

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Джантемирова Ауеса Хасамбиевича «**Двухжидкостная система носителей заряда в сильно связанных электронном и фононном полях и свойства сверхпроводящих купратов**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.8 Физика конденсированного состояния**

Диссертационная работа Джантемирова Ауеса Хасамбиевича посвящена развитию биполярной модели высокотемпературной сверхпроводимости. В ней рассматриваются биполярны, возникающие за счет дальнедействующего электрон-фононного взаимодействия, размер которых много больше постоянной решетки. Поскольку плотность таких квазичастиц весьма ограничена, для анализа систем с плотностью носителей заряда, характерной для сверхпроводящих купратов, в диссертации предлагается двухжидкостная модель, включающая помимо биполярных делокализованные носители заряда. **Актуальность** темы диссертационного исследования остается высокой уже почти 40 лет, так как ни высокотемпературная сверхпроводимость купратов, ни весьма необычные свойства их нормального состояния не получили пока общепризнанного объяснения. Работа Джантемирова А. Х. направлена на решение этих задач.

Диссертация Джантемирова А. Х. состоит из введения, 3 глав, заключения, списка цитированной литературы (106 наименований) и списка публикаций автора (13 наименований). Диссертация изложена на 105 страницах, включая 20 рисунков.

**Во введении** обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, отмечены их научная новизна, теоретическая и практическая значимость. В **1 главе** дан краткий обзор современного состояния экспериментальных исследований купратных высокотемпературных сверхпроводников, связанных с темой диссертации и использованных при построении модели и сравнении результатов ее исследования с экспериментом,

а также теоретических исследований возможной роли электрон-фононного взаимодействия в купратах.

Во **2 главе** вариационным методом получено основное состояние системы сильно взаимодействующих носителей заряда и фононного поля при высокой плотности носителей. Вводятся и рассчитываются основные параметры двухжидкостной модели – волновой вектор зарядового упорядочения и волновой вектор, ограничивающий область импульсов, доступную делокализованным носителям независимо от присутствия в системе автолокализованных носителей. Показано, что оба характерных импульса определяются размером биполярона. Для записи вектора состояния фононного поля используется базис квантово-когерентных состояний, что позволило продемонстрировать сосредоточение значительной доли деформации вакуума фононного поля в гармонике с волновым вектором зарядового упорядочения, как это и наблюдается в купратах. Рассчитан спектр резонансного рассеяния рентгеновских лучей на двухжидкостной системе носителей заряда, показано его согласие с экспериментальными спектрами купратов. Разработаны интересные приемы для моделирования распределения вероятности обнаружить носитель в биполяронной жидкости.

**Глава 3** посвящена получению слабо возбужденных состояний системы с сильным Фрелиховским электрон-фононным взаимодействием и высокой плотностью носителей заряда. Для решения этой задачи строится свободная энергия двухжидкостной системы носителей заряда, включающей биполяронную жидкость и Ферми жидкость делокализованных носителей. При ее построении используется функция распределения носителей заряда в системах, где их автолокализованные и делокализованные состояния могут сосуществовать. Равновесный радиус биполярона и плотность носителей заряда в биполяронной и Ферми жидкости рассчитываются варьированием свободной энергии при фиксированной температуре. Сравнением полученной в результате минимизации свободной энергии двухжидкостной системы со свободной энергией системы носителей без биполяронов определяется граница области существования двухжидкостной фазы. Температура Бозе конденсации биполяронной жидкости определяется сравнением плотности биполяронов при заданных температуре и допировании с их максимальной плотностью в Бозе-паре при заданных условиях. Показано, что спектр элементарных возбуждений

биполярной жидкости, определяющий максимальную плотность Бозе-пара, меняется при увеличении числа проводящих слоев в элементарной ячейке таким образом, что температура сверхпроводящего перехода при этом растет, в согласии с экспериментальными данными о купратах. Рассчитан коэффициент Холла двухжидкостной системы носителей заряда в рамках двух различных подходов, результаты сравниваются с экспериментальными данными.

В **Заключении** приведены основные результаты и сформулированы выводы.

Тема, задачи и основные результаты диссертации соответствуют формуле и пунктам 1 и 5 областей исследования Паспорта специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

В целом, нельзя не отметить тот факт, что соискатель овладел большим количеством методов теоретической физики и предложил новые интересные модели, в частности, для получения температурного и концентрационного поведения постоянной Холла. Несмотря на общий высокий уровень работы необходимо сделать ряд замечаний.

1. В работе используется термин “радиус” биполярона, хотя при описании ближнего порядка биполяронной жидкости размер биполярона характеризуется длиной диагонали ромба.
2. Порядок изложения не вполне удобен для читателя. Правильнее было бы вначале показать, что в основном состоянии системы поляроны практически отсутствуют, что сделано в третьей главе путем варьирования свободной энергии системы, которая получена с помощью функции распределения, учитывающей поляроны. А потом уже определять состояние фононного поля и радиус биполярона в основном состоянии системы, используя пробный вектор состояния без поляронов, что сделано во второй главе.
3. При расчете коэффициента Холла одна из рассмотренных в работе моделей предполагает участие в транспорте заряда дырок верхней половины нижней зоны Хаббарда. Понятно, что это предположение основано на экспериментальных данных, но все же возможные причины этого вовлечения полезно было бы обсудить.

Высказанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы и не подвергают сомнению основные положения, выносимые на защиту.

Работа выполнена на высоком научном уровне, **обоснованность** научных положений, выносимых на защиту, и **достоверность** полученных в диссертации результатов определяется квалифицированным использованием для анализа предложенной модели стандартных методов квантовой механики, квантовой теории поля, статистической физики и физики конденсированного состояния.

**Новизна** рассмотренной модели связана с тем, что ранее сильное Фрелиховское электрон-фононное взаимодействие рассматривалось лишь при низкой концентрации носителей, не приводящей к формированию двухжидкостной системы носителей заряда. Новизна модели и комплексный подход к ее анализу позволили получить важные новые результаты. Например, в рамках предложенного подхода возникает наблюдаемый на эксперименте рост температуры сверхпроводящего перехода с числом проводящих плоскостей в элементарной ячейке кристалла. Интересен полученный вывод о возможной связи необычного температурного поведения постоянной Холла в купратах с фазовым переходом от двухжидкостной системы носителей заряда к чистой Ферми жидкости. **Теоретическая значимость** полученных результатов связана с тем, что они дополняют теоретическую физику конденсированного состояния, исследуя двухжидкостную модель системы носителей заряда, включающую биполярную жидкость и Ферми-жидкость делокализованных носителей заряда. Проведенная работа расширяет границы систем, рассмотренных в физике конденсированного состояния, на системы с сильным Фрелиховским электрон-фононным взаимодействием и высокой плотностью носителей. **Практическая значимость** результатов диссертационной работы обусловлена тем, что она вносит вклад в установление связи структуры сверхпроводящих купратов с их свойствами. В частности, в работе выявлены возможные источники отличий волнового вектора зарядового упорядочения в разных сверхпроводящих купратах, а также роста температуры сверхпроводящего перехода в купратах с увеличением числа слоев в элементарной ячейке кристалла.

Основные результаты работы опубликованы в 3 статьях в журналах 1 и 2 квартиля по Scopus и WoS, и представлены на 10 российских и международных конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертация «Двухжидкостная система носителей заряда в сильно связанных электронном и фононном полях и свойства сверхпроводящих купратов» является завершенной научно-квалификационной работой, которая

