

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Вадима Андреевича Шестакова “Влияние немагнитных примесей на сверхпроводящее состояние в многозонных моделях ферропниктидов”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

В диссертации В.А.Шестакова, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, приведены результаты исследований по ряду современных направлений теории сверхпроводимости. Прежде всего, речь идет о направлении, связанном с физикой интересного класса сверхпроводников на основе железа. Одной из отличительных особенностей данного класса соединений является существенно многозонный характер сверхпроводящего спаривания: сверхпроводящий параметр порядка возникает на нескольких отдельных листах поверхности Ферми. Такие многозонные сверхпроводники проявляют весьма интересные термодинамические и транспортные свойства и активно изучаются в последние годы как экспериментально, так и теоретически. При этом, разность фаз сверхпроводящих параметров порядка на разных листах поверхности Ферми вполне может быть отлична от нуля, и, в частности, может быть равна пи, что соответствует так называемому $s\pm$ типу спаривания. Существует целый ряд экспериментальных указаний на реализацию именно такого типа спаривания в сверхпроводниках на основе железа и в этом плане задача правильной интерпретации имеющихся экспериментов и поиска новых постановок эксперимента, чувствительного к разности фаз сверхпроводящего параметра порядка на различных листах поверхности Ферми, является очень **актуальной и своевременной**. Одним из способов верификации необычного типа спаривания мог бы служить эксперимент, в котором было бы возможно осуществить переключение разности сверхпроводящих фаз между различными частями поверхности Ферми. В качестве механизма такого управления сверхпроводящим состоянием в литературе рассматривается влияние упругого рассеяния электронов на немагнитных примесях. В случае, если такое рассеяние может перебрасывать импульсы электронов между различными листами зонной поверхности, знакопеременный параметр порядка будет подавляться за счет частичного усреднения при таком рассеянии и в результате энергетически выгодным может оказаться состояние с нулевой разностью фаз между сверхпроводящими параметрами порядка на различных листах поверхности Ферми. Таким образом, изменяя концентрацию немагнитных примесей в образце, экспериментатор получает возможность перестраивать структуру сверхпроводящего параметра порядка в пространстве квазимпульсов. Рассматриваемая диссертация содержит ряд **новых** интересных и **актуальных** теоретических разработок в данном направлении, связанных с влиянием беспорядка в многозонных сверхпроводниках. В целом, следует отметить, что значительная часть рассмотренных в диссертации задач может быть отнесена к «горячим темам» в физике конденсированных сред, что показывает **актуальность** результатов работы и ее **значимость**.

Для решения поставленных задач диссертации автор использовал в основном численные расчеты на основе метода функций Грина.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 95 страницах, включая 30 рисунков.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит краткое изложение основных фактов и обсуждение моделей для сверхпроводников на основе железа. Там приводится обзор литературы и дан ряд полезных формул, используемых далее в работе.

Вторая глава посвящена теоретическому расчету динамической спиновой восприимчивости многозонных сверхпроводников с различными знаками и амплитудами сверхпроводящих параметров порядка на разных листах поверхности Ферми. Теоретический анализ спин – резонансного пика (связанного со сдвигом фаз на пи между различными компонентами параметра порядка) в зависимости динамической спиновой восприимчивости от частоты обобщен на случай различных амплитуд сверхпроводящих параметров порядка. Данный анализ представляется важным для интерпретации экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов.

В **третьей главе** автор представляет подробный теоретический анализ фазовой диаграммы сверхпроводящих состояний при изменении характеристик упругого рассеяния на немагнитных примесях (сечения рассеяния, концентрации рассеивателей, соотношения внутризонного и межзонного рассеяния). Представленный автором детальный анализ поведения сверхпроводящего параметра порядка при изменении указанных характеристик рассеяния представляется **новым и оригинальным**.

В **четвертой главе** исследуется диамагнитный отклик многозонных сверхпроводников, в которых взаимная фаза сверхпроводящих параметров порядка на различных листах Ферми поверхности перестраивается за счет изменения характеристик беспорядка. Другими словами, в данной главе представлены результаты расчета лондоновской глубины проникновения в различных областях фазовой диаграммы, найденной автором в третьей главе. Автор формулирует ряд предложений для эксперимента, направленных на обнаружение переключения между состояниями с различной разностью сверхпроводящих фаз между параметрами порядка на разных листах поверхности Ферми.

В разделе **Выводы** автор формулирует основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Достоверность основных выводов, сформулированных диссидентом, обеспечивается правильным выбором необходимых теоретических методов исследования и аprobацией работы на российских и международных конференциях. **Новизна и практическая значимость** полученных результатов, подтверждаются достаточным количеством публикаций в ведущих физических журналах, цитированием работ диссидентата другими исследователями и анализом связи теоретических предсказаний с известными экспериментальными данными.

Вместе с тем по диссертации необходимо сделать некоторые замечания.

1. На мой взгляд, востребованность работы могла бы возрасти, если бы диссидент наряду с численными результатами всех разделов представил бы аналитические выражения, полученные в некоторых предельных случаях. Особенно полезно это было бы для стимуляции дальнейших экспериментальных работ.
2. Мне представляется, что физическое обсуждение причин спин-резонансного пика в первой и второй главе могло бы быть расширено. В частности, хотелось бы видеть качественное обсуждение причин, по которым характеристики неупругого рассеяния

нейтронов оказываются чувствительны к разности сверхпроводящих фаз параметров порядка на разных листах поверхности Ферми.

3. Представляется, что для более глубокого понимания физики влияния упругого рассеяния на устройство сверхпроводящего состояния в многозонном сверхпроводнике было бы полезно хотя бы на качественном уровне обсудить задачу о квантовой механике квазичастиц в присутствии отдельной примеси (без усреднения по примесям), включая, например, обсуждение подщелевого спектра квазичастиц. Обсуждение решения этой задачи могло бы усилить диссертацию.

4. Вычисления автора выполнены в предположении, что разность фаз параметров порядка на разных листах поверхности Ферми может быть равна либо нулю, либо пи. На мой взгляд, было бы полезно обсудить и возможно рассмотреть случай произвольной разности фаз между параметрами порядка. В какой мере такое расширение класса возможных сверхпроводящих фаз повлияет на фазовую диаграмму сверхпроводящих состояний и экспериментально измеримые величины?

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации и являются скорее рекомендациями для дальнейшей работы. В целом, следует отметить, что диссертационная работа В.А.Шестакова является существенным вкладом в развитие важного и актуального направления физики сверхпроводимости – физики многозонной сверхпроводимости.

Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком.
Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Итак, результаты диссертации представляются достоверными и научно обоснованными, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертация представляет собой законченную работу, которая соответствует всем критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Шестаков Вадим Андреевич, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

30 января 2022г.

Гнс, Зав. отд. физики сверхпроводников
Института физики микроструктур РАН
доктор физико-математических наук

А.С.Мельников

"Подпись А.С. Мельникова удостоверяю"

Ученый секретарь Института физики микроструктур РАН— филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

кандидат физико-математических наук



Д.М.Гапонова

Сведения об официальном оппоненте

Мельников Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, главный научный сотрудник, заведующий отделом физики сверхпроводников Института физики микроструктур РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), телефон: +7 910 3929860, e-mail: melnikov@ipmras.ru. Почтовый адрес: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ИФМ РАН.

Список работ по теме диссертации за последние пять лет

1. A.A. Kopasov, A.G. Kutlin, and A.S. Mel'nikov, Geometry controlled superconducting diode and anomalous Josephson effect triggered by the topological phase transition in curved proximitized nanowires, *Phys. Rev. B* 103, 144520 (2021).
2. A.V. Samokhvalov, V.D. Plastovets, and A.S. Mel'nikov, Topological transitions in electronic spectra: Crossover between Abrikosov and Josephson vortices, *Phys. Rev. B* 102, 174501 (2020).
3. A.A. Kopasov and A.S. Mel'nikov, Multiple topological transitions driven by the interplay of normal scattering and Andreev scattering, *Phys. Rev. B* 101, 054515 (2020).
4. A.G. Kutlin and A.S. Mel'nikov, Geometry-dependent effects in Majorana nanowires, *Phys. Rev. B* 101, 045418 (2020).
5. Zh. Devizorova, S.V. Mironov, A.S. Mel'nikov, and A. Buzdin, Electromagnetic proximity effect controlled by spin-triplet correlations in superconducting spin-valve structures, *Phys. Rev. B* 99, 104519 (2019).
6. V.L. Vadimov, I.M. Khaymovich, and A.S. Mel'nikov, Higgs modes in proximized superconducting systems, *Phys. Rev. B* 100, 104515 (2019).
7. A.V. Samokhvalov, I.A. Shereshevskii, N.K. Vdovicheva, M. Taupin, I.M. Khaymovich, J.P. Pekola, and A.S. Mel'nikov, Electronic structure of a mesoscopic superconducting disk: Quasiparticle tunneling between the giant vortex core and the disk edge, *Phys. Rev. B* 99,

134512 (2019).

8. V.L. Vadimov, M.V. Sapozhnikov and A.S. Mel'nikov, Magnetic skyrmions in ferromagnet-superconductor (F/S)heterostructures, Appl. Phys. Lett. 113, 032402 (2018).
9. S. V. Mironov, D. Yu. Vodolazov, Y. Yerin, A. V. Samokhvalov, A. S. Mel'nikov, and A. Buzdin, Temperature Controlled Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov Instability in Superconductor-Ferromagnet Hybrids, Phys. Rev. Lett. 121, 077002 (2018).
10. A.A. Kopasov, I.M. Khaymovich and A.S. Mel'nikov, Inverse proximity effect in semiconductor Majorana nanowires, Beilstein J. Nanotechnol. 9, 1184 (2018).
11. S. Mironov, A.S. Mel'nikov, and A. Buzdin, Electromagnetic proximity effect in planar superconductor-ferromagnet structures, Appl. Phys. Lett. 113, 022601 (2018).

Д.Ф.-М.Н.

А.С. Мельников

Ученый секретарь

Института физики микроструктур РАН

к.ф.-м.н.



Д.М. Гапонова