

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Воронина Владимира Эдуардовича «Конфайнмент и свойства мезонов в доменной модели вакуума КХД»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Теория сильных взаимодействий – квантовая хромодинамика (КХД) является хорошо проверенной теорией в пертурбативном режиме при больших передачах импульса, когда константа связи мала. Однако, в то же время, для описания статических и динамических свойств адронов и вакуума (явления конфайнмента и деконфайнмента, спонтанное нарушение киральной симметрии и т.п.) методы КХД в непертурбативном режиме все еще требуют развития как в аналитическом так и численном направлениях.

Представленная диссертационная работа Воронина Владимира Эдуардовича посвящена весьма **актуальной** проблеме изучения непертурбативного вакуума КХД, описываемого статистическим ансамблем доменных стенок, разделяющих области с почти однородными абелевыми (анти)самодуальными глюонными полями. Такой ансамбль обеспечивает конфайнмент как статических (закон площадей для петли Вильсона), так и динамических кварков (отсутствие полюса в пропагаторе), спонтанное нарушение киральной симметрии и решение проблемы  $U_A(1)$ . Определяющими для механизмов конфайнмента и нарушения киральной симметрии свойствами такого статистического ансамбля являются (анти)самодуальность, абелевость и стохастичность. Используемый в диссертации единый подход ко многим проблемам непертурбативной КХД, основанный на квантовом эффективном действии, является важной и **актуальной** особенностью диссертации. Также, **актуальность** рассматриваемой проблемы подтверждается широкими программами адронной и ядерной физики в современных ускорительных центрах: ЦЕРН, КЕК, SLAC, JLAB, RHIC, FAIR, NICA и др.

Основной **целью** данной диссертации является изучение непертурбативных глюонных конфигураций, обеспечивающих одновременно конфайнмент статических и динамических кварков, описание нарушения киральной симметрии и решение проблемы  $U_A(1)$ , и, в частности, исследование их проявлений в собственных модах и пропагаторах кварковых и глюонных полей и свойствах мезонов. Для достижения цели диссертации были решены следующие задачи:

- Построение ансамбля почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных полей с помощью суперпозиции доменных стенок. Нахождение спектра и собственных мод кваркового и глюонного полей внутри домена и на

доменной стенке;

- Диагонализация квадратичной части ранее найденного эффективного мезонного действия по радиальному квантовому числу мезонов. Включение в действие электромагнитные и слабые взаимодействия калибровочно-инвариантным образом;
- Расчет масс мезонов в основном и радиально возбужденных состояниях, константы лептонных распадов псевдоскалярных мезонов, сильные константы распада векторных мезонов и переходные электромагнитные константы векторных мезонов;
- Сравнение пропагаторов кваркового и глюонного полей в однородных абелевых (анти)самодуальных полях с пропагаторами, найденными с помощью функциональной ренормгруппы, уравнений Дайсона-Швингера и КХД на решётке;
- Исследование влияния почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных вакуумных полей на процесс  $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi$ . Вычисление переходных электромагнитных формфакторов нейтральных псевдоскалярных мезонов. Исследование влияния почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных вакуумных полей на сильные константы распада векторных мезонов на пару псевдоскалярных.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и перечня цитируемой литературы, содержащего 163 ссылки. В диссертации содержится 36 рисунков и 8 таблиц. Общий объем диссертации составляет 108 страниц.

**Введение** содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и направлений работы, обсуждение новизны работы, методов исследований и апробацию работы.

В **первой главе** обсуждается квантовое эффективное действие КХД и его глобальные минимумы. Для эффективных уравнений движения в подходе Гинзбурга-Ландау найдены решения в виде кинков. Из этих решений в явном виде построен ансамбль вакуумных полей. Обсуждаются свойства пропагаторов кварков, глюонов и связь с другими подходами к вакууму КХД.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению дефектов в виде хромомангнитных трубок в ансамбле почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных полей. Такие дефекты могут возникать под действием сильных внешних электромагнитных полей. Найдены спектры и собственные моды кварков и глюонов в хромомангнитной трубке. Показано, что существует критический радиус  $R_C$  хромомангнитной трубки, при превышении которого возникают тахионные моды Нильсена-Олесена, дестабилизирующие дефект.

В **третьей главе** приведены расчёты масс мезонов в основном и радиально возбуждённых состояниях, констант лептонных распадов и переходных электромагнитных констант.

**Четвертая глава** диссертации содержит результаты исследования влияния вакуумного поля на процесс  $P \rightarrow \gamma^* \gamma^*$  при различной виртуальности фотонов и на процесс распада векторного мезона на пару псевдоскалярных  $V \rightarrow PP$ . Вычислены константы распадов  $g_{P\gamma\gamma}$  и  $g_{VPP}$  для различных мезонов.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и обсуждаются направления возможных дальнейших исследований.

В **Приложении А** описано включение взаимодействия  $U(1)$  в эффективное мезонное действие калибровочно-инвариантным образом.

В **Приложении Б** описано включение взаимодействия  $SU_L(2) \times U_Y(1)$  в эффективное мезонное действие калибровочно-инвариантным образом.

В **Приложении В** приведены формулы для переходного электромагнитного формфактора.

**Основные результаты** диссертации выносимые на защиту:

- В подходе к квантовому эффективному действию глюонного поля найдены решения уравнений для глюонного поля, интерполирующие между дискретными глобальными минимумами эффективного действия. Минимумы соответствуют разным вакуумным конфигурациям абелева (анти)самодуального глюонного поля, связанным друг с другом дискретными преобразованиями симметрии. На основе этих решений построен ансамбль почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных полей как сеть доменных стенок;

- Найдены спектры и собственные моды кварков, глюонов и духов Фаддеева-Попова внутри домена с плоскими стенками и на доменных стенках. Собственные моды заряженных по цвету полей на доменных стенках соответствуют квазичастицам, характерным для режима деконфайнмента. На примере пересечения доменных стенок с цилиндрической симметрией (хромомангнитная трубка) показано, что существует критический размер области, занимаемый доменной стенкой, при котором глюонные квазичастичные моды становятся тахионными вследствие неустойчивости Нильсена-Олесена;

- Построено нелокальное эффективное мезонное действие, диагональное по радиальному квантовому числу. Действие включает электромагнитные и слабые взаимодействия, а также инвариантно относительно калибровочных

преобразований фонового поля. Массы радиально возбужденных мезонов, состоящих из  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $b$ -кварков, константы лептонных распадов псевдоскалярных мезонов и электромагнитные переходные константы векторных мезонов (включая радиально возбужденные), сильные константы распада векторных мезонов  $g_{VPP}$  рассчитаны взаимно согласованным образом. Показано, что для корректного описания  $g_{VPP}$  критически важна инвариантность эффективного мезонного действия относительно калибровочных преобразований фонового поля;

- рассчитаны переходные электромагнитные формфакторы  $F_{P\gamma^*\gamma}$  и константы  $g_{P\gamma\gamma}$  с соответствующими массами и константами распадов. Показано, что величина  $Q^2 F_{P\gamma^*\gamma}$  приближается при асимптотически больших  $Q^2$  к константе, которая превышает предел Бродского-Лепаж, что обусловлено влиянием конфаймирующих глюонных полей. В то же время стандартный факторизационный предел достигается для  $Q^2 F_{P\gamma^*\gamma^*}$ , так как конфаймирующие абелевы (анти)самодуальные поля не дают вклада в асимптотику в этом кинематическом режиме. Рассчитаны и проанализированы особенности формфакторов  $\eta$ ,  $\eta'$  и  $\eta_c$ .

Результаты, полученные в диссертации с достаточной полнотой **опубликованы** в ведущих реферируемых научных журналах: из 8 работ 3 статьи в рецензируемых журналах, а также 4 работы в сборниках трудов конференций, индексируемых в системах Web of Science и/или Scopus.

Результаты диссертации неоднократно **апробировались** на международных научных конференциях, совещаниях и семинарах. В частности, результаты работы докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Гейдельбергского университета имени Рупрехта и Карла, Гисенского университета имени Юстуса Либиха, а также были представлены на международных совещаниях и конференциях: на 22-ом и 23-ем Международном Балдинском Семинаре (Дубна, 2014 и 2016 гг.), на 19-й Международной конференции молодых ученых и специалистов (Дубна, 2015 г.), Международной Сессии-Конференции РАН (Дубна, 2016 г.), 9й Международной Конференции Hadron Structure '15 (Горный Смоковец, Словакия, 2015 г.) и 12й Международной Конференции Quark Confinement and Hadron Spectrum (Чессалоники, Греция, 2016 г.).

**Достоверность** полученных в диссертации результатов подтверждена там где это возможно независимыми аналитическими и численными вычислениями, компьютерным решеточным моделированием, а также экспериментальными измерениями.

Результаты диссертации могут быть использованы во многих зарубежных мировых ускорительных центрах физики элементарных частиц и ядерной физики (ЦЕРН, КЕК, SLAC, JLAB, RHIC, FAIR, NICA и др.), а также в России в

ОИЯИ, НИЦ КИ, ПИЯФ НИЦ КИ, ИФВЭ НИЦ КИ, ИТЭФ НИЦ КИ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, СПбПУ и др.

Диссертация написана довольно хорошим языком, в кратком, но ясном стиле. Небольшим недостатком диссертации можно считать немного фрагментарное изложение, употребление сленга (например, без кавычек употребляются “гармонический конфайнмент”, “безразмерные обозначения”), при этом, какие-либо существенные опечатки не замечены. Также небольшим недостатком можно считать отсутствие хотя бы качественного обсуждения пертурбативных поправок для мезонов, содержащих тяжелые очарованные кварки, при сравнении с экспериментальными данными. Заметим, впрочем, что, отмеченные выше недостатки ни в какой мере не меняют общей высокой положительной оценки диссертации.

Представленная диссертация является законченным трудом, ее содержание соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Воронина Владимира Эдуардовича «Конфайнмент и свойства мезонов в доменной модели вакуума КХД», выполненная на высоком уровне, соответствует специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» и полностью отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Воронин Владимир Эдуардович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

31 августа 2017 г.

Ким Виктор Тимофеевич  
доктор физико-математических наук  
заместитель руководителя Отделения физики высоких энергий  
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Адрес: 188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща д.1  
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
Тел. (81371) 46722  
e-mail: kim\_vt@pnpi.nrcki.ru



Лубкова О.К.

04.09.2017