

Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный научный центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики

на правах рукописи

Орловский Всеволод Дмитриевич

Сильные взаимодействия и поиски Новой Физики:
непертурбативная феноменология

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2011

УДК 539.12

Работа выполнена в ГНЦ РФ “Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” им. А. И. Алиханова.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. В. И. Шевченко
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., проф. Э.Э. Боос
(НИИЯФ МГУ, г. Москва)

д.ф.-м.н., проф. Б.О. Кербиков
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Ведущая организация: ГНЦ РФ ИФВЭ, г. Протвино

Защита состоится 5 апреля 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан 1 марта 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

В. В. Васильев

1. Общая характеристика работы

1.1. Актуальность темы

Современная физика знакома с четырьмя видами взаимодействий: гравитационным, электромагнитным, слабым и сильным. Безусловно, мечтой любого физика-теоретика является всеобъемлющая теория, которая объединила бы все известные взаимодействия на единой основе и общих принципах. Однако на сегодняшний день гравитация стоит немного особняком, хотя и является областью наиболее смелых и красивых идей, в то время как тройка оставшихся взаимодействий объединена общепринятой теорией, называемой Стандартной Моделью (СМ) физики элементарных частиц. Стандартная Модель взаимодействий оказалась необычайно успешной: за несколько десятков лет ее развития и утверждения были проведены сотни экспериментов, в основном при помощи ускорителей частиц, которые подтвердили правильность ее предсказаний с феноменальной точностью – от 10^{-10} в электромагнитном секторе до долей процента в случае сильных взаимодействий. Стандартная Модель будет проверяться и в дальнейшем на Большом Адронном Коллайдере, впрочем, больше не с целью проверки согласованности теоретических предсказаний и экспериментальных измерений, а, скорее, наоборот – через поиск новых явлений, так называемой Новой Физики – физики, лежащей за рамками описаний Стандартной Модели. Многие факты говорят нам о том, что Стандартная Модель не есть окончательная теория, но является низкоэнергетическим пределом некоторой общей теории, учитывающей гравитационное взаимодействие, включающей дополнительные механизмы нарушения симметрий, возможно, какие-то новые частицы или даже предполагающей отход от парадигмы квантовомеханической теории локальных полей. Основные надежды при этом с точки зрения экспериментального обнаружения каких-либо новых эффектов связаны с электрослабым сектором Стандартной Модели – той ее частью, которая описывает слабые и электромагнитные взаимодействия, наиболее тесно сплетенные в этой теории, а также, по некоторым предположениям, возможно удастся зарегистрировать какие-то феномены, имеющие в своей основе гравитационные взаимодействия. В то же время, по всеобщему убеждению, физика сильных взаимодействий с исчерпывающей полнотой описывается уже существующей теорией Квантовой Хромодинamikой

(КХД) – неабелевой теорией поля на основе калибровочной группы $SU(3)$ цветовой симметрии. Фундаментальными составляющими этой теории являются кварки – фермионные поля спина $1/2$, обладающие дробным зарядом, и глюоны – неабелевы калибровочные поля спина 1 , взаимодействующие с кварками и между собой. Сильные взаимодействия занимают особое место в Стандартной Модели и КХД может изучаться отдельно от остальных секторов СМ. С другой стороны, эффекты взаимодействия кварков и глюонов играют первостепенную роль на такой адронной машине, как ЛНС, и должны быть учтены с необходимой полнотой, если мы хотим правильно понять физику, стоящую за процессами, наблюдаемыми на ускорителе. Нет необходимости говорить о том, что сильные взаимодействия ответственны за формирование ядер, взаимодействие нуклонов между собой и, в конечном счете, образование самих нуклонов (и других элементарных частиц), которые составляют основную компоненту нашей видимой Вселенной, так что роль сильных взаимодействий трудно переоценить.

Данная работа преследует двоякую цель: во-первых, это развитие феноменологии сильных взаимодействий. С использованием методов ренормгруппового анализа было установлено, что КХД является асимптотически свободной теорией: при больших переданных импульсах константа связи мала и применима теория возмущений с соответствующими рассматриваемой теории Фейнмановскими правилами. Теоретические предсказания на этих масштабах были успешно проверены в экспериментах, в частности, по глубоко неупругому рассеянию электрона на протоне – наиболее эффективному средству проверки партонной модели КХД и пертурбативных вычислений. Однако при переходе к режиму малых энергий (или больших расстояний) мы наблюдаем ситуацию, отличную от случая квантовой электродинамики (КЭД). Константа связи растет, теория возмущений оказывается неприменимой, и мы входим в область, где главную роль играют непертурбативные эффекты, для которых на данный момент не существует исчерпывающего количественного описания. Наблюдаемые частицы не являются, в отличие от КЭД, элементарными квантами теории, которые соответствуют полям, входящим в фундаментальный лагранжиан, а представляют собой связанные бесцветные состояния кварков и глюонов, удерживаемых в одном адроне явлением конфайнмента. Экспериментальные данные говорят о том, что кварк и антикварк, составляющие мезон, притягиваются друг к другу на больших расстояниях с силой порядка 14 тонн.

Выяснилось, что само явление связано с образованием струны между цветными зарядами, которая ответственна за постоянную силу на больших расстояниях (или линейный рост потенциала, что следует из решеточных расчетов). Таким образом, развитие феноменологии КХД в ее непертурбативной области, корреляторов непертурбативных полей, адронных токов и вообще исследование структуры вакуума КХД, ответственной за эти непертурбативные явления, представляет собой задачу первостепенной важности. В этой связи первая часть настоящего исследования касается такого непертурбативного метода как правила сумм и техника частичных суммирований рядов операторного разложения. Рассматривается полезное техническое средство – представление амплитуд в виде первичноквантованного интеграла по траекториям частиц, так называемое представление Фейнмана-Фока-Швингера, или worldline-формализм, в применении к вычислению петлевых процессов, в которых принимают участие частицы с разными массами. Это может иметь непосредственное применение к расчету адронных вкладов, например, в форм-факторы и амплитуды распадов B -мезонов. Очень давно пришло понимание того, что за нетривиальные непертурбативные эффекты сильных взаимодействий ответственна сложная структура вакуума КХД. В методе правил сумм появляется понятие глюонного конденсата – непертурбативного среднего от глюонных полей по вакуумному состоянию. В логическом развитии этого подхода – методе полевых корреляторов, рассматриваются уже нелокальные величины – корреляционные функции от вакуумных полей, характеристикой нелокальности которых служит корреляционная длина, определяющая их пространственно-временную зависимость. Вычислению этой величины в удобной модели посвящен один из разделов первой части диссертации.

Вторая цель работы также была обозначена немного выше – это поиск Новой Физики. Под понятием “Новая Физика” мы подразумеваем не только какие-либо экзотические эффекты, находящиеся за рамками описания Стандартной Модели, но и явления, уже присутствующие в ней, но экспериментально еще не до конца изученные или не имеющие адекватного и ясного теоретического объяснения, например, из-за упомянутой недоработанности феноменологии непертурбативных аспектов сильных взаимодействий. В частности, мы исследуем возможные проявления физики, не представленной в Стандартной Модели в процессах с участием B -мезонов, которые будут наблюдаться и исследоваться в рамках программы эксперимента LHCb. Также рассматривается более

экзотический сюжет (но тем не менее имеющий тесную связь с феноменологией и экспериментом), развивающийся не из электрослабого сектора, а из популярной в настоящее время темы, связанной с предположением о перестройке структуры и свойств пространства-времени на некотором масштабе. С другой стороны, если говорить о явлениях, уже заложенных в Стандартной Модели, но еще недостаточно изученных, то хорошим примером в этой области является киральный магнитный эффект, которому посвящен раздел второй части данной работы. Это явление в последнее время привлекает к себе все более пристальное внимание, в частности, в связи с возможностью экспериментального его наблюдения в экспериментах по столкновению тяжелых ионов.

1.2. Задачи диссертационного исследования

Диссертационное исследование нацелено на решение следующих задач.

1. Сравнение метода правил сумм и квазиклассического подхода на примере квантовомеханических задач о вычислении положений энергетических уровней в заданном потенциале с применением пересуммирования спектральной суммы и техники частичного суммирования рядов квантовомеханического операторного разложения.

2. Сравнение вычислений корреляторов адронных токов – поляризационных операторов, вычисленных в модели с эквидистантным спектром с экспериментальными данными коллаборации ALERH по адронному распаду τ -лептона.

3. Применение техники частичных суммирований рядов операторного разложения с использованием представления Фейнмана-Фока-Швингера для корреляционных функций в виде интеграла по собственному времени.

4. Развитие техники вычисления функций Грина, амплитуд перехода и эффективных действий в worldline-подходе для петлевых процессов с участием фермионов разных масс.

5. Исследование вакуума калибровочных теорий и вычисление в связи с этим корреляционной длины вакуумных полей в HP^1 σ -модели.

6. Вычисление параметра поляризации фотона в трехчастичном радиационном распаде $B \rightarrow \varphi K \gamma$ на основе измерения углового распределения продуктов распада.

7. Развитие феноменологии в сценарии с существованием дополнительных нецелочисленных пространственных измерений в контексте поиска возможных ограничений на параметры модели из экспериментальных данных по измерению бегущей константы связи КЭД.

8. Разработка теории, способной прояснить понимание явлений, связанных с киральным магнитным эффектом, на основе вычислений поляризационных операторов во внешнем магнитном поле при конечной температуре.

1.3. Научная новизна и результаты диссертационного исследования

Следующие новые научные результаты выносятся на защиту.

1. Проведено сопоставление феноменологических расчетов поляризационных операторов в координатном представлении в модели с эквидистантным спектром и найдено хорошее согласие с экспериментальными данными коллаборации ALEPH по адронному τ -распаду.

2. Вычислено дифференциальное сечение радиационного распада $B \rightarrow \varphi K \gamma$, фитированием которого будущими экспериментальными данными эксперимента LHCb по соответствующему каналу возможно извлечение параметра поляризации фотона, с хорошей точностью равного -1 в Стандартной Модели, но допускающего существенные отклонения от этого значения в ее расширениях.

3. Явно вычислены корреляторы калибровочных полей в HP^1 σ -модели, являющейся своего рода проекцией калибровочной теории $SU(2)$. Корреляционные длины, извлеченные из экспоненциальных фитов для этих корреляторов $\lambda_1^{-1} = 1.40(3)$ ГэВ и $\lambda^{-1} = 1.51(3)$ ГэВ, находятся в хорошем согласии с другими известными вычислениями.

4. Получен явный вид асимметрии зарядовых флуктуаций в терминах компоненты поляризационного оператора для свободных фермионов, находящихся в постоянном магнитном поле при конечной температуре.

Все представленные к защите результаты являются оригинальными и новыми разработками на момент опубликования.

1.4. Апробация результатов и публикации

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” в 2009 году, на VI Курчатовской молодежной научной школе в 2008 году, на Второй летней научной школе фонда Династия в 2005 году, на Международных школах “European School of High-Energy Physics 2007” (Тржешт, Чехия), “Trans-European School of High Energy Physics 2008” (Буймеровка, Украина), “9th International Moscow School of Physics 2006” (Звенигород, Россия), а также на теоретических семинарах ИТЭФ. По теме диссертационного исследования имеется 6 публикаций, 5 из которых входят в перечень ВАК.

1.5. Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей два раздела по три главы в каждом, и заключения, а также двух приложений. В диссертации 128 страниц, включая 19 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 159 ссылок.

2. Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, приведены общие характеристики диссертации, дан краткий обзор диссертационной работы.

Основная часть работы содержит два смысловых раздела. **Первый раздел** посвящен развитию непертурбативной феноменологии и состоит из трех глав. **Первая глава** носит вводный характер и посвящена операторному разложению и правилам сумм в квантовой механике. Основным объектом изучения и средством решения спектральных задач здесь является функция Грина уравнения Шредингера. Когда мы говорим об операторном разложении в квантовой механике, то, на самом деле, имеем в виду разложение функции Грина в ряд теории возмущений по оператору взаимодействия $V(x)$. Так же как и в случае правил сумм КХД у нас есть два альтернативных представления для фундаментального объекта нашего изучения – разложение функции Грина в ряд по потенциалу и, с другой стороны, спектральное представление, выражающее функцию Грина через нормированные волновые функции состояний квантовомеханической системы и их энергетические уровни. Заменяя вклад возбужденных состояний эффективным вкладом континуума, мы можем найти энергию основного состояния в терминах характеристик потенциала $V(x)$. Мы приводим результаты для энергии основного состояния в случае потенциала осциллятора и для так называемых квази-точно решаемых потенциалов – потенциалов, для которых можно точно найти несколько первых энергетических уровней. Получающаяся при этом точность зависит от характеристик потенциала, но в общем случае составляет несколько процентов. Однако результаты можно улучшить (и в количественном отношении, и в смысле устойчивости процедуры извлечения основного состояния), если использовать в качестве операторного разложения выражение, в котором проведено частичное

суммирование входящих в его состав подрядов. Например, оказывается возможным точно учесть все вклады, содержащие зависимость от первой и второй производной потенциала по координате. Это связано с тем, что задача о гармоническом осцилляторе может быть решена точно. С помощью техники таких частичных суммирований также оказывается возможным выписать операторное разложение для степенных потенциалов вида $V(x) = ax^N$, $N \geq 4$. Все технические детали, связанные с описываемым методом суммирований, собраны в **Приложении А**. Другой метод, связанный со сравнением разложений функции Грина, основан на квазиклассическом подходе, когда применением формулы суммирования Эйлера-Маклорена удается точно учесть вклад всей верхушки башни энергетических уровней. В этом случае мы получаем рецепт получения квазиклассической асимптотики и систематического вычисления поправок к ней. Как ожидалось, надежные результаты получаются только для возбужденных уровней, тем не менее, например, для степенного потенциала ax^4 метод работает с хорошей точностью уже для первого возбужденного уровня при учете всего одной поправки к лидирующему квазиклассическому поведению.

Во **второй главе** рассматриваются уже задачи физики высоких энергий. Здесь базовый объект – это корреляторы адронных токов, которые несут в себе фундаментальную информацию как о свойствах непертурбативного вакуума через операторное разложение, так и о спектральных характеристиках адронов через функции спектральной плотности и дисперсионное соотношение. В целях вычисления корреляторов мы рассматриваем феноменологическую модель [1], в которой спектр представлен бесконечным набором уровней нулевой ширины, что отвечает пределу большого числа цветов. Сам спектр – ряд эквидистантных уровней и набор соответствующих вычетов можно вычислить квазиклассически, исходя из гамильтониана двух массивных кварков. Нашей целью является сравнение полученных в такой модели корреляционных функций в координатном пространстве с экспериментальными данными коллаборации ALERH по адронному τ -распаду для спектральных функций в аксиальном и векторном каналах. Ясно, что описанная картина далека от реальной действительности – на практике мы имеем более богатую картину адронного спектра с ненулевыми ширинами. Но оказывается, что если мы имеем дело не с функцией спектральной плотности, а с некоторыми ее моментами, например, корреляционными функциями в координатном пространстве, то эти детали, сублидирующие эффекты в разложении

по количеству цветов, оказываются несущественными, определяющими являются всего лишь несколько глобальных характеристик спектра – асимптотики поведения высоковозбужденных уровней (наклон траекторий Редже) и правильное положение нижних резонансов. И действительно, как показывают наши расчеты, вычисленные корреляторы замечательным образом согласуются с экспериментальными данными, при том, что фактически все параметры модели (постоянные распада и натяжения струны, массы мезонов) фиксированы своими физическими значениями. Далее делается краткое введение в метод правил сумм КХД [2, 3], основанный на сопоставлении операторного разложения для корреляторов адронных токов с представлением через спектральные функции. С одной стороны у нас есть разложение по локальным конденсатам – непертурбативным средним от вакуумных глюонных полей, с другой – спектральное представление, несущее информацию о характеристиках нижних резонансов. Сравнение этих двух представлений позволяет вычислить массы и постоянные распада в терминах непертурбативных характеристик вакуумных полей. Из результатов первой главы мы видели, что частичное суммирование подрядов операторного разложения способно значительно улучшить результаты вычислений. Поэтому мы разрабатываем методику частичных суммирований и в случае кварковых функций Грина, через которые выражаются однопетлевые адронные корреляторы. При этом эффективным и удобным техническим средством для подобных вычислений оказывается так называемый worldline-формализм, или представление Фейнмана-Фока-Швингера для функции Грина в виде интеграла по собственному времени [4] (см. также обзор [5]). Получающийся ответ для кварковой функции Грина оказывается довольно громоздким, однако, интересна принципиальная возможность учесть точно все квадратичные по глюонному полю вклады вида $D^k G^2$. В пределе постоянных полей полученный результат находится в согласии с выражением для однопетлевого эффективного действия, соответствующего лагранжиану Гейзенберга-Эйлера [6].

В подходе правил сумм влияние непертурбативного вакуума КХД на наблюдаемые обусловлено наличием в некотором смысле внешних глюонных полей, количественно результирующих в матричные элементы от локальных операторов – глюонный конденсат и другие непертурбативные средние высших порядков. Изучение динамики этих полей, корреляционных функций и пространственно-временной зависимости является поэтому важной задачей при изучении влияния структуры вакуума на

физические величины и наблюдаемые явления. Этому посвящена **третья глава**. В методе полевых корреляторов [7–9] (см. также обзор [10]), являющемся логическим продолжением метода правил сумм, базовыми объектами являются уже нелокальные корреляторы глюонных полей, учитывающие не только амплитуду этих полей, но и их пространственно-временную динамику, проявляющуюся в наличии корреляционной длины. Оказывается, что описать большинство непертурбативных явлений можно при помощи всего лишь простейшего двухточечного коррелятора, тогда как корреляционные функции более высоких порядков могут рассматриваться как малые поправки. Вычислению бислокального коррелятора вакуумных полей в калибровочных теориях были посвящены многие решеточные работы. Общая трудность всех вычислений – наличие вкладов теории возмущений, расходящихся на малых расстояниях, так что интересующий нас непертурбативный вклад на их фоне практически незаметен. Существуют технические методы, позволяющие избавиться от пертурбативных вкладов на малых расстояниях, но в данной работе мы придерживаемся альтернативного подхода, а именно – рассматриваем вместо исходных полевых конфигураций другие, близкие им в некотором смысле. Так, для калибровочной SU(2) теории такими близкими конфигурациями оказываются поля кватернионной проективной σ -модели. Ранее было показано [11, 12], что эта модель оставляет в неприкосновенности непертурбативный состав теории, но при этом эффективно обрезает вклады теории возмущений. Таким образом, вычисление непертурбативных корреляторов выглядит очень естественно в этом подходе, и в данном исследовании проводится впервые. Получающиеся результаты для корреляционных функций хорошо фитируются экспоненциальной зависимостью, а корреляционные длины, извлеченные из полученных данных $\lambda_1^{-1} = 1.40(3)$ ГэВ и $\lambda^{-1} = 1.51(3)$ ГэВ, находятся в хорошем согласии с другими известными вычислениями. Также мы изучаем, как результаты для бислокальных корреляторов зависят от формы кривой, соединяющей точки между собой.

Второй раздел посвящен развитию феноменологии некоторых новых явлений в физике высоких энергий и состоит из трех глав. **Первая глава** имеет дело с описанием угловых распределений продуктов распада в трехчастичном радиационном распаде $B \rightarrow \varphi K \gamma$ с целью извлечения информации о параметре поляризации фотона $\lambda_\gamma = \frac{|c_R|^2 - |c_L|^2}{|c_R|^2 + |c_L|^2}$, где $c_{L,R}$ – амплитуды распада, отвечающие испусканию лево(право)поляризованного фотона. Дело в том, что в Стандартной Модели фотоны, испускаемые в

распадах B^- -мезонов, являются преимущественно левополяризованными (или правополяризованными для B^+ -мезонов) [13], т.е. примесь фотонов с противоположной поляризацией с учетом всех эффектов составляет 3-5%. С другой стороны, в некоторых расширениях Стандартной Модели, таких как Минимальная Суперсимметричная Стандартная Модель, лево-правые симметричные модели, модели с дополнительными измерениями и т.д., примесь фотонов “неправильной” поляризации может достигать 100%. Таким образом, изучение поляризационной картины для данной моды распада может дать очень определенные и чистые указания на существование Новой Физики. Кроме того, что данная наблюдаемая избавлена от влияния адронных неопределенностей, сама мода распада обладает рядом привлекательных черт – конечное состояние содержит только фотон и заряженные частицы, а узость φ -резонанса сводит к минимуму эффекты интерференции с другими резонансами. Мы выводим дифференциальную ширину распада $B^- \rightarrow K^+ K^- K^- \gamma$, в предположении, что доминирующий вклад вносят состояния системы $[\varphi K]$ с квантовыми числами $J = 1^+$ (в s - и d -волне) и $J = 1^-$ (p -волна). Полученный результат зависит от четырех адронных параметров и параметра поляризации λ_γ , который может быть найден путем фитирования полученной формулы для ширины распада экспериментальными данными. Впрочем, при этом должно выполняться условие интерференции между различными парциальными волнами в векторной системе $[\varphi K]$.

Вторая глава посвящена рассмотрению более экзотической модели введения Новой Физики, а именно развитию феноменологии сценария с дополнительными дробными пространственно-временными измерениями. В рассматриваемой модели [14] Новая Физика вводится как изменение поведения меры интегрирования на больших импульсах в петлевых интегралах, описывающих процессы Стандартной Модели. Ниже некоторого масштаба мы имеем обычную четырехмерную динамику, тогда как при энергиях, больших некоторого масштаба L^{-1} , поведение становится эффективно d -мерным. Основным вопросом, который возникает в связи с этим – это какая размерность пространства-времени соответствует заданной энергетической шкале, в частности, масштабу энергий, соответствующему электрослабой физике. Для таких энергий естественным пробником являются электрослабые петлевые процессы. Ранее были вычислены ограничения на пространство параметров модели, следующие из данных по смешиванию нейтральных B -мезонов и аномального магнитного момента мюона [14]. Мы рассматриваем ограничения, которые можно

получить из экспериментальных данных LEP по бегущей константе связи КЭД на пике Z -бозона. Мы вычисляем поляризационный оператор, который определяет бег константы связи, в терминах двух параметров модели – масштаба появления Новой Физики L и эффективной размерности теории d в ультрафиолетовом пределе. Предполагая, что Новая Физика входит через вклад от лептонов, но не воздействует на адронную часть, мы получаем ограничения на допустимые значения L и d , пользуясь экспериментальным значением константы связи на массе Z -бозона. Видно, что как эти данные, так и данные по смешиванию нейтральных мезонов и аномальному магнитному моменту мюона, допускают значительные отклонения размерности от своего обычного значения $d = 4$ даже при достаточно низких масштабах $L^{-1} \simeq 100 - 200$ ГэВ.

В **третьей главе** рассматривается явление так называемого Кирального Магнитного Эффекта (КМЭ). Сам эффект проявляется в возникновении электрического тока в направлении внешнего магнитного поля, приложенного к кирально-несимметричной среде. Причина его лежит во взаимодействии магнитного момента кварка с магнитным полем и в корреляции спина и импульса киральных фермионов. Все это вместе с нетривиальной структурой КХД вакуума приводит к пространственному разделению электрического заряда. КМЭ часто рассматривается как разумное объяснение асимметрии заряда вылетающих частиц, наблюдаемой на Релятивистском ускорителе тяжелых ионов (RHIC) при столкновениях Au+Au и Cu+Cu с $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. При этом корреляция между полярным (электрический ток) и аксиальным (угловой момент, магнитное поле) векторами трактуется иногда как нарушение P -четности в данном событии. Несмотря на относительную ясность теоретической картины описываемого явления, применение ее к реальным физическим процессам является нетривиальной задачей. В этой работе мы обсуждаем три основных взаимодополняющих способа обсуждения квантовой природы КМЭ. Первый рассматривает понятие нарушения P -четности в терминах локальных параметров порядка – средних от локальных операторов или их произведений, взятых в одной точке. Здесь важно подчеркнуть роль среды: через нарушение Лоренц-инвариантности, существование выделенной системы отсчета, она обеспечивает инвариантное описание электрического и магнитного полей и делает, таким образом, возможной корреляцию между локальными операторами разной четности, как, например, $\langle \phi | J_\mu \partial J^5 | \phi \rangle \propto u^\nu \tilde{F}_{\mu\nu}$. Вторым подходом рассматривается КМЭ в рамках теории квантовых измерений. Здесь предполагается, что кварк-

глюонная среда, созданная в процессе столкновения ионов, играет роль измеряющего прибора, выполняя эффективные измерения топологического заряда (и, соответственно, величин, связанных с киральным зарядом) в соответствующей области пространства-времени. Пользуясь формализмом функций распределения, можно получить выражение для тока $J_\mu(x, \eta)$ при условии, что величина дивергенции кирального тока “измерена” средой в состоянии $|\Omega_\eta\rangle$ и с некоторой точностью равна η . При этом хорошо видно, что обсуждаемый эффект является результатом тонкого взаимодействия сильной и электромагнитной аномалии. В то время как последняя отвечает за корреляцию между векторным и аксиальным токами, первая обеспечивает несохранение аксиального заряда из-за топологических непертурбативных глюонных флуктуаций. В рамках третьего подхода изучаются вклады типа “ P -нечетный \times P -нечетный” в P -четные наблюдаемые или, другими словами, рассматриваются матричные элементы от токов между состояниями с противоположной четностью, что соответствует вкладу в поляризационный оператор определенных состояний из спектрального разложения. В отличие от других работ на эту тему мы рассматриваем не пространственные компоненты токов, а флуктуацию плотности заряда в статическом пределе, выраженную через 44-компоненту поляризационного оператора, выделяя при этом некоторый форм-фактор, соответствующий состояниям отрицательной четности. Сам поляризационный оператор может быть разложен по независимым тензорным структурам, среди которых можно выделить чисто квантовую часть, имеющую ненулевой предел при $B, T = 0$, структуру, описывающую тепловые флуктуации, а также часть, отвечающую за флуктуации заряда, вызванные внешним полем. Именно последняя соответствует вкладу P -нечетных промежуточных состояний в поляризационный оператор. Мы также рассматриваем несколько модельных примеров, в которых можно построить явные выражения для интересующих нас величин. В частности, описан случай свободных фермионов, для которого существует явное выражение для поляризационного оператора во внешнем поле при конечной температуре. Для удобства соответствующие формулы вынесены в **Приложение Б**.

В **заключении** подведены итоги работы и еще раз кратко сформулированы основные результаты.

Публикации автора по теме диссертации

1. V. D. Orlovsky, "Correlators of hadron currents: The model and the ALEPH data on tau decay," Phys. Lett. B **634**, 408 (2006), [arXiv:hep-ph/0510192].
2. V. D. Orlovsky and V. I. Shevchenko, "On the photon polarization in radiative $B \rightarrow \varphi K \gamma$ decay," Phys. Rev. D **77**, 093003 (2008), [arXiv:0708.4302 [hep-ph]].
3. V. D. Orlovsky and V. I. Shevchenko, "Nonlocal field correlators on the lattice in HP^1 σ -model," JETP Lett. **90**, 85 (2009), [arXiv:0906.1340 [hep-lat]].
4. V. Orlovsky, "Operator expansion in quantum mechanics," Surveys High Energ. Phys. **19**, 203 (2004).
5. В. Д. Орловский, В. И. Шевченко, "Нелокальные полевые корреляторы на решетке в HP^1 σ -модели," Ядерная Физика **73**, 2023 (2010), [Phys. Atom. Nucl. **77**, 1970 (2010)].
6. V. D. Orlovsky and V. I. Shevchenko, "Towards a quantum theory of chiral magnetic effect," Phys. Rev. D **82**, 094032 (2010), arXiv:1008.4977 [hep-ph].

Список литературы

- [1] V. I. Shevchenko and Yu. A. Simonov, "Current correlators in QCD: OPE versus large distance dynamics," Phys. Rev. D **70**, 074012 (2004) [arXiv:hep-ph/0406276].
- [2] M. A. Shifman, A. I. Vainshtein and V. I. Zakharov, "QCD And Resonance Physics: Applications," Nucl. Phys. B **147**, 448 (1979).
- [3] M. A. Shifman, A. I. Vainshtein and V. I. Zakharov, "QCD And Resonance Physics. Sum Rules," Nucl. Phys. B **147**, 385 (1979).
- [4] J. S. Schwinger, "On gauge invariance and vacuum polarization," Phys. Rev. **82**, 664 (1951).
- [5] Yu. A. Simonov and J. A. Tjon, "The Feynman-Schwinger representation in QCD," Annals Phys. **300**, 54 (2002) [arXiv:hep-ph/0205165].
- [6] W. Heisenberg and H. Euler, "Consequences of Dirac's theory of positrons," Z. Phys. **98** (1936) 714 [arXiv:physics/0605038].
- [7] H. G. Dosch and Yu. A. Simonov, "The Area Law of the Wilson Loop and Vacuum Field Correlators", Phys. Lett. **B205**, 339 (1988).
- [8] H. G. Dosch, "Gluon Condensate and Effective Linear Potential", Phys. Lett. **B190**, 177 (1987).

- [9] Yu. A. Simonov, "Vacuum Background Fields in QCD as a Source of Confinement", Nucl. Phys. **B307**, 512 (1988).
- [10] A. Di Giacomo, H. G. Dosch, V. I. Shevchenko and Yu. A. Simonov, "Field correlators in QCD: Theory and applications," Phys. Rept. **372**, 319 (2002) [arXiv:hep-ph/0007223].
- [11] F.V. Gubarev, S.M. Morozov, "Lattice gauge fields topology uncovered by quaternionic sigma-model embedding", Phys. Rev. **D72**, 076008 (2005), hep-lat/0509011.
- [12] P. Yu. Boyko, F.V. Gubarev, S.M. Morozov, "SU(2) gluodynamics and HP1 sigma-model embedding: Scaling, topology and confinement", Phys. Rev. **D73**, 014512 (2006), hep-lat/0511050.
- [13] D. Atwood, M. Gronau and A. Soni, "Mixing-induced CP asymmetries in radiative B decays in and beyond the standard model," Phys. Rev. Lett. **79**, 185 (1997) [arXiv:hep-ph/9704272].
- [14] V. I. Shevchenko, "Phenomenology of scale-dependent space-time dimension", arXiv:0903.0565 [hep-ph].