

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **РАДЖАБОВА АНДРЕЯ ЕВГЕНЬЕВИЧА** «АДРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ, ГОРЯЧЕЙ И ПЛОТНОЙ СРЕДЕ, ПОПРАВКИ К АНОМАЛЬНОМУ МАГНИТНОМУ МОМЕНТУ МЮОНА В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КХД», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Квантовая хромодинамика (КХД) как теория сильных взаимодействий является составной частью стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. Базовыми объектами являются взаимодействующие кварки и глюоны. При использовании теоретико-полевого метода теории возмущений в рамках КХД достигнут существенный прогресс в описании процессов в области высоких энергий и больших передач импульсов. Константа связи КХД, α_s , в этой кинематической области мала, поэтому применение теории возмущений оправдано. Но при относительно низких энергиях, меньших чем энергия покоя J/ψ -мезона, α_s не мала, поэтому методы теории возмущений не работают. Приходится проводить либо прямое численное моделирование КХД в решёточном подходе, которое при учёте динамических кварков сильно ограничено вычислительными ресурсами, либо конструировать модели, использующие метод эффективных лагранжианов. Базовыми степенями в этом случае являются наблюдаемые на опыте мезоны и барионы.

Однако имеются модели, занимающие промежуточное положение между чистой КХД и методом эффективных лагранжианов. Наиболее популярной в этом классе является модель Намбу и Иона-Лазинио (НИЛ), в которой в качестве базовых степеней свободы наряду с мезонными состояниями фигурируют и кварки. Поскольку число свободных параметров модели НИЛ невелико, возникает возможность вычисления парциальных ширины многочисленных мод распада известных скалярных, псевдоскалярных, векторных и аксиальных мезонов. Более того, введение, наряду с мезонами, кварковых степеней свободы позволяет надеяться на описание процессов фазового перехода конфайнмент-деконфайнмент при ненулевых температуре и плотности. Включение в описание аналога параметра порядка, указывающего на такой переход (т.н. петля Полякова), даёт способ вычисления фазовых диаграмм. Данная проблема и возможности её решения интенсивно исследуются в связи с прогрессом по развитию и созданию установок для экспериментального исследования процессов столкновения тяжёлых ионов. Далее, поиск процессов, для анализа и описания которых требуется выход за рамки стандартной модели, является одной из основных задач современной

физики элементарных частиц. К ним относится измерение аномального магнитного момента мюона. Результаты последних измерений указывают на возможное отклонение от предсказаний стандартной модели, поэтому необходим теоретический анализ всех возможных вкладов в эту характеристику мюона.

Диссертационная работа А.Е. Раджабова посвящена теоретическому анализу и решению указанных выше проблем, касающихся адронных процессов в вакууме, горячей и плотной материи и вычислению поправок к аномальному магнитному моменту мюона в рамках конкретной модели КХД. Поскольку указанные проблемы находятся в повестке дня экспериментальной и теоретической физики высоких энергий, то **актуальность темы** диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения и шести приложений. Список литературы содержит 340 наименований, объём текста 237 страниц. Во введении дан краткий обзор проблем, которые предлагаются для решения, описано современное состояние исследований по этим проблемам и приводится краткое изложение материала диссертации. Здесь излагаются положения, выносимые на защиту.

Каждая из трёх глав представляет собой отдельное большое исследование. В **главе 1** проводится разработка нелокальной кварковой модели. В рамках этой модели рассмотрен ряд процессов в вакууме, относящихся к конкретным распадам лёгких элементарных частиц со спином ноль и единица. Модель основана на обобщении популярной модели Намбу и Иона-Лазинио. Важным элементом явилось предложенное автором включение нелокальных эффектов, возникающих за счёт нетривиальной непертурбативной структуры вакуума КХД. Это позволило обеспечить сходимость петлевых интегралов и обойти проблему конфайнмента кварков, которая имела место в простой локальной модели НИЛ. Используя нелокальную модель Намбу и Иона-Лазинио, диссертант проанализировал рассеяние пионов, вычислив амплитуды и длины рассеяния. Он оценил роль поправок в разложении по обратному числу цветов. В этой же главе вычислены ширины редких распадов $\eta \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$, $\rho(\omega) \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ и $\rho(\omega) \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$. Рассчитан форм-фактор Паули кварка.

Глава 2 посвящена исследованию эффектов в среде с ненулевой температурой и плотностью. Учёт эффектов перехода конфайнмент-деконфайнмент проведён путём введения эффективного потенциала, зависящего от параметра порядка - петли Полякова. Найденные автором термодинамические потенциалы позволили ему рассмотреть мезонные корреляции в модели с петлёй Полякова и в схеме строго разложения по

обратному числу цветов. Интересным следствием присутствия среды явилась возможность появления аномальных мод распада лёгких мезонов, которые в вакууме запрещены сохранением зарядовой чётности. Другим эффектом среды явилось указанное автором неравенство отношений выходов каонов к пионам с противоположными знаками заряда, которое наблюдалось в экспериментах по столкновениям тяжёлых ионов.

В **главе 3** диссертации решается задача расчёта поправок к аномальному магнитному моменту мюона. В рамках нелокальной модели НИЛ вычислены вклады за счёт адронной поляризации вакуума и рассеяния света на свете. В последнем случае подробно рассмотрен вклад псевдоскалярного мезона. В той же главе проведено теоретическое изучение переходного формфактора $F_{P^*\gamma^*\gamma^*}$ с произвольными виртуальностями псевдоскалярного мезона и обоих фотонов. Такие форм-факторы являются предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований и в более общем контексте, не связанном с расчётами поправок к аномальному магнитному моменту мюона. В **Заключении** дан перечень основных результатов, полученных в диссертации. В **шести приложениях** приведены детали сложных вычислений, необходимых при работе с амплитудами в нелокальной модели Намбу и Иона-Лазинио.

Научная новизна диссертации несомненна, поскольку в рамках нелокальной модели Намбу и Иона-Лазинио впервые проведены расчёты таких важных для физики элементарных частиц характеристик как ширины редких распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. Вычислен форм-фактор Паули кварка. Рассмотрено влияние среды с ненулевой температурой и плотностью на поведение мезонов, что позволило предсказать и рассчитать вероятности распадов, строго запрещённых в вакууме сохранением зарядовой чётности.

Научная ценность диссертации обусловлена тем, что автор существенно развил популярную модель Намбу и Иона-Лазинио, включив в рассмотрение эффекты нелокальности. Это потребовало разработки адекватного аппарата вычислений для анализа эффектов, важных и интересных для теоретической физики элементарных частиц.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что диссертант вычислил вероятности редких распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. Экспериментальное исследование таких распадов стоит в повестке дня новых и модернизируемых электрон-позитронных накопителей ВЭПП-2000 в Новосибирске, BEPC в Пекине и детекторов СНД, КМД-3 (Новосибирск) и BESIII (Пекин). Обнаруженное им неравенство относительного выхода каонов к пионам разных знаков заряда, вызванное наличием среды, представляет интерес при анализе экспериментов по столкновению тяжёлых ионов на LHC (CERN) и других установках по исследованию столкновений тяжёлых ионов. Расчёты поправок к аномальному магнитному моменту мюона несомненно окажутся

полезными при теоретическом анализе новых экспериментальных данных по этой величине, которые в настоящее время набираются на мюонном кольце в лаборатории им. Ферми в США.

Обоснованность научных положений диссертации не вызывает сомнений, поскольку её материалы основаны на использовании теоретико-полевых методов теоретической физики, многократно проверенных при решении задач в других областях. Научная обоснованность методов квантовой теории поля доказана признанными результатами в физике элементарных частиц. Учёт эффектов среды с ненулевой температурой и плотностью доказал свою надёжность и эффективность в физике конденсированного состояния.

Достоверность результатов диссертации подтверждается тем, что на каждом этапе их получения проводилось сравнение с аналогичными результатами, полученными другими методами. Предельные случаи разработанной диссертантом нелокальной модели согласуются с результатами более простых моделей. Проведена проверка чувствительности результатов нелокальной модели к разным способам учёта эффектов нелокальности. Там, где это возможно, проведено сравнение с результатами решёточных вычислений.

Работа хорошо оформлена, результаты проведённых расчётов и аналитические выражения проиллюстрированы многочисленными графиками. Каждая глава завершается кратким резюме полученных в ней результатов. Список цитированной литературы позволяет понять важность рассматриваемых проблем и оценить вклад диссертанта в их решение. Изучение автореферата диссертации показало, что он правильно отражает основные её положения.

Вместе с тем имеются несколько замечаний, которые касаются деталей представления материала. В самом тексте встречаются случаи рассогласования окончаний слов. В отсылках к различным частям текста диссертации фигурирует указание на главы, хотя речь идёт о разделах внутри глав. В неравенстве на стр. 33 опущена правая часть. В выражении для эффективного действия (1.9) опущен вклад кинетических членов бозонных полей, хотя в оригинальной публикации диссертанта в УФН такой вклад содержится. Ответы для длин рассеяния на стр. 49 имеют неправильную размерность. Приводимые на стр. 65, 4-я и 5-я строка снизу, значения ширин столь малы, что требуют комментария, если только это не опечатка. На стр. 115 стоило бы прокомментировать утверждение о неравенстве в среде масс каонов разных знаков заряда, поскольку их равенство в вакууме есть следствие СРТ. При обсуждении аномальных распадов в среде, идущих с нарушением зарядовой чётности, было бы полезно представить их ширины в таком виде, чтобы сделать очевидным их стремление к нулю в вакууме. Разумеется, эти замечания не умаляют научную ценность самой работы.

Таким образом, учитывая актуальность избранной темы, обоснованность основных научных положений диссертации, новизну и достоверность полученных результатов, их своевременную публикацию в ведущих рецензируемых отечественных и международных журналах УФН, ЯФ, Phys. Rev. D, Eur. Phys. J. A и C, входящих в список ВАК, можно заключить, что диссертация **А.Е.Раджабова** «АДРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ, ГОРЯЧЕЙ И ПЛОТНОЙ СРЕДЕ, ПОПРАВКИ К АНОМАЛЬНОМУ МАГНИТНОМУ МОМЕНТУ МЮОНА В НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КХД», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, является законченным трудом, в котором была разработана нелокальная модель Намбу и Иона-Лазинио. В рамках этой модели проведено теоретическое исследование и расчёт эффектов, представляющих большой теоретический и практический интерес для адронной физики. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор **Андрей Евгеньевич Раджабов** заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составлен 11 ноября 2019 г.

Официальный оппонент доктор
физико-математических наук
(01.04.02 – теоретическая физика)



А.А. Кожевников

ведущий научный сотрудник лаборатории
теоретической физики ФГБУН «Институт
математики им. С.Л. Соболева СО РАН»,
адрес: 630090, Новосибирск, пр. акад. Коптюга, 4
тел.: +7383 329 75 19
e-mail:kozhev@math.nsc.ru

Подпись А.А. Кожевникова удостоверяю.
Учёный секретарь ИМ СО РАН
кандидат физико-математических наук



И.Е. Светов