

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Комарова Константина Константиновича «Лондоновская глубина проникновения в ансамбле спин-поляронных квазичастиц в купратных высокотемпературных сверхпроводниках», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»

**Актуальность работы.** Диссертационное исследование Комарова К.К. посвящено изучению особенностей температурной зависимости лондоновской глубины проникновения в купратных высокотемпературных сверхпроводниках в рамках спин-поляронной концепции. Несмотря на то, что купратные сверхпроводники исследуются уже на протяжении нескольких десятилетий, до сих пор не ясными остаются ряд вопросов и наиболее важный из них связан с механизмом купровской неустойчивости в этих соединениях. В работе соискатель убедительно показывает, что наблюдаемые экспериментально особенности температурной зависимости лондоновской глубины, хорошо воспроизводятся теоретической кривой, рассчитанной в рамках концепции спинового полярона. Важно отметить, что указанные особенности не имеют однозначного объяснения, и поэтому тема исследования Комарова К.К. безусловно является своевременной и актуальной.

Диссертации состоит из введения, обзорной главы, трех оригинальных глав, заключения и двух приложений. Общий объем работы составляет 116 страниц, включая 18 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 198 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель и задачи работы, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, отмечается новизна и практическая ценность полученных результатов и личный вклад автора. Приведены сведения об апробации результатов. Представлен список работ, опубликованных автором по теме диссертации.

**В первой главе** приводится обзор современного состояния исследований купратных ВТСП. Обсуждаются особенности электронного строения этих соединений, приводящие к возникновению сильных электронных корреляций, которые и являются причиной нетривиальных свойств в купратах. Проанализированы различные популярные теоретические модели, учитывающие эти корреляции с высокой точностью. Приводится эффективная спин-фермионная модель, на основе которой в предшествующих работах была развита концепция спин-поляронной квазичастицы высокотемпературной сверхпроводимости купратов. Отдельное внимание уделяется достижениям этой концепции. В конце главы, как и рекомендовано ВАК, конкретизируются задачи исследования.

Вх.№287-03/08-64

от 02.12.2020

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке подхода для расчета отклика спин-поляронных квазичастиц на слабое магнитное поле в сверхпроводящей фазе. Обсуждаются известные теоретические подходы к описанию температурной зависимости лондоновской глубины проникновения. Обосновывается необходимость в разработке предложенного подхода. Вычисляется выражение для сверхпроводящей плотности тока ансамбля спин-поляронных квазичастиц в поле векторного потенциала магнитного поля. Резюмируются достоинства и особенности разработанного подхода и полученного выражения.

**В третьей главе** рассчитывается и анализируется температурная зависимость лондоновской глубины проникновения в купратных ВТСП в рамках разработанного на основе спин-поляронной концепции подхода. Впервые установлено, что основной вклад в выражение для плотности сверхтока обусловлен только одним слагаемым, которое пропорционально параметру спин-фермионной связи  $J$ . В области оптимального легирования, 17%, на теоретически рассчитанной температурной зависимости обратного квадрата лондоновской глубины проявляется наблюдаемая экспериментально точка перегиба. Впервые показано, что причина возникновения этой точки перегиба заключается в особенности спин-поляронного спектра, характеризующегося дырочным карманом на поверхности ферми.

**Четвертая глава** диссертации посвящена исследованию влияния кулоновского взаимодействия на лондоновскую глубину проникновения в рамках разработанного во второй главе подхода. При вычислении функций Грина, необходимых для расчета термодинамических средних, входящих в выражение для сверхпроводящей плотности тока, аналитически показано, что функция  $|\Delta_k|^2$ , описывающая щель боголюбовских возбуждений в ансамбле спин-поляронных квазичастиц, выражается в виде суммы квадратов модулей амплитуд, определяющих вклад в куперовское спаривание от каждой пары базисных операторов. Показано, что учет кулоновского взаимодействия в спин-поляронном подходе не приводит к функциональному изменению температурной зависимости лондоновской глубины проникновения. Рассчитанные температурные зависимости обратного квадрата лондоновской глубины в диапазоне легирования от 15% и до 22% включительно хорошо воспроизводят экспериментальные данные на  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

На защиту вынесено пять научных положений. Все выводы диссертации хорошо обоснованы, обладают несомненной практической новизной, не вызывают возражений и являются практически значимыми. В особенности объяснение механизма возникновения точки перегиба в температурной зависимости лондоновской глубины позволит стимулировать постановку соответствующих исследований не только в ВТСП медно-оксидной группы, но и в других системах с сильными электронными корреляциями.

Работа выполнена качественно и отражает высокий уровень теоретических исследований, диссертация имеет понятный и логичный язык изложения.

Однако по диссертации имеется ряд замечаний:

1. В обзорной главе диссертации, автор не раскрывает данные об экспериментальных работах по исследованию лондоновской глубины в купратных сверхпроводниках. Хотя именно здесь следовало бы подробно обсудить такую важную особенность температурной зависимости лондоновской глубины, как точка перегиба, объяснению которой в диссертации <sup>делается</sup> уделено особое внимание. Обсуждение этих данных делается только во введении главы 3. В связи с этим, сведения об экспериментальных данных кажутся недостаточными.
2. В третьей главе, в рамках концепции спинового полярона диссертант объясняет причину возникновения точки перегиба наличием особенностей спин-поляронного спектра, которые в режиме слабого легирования приводят к поверхности Ферми в виде дырочного кармана. Окрестности двух точек пересечения границы одного дырочного кармана и линии нулей параметра порядка дают конкурирующий вклад в интеграл, определяющий поведение лондоновской глубины как функции температуры и, как следствие, приводят к точке перегиба. Однако известно, что дальний от Г-точки зоны Бриллюэна край дырочного кармана в ARPES экспериментах не виден. Это связывают с подавлением спектрального веса этих состояний, например, процессами спин-флуктуационного рассеяния. Если учесть эти процессы, то один из конкурирующих вкладов будет существенно ослаблен и поведение кривой температурной зависимости глубины проникновения изменится. Останется ли после этого “точка перегиба” на теоретической кривой?

Приведенные замечания никак не снижают общий уровень научной работы и значимость полученных результатов диссертационного исследования. Высокий уровень диссертации подтверждается публикациями в престижных научных журналах, в которых опубликованы статьи диссертанта: *Physica Scripta* (2020), *Journal of Experimental and Theoretical Physics* (2019), *The European Physical Journal B* (2018). Результаты проведенных исследований представлялись в основном на международных конференциях. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

В целом диссертационная работа «Лондоновская глубина проникновения в ансамбле спин-поляронных квазичастиц в купратных высокотемпературных сверхпроводниках» является самостоятельным и законченным исследованием, выполненным соискателем на актуальную тему. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Комаров Константин Константинович, заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния».

Главный научный сотрудник  
лаборатории теоретической физики  
ФГБУН Института электрофизики  
Уральского отделения РАН,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН



Некрасов  
Игорь Александрович

Зам. Директора  
ФГБУН Института электрофизики  
Уральского отделения РАН,  
кандидат физико-математических наук



Кайгородов Антон  
Сергеевич



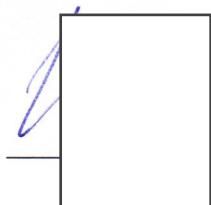
« 25 » 11 2020 г. МП

Сведения об оппоненте

Фамилия, имя, отчество оппонента	Некрасов Игорь Александрович
Ученая степень	Доктор физико-математических наук
Ученое звание	Член-корреспондент РАН
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация	01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»
Полное наименование организации места работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук
Структурное подразделение и должность	Лаборатория теоретической физики, главный научный сотрудник, член-корреспондент РАН
Индекс, почтовый адрес организации и места работы	620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
Телефон	+7 (343) 267-87-96
Адрес электронной почты	nekrasov@iep.uran.ru
Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций)	<p>9</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. GdFe<sub>2</sub> Laves phase intermetallic system under pressure: an ab-initio study / E. E. Kokorina, M. V. Medvedev, I. A. Nekrasov //Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1389, no. 1. — P. 012076.</li> <li>2. Effect of CuO<sub>2</sub> Lattice Strain on the Electronic Structure and Properties of High-T<sub>C</sub> Cuprate Family / I. A. Makarov, V. A. Gavrichkov, E. I. Shneyder, I. A. Nekrasov, A. A. Slobodchikov, S. G. Ovchinnikov, A. Bianconi / /Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. — 2019. — Vol. 32, no 7. — P. 1927–1935.</li> <li>3. Electronic band structure and superconducting properties of SnAs / P. I. Bezotosnyi, K. A. Dmitrieva, A. V. Sadakov, K. S. Pervakov, A. V. Muratov, A. S. Usoltsev, A. Yu. Tsvetkov, S. Yu. Gavrilkin, N. S. Pavlov, A. A. Slobodchikov, O. Yu. Vilkov, A. G. Rybkin, I. A. Nekrasov, and V. M. Pudalov</li> </ol>

- // Physical Review B. — 2019. — Vol. 100, no. 18. — P. 184514.
4. Consistent LDA'+ DMFT – an unambiguous way to avoid double counting problem: NiO test / I. A. Nekrasov, V. S. Pavlov, M. V. Sadovskii // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 2019. — Vol. 109, no 11. — P. 345–349.
  5. Hidden Fermi Surface in  $K_xFe_{2-y}Se_2$ : LDA + DMFT Study / I. A. Nekrasov, N. S. Pavlov // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 2018. — Vol. 108, no 9. — P. 623–626.
  6. Pressure-Induced Decrease in the Curie Temperature of  $Gd_2Fe_{17}$ : LSDA + U Calculations / P. A. Igoshev, E. E. Kokorina, M. V. Medvedev, I. A. Nekrasov // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2018. — Vol. 127, no 2. — P. 342–349.
  7. Electronic structure of FeSe monolayer superconductors: shallow bands and correlations / I. A. Nekrasov, V. S. Pavlov, M. V. Sadovskii // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2018. — Vol. 126, no. 4. — P. 485–496.

Главный научный сотрудник  
ФГБУН Института электрофизики  
Уральского отделения РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН



Некрасов  
Игорь Александрович

Зам. Директора  
ФГБУН Института электрофизики  
Уральского отделения РАН,  
кандидат физико-математических наук



Кайгородов Антон  
Сергеевич