



Утверждаю

Директор ИФМ им. М. Н. Михеева

Академик РАН

Н. В. Мушников

«16» 05 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, на диссертационную работу Иванцова Ильи Дмитриевича «Сильные электронные корреляции в нормальной фазе слабодопированных ВТСП купратов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертационная работа посвящена исследованию свойств нормального состояния слабодопированных ВТСП купратах. Данный класс соединений получил широкое применение благодаря эффекту высокотемпературной сверхпроводимости, возникающей при температуре выше точки кипения жидкого азота, однако полного теоретического описания данного эффекта до сих пор не существует. Таким образом, исследования свойств нормального состояния, являющегося основой для возникновения высокотемпературной сверхпроводимости, является актуальной задачей современной квантовой теории конденсированного состояния. В данной диссертации свойства ВТСП купратов в нормальной фазе рассматриваются в рамках двумерных моделей сильно коррелированных электронов, описывающих CuO_2 плоскости, которые вносят основной вклад в свойства допированных купратов. Такой подход позволяет, в принципе, как воспроизвести ранее известные особенности купратов, так и получить новые теоретические результаты, описывающие экспериментальные данные. Диссертация состоит из введения, 3 глав основного текста, заключения, 2 приложений и списка использованной литературы из 99 наименований. Результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в журнале Physical Review B, входящем в список ВАК, а также были представлены на 6 международных и всероссийских конференциях.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы и ее научная новизна. Формулируются цели и задачи, а также перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации вводится модель Кондо-Гейзенберга. Поведение ВТСП купратов, описываемых в рамках моделей сильнокоррелированных электронов, рассмотрено в широком диапазоне допирования. В случае слабого допирования, с помощью расчета спиновых корреляционных функций в рамках метода квантового Монте-Карло, показано быстрое разрушение антиферромагнитного порядка с ростом допирования, что полностью соответствует экспериментальным данным. Кроме того,

показано, что антиферромагнетизм восстанавливается с ослаблением величины корреляций. В рамках кластерной теории возмущений рассчитаны поверхности Ферми и спектральные функции модели Кондо-Гейзенберга и t-J модели. Показано, что нарушение трансляционной симметрии приводит к реконструкции поверхности Ферми. Впервые был продемонстрирован непротиворечивый и соответствующий эксперименту переход между фазами псевдощели и волны зарядовой плотности, а также восстановление псевдощели и ферми-жидкостной фазы при увеличении дипирования. Исследовано влияние величины антиферромагнитного взаимодействия, роли «запрета» двойного заполнения узла, неоднородности пространственного распределения заряда и эффектов конечного размера кластера на структуру поверхности Ферми, благодаря чему установлено, что основной причиной реконструкции поверхности Ферми из псевдощелевой в поверхность с малыми электронными карманами являются одноузельные сильные электронные корреляции.

Во второй главе исследуется так называемая фаза Нагаока, описывающаяся в рамках модели Хаббарда в пределе бесконечного кулоновского отталкивания. Особый интерес к данной фазе обусловлен тем, что поведение электронов в данном случае является следствием исключительно статистики редуцированных фермионных операторов, возникающих как прямое следствие сильных корреляций, без участия какого-либо дополнительного взаимодействия. Таким образом, свойства системы обусловлены исключительно «запретом» двойного заполнения узла. В данной главе исследуется вопрос о устойчивости Нагаоковского ферромагнетизма при конечном дипировании. Рассчитанные с помощью метода квантового Монте-Карло спиновые корреляционные функции указывают на отсутствие следов ферромагнитного упорядочения при конечной температуре. С помощью точной диагонализации малых кластеров показано, что спин основного состояния в случае конечного дипирования не является максимальным и не соответствует насыщенному ферромагнетизму. С помощью точной диагонализации высокоспинового и слабодипированного сектора Гильбертова пространства в случае больших решеток показано, что возможность существования насыщенного ферромагнитного основного состояния зависит как от размера решетки, так и от типа граничных условий, что указывает на нетривиальность термодинамического предела. В частности, показано, что Нагаоковская фаза является термодинамически неустойчивой при конечном дипировании.

В третьей главе исследуется реконструкция поверхности Ферми в фазе волны зарядовой плотности слабодипированных купратов. Для описания данного явления используется t-J модель с явно нарушенной трансляционной симметрии, что достигается благодаря кластеризации решетки и точной диагонализации внутрикластерной части Гамильтониана. В рамках данной модели были рассчитаны спектральные функции и построены поверхности Ферми в широком диапазоне дипирования. Показано изменение топологии поверхности Ферми при дипировании порядка 9%, что свидетельствует о расходимости эффективной массы носителей заряда, что соответствует экспериментальным данным. Установлено, что наличие кулоновского отталкивания

приводит к возникновению анизотропной щели на границе редуцированной зоны Бриллюэна, что приводит к расщеплению псевдощелевой дырочной поверхности Ферми на электронный и два дырочных кармана в фазе волны зарядовой плотности. В то же время Брэгговское отражение на границах редуцированной зоны Бриллюэна приводит к замыканию квазичастичных орбит, что приводит к существованию квантовых осцилляций плотности электронных состояний в сильном магнитном поле при тех же величинах додирования, что и в эксперименте. Рассчитаны плотности электронных и дырочных носителей тока и показано преобладание электронной проводимости в фазе волны зарядовой плотности, вплоть до полного падения дырочной проводимости при додировании порядка 10%, что объясняет экспериментально наблюдаемое изменение знаков коэффициента Холла и Зеебека, а также ряд экспериментов по измерению теплоемкости купратов в фазе волны зарядовой плотности.

Выводы, приведенные автором в **заключении** диссертации, кратко излагаются основные результаты, полученные в диссертационной работе. Описание используемых в работе численных методов квантового Монте-Карло и кластерной теории возмущений приведены в **приложениях А и Б** соответственно.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Автор претендует на учет влияния кулоновского взаимодействия электронов/дырок на свойства нормальной фазы слабододированных ВТСП купратов, хотя используемая им модель Кондо-Гейзенберга формально учитывает только спиновые корреляции.
2. В работе большое внимание уделяется пределу бесконечно сильных корреляций (фаза «Нагаока»), однако не совсем понятно, какое отношение эта фаза имеет к купратам.
3. Автор не рассматривает и даже не комментирует многие важные аномальные свойства «нормальной» фазы слабододированных купратов, такие как обнаружение эффектов нарушения симметрии относительно обращения времени (*circular currents!*), нарушения тетрагональной симметрии (*nematic order*), «локальной сверхпроводимости».
4. В тексте диссертации и автореферата присутствует ряд опечаток, орфографических и пунктуационных ошибок, неудачных выражений типа «констрайнт отсутствия двойного заполнения», а также «англорусских» выражений типа «*d-wave* упорядочение», «*hard-core* бозон».

Приведенные замечания не умаляют научной ценности диссертации, которая по критериям актуальности, объему выполненных исследований и оригинальности удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения ученых степеней».

Таким образом, считаем, что диссертационная работа «Сильные электронные корреляции в нормальной фазе слабододированных ВТСП купратов» представляет цельный научный труд, соответствует требованиям п.9- 14 «Положения о порядке

присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Иванцов Илья Дмитриевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета Института физики металлов им. Н. М. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, протокол номер 8 от 15 мая 2019 года.

Отзыв составил
ведущий научный сотрудник
Института физики металлов им. М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор

А.С. Москвин

«15» мая 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Института физики металлов им. М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук,
620137, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
Телефон: +7 (343) 374-02-30
Электронная почта: physics@imp.uran.ru

Ученый секретарь
института, к. ф.-мн.

И.Ю. Франова
15 мая 2019г.