

## ОТЗЫВ

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

Основной целью данной диссертации является построение новых моделей сильных взаимодействий, которые, опираясь на широко применяемый в настоящее время подход эффективных лагранжианов, используются для поиска новых более детализированных теоретических особенностей, проявляющихся в непертурбативном вакууме КХД в случае изучения свойства конфайнмента и адронизации. На практике предложенные модели применяются для вычисления измеряемых на эксперименте характеристик ряда лёгких и тяжёлых мезонов и их радиальных возбуждений и изучения возможности получения информации об энергетической зависимости формфакторов  $\pi$ ,  $\eta'$  и  $\eta_c$ -мезонов, для которых имеются в некоторых случаях не согласующиеся между собой экспериментальные данные, полученные несколькими коллаборациями из США и Японии.

Ещё одной весьма актуальной целью диссертации является поиск новых характерных особенностей сильновзаимодействующей материи, которые могли бы проявляться в экспериментах по столкновению тяжёлых ионов, проводящихся на ускорителях RHIC (США) и LHC (Швейцария-Франция), а также на создаваемых установках FAIR (Германия) и NICA (Дубна).

Диссертация состоит из Введения, 4 глав основного текста, трёх детальных технических приложений, списка из 8 публикаций автора с 2015 по 2017 гг по теме диссертации (в которую входят 3 работы в рецензируемых высокорейтинговых международных журналах, 3 доклада в рецензируемых и входящих в Web of Science конференционных приложениях к известным международным журналам и два доклада, опубликованных в трудах двух международных конференций, проведённых в ОИЯИ, Дубна в 2015 и 2016 гг) и списка использованной литературы из 163 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность проводимых в диссертации исследований и даётся краткий обзор связанных с этими исследованиями методов и результатов их теоретических применений. Особое внимание уделяется обсуждению представления нетривиальной структуры вакуума КХД, возникшей при применении правил сумм КХД и метода компьютерных вычислений на решётках. При этом отмечено, что в различных походах непертурбативные эффекты, ответственные за конфайнмент, связываются с различным способами описания сложной структуры вакуума КХД.

Глава 1 диссертации посвящена построению и детальному обсуждению оригинального подхода к изучению инфракрасной области теории сильных взаимодействий, существенно опирающегося на построение эффективного лагранжиана глюодинамики, следующего из проделанных ранее теоретических исследований (A. C. Kalloniatis, S. N. Nedelko, "Realization of chiral symmetry in the domain model of QCD," Phys. Rev. D **69**, 074029 (2004)). Важной особенностью данного лагранжиана является минимизация входящего в него эффективного потенциала при ненулевом значении скалярного вакуумного конденсата глюонных полей и существование двенадцати вырожденных дискретных минимумов при постоянных абелевых (анти)самодуальных глюонных полях. Минимумы соответствуют разным вакуумным конфигурациям (анти)самодуального глюонного поля, связанных друг с другом

дискретными симметриями. Автором диссертации найдены решения уравнений глюонных полей, интерполирующие между его дискретными глобальными минимумами и обобщающие ранее полученные результаты (B. V. Galilo, S. N. Nedelko, "Weyl group, CP and the kink-like field configurations in the effective SU(3) gauge theory," Phys. Part. Nucl. Lett. 8, 67 (2011)). Получено представление ансамбля почти всюду однородных абелевых (анти)самодуальных полей в виде сети доменных стенок. В результате предлагается к рассмотрению новая модель вакуума КХД.

В разделе 1.2 автором диссертации получено диагональное по радиальному квантовому числу мезонов нелокальное эффективное действие, построенное на рассмотренной в разделе 1.1. модели вакуума КХД, которая приводит к формированию так называемых доменных стенок. Данное исследование уточняет и перефразирует на более современный язык результаты работы Г.В. Ефимова и С.Н. Неделько, опубликованной в 1995 г. В этой работе было продемонстрировано, что в нелокальной модели типа модели Намбу-Йона-Лазинио, близкой по построению к изучаемой автором диссертации, спектр масс мезонов имеет реджевский характер не только при больших значениях радиального квантового числа  $n$ , что справедливо в линейных дуальных моделях, полученных ранее с использованием активно развивавшегося в ИИИ РАН метода правил сумм КХД при конечных энергиях, но и при больших значениях орбитального квантового числа  $l$ . Следует подчеркнуть, что одновременное выполнение этих двух свойств характерно не только для спектров адронов, предсказываемых в изучаемых в диссертации нелокальных моделях, но и для траекторий Редже для лёгких векторных и псевдоскалярных мезонов, полученных в других работах, опирающихся на популярный в настоящее время среди ряда теоретиков голографический подход к КХД, лежащий в основе модели AdS/КХД.

В Главе 2 диссертации рассмотрены характерные дефекты в вакууме теории сильных взаимодействий, которые могут возникать под действием сильных электромагнитных полей. Найдены спектры и собственные моды кварков и глюонов в образующейся при таких внешних условиях хромагнитной трубке. В.Э. Ворониным показано, что если размер такой трубки превышает критический, то возникают тахионные моды, аналогичные обсуждавшимся ранее в работах Нильсена и Олесена. При этом возникают области, в которых свойство конфайнмента пропадает даже несмотря на то, что одна из его характеристик — а именно скалярный глюонный конденсат — не зануляется (см. Рис.2.2 на стр. 43 диссертации). В связи с этим считаю крайне желательным прояснить, проявляются ли аналоги обнаруженного явления при вычислениях в других моделях, например опирающихся на решёточные компьютерные вычисления.

Главы 3 и 4 являются связанными. В них развиваемый нелокальный подход к изучению эффектов сильной связи в КХД применяется для вычисления спектров лёгких и тяжёло-лёгких мезонов (к последним относятся радиальные возбуждения  $D$ ,  $D_s$ ,  $B$ ,  $B_s$  и  $B_c$ -мезонов), тяжёлых кваркониев, их констант лептонных распадов и энергетическое поведение измеряемых в различных экспериментах переходных электромагнитных формфакторов  $\pi$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$  и  $\eta_c$ -мезонов.

В конкретных расчётах используется нелокальное эффективное мезонное действие, диагонализированное по радиальному квантовому числу. При этом сначала определяются значения следующих 7 параметров: (1) скалярный глюонный конденсат; (2) топологическая восприимчивость вакуума чистой глюодинамики; (3)-(6) конституентные массы лёгких кварков (в случае, когда  $m_u = m_d$ ), конституентные массы  $s$  и  $b$ -кварков; (7) определённая из уравнений (1.28) модельная константа связи сильных взаимодействий, поведение которой при росте энергий согласуется с однопетлевым поведением константы связи КХД.

Значение этих параметров фиксируется фитированием масс  $\pi$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $K^*$ ,  $\eta'$ ,  $J/\psi$  и  $\Upsilon$ -мезонов, определяемых полюсами в двухточечных корреляторах интерполирующих конкретные мезоны кварковых токов после дополнительных преобразований, частично включающих в себя эффекты, пропорциональные константе связи  $\alpha_s$  в развиваемом нелокальном подходе. Результаты фитирования используются для вычисления масс и лептонных констант связи семейств тяжёло-лёгких мезонов и тяжёлых кваркониев уже без дополнительной подстройки параметров фитирования.

Следует подчеркнуть, что расхождение с имеющимися экспериментальными данными не превышает 15 %, что может считаться успехом для изопрёрнённой модели, нацеленной на одновременный учёт нетеоретико-возмущенческих эффектов, которые связаны с моделированием нетривиальной структуры вакуума сильных взаимодействий и эффектов адронизации.

В предлагаемой в диссертации модели адронизации фоновые глюонные поля учитываются непертурбативно, что позволяет исследовать их влияние на переходные электромагнитные формфакторы нейтральных псевдоскалярных мезонов. Подчеркну, что изучение формфакторов в рамках данного подхода позволяет лучше понять уровень достоверности конкретных вычислений в изучаемом подходе. Действительно, в недавних работах расхождения результатов экспериментов по измерению переходного электромагнитного формфактора пиона, проведённых коллаборациями BaBar и Belle, уже хорошо изучены с помощью метода КХД правил сумм. Полученные в диссертации результаты расчётов свидетельствуют об отсутствии роста формфактора пиона  $Q^2 F_{\pi\gamma^*\gamma}$ , обнаруженного коллаборацией BaBar ( что согласуется с детальными вычислениями, проведёнными с использованием метода правил сумм КХД в работах А.П. Бакулева, С.В. Михайлова, А.В. Пимикова и Н. Стефаниса), однако указывают на превышение поведения формфактора  $\pi$ -мезона, характерного для асимптотического предела, впервые рассмотренного в работе Бродского-Лепажя.

Данное расхождение может указывать на необходимость уточнения процедуры учёта различных эффектов при вычислении феноменологически проверяемых следствий вычисления треугольных диаграмм в развиваемом в диссертации подходе. Представляется также важным понять причину значительного расхождения предсказаний модели для  $Q^2$ -зависимости переходного формфактора  $\eta'$ -мезона с данными коллаборации BaBar и CLEO (см. Рис.4.4 и Рис.4.5), которые хорошо описываются методами, совместимыми с методами правил сумм КХД (см. I. Balakireva, W. Lucha and D. Melikhov, "Pion elastic and  $(\pi^0, \eta, \eta') \rightarrow \gamma\gamma^*$  transition form factors in a broad range of momentum transfers," Phys. Rev. D **85** (2012) 036006 [arXiv:1110.6904 [hep-ph]] и Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, "Transition Form Factors and Mixing of Pseudoscalar Mesons from Anomaly Sum Rule," Phys. Rev. D **87** (2013) no.3, 036013 Erratum: [Phys. Rev. D **88** (2013) no.5, 059902] [arXiv:1211.0874 [hep-ph]]).

Отмечу также следующие дополнительные замечания к содержанию работы:

1. В разделе 1.3 диссертации приведены результаты лишь качественного сравнения поведения пропагаторов кваркового и глюонного полей, полученных с использованием изучаемого подхода, и рассчитанных методом функциональной ренормгруппы. и методом численных решёточных вычислений. Желательно было бы провести также количественное сравнение результатов применения независимых вычислений.
2. Способ извлечения величины токовых масс кварков из параметров модели на странице 61 требует более подробного объяснения. Также упоминается, что отношение токовых масс является ренормгрупповым инвариантом. К сожалению, конкретные вычисления, проясняющие это утверждение, не приведены.

3. Обсуждаемое в разделе 1.2 эффективное мезонное действие является примером нелокальной теории. Для полноты обсуждения следовало обсудить ряд характерных общих свойств нелокальных теорий, подробно исследованных в работах Г.В. Ефимова и соавторов.

Приведённые замечания не умаляют научной ценности диссертации, которая по актуальности, объёму выполненных исследований и оригинальности удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения учёных степеней». Материалы диссертации своевременно опубликованы в ведущих научных изданиях. Ряд полученных результатов уже нашёл использование не только в работах теоретиков из ОИЯИ, Дубна, но и в опубликованных в научной литературе исследованиях, проведённых учёными из Польши, Австрии, Германии и Индии.

Хорошо написанный автореферат улучшает понимание использованных и развитых в диссертации методов и полученных теоретических и феноменологических результатов и проясняет вопросы, которые следует изучить в возможных дальнейших исследованиях с использованием предложенных и изученных в диссертации моделей конфайнмента и адронизации.

Считаю, что Владимир Эдуардович Воронин заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:  
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
Института ядерных исследований  
Российской Академии наук

Адрес: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия  
исследований РАН  
Телефон: +7 (495) 1336533  
Электронная почта: kataev@ms2.inr.ac.ru

Подпись А.Л. Катаева заверяю.  
Ученый секретарь ИЯИ РАН



А.Л. Катаев

Июль 2017 г.

Институт ядерных

А.Д. Селидовкин

Июль 2017 г.