

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н.Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, В-333

Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429

(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880

<http://www.lebedev.ru>

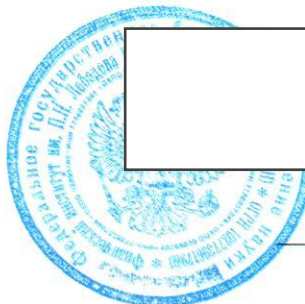
postmaster@lebedev.ru

Дата

№

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИАН



Г.А. Месяц

20.03 2015г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу

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 1.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа М. М. Коршунова посвящена теоретическому исследованию взаимосвязи магнитного упорядочения и сверхпроводящего спаривания в слоистых соединениях переходных металлов таких как купраты, пниктиды, халькогениды и кобальтиты. Диссертация объемом в 345 страницы состоит из *Введения*, десяти *Главы*, *Заключения* и *Списка цитированной литературы* (474 наименования), включающего список основных публикаций автора. По материалам исследований автором опубликовано 36 научных работ в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, включая две статьи в рецензируемых журналах - трудах конференций. Основные результаты многократно представлялись автором на отечественных и международных научных форумах, а также докладывались на семинарах в ведущих Российских научных организациях.

Общая характеристика диссертации. Темой диссертационной работы является влияние сосуществование, конкуренция и взаимосвязь магнетизма и сверхпроводимости в соединениях переходных металлов в кобальтитах, оксидах меди, ферропниктидах и халькогенидах. Эта тематика в течение последних 30 лет привлекает пристальное внимание исследователей в связи с нерешенной проблемой высокотемпературной сверхпроводимости. Особую актуальность она приобрела в связи с открытием в 2008г. нового класса высокотемпературных сверхпроводников на основе ферропниктидов.

Объектами исследования в диссертационной работе являются различные многокомпонентные соединения, изучаемые экспериментально. Автор разработал обобщенный метод сильной связи (LDA+GTB) для численных расчетов электронной структуры сильно-коррелированных систем. Применяя этот метод к купратам в режиме сильных корреляций автор получил зависимости зонной структуры и поверхности Ферми от допирования п- и р-типа. Для недавно открытых кобальтитов $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ Коршуновым исследована эволюция магнитных свойств с допированием и связь электронного магнетизма с топологией поверхности Ферми. Для сверхпроводящего состояния $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ автором изучено влияние симметрии параметра порядка и электронной структуры на динамическую спиновую восприимчивость. Для сверхпроводящих ферропниктидов автор изучил динамический спиновый отклик в многозонном приближении для различных типов симметрии параметра порядка и сопоставил теоретические результаты с экспериментальными данными по рассеянию нейтронов. В рамках двухзонной модели им исследована статическая спиновая восприимчивость и объяснена ее наблюдаемая температурная зависимость как следствие неаналитических Ферми-жидкостных поправок. Особенно подробно Коршуновым изучены вопросы динамического рассеяния квазичастиц на спиновых и зарядовых флуктуациях в ферропниктидах и объяснены различия в транспорте электронно- и дырочно- легированных соединений.

В *Главе 1* приведен подробный обзор имеющихся в литературе данных по тематике диссертации, охватывающий всю рассматриваемую область исследований –зарядовое и спиновое упорядочения, псевдощелевое состояние, электрон-электронные корреляции, динамику квазичастиц, влияние допирования, симметрию параметра порядка, различные механизмы сверхпроводящего спаривания. Приведены основные сведения о рассматриваемых в диссертации объектах исследований - ВТСП купратах, кобальтитах, ферропниктидах и халькогенидах. Немаловажно, что в этом обзоре автор анализирует достоверность и согласованность экспериментальных и теоретических результатов, а также возможности и ограничения различных методов вычислений. Приведена сводка экспериментальных данных по разным материалам. В части теории подробно описан разработанный автором обобщенный метод сильной связи (GTB), а также гибридный метод LDA+GTB для численных расчетов электронной структуры сильно-коррелированных систем.

В *Главе 2* рассмотрена зависящая от допирования зонная структура купратов и фазовые переходы с изменением поверхности Ферми. Здесь метод LDA+GTB применен для описания спин-жидкостной парамагнитной несверхпроводящей фазы в р- и п-типа ВТСП купратах, в т.ч. для расчета параметров низкоэнергетических эффективных моделей для недопированных соединений La_2CuO_4 дырочного типа, также Nd_2CuO_4 и Sm_2CuO_4 электронного типа. В р-типе купратов обнаружены два квантовых фазовых перехода с изменением поверхности Ферми (переходы Лифшица) в обобщённом приближении среднего поля, учитывающем рассеяние на спиновых флуктуациях. Установлено, что развитая автором теория ухватывает наиболее важную часть низкоэнергетической физики в рассматриваемой модели купратов. Это утверждение подкрепляется качественным согласием теории с наблюдаемыми в экспериментах критическими концентрациями

кроссоверов, а также качественным согласием с наблюдаемыми зависимостями от допирования Ферми-скорости и эффективной массы. Автор использует теорию среднего поля, которая, казалось бы, плохо применима для описания локализованных состояний, однако в применяемый метод включены (необходимые для описания ВТСП купратов) сильные электронные корреляции, спиновые флуктуации (ближний магнитный порядок) и трёхцентровые перескоки. Межэлектронные корреляции и спиновые флуктуации являются неотъемлемыми свойствами купратов, которые имеют дальний магнитный порядок при малых уровнях допирования и диэлектрическое состояние в недопированном случае.

В *Главе 3* описаны результаты теоретического анализа эволюции магнитного отклика с допированием в кобальтитах $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ с помощью полученной эффективной многозонной модели. Влияние сильных электронных корреляций рассмотрено в приближении Гутцвиллера. Фазовая диаграмма кобальтитов качественно объяснена в модели коллективизированных электронов с учётом зависящего от допирования изменения топологии Ферми-поверхности. Здесь автору удалось объяснить наблюдаемую в эксперименте трансформацию с концентрацией от АФМ упорядочения и АФМ флуктуаций к ферромагнитным флуктуациям. Этот переход объяснен возникновением при увеличении электронной концентрации локального минимума в дисперсии в районе Γ -точки и электронного кармана малого радиуса.

В *Главе 4* в рамках трех моделей рассмотрена спиновая восприимчивость в сверхпроводящей фазе кобальтитов $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$. В этих соединениях пока нет ясности с симметрией параметра порядка. Магнитный отклик в нормальной фазе определяется несоизмеримыми флуктуациями волны спиновой плотности на больших импульсах, близких к $QAFM$. В сверхпроводящем состоянии на основе температурной зависимости сдвига Найта и времени спин-решеточной релаксации сделан вывод в пользу d -симметрии параметра порядка. Полученные результаты не подтверждают предсказанную ранее возможность существования спин-резонансного пика в динамической восприимчивости.

В *Главе 5* рассмотрен спин-резонансный пик в неупругом рассеянии нейтронов в ферропниктидах. На основе сформулированной эффективной 4-зонной модели пниктидов проанализирован спиновый отклик в сверхпроводящем состоянии. Резонансный пик естественным образом возникает на антиферромагнитном волновом векторе при $\pm\pi$ типе симметрии. Его наблюдение в экспериментах по рассеянию нейтронов является главным свидетельством в пользу такого типа симметрии. Динамическая спиновая восприимчивость исследовалась автором в 4-зонной модели, а для проверки справедливости полученных выводов была также изучена в 5-орбитальной модели.

В *Главе 6* исследовался спиновый отклик в нормальном состоянии ферропниктидов в зависимости от допирования. В рамках 4-зонной модели показано как переход в состояние соизмеримой волны спиновой плотности исчезает с допированием при критической концентрации $x=0.04$. Теоретически воспроизведены согласующиеся с экспериментом значение температуры T_{SDW} , температурная зависимость $\Delta_{SDW}(T)$, а также величина магнитного момента на железе.

В *Главе 7* наблюдаемая в эксперименте в пниктидах сильная линейная температурная зависимость статической спиновой восприимчивости $\chi(T)$ объяснена с помощью неаналитических перенормировок в двумерной Ферми жидкости. Из-за близости SDW неустойчивости, амплитуда волны спиновой плотности, связывающей дырочные и электронные карманы велика, что, вместе с малым значением энергии Ферми, приводит к сильной температурной зависимости $\chi(T)$. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В *Главе 8* изучается эффект Холла и изменение его знака в ферропниктидах, связанное с динамикой рассеяния квазичастиц. Температурная зависимость транспорта определяется рассеянием квазичастиц на спиновых флуктуациях, которое может быть существенно анизотропно. Рассеяния в недопированных и электронно-допированных системах меньше вследствие малого фазового пространства. Анизотропия рассеяния имеет важные следствия для транспортных свойств пниктидов. Автором рассмотрены несколько факторов, которые вместе дают экспериментально наблюдаемую в транспорте электрон-дырочную асимметрию.

В *Главе 9* изучено влияние магнитного и немагнитного беспорядка на свойства сверхпроводников с различными типами симметрии параметра порядка. Для немагнитных примесей воспроизведен очевидный результат - исчезновение T_c с интенсивностью рассеяния в $s_{\pm}$ сверхпроводниках. Помимо этого получено неожиданное решение, в котором T_c остается конечной, а тип симметрии меняется от $s_{\pm}$ в s_{++} . При рассеянии магнитными примесями предсказано сохранение конечной T_c для $s_{\pm}$ типа симметрии. Этот вывод согласуется с более ранними результатами, полученными в рамках менее обоснованных приближений. При трансформации типа симметрии предсказано возникновение интересного бесщелевого сверхпроводящего состояния, которое еще экспериментально не обнаружено.

В *Главе 10* исследуется трансформация симметрии и структуры сверхпроводящей щели при изменении допирования в ферропниктидах. На основе полученных результатов построена фазовая диаграмма для соединений железа, объясняющая изменение симметрии параметра порядка и изменение Ферми поверхности с типом допирования.

Продолжая традиции школы проф. С.Г. Овчинникова М.М. Коршунов в своей диссертационной работе по всем перечисленным направлениям провел глубокие и обширные теоретические исследования, сочетая их с глубокой интерпретацией имеющихся экспериментальных данных. Важным достоинством диссертации Коршунова является постоянное сопоставление полученных теоретических результатов с экспериментальными. Замечательная особенность диссертации состоит в разнообразии сложных современных теоретических подходов, дополняющих друг друга, и их выбор исходя из физики конкретных изучаемых соединений. 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. Достоверность полученных в работе результатов гарантируется разнообразием применявшихся методов вычислений, сопоставлением результатов полученных в различных приближениях, сопоставлением с теоретическими результатами, полученными в других работах, и согласием с имеющимися экспериментальными данными.

Некоторые замечания, которые можно сделать по тексту диссертации:

1. В подписях ко многим рисункам (например, 3.3, 3.4, 3.6, 3.8, 3.9, 4.1) не даны ссылки на статьи, в которых автором опубликованы соответствующие результаты, что затрудняет оценку приоритета результатов.
2. В обзоре литературы обсуждается сложная структура энергетического спектра купратов и его эволюция с допированием, но, к сожалению, не приведены рисунки поясняющие эволюцию спектра.
3. 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 обсуждает и не предлагает таких экспериментов, которые могли бы пролить свет на имеющуюся неоднозначность толкования.
4. 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.
5. 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 2Δ . 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 2010г. при нормировании приняты устаревшие значения щели для BaCoFeAs , равные 12мэВ по измерениям 2009г. 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 $\Delta_L=6\text{--}8\text{мэВ}$. Т.о., по современным данным согласие теории с экспериментом хуже, но это в диссертации не обсуждается.
6. 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 $x>0$.

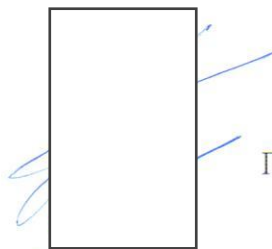
Эти замечания, однако, носят скорее характер пожеланий для развития теоретических исследований автора. Они нисколько не умаляют общей высокой оценки диссертации, представляющей собой выдающееся теоретическое исследование, открывающее новое направление в исследовании физики магнетизма и сверхпроводимости. Результаты работы могут быть использованы и частично уже используются в ведущих научных организациях, таких как Физический институт им. П. Н.

Лебедева РАН, ИФП им. П.Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, Институт физики микроструктур РАН, Институт физики металлов УрО РАН, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Основные результаты диссертации М.М. Коршунова были опубликованы в ведущих российских и иностранных научных журналах, включая Успехи физических наук, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Physical Review, Physical Review Letters, Reports on Progress in Physics, и докладывались на многих российских и международных конференциях.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Коршунова Максима Михайловича «Исследование связи магнетизма и необычной сверхпроводимости в многоорбитальных моделях слоистых соединений переходных металлов» является выдающимся научным исследованием, соответствующим по глубине содержания монографии. Диссертация полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составил
Гл. научн. сотр. ФИАН,
заведующий отделом
высокотемпературной сверхпроводимости
и сверхпроводниковых наноструктур
д.ф.-м.н.

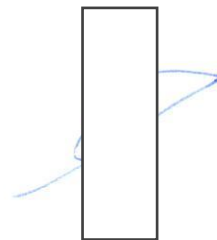


Пудалов В. М.

Отзыв был утвержден на заседании Ученого Совета ОФТТ ФИАН от 30 января 2015 года 2015 (протокол № 03/15).

Состав Ученого Совета	27 чел.
Присутствовали на заседании	20 чел.

Председатель Ученого совета ОФТТ,
Член-корр. РАН.



Н.Н. Сибельдин

Ученый секретарь,
к.ф.-м.н.



О.М. Иваненко

Физический



ИНСТИТУТ

имени

П.Н.Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, В-333

Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429

(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880

<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lebedev.ru

В диссертационный совет Д003.055.02
при ФГБУН Институте физики
им. Л.В. Киренского СО РАН

Дата 16.03.15 № 11220-92240977-271

На № 15306-03/2324 от 09.02.2015

Сообщаю список основных публикаций сотрудников ФИАН по тематике диссертации
М.М. Коршунова, опубликованных в рецензируемых изданиях за последние 5 лет.

1. Lower critical field and SNS-Andreev spectroscopy of 122-arsenides: Evidence of nodeless superconducting gap, M. Abdel-Hafiez, P. J. Pereira, S. A. Kuzmichev, **T. E. Kuzmicheva, V. M. Pudalov**, L. Harnagea, A. A. Kordyuk, A. V. Silhanek, V. V. Moshchalkov, B. Shen, Hai-Hu Wen, Xiao-Jia Chen, and A. N. Vasiliev, *Phys. Rev. B* **90**, 054524 (2014).
2. Magnetic flux creep in HTSC and Anderson- Kim theory, **N. Lykov**, *J. Low Temperature Physics* **40**, №9, 991 (2014).
3. Magnetic phase diagram and critical current of BaFe₂As₂ single crystals with hole- and electron-doping, **K Pervakov, V Vlasenko**, E Khlybov, **V Pudalov, Yu Eltsev**, *Journal of Physics Confer. Series*, **507(1)**, 012041 (2014). DOI:10.1088/1742-6596/507/1/012041
4. Магнитные и транспортные свойства кристаллов железосодержащих сверхпроводников семейств 122, **Ю.Ф.Ельцев, К.С.Перваков, В.А.Власенко, С.Ю.Гаврилкин, Е.П.Хлыбов, В.М.Пудалов**, *УФН* **184** (8) 897(2014)
5. Андреевская спектроскопия железосодержащих сверхпроводников: температурная зависимость параметров порядка и их скейлинг с T_c, **Т.Е.Кузьмичева, С.А.Кузьмичев, М.Г.Михеев, Я.Г.Пономарев, С.Н.Чесноков, В.М. Пудалов, Е.П.Хлыбов, Н.Д. Жигadlo**, *УФН* **184(8)**, 888 (2014)
6. Bulk magnetization and strong intrinsic pinning in Ni-doped BaFe 2As₂ single crystals, **K. S. Pervakov, V.A. Vlasenko**, E. P. Khlybov, A. Zaleski, **V.M. Pudalov, Yu. F. Eltsev** *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 015008.
7. Mossbauer Study of a New Superconductor GdOFeAs, N.Y. Korotkov, K.V. Frolov, I.S. Lyubutin, E.P. Khlybov, **V.M. Pudalov**, *J Supercond Nov Magn*, **26**, 2877, (2013). DOI 10.1007/s10948-013-2211-7
8. Спектроскопия многократных андреевских отражений сверхпроводящего LiFeAs: анизотропия параметров порядка и их температурное поведение, **С.А.Кузьмичев, Т.Е.Кузьмичева, А.И.Болталин, И.В.Морозов**, *Письма в ЖЭТФ* **98(11)**, 816-825 2013)
9. Experimental study of intrinsic multiple Andreev reflections effect in GdO(F)FeAs superconductor array junctions, **T.E. Kuzmicheva**, S.A. Kuzmichev, M.G. Mikheev, Ya.G. Ponomarev, S.N. Tchesnokov, **V.M. Pudalov, K.S. Pervakov, A.V. Sadakov, A.S. Usoltsev**, E.P. Khlybov, L.F. Kulikova, *Eur.Phys. Lett.* **102**, 67006 (2013).
10. Multigap Superconductivity in GdFeAsO_{0.88} Evidenced by SnS-Andreev Spectroscopy, **T.E. Shanygina**, S.A. Kuzmichev, M.G. Mikheev, Y.G. Ponomarev, S.N. Tchesnokov, **Y.F. Eltsev, V.M. Pudalov, A.V. Sadakov, A.S. Usol'tsev**, *J. Supercond. Nov. Magn.* **26**, 2661 -2665 (2013). DOI 10.1007/s10948-013-2155-y

11. Multiple Andreev Reflections Spectroscopy of Two-Gap 1111- and 11 Fe-Based Superconductors, Y.G. Ponomarev, S.A. Kuzmichev, **T.E. Kuzmicheva**, M.G. Mikheev, M.V. Sudakova, S.N. Tchesnokov, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev, **V.M. Pudalov**, **A.V. Sadakov**, **A.S. Usol'tsev**, T. Wolf, E.P. Khlybov, L.F. Kulikova, J. Supercond. Nov. Magn. **26**(9), 2867-2871 (2013). DOI 10.1007/s10948-013-2264-7
12. Temperature dependence of the upper critical field of FeSe single crystals **S. I. Vedeneev**, B. A. Piot, D. K. Maude, and **A. V. Sadakov**, Phys. Rev. B **87**, 134512 (2013).
13. Study of the Two-Gap Superconductivity in GdO(F)FeAs by ScS-Andreev Spectroscopy, **T.E. Shanygina**, Ya.G. Ponomarev, S.A. Kuzmichev, M.G. Mikheev, S.N. Tchesnokov, **O.E. Omel'yanovsky**, **A.V. Sadakov**, **Yu.F. Eltsev**, **V.M. Pudalov**, **A.S. Usol'tsev**, E.P. Khlybov, and L.F. Kulikova, J. of Physics: Conf. Ser. **391** (2012) 012138 doi:10.1088/1742-6596/391/1/012138.
14. S.A. Kuzmichev, **T.E. Shanygina**, I.V. Morozov, A.I. Boltalin, M.V. Roslova, S. Wurmehl, B. Büchner, Investigation of LiFeAs by means of "Break-junction" Technique, Письма в ЖЭТФ **95**, 604-610 (2012).
15. S.A. Kuzmichev, **T.E. Shanygina**, S.N. Tchesnokov, **S.I. Krasnosvobodtsev**, Temperature dependence of superconducting gaps in $Mg_{1-x}Al_xB_2$ system investigated by SnS-Andreev spectroscopy Sol.State Commun., **152** (2), 119-122 (2012). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2011.10.028>

Ученый секретарь ФИАН
к.ф.-м.н.



Иваненко О.М.