

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Мостового Сергея
Дмитриевича
на тему: «Исследование фазовых явлений в решеточных
моделях физики конденсированного состояния
вещества и теории поля»
по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика»

В настоящее время исследование фаз, фазовых переходов и корреляционных свойств частиц в моделях физики конденсированного состояния и квантовой теории поля является одним из наиболее актуальных и активно развивающихся направлений. Основная специфика таких задач состоит в том, что пертурбативные методы имеют в них лишь ограниченную применимость. Одним из наиболее эффективных альтернативных подходов, который позволяет выйти за рамки теории возмущений и тем самым исследовать возникающие в таких системах в режиме сильной связи непертурбативные эффекты, является метод Монте-Карло, реализуемый на пространственных решетках.

Диссертационная работа С. Д. Мостового посвящена развитию и применению метода Монте-Карло к решеточной теории поля и решеточной фермионной модели. Соискатель предлагает несколько способов развития техники моделирования, новый метод корреляционного анализа и исследует поведение энергии и теплоемкости в различных фазах.

Соискателем получен ряд новых результатов, представляющих значительный интерес: наличие нескольких фаз внутри фазы

конфайнмента компактной решеточной модели; дальний порядок топологических дефектов в формализме К. Ребби в этой модели; существенное усовершенствование техники моделирования Монте-Карло в фермионных системах, заданных вторично-квантованным гамильтонианом с четырехфермионным взаимодействием, и демонстрация преимуществ использования этой техники; найдена зависимость теплоемкости газа электронов проводимости в модели Хаббарда в широком диапазоне температур: от 0,4 эВ до 5,6 эВ (от 4600 К до 65000 К).

Диссертационная работа состоит из введения, 12 глав основного содержания, объединенных в 3 части, заключения, списка литературы и приложения.

Введение содержит краткое описание основных свойств решеточной компактной модели и расширенной модели Хаббарда, формулировку научной новизны работы, *основные положения*, обоснование достоверности результатов, личный вклад.

Глава 1.1 содержит необходимую предварительную информацию о компактной калибровочной модели с модифицированным действием Вильсона согласно работе Kerler W., Rebbi C., Weber A. Phys. Rev. D. 50, 6984 (1994).

Глава 1.2 содержит описание предлагаемого соискателем метода корреляционного анализа фазовых состояний модели, полученной фазовой диаграммы для областей с кулоновской фазой и фазой конфайнмента, параметров порядка для фазового перехода между новыми состояниями.

Глава 1.3 представляет новый метод геометризации дираковских струн, связывающих топологические дефекты в

четырёхмерном пространстве модели. Вводятся два типа так называемых токовых объектов, перечисляются многочисленные результаты, полученные с их помощью.

Главы 2.1 и 2.2 рассматривают существующие методы Квантового Монте-Карло, применяемые для изучения систем в режиме сильной связи. При этом в **главе 2.2** содержится методологически ценный обзор основных идей каждого из упомянутых методов. Соискатель особо подробно касается детерминантного метода (подход Бланкенбеклера, Скалапино и Шугара, 1981), который был использован в рамках диссертационной работы.

Глава 2.3 обобщает существующую на данный момент информацию об обработке рядов данных, получаемых на выходе программы моделирования Монте-Карло. Существенной частью **главы 2.3** является описание поведения алгоритма с позиции «обхода конфигурационного пространства», которое позволяет соискателю обосновать предлагаемые им улучшения алгоритма Монте-Карло. Также рассматриваются два алгоритма оценки дисперсии по ряду вычислений.

Глава 3.1 вводит объект исследования завершающей части работы: расширенную модель Хаббарда (Hubbard J. Proceedings of the Royal Society A (1963)) на гексагональной решетке.

Глава 3.2 представляет аналитический вывод формулы решеточной аппроксимации Сузуки-Троттера континуального интеграла в подходе Хаббарда-Стратоновича, соответствующего данной модели. Здесь же вводятся так называемые линковые поля, которые являются одним из основных результатов, полученных

соискателем.

Глава 3.3 продолжает аналитическое рассмотрение формализма модели с целью подготовки рабочих формул для моделирования Монте-Карло в двух подходах для вычислений: псевдофермионных полей и точных фермионных сил (подход Бланкенбеклера, Скалапино и Шугара).

Глава 3.4 представляет результаты, полученные методом двух полей: для параметров порядка модели (согласно Buividovich P., Smith D., Ulybyshev M., von Smekal L. Phys. Rev. B. 98, 235129. (2018)), энергии и квадрата энергии при $V_{00} = 8,96$ эВ, $V_{01} = 2,24$ эВ. Последние два являются новыми результатами, полученными в рамках диссертационной работы.

Глава 3.5 перечисляет аргументы в пользу метода пяти полей, в том числе: увеличение доли смены конфигураций модели (от общего числа попыток) до 98%, стабилизация флуктуаций вспомогательных бозонных полей, уменьшение времени автокорреляции (от 1,5 до 4 раз) в ряду величин, улучшение асимптотики распределения величин со стороны «тяжелого хвоста». Приводятся конкретные результаты вычислений.

Глава 3.6 демонстрирует, как новый метод улучшает результаты расчетов в частном случае выбора разных значений V_{00} для каждой из подрешеток. Интересным фрагментом является попытка интерпретации обсуждаемого явления в терминах состояний электронов в узлах решетки.

В заключении перечисляются основные полученные соискателем результаты: найдены новые фазы внутри фазы конфайнмента в компактной решеточной U(1)-модели; определены

корреляционные свойства магнитных токов; предложен новый геометрический способ описания магнитных токов, который позволяет выявить пространственное распределение магнитных монополей; получены аналитические выражения для нового метода решеточной аппроксимации расширенной модели Хаббарда, показаны его преимущества над общепринятым подходом, найдены аналитические выражения для энергии и квадрата энергии, что позволило вычислить теплоемкость двумя способами и провести сравнение результатов.

В **Приложении** приводятся формулы для вычисления среднего квадрата гамильтониана в расширенной модели Хаббарда при помощи элементов обратной фермионной матрицы.

Диссертационная работа выполнена на предельно высоком уровне. Получены аналитические формулы для решеточной аппроксимации рассматриваемых моделей. Результаты вычислений представлены как численно, так и графически. Основные тезисы, выдвигаемые соискателем, сопровождаются подробным описанием и обоснованием. Выводы сформулированы четко и однозначно.

Тем не менее, следует выделить ряд моментов, упущенных в представляемой диссертационной работе. Величина коррелятора магнитных токов везде используется без погрешности. Это не позволяет должным образом оценить неизбежную вычислительную ошибку, в том числе достаточность статистики. В тексте диссертации не содержится указания на род фазового перехода между новыми обнаруженными состояниями внутри фазы конфайнмента. Соискатель использует линковые поля лишь на первом координационном радиусе (согласно работе Ulybyshev M.V., Buividovich P.V., Katsnelson M.I., Polikarpov M.I., Phys. Rev. Lett. 111,

056801 (2013)), но достаточно очевидно, что предлагаемый подход может быть расширен и на следующие радиусы – в тексте нет указаний на исследование этой возможности и сравнение результатов.

Приведенные недостатки, однако, никак не снижают качество уже полученных результатов, но являются пожеланиями к дальнейшему развитию работы в этом направлении. Диссертация С. Д. Мостового полностью отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3. – «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Мостовой Сергей Дмитриевич безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Профессор кафедры квантовой теории и физики высоких энергий
физического факультета
ФГБОУ ВО «Московский Государственный Университет имени
М.В. Ломоносова»
Свешников Константин Алексеевич

Контактные данные:

тел.: 7(915)326-05-28, e-mail: k.sveshnikov@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 2
физический факультет
Тел.: 7(915)326-05-28; e-mail: k.sveshnikov@physics.msu.ru

Подпись сотрудника физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
проф. К.А. Свешникова удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор

В.А. Караваев