

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.055.02 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ИМ. Л.В. КИРЕНСКОГО СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФ СО РАН), ФАНО,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 3 апреля № 4

О присуждении Коршунову Максиму Михайловичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Исследование связи магнетизма и необычной сверхпроводимости в многоорбитальных моделях слоистых соединений переходных металлов» по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 25 декабря 2014 г., протокол № 16 диссертационным советом Д 003.055.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН), ФАНО. 660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38, приказ Минобрнауки России №714/НК от 2 ноября 2012 г.

Соискатель Коршунов Максим Михайлович 1979 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Свойства нормальной и сверхпроводящей фаз в синглет-триплетной модели оксидов меди» защитил в 2004 году, в диссертационном совете, созданном на базе ИФ СО РАН. Работает старшим научным сотрудником в ИФ СО РАН (ФАНО). Диссертация выполнена в лаборатории физики магнитных явлений ИФ СО РАН. С 01.04.2013 г. по 03.04.2015 г. был прикреплен к докторантуре ИФ СО РАН. Научный консультант – доктор физико-математических наук Овчинников Сергей Геннадьевич, ИФ СО РАН, зам. директора по научной работе, зав. лабораторией физики магнитных явлений.

Официальные оппоненты: *Садовский Михаил Виссарионович* – д.ф.-м.н., академик РАН, зав. лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук; *Еремин Михаил Васильевич* – д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Федерального государственного

ного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»; *Захаров Юрий Владимирович* – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет» дали положительные отзывы.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Пудаловым Владимиром Моисеевичем – д.ф.-м.н. профессор, гл. научн. сотр. отдела высокотемпературной сверхпроводимости и сверхпроводниковых наноструктур указала, что М.М. Коршунов в своей диссертационной работе провел глубокие и обширные теоретические исследования, сочетая их с глубокой интерпретацией имеющихся экспериментальных данных. Теоретические результаты автора не только объяснили многие казавшиеся загадочными экспериментальные результаты, но и послужили стимулом для постановки новых экспериментов по проверке теоретических предсказаний автора. Последнее обстоятельство делает диссертационную работу особенно ценной для экспериментаторов в данной области.

Соискатель имеет 58 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 36 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, 34 работ, среди которых *Physical Review Letters*, *Physical Review B*, *Reports on Progress in Physics*, *Успехи физических наук*, *ЖЭТФ* и *Письма в ЖЭТФ*. Общий объём 35 усл.-печ.л. Они представляют большую научную ценность, поскольку делают необходимые шаги на пути выяснения природы высокотемпературной сверхпроводимости. Наиболее значительные работы:

1. Korshunov M. M., Efremov D. V., Golubov A. A., Dolgov O. V. Unexpected impact of magnetic disorder on multiband superconductivity // *Phys. Rev. B*. 2014. Vol. 90. P. 134517
2. Коршунов М. М. Сверхпроводящее состояние в соединениях железа и спин-флуктуационная теория спаривания // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184, № 8. С. 882–888;
3. Cao G., Korshunov M. M., Gao Y. et al. Anomalous In-Plane Electronic Scattering in Charge Ordered  $\text{Na}_{0.41}\text{CoO}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$  // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108. P. 236401.

4. Maiti S., Korshunov M. M., Chubukov A. V. Gap symmetry in  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  and the  $\cos 4\theta$  gap component in  $\text{LiFeAs}$  // *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 85. P. 014511.
5. Hirschfeld P. J., Korshunov M. M., Mazin I. I. Gap symmetry and structure of Fe-based superconductors // *Reports on Progress in Physics*. 2011. Vol. 74, P. 124508.
6. Maiti S., Korshunov M. M., Maier T. A. et al. Evolution of the Superconducting State of Fe-Based Compounds with Doping // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107. P. 147002.
7. Efremov D. V., Korshunov M. M., Dolgov O. V. et al. Disorder-induced transition between  $s_{\pm}$  and  $s_{++}$  states in two-band superconductors // *Phys. Rev. B*. 2011. Vol. 84. P. 180512.
8. Kemper A. F., Korshunov M. M., Devereaux T. P. et al. Anisotropic quasiparticle lifetimes in Fe-based superconductors // *Phys. Rev. B*. 2011. Vol. 83, P. 184516.
9. Korshunov M. M., Eremin I., Efremov D. V. et al. Nonanalytic Spin Susceptibility of a Fermi Liquid: The Case of Fe-Based Pnictides // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102, P. 236403.
10. Иванова Н. Б., Овчинников С. Г., Коршунов М. М. и др. Особенности спинового, зарядового и орбитального упорядочений в кобальтитах // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179, № 8. С. 837–860.
11. Овчинников С. Г., Коршунов М. М., Шнейдер Е. И. Квантовые фазовые переходы Лифшица и перестройка Ферми-поверхности с изменением концентрации дырок в высокотемпературных сверхпроводниках // *ЖЭТФ*. 2009. Т. 136, № 5. С. 898–909.
12. Korshunov M. M., Eremin I. Theory of magnetic excitations in iron-based layered superconductors // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 78, P. 140509.
13. Parker D., Dolgov O. V., Korshunov M. M. et al. Extended  $s_{\pm}$  scenario for the nuclear spin-lattice relaxation rate in superconducting pnictides // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 78, P. 134524.
14. Korshunov M. M., Ovchinnikov S. G. Doping-dependent evolution of low-energy excitations and quantum phase transitions within an effective model for high- $T_c$  copper oxides // *The European Physical Journal B*. 2007. Vol. 57, Pp. 271–278.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

*Ведущая организация* – отзыв положительный. Замечания: 1. В главе 3 тенденция к ферромагнетизму  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  при низких температурах получила два объяснения, в двух альтернативных предположениях. К сожалению, автор не об-

суждает и не предлагает таких экспериментов, которые могли бы пролить свет на имеющуюся неоднозначность толкования. 2. В главе 4, раздел 4.3, написано, что результаты теоретического анализа согласуются с экспериментальными данными по ЯКР. Однако экспериментальные данные не приведены на рисунках этой главы и обсуждаются только словесно. 3. В главе 5 автор сопоставляет теоретически вычисленную динамическую спиновую восприимчивость с резонансом неупругого рассеяния нейтронов в ферропниктидах. Для сравнения оба значения энергии нормируются на величину щели  $2\Delta$ . Расчетная зависимость в  $s+$ -модели имеет пик на частоте  $\omega/2\Delta=0.75$  (Рис. 5.7). В экспериментальной работе Иносова и др. [319] от 2010 г. при нормировании приняты устаревшие значения щели для  $\text{BaCoFeAs}$ , равные 12 мэВ по измерениям 2009 г. и сообщается  $\omega/2\Delta=0.75$ , казалось бы, в хорошем согласии с теорией. С тех пор, однако, значения щели для ферропниктидов были неоднократно перемерены и, например, согласно работе [M. Abdel-Hafiez et al., Phys. Rev. B **90**, 054524 (2014)] для большой щели в 122-ферропниктидах  $\Delta_L=6-8$  мэВ. Т.о., по современным данным согласие теории с экспериментом хуже, но это в диссертации не обсуждается. 4. В главе 8 рассматриваются зависимости холловского коэффициента от температуры и допирования. К сожалению,  $R_H(T)$  не сопоставляется с имеющимися экспериментальными данными, а  $R_H(x)$  сравнивается с экспериментальными данными лишь для  $x>0$ . Сделанные замечания, однако, носят скорее характер пожеланий для развития теоретических исследований автора. *Садовский М.В. (оппонент)* – отзыв положительный. Замечания: 1. В главе 7, при обсуждении линейной по температуре зависимости магнитной восприимчивости ферропниктидов, автор не упоминает имеющиеся в литературе альтернативные объяснения такой зависимости, связанные не с антиферромагнитными флуктуациями, а с особенностями электронной структуры этих систем (работы Анисимова, Катанина, Скорнякова и Фолльхардта). 2. При обсуждении времени жизни квазичастиц в главе 8 автор совершенно не упоминает возможную роль фононов, которые, с очевидностью, также играют роль при определении температурных зависимостей затухания и кинетических коэффициентов. 3. В главе 9 утверждается, что эксперименты по разупорядочению сыграли решающую роль при определении симметрии сверх-

проводящего параметра порядка в купратах. Это конечно не так, тут основную роль сыграли чувствительные к изменению фазы эксперименты джозефсоновского типа, а роль разупорядочения в купратах остается не до конца понятной даже в настоящее время. Замечу, что из обсуждения имеющихся экспериментов по разупорядочению в этой главе, становится ясным, что автор не знаком с работами по разупорядочению быстрыми нейтронами (Гощицкий, Карькин и др.), которые обеспечивают контролируемое разупорядочение образцов без изменения химического состава (что является основной трудностью при обычном введении примесей). Отмеченные недостатки не снижают высокое научное качество работы. В целом, диссертация М.М. Коршунова представляет собой вполне завершенное и оригинальное научное исследование, решающее крупные научные проблемы, связанные с изучением широкого круга физических явлений в новых сверхпроводниках. Эта работа существенным образом развивает новое научное направление, связанное с теоретическим описанием сверхпроводимости в многозонных системах. *Еремин М.В. (оппонент)* – отзыв положительный. Замечания:

1. На стр. 211, для обсуждения особенностей ядерной релаксации двухзонного сверхпроводника, приведена формула (9.13). В ней смущает отсутствие явной симметрии относительно перестановки индексов зон. Лучше бы было воспользоваться формулой с четко выраженной симметрией, например, из книги Шриффера «Теория сверхпроводимости», стр. 85, формула (3.28).
2. По всему тексту диссертации, при обсуждении ядерной спин-решеточной релаксации, не указано о каких ядрах идет речь. Вероятно, молчаливо предполагается, что формфакторы, связывающие поле электронных спинов с ядерными, не зависят от волновых векторов. В купратах эффект формфакторов очень важен. Так, например, температурные зависимости ядерной релаксации меди, кислорода и иттрия в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  сильно отличаются. Будучи в различных позициях кристаллической решетки эти ядра из-за различия в формфакторах по-разному «видят» подсистему коллективизированных спинов и тем самым методом ЯМР удается получить дополнительную информация о динамической спиновой восприимчивости.
3. При обсуждении роли примесей (стр. 23 автореферата и на стр. 224 диссертации) имеются странные термины; «межзонные немагнитные примеси» и «межзонные

магнитные примеси». Замечания не умаляют достоинств диссертационной работы. Проведенное исследование следует классифицировать как крупное достижение в физике конденсированного состояния.

*Захаров Ю.В. (оппонент)* – отзыв положительный. Замечания: 1. Полученные в методе LDA+GTV 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 немонотонное 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 пожелание для будущих исследований. 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.

*д.ф.-м.н. Голубов А.А.* – отзыв положительный. Замечание: хотя в работе и исследованы отдельно случаи влияния немагнитных или магнитных примесей на сверхпроводящее состояние в двузонной модели, не рассмотрен наиболее интересный случай наличия одновременно и магнитной и немагнитной составляющих потенциала примесного рассеяния. Такой потенциал обоснован с физической точки зрения при исследовании рассеянии на магнитных примесях, по-

сколькo трудно себе представить парамагнитную примесь, не имеющую потенциального канала рассеяния. *д.ф.-м.н. Боярский Л.А.* – отзыв положительный.

Замечания: 1. автор утверждает, что в содержащих ионы железа сверхпроводниках в нормальном состоянии нет псевдощелевой фазы. Это не так, достаточно обратиться к недавно опубликованному обзору (А.А. Kordyuk. ArXiv: 1501.04154), в котором можно найти необходимые ссылки. 2. Следовало бы более осторожно говорить об обнаруженных автором квантовых фазовых переходах в купратах. Прежде всего, все ВТСП-вещества нестехиометричны и поэтому неоднородны. В этом случае говорить о точке перехода, в общем-то, некорректно. Примерно 15 лет назад в литературе обсуждался вопрос о размазанных переходах (их принято называть кроссоверными) между разными ортофазами в псевдощелевой области концентраций кислорода. Наверное, описанные диссертантом переходы связаны именно с этими превращениями. Обсуждение данного вопроса заглохло, поскольку, как тогда считалось, эти переходы к природе сверхпроводимости отношения не имели. 3. Представляется также некорректным использование термина «сверхпроводник на основе железа». Уместнее было бы писать о сверхпроводниках, содержащих ионы железа. Высказанные замечания не снижают общего положительного отношения к рецензируемой работе, а те из них, которые автор диссертации сочтет полезными, он учтет в дальнейшей научной деятельности. *д.ф.-м.н. Долгов О.В.* – отзыв положительный.

Замечание: в работе исследовано влияние статических немагнитных и магнитных примесей на сверхпроводящее состояние, но не уделено внимание вопросу неупругого рассеяния на магнитных примесях, рассмотренных ранее в однозонной модели в работе A.G. Kozorezov et al., Phys. Rev. B 78, 174501 (2008). Сделанное замечание не портит общего хорошего впечатления от проделанной работы и является, скорее, рекомендацией для будущих исследований.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организацией обосновывается тем, что они являются общепризнанными специалистами в физике конденсированного состояния, в частности, сверхпроводимости и магнетизма, что подтверждается большим количеством публикаций по теме диссертации в научных

журналах, а также способностью определить научную ценность представленной диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что в диссертации в рамках современного микроскопического подхода выявлена роль магнетизма в формировании свойств нормальной и сверхпроводящей фаз слоистых соединений переходных металлов, и на основании выполненных соискателем исследований:

1. Получены параметры эффективных низкоэнергетических моделей ВТСП купратов р-типа и n-типа. Обнаружены переходы Лифшица с изменением топологии поверхности Ферми при изменении допирования.
2. Найдена эволюция магнитного отклика с допированием и в приближении Гутцвиллера выяснено влияние сильных электронных корреляций в эффективной многозонной модели кобальтитов  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ .
3. Получена динамическая спиновая восприимчивость в сверхпроводящем слоистом кобальтите  $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$  в трёх различных моделях.
4. Предсказано возникновение спинового резонанса в неупругом рассеянии нейтронов при наличии  $s_{\pm}$ -симметрии параметра порядка в сверхпроводниках на основе железа.
5. В рамках теории магнетизма коллективизированных электронов предложено описание магнитных свойств пниктидов  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ : температурной зависимости параметра порядка состояния волны спиновой плотности; магнитного момента, приходящегося на атом Fe; зависимости температуры Нееля от допирования.
6. Установлено, что экспериментально наблюдаемая линейная температурная зависимость однородной спиновой восприимчивости в пниктидах обусловлена наличием эффектов, связанных с неаналитическими поправками в двумерной ферми-жидкости и определяется квадратом амплитуды рассеяния фермионов в канале волны спиновой плотности.
7. Предложено качественное объяснение наблюдаемой зависимости постоянной Холла и проводимости от допирования в пниктидах  $\text{Ba}(\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  и  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  при учёте неупругого динамического рассеяния квазичастиц на спиновых и зарядовых флуктуациях в пятиорбитальной модели соединений железа с локальным кулоновским взаимодействием.

8. Найден переход из  $s_{\pm}$ - в  $s_{++}$ -состояние по степени беспорядка в двухзонной модели пниктидов при рассеянии на немагнитных примесях и переход из  $s_{++}$ - в  $s_{\pm}$ -состояние при рассеянии на магнитных примесях, что приводит к конечному значению  $T_c$ , практически не зависящему от параметра рассеяния на примесях.

9. Описана сверхпроводящая фазовая диаграмма соединений железа на основе спин-флуктуационной теории сверхпроводящего спаривания и приближения главных угловых гармоник и установлено, какое именно взаимодействие на ферми-поверхности доминирует при различных уровнях допирования.

*Теоретическая значимость* исследования обусловлена тем, что:

оно вносит вклад в понимание роли магнетизма в формировании свойств нормальной и сверхпроводящей фаз слоистых соединений переходных металлов. В рамках единого подхода подробно изучено влияние магнитных возбуждений на низкоэнергетическую физику купратов, слоистых кобальтитов, пниктидов и халькогенидов железа. Изложены элементы теории многозонных и многоорбитальных подходов, которые результативно используются автором. Данное исследование является необходимым шагом на пути построения теории высокотемпературной сверхпроводимости в многозонных системах. Результаты могут служить основой для построения новых теоретических подходов.

*Значение полученных результатов для практики* подтверждается тем, что:

в работе активно обсуждаются различные экспериментальные результаты, выдвигаются новые теоретические предсказания, которые могут быть стимулом для постановки новых экспериментов, что делает диссертационную работу особенно ценной для экспериментаторов в области высокотемпературной сверхпроводимости.

*Оценка достоверности результатов* выявила:

Теория базируется на применении методов, широко апробированных для изучения ферми-жидкостных систем и систем с сильными корреляциями, использованы обоснованные физические приближения, установлено согласие результатов работы с результатами других авторов и экспериментальными данными.

*Личный вклад соискателя:*

Автор лично принимал участие в постановке всех задач, разработке моделей и методов их решения, анализе и интерпретации полученных результатов. Ос-

новная часть численных расчётов, а также разработка и тестирование программ, выполнены лично автором или при его непосредственном участии. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим для статей, включенных в диссертацию. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

На заседании 03 апреля 2015 г. диссертационный совет принял решение присудить Коршунову М.М. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и 9 докторов наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель  
диссертационного совета Д 003.055.02  
д.ф.-м.н., академик РАН

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.055.02  
д.ф.-м.н., с.н.с.

7 апреля 2015 г.

