

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Коршунова Максима Михайловича «Исследование связи магнетизма и необычной сверхпроводимости в многоорбитальных моделях слоистых соединений переходных металлов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Работа М.М. Коршунова посвящена исследованию квазидвумерных высокотемпературных сверхпроводников. Такие системы интенсивно исследуются в физике конденсированного состояния в последние годы. Помимо возможного практического применения исследуемых соединений, к которым относятся купраты, слоистые кобальтиты, пниктиды и халькогениды железа, представляет большой интерес существующее множество нерешённых фундаментальных проблем. Одной из таких проблем является выяснение механизма формирования сверхпроводящего состояния. Близость сверхпроводимости и магнетизма на фазовых диаграммах даёт основания полагать, что главным кандидатом при куперовском спаривании является взаимодействие через магнитные возбуждения. Результаты, изложенные в диссертации М.М. Коршунова, напрямую связаны с этой современной тематикой, что делает их актуальными. В указанных системах важную роль играет многозонный характер состояний вблизи уровня Ферми, что приводит, с одной стороны, к разнообразию наблюдаемых явлений, а с другой – к усложнению их теоретического описания. В диссертации М.М. Коршунова проведено исследование роли магнетизма в формировании свойств нормальной и сверхпроводящей фаз соединений переходных металлов в многозонных моделях.

Диссертация М.М. Коршунова имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК, и состоит из введения, десяти глав и заключения. Работа содержит 345 страниц. В первой главе содержится обзор литературы.

Вторая глава посвящена исследованию медно-оксидных сверхпроводников – купратов. Для них получены параметры низкоэнергетических моделей купратов. Затем описано получение обобщённого приближения среднего поля, в котором учитывается рассеяние на спиновых флуктуациях за пределами расщепления Хаббард 1. В этом приближении рассчитана зависимость зонной структуры и Ферми-поверхности от допирования. Самым важным результатом этой главы является демонстрация возникновения переходов Лифшица при изменении допирования.

В третьей и четвёртой главах обсуждаются слоистые кобальтиты $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$. Для них получена эффективная модель сильной связи. В этой

модели показано, что изменение Ферми-поверхности с допированием приводит к изменению характера магнитной восприимчивости, а именно, при высокой концентрации допирования ($x > x_m$, где x_m – критическая концентрация, определяемая зонной структурой) имеет место тенденция к ферромагнитному упорядочению в плоскости Co . В приближении среднего поля для коррелированных металлических систем проанализировано влияние сильных электронных корреляций и установлено, что их учёт не приводит к качественным изменениям такой картины, но количественно концентрация x_m возрастает. В главе 4 исследовано влияние симметрии сверхпроводящего параметра порядка на динамическую спиновую восприимчивость, сдвиг Найта и время спин-решёточной релаксации. Выявлено, что с имеющимися данными согласуется наличие параметра порядка с линиями нулей.

Все последующие главы посвящены исследованию пниктидов и халькогенидов железа. В главе 5 сформулирована четырёхзонная модель сильной связи для пниктидов. В ней, в приближении хаотических фаз, получена спиновая восприимчивость в нормальной и сверхпроводящей фазах. Автором показано возникновение спин-резонансного пика в случае $s+$ -симметрии параметра порядка. Замечательность этого результата состоит в том, что теоретически получен он был до экспериментального наблюдения спин-резонансного пика в неупругом рассеянии нейтронов. Также в этой главе продемонстрировано возникновение спин-резонансного пика в реалистичной многозонной модели пниктидов и проведено детальное сравнение результатов расчётов с результатами неупругого рассеяния нейтронов в халькогениде $FeTe_{0.6}Se_{0.4}$.

Глава 6 посвящена исследованию магнитных свойств пниктида $LaFeAsO$ на основе приближения хаотических фаз. Кулоновские параметры подобраны так, чтобы из условия расходимости спиновой восприимчивости получить величину температуры Нееля, согласующуюся с экспериментально наблюдаемой. При этих параметрах получена температурная зависимость параметра порядка состояния волны спиновой плотности и вычислен магнитный момент, по величине очень близкий к полученному из экспериментов. Выше температуры магнитного перехода рассчитана скорость спин-решёточной релаксации и показано, как она существенно меняет свой характер при изменении допирования.

В главе 7 выясняются причины наблюдаемого линейного роста однородной спиновой восприимчивости с температурой. В двухзонной модели пниктидов показано, что такое поведение является универсальным для двумерной Ферми-жидкости с сильными флуктуациями волны спиновой плотности. Получено количественное согласие с экспериментальными данными на различных пниктидах.

Восьмая глава посвящена исследованию вклада рассеяния на спиновых и зарядовых флуктуациях в проводимость и коэффициент Холла в пниктидах. В качестве исходной использована 5-орбитальная модель с локальным кулоновским взаимодействием. Вклад спиновых и зарядовых флуктуаций в массовый оператор учитывался в приближении хаотических фаз. В результате объяснено сильное различие между транспортными свойствами электронов и дырок. Полученная картина зависимости проводимости и коэффициента Холла от допирования качественно согласуется с наблюдаемой в пниктидах $\text{Ba}(\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ и $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$.

Глава 9 посвящена исследованию влияния немагнитных и магнитных примесей на сверхпроводящее состояние с s^{+-} и s^{++} симметриями параметра порядка. Используется решение уравнений многозонной теории Элиашберга для двузонной модели пниктидов. Получена зависимость критической температуры T_c от параметра рассеяния на примесях и при этом выяснено, при каких параметрах T_c будет уходить в ноль, а при каких – оставаться конечной. При этом показано, что в многозонных системах возможны переходы между s^{+-} и s^{++} симметриями параметра при увеличении концентрации примесей.

В десятой главе изложен многозонный вариант спин-флуктуационной теории сверхпроводящего спаривания. Для удобства анализа решений в этой теории используется приближение главных угловых гармоник куперовского взаимодействия и параметра порядка. Таким методом описана сверхпроводящая фазовая диаграмма пниктидов и халькогенидов железа. Особенно интересным является анализ предельных случаев допирования электронами и дырками, когда остаются Ферми-поверхности только электронные и дырочные, соответственно.

Все результаты диссертации новы, достоверны и актуальны. Достоверность демонстрируется применением обоснованных и хорошо изученных методов исследования систем со слабыми и сильными корреляциями и согласием с широким спектром экспериментальных результатов. Некоторые результаты, например, спин-резонансный пик в магнитной восприимчивости, были сначала предсказаны теоретически, а затем обнаружены экспериментально.

Среди всех научных результатов, на мой взгляд, особо стоит отметить следующие:

1. Переходы Лифшица в купратах как единственный способ трансформации малой поверхности Ферми при низком уровне допирования в большую поверхность при высоких уровнях допирования.
2. Предсказание спин-резонансного пика, наблюдаемого в неупругом рассеянии нейтронов в пниктидах и халькогенидах железа.

3. Описание линейной температурной зависимости однородной спиновой восприимчивости, как возникающей естественным образом в теории двумерной Ферми-жидкости вблизи магнитной неустойчивости.
4. Расчёт влияния рассеяния на спиновых и зарядовых флуктуациях для объяснения асимметрии транспортных свойств пниктидов по отношению к дырочному и электронному допированию.
5. Описание влияния немагнитных и магнитных примесей на сверхпроводящий параметр порядка в многозонной модели пниктидов.
6. Последовательное исследование симметрии параметра порядка в многозонной спин-флуктуационной теории сверхпроводящего спаривания с использованием приближения главных угловых гармоник.

Все вышеизложенное позволяет сделать общий вывод о том, что в диссертации М.М. Коршунова в рамках микроскопического подхода установлена роль спиновых возбуждений в формировании свойств нормальной и сверхпроводящей фаз слоистых соединений переходных металлов. Совокупность положений диссертации М.М. Коршунова можно квалифицировать как новое крупное достижение в развитии теории сверхпроводимости многозонных систем.

Работа, к сожалению, не свободна от недостатков. У меня возникли следующие замечания:

1. Полученные в методе LDA+GTB параметры перескока (таблицы 2.2-2.4) показывают необычную тенденцию: интеграл перескока между данным узлом и его третьим соседом больше соответствующего интеграла с участием второго соседа. В диссертации не обсуждается, чем вызвано такое немонокотное поведение.
2. В разделе 3.2 приведены результаты вычисления магнитной восприимчивости, однако, не указано, как именно она вычислялась.
3. На рисунке 8.8 показана зависимость коэффициента Холла от эффективной температуры, но определение «эффективной температуры» в тексте не дано.
4. В диссертации исследуется влияние примесей на сверхпроводящее состояние и показано, как изменяется при этом параметр порядка. Таким изменения должны влиять на спин-резонансный пик в магнитной восприимчивости, однако, этот вопрос автором не обсуждается. Данное замечание носит, скорее, характер пожелания для будущих исследований.
5. Из рисунка 8.6 видно, что экспериментально наблюдаемые резкие изменения хода зависимости коэффициента Холла от допирования лежат в области дальнего магнитного порядка. В этой области теория, изложенная в восьмой главе, неприменима. Интересным развитием изложенной теории

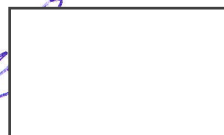
было бы вычисление кинетических коэффициентов при наличии магнитного порядка. Это тоже пожелание для будущих исследований.

Сделанные замечания не умаляют достоинств и научной значимости диссертации М.М. Коршунова. Его работы опубликованы в ведущих мировых и российских журналах и доложены на ведущих международных и российских конференциях по тематике диссертации. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация М.М. Коршунова является законченной работой, обладающей очень высокой научной значимостью. Совокупность положений диссертации М.М. Коршунова можно квалифицировать как новое крупное достижение в развитии теории сверхпроводимости многозонных систем. Работа полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения научным работникам учёных степеней» для докторских диссертаций, паспорту специальности «Физика конденсированного состояния (01.04.07)», а ее автор, Коршунов Максим Михайлович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07.

Официальный оппонент
Заведующий кафедрой физики
Сибирского государственного
технологического университета
д.ф.-м.н., профессор,

660049, г. Красноярск, пр. Мира, д. 82
Телефон: (391) 227-39-25
e-mail: fait@sibgtu.ru



Ю.В. Захаров

Участный секретарь Ч
ФРБ ОУ ВПО, СибГТУ
17.03.2016



А.И. Кривонозова

Список публикаций по теме диссертации:

**ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛИННОГО ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО
ПЕРЕХОДА ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЧЕРЕЗ НЕГО ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Уваев И.В., Захаров Ю.В., Юшкова О.Г.

Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. 2011. Т. 4.
№ 3. С. 393-399.

**TWO-THRESHOLD STABILITY LOSS IN MAGNETIC SYSTEM WITH NONMAGNETIC
INTERLAYER**

Zakharov Yu.V., Avakumov R., Vlasov A.Yu.

Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena. 2011. Т. 168-169. С. 321-324.

**ПРОДОЛЬНОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ МУЛЬТИСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ
СИСТЕМЫ С НЕМАГНИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ**

Захаров Ю.В., Власов А.Ю., Авакумов Р.В.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика
М.Ф. Решетнева. 2010. № 2. С. 15-18.

**АНАЛОГИЯ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ОБМЕННО-СВЯЗАННОЙ МАГНИТНОЙ
СТРУКТУРЫ И ИЗГИБА УПРУГОГО СТЕРЖНЯ СО СЖАТИЕМ**

Захаров Ю.В., Исакова В.В., Охоткин К.Г.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика
М.Ф. Решетнева. 2009. № 2. С. 122-125.

**УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ
НАГРУЗКИ**

Захаров Ю.В., Никулин А.К., Филенкова Н.В., Власов А.Ю.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика
М.Ф. Решетнева. 2013. № 3. С. 32-36.

**ТОНКАЯ КРУГОВАЯ ПЛАСТИНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАВНОМЕРНО
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА**

Захаров Ю.В., Охоткин К.Г., Пашковский А.В., Скоробогатов А.Д., Уваев И.В.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика
М.Ф. Решетнева. 2013. № 3. С. 37-40.

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО ОБОДА
БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ГИБКИМИ КОМПОЗИТНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

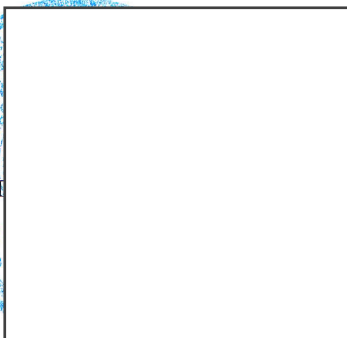
Лопатин А.В., Захаров Ю.В., Охоткин К.Г., Вильянен В.В., Пашковский А.В.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика
М.Ф. Решетнева. 2012. № 5 (45). С. 75-80.

Д. ф.-м. н., профессор,

Список верен:

Ученый секретарь Ученого совета



Ю.В. Захаров

А.И. Криворотова