

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Алексея Андреевича Радкевича  
“Флуктуационные явления в низкоразмерных сверхпроводниковых  
системах”, представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.04.02 -  
«Теоретическая физика».

В диссертации А.А.Радкевича, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика», приведены результаты исследований по интересному и актуальному направлению физики сверхпроводимости – физике сверхпроводящих флуктуационных явлений. Суть этих явлений связана с тем, что сверхпроводящий параметр порядка в различных системах может испытывать отклонения от своего среднего значения, определяемого в рамках теории среднего поля. Соответствующие термодинамические флуктуации волновой функции куперовских пар успешно исследовались в течение нескольких десятилетий как экспериментаторами, так и теоретиками. Несколько позднее, исследователи обратились к интересной проблеме квантовых сверхпроводящих флуктуаций в низкоразмерных системах, которые проявляются в измеряемых характеристиках при низких температурах. Следует отметить, что при понижении размерности системы (т.е. в тонких пленках или нанопроводах) флуктуационные явления становятся особенно существенными. Успехи современной технологии и экспериментальной техники постоянно расширяют класс систем, в которых сверхпроводящие флуктуации играют значительную роль. В связи с этим, задачи развития теории флуктуационных явлений в низкоразмерных сверхпроводящих структурах, поставленные в диссертации, представляются интересными и своевременными. Более конкретно, рассматриваемая диссертация содержит ряд **новых актуальных** теоретических разработок, связанных с влиянием флуктуаций на плотность электронных состояний в сверхпроводящих нанопроволоках и тонких пленках, а также на соотношения ток – фаза, измеряемые в таких системах с помощью локальных джозефсоновских контактов. Сильной стороной работы является также тесная связь теоретических результатов с экспериментом, выполненным на титановых нанопроволоках. В целом, следует отметить, что значительная часть рассмотренных в диссертации задач может быть отнесена к «горячим темам» в физике конденсированных сред, что показывает **значимость** результатов работы.

Для решения поставленных задач диссертации автор использовал широкий набор современных методов теории конденсированного состояния, таких как метод функционального интегрирования, мацубаровская диаграммная техника, техника Келдыша, метод квазиклассических функций Грина, метод эффективного действия, а также оригинальные аналитические и численные подходы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Она изложена на 88 страницах, включая 14 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 изложение теоретических результатов по расчету влияния флуктуаций фазы параметра порядка и связанных с ними плазменных мод Муи-Шёна на одночастичную плотность состояний сверхпроводящих нанопроволок и тонких

пленок. Сделаны **новые** теоретические предсказания относительно характера подавления щелевой особенности в электронной плотности состояний, а также поведения подщелевой плотности состояний при различных параметрах системы и температуры. Результаты **актуальны** в контексте современных туннельных экспериментов, и, в частности, экспериментов по сканирующей туннельной микроскопии/спектроскопии.

**Вторая глава** посвящена теоретическому расчету влияния флуктуаций на транспортные свойства сверхпроводящей нанопроволоки, измеряемые с помощью пары джозефсоновских контактов с некоторой заданной на них разностью сверхпроводящих фаз. Автор изучает ток – фазовое соотношение в этой цепи в зависимости от параметров и расстояния между электродами. При этом он учитывает влияние как плазменных мод Муи-Шёна, так и квантовых центров проскальзывания фазы. Автор делает **новые** интересные предсказания относительно поведения сверхтекучего критического тока в данной системе, анализирует обнаруженные квантовые фазовые переходы.

В **третьей главе** представлены результаты совместных работ автора с экспериментальной группой К.Арутюнова. Здесь автор предлагает интерпретацию экспериментальных данных, полученных для набора титановых нанопроволок различного сечения. Основное экспериментальное наблюдение заключается в наличии сверхпроводящего перехода для достаточно толстых проволок и его отсутствие для проволок малого сечения. При этом для всех образцов сохраняются сверхпроводящие особенности в локальных туннельных характеристиках. Автором предложено теоретическое объяснение наблюдаемых температурных зависимостей сопротивления и установлено качественное соответствие экспериментальных данных по туннельным вольтамперным характеристикам с результатами первой главы диссертации.

Представленный автором детальный анализ экспериментов представляется **новым и оригинальным**.

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

**Достоверность** основных выводов, сформулированных диссертантом, обеспечивается правильным выбором необходимых теоретических методов исследования и апробацией работы на российских и международных конференциях.

**Новизна и практическая значимость** полученных результатов, подтверждаются достаточным количеством публикаций в ведущих физических журналах, цитированием работ диссертанта другими исследователями и анализом связи теоретических предсказаний с известными экспериментальными данными.

Вместе с тем по диссертации необходимо сделать некоторые замечания.

1. Представляется, что для лучшего понимания физической ситуации и, в особенности, в контексте сравнения с экспериментом, автору следовало бы уделить больше внимания обсуждению электродинамики плазменных мод Муи-Шёна, зависимости параметров соответствующего эффективного действия от электродинамического окружения и оценкам емкости и других параметров для условий конкретного эксперимента, обсуждаемого в главе 3.

2. В первой главе при анализе влияния флуктуаций на плотность состояний квазичастиц автор пренебрегает вкладом флуктуационных центров проскальзывания фазы. Мне представляется, что условия справедливости такого приближения следовало бы обсудить более подробно, в том числе при конечных температурах.

3. На рис.1.4 представлена зависимость от энергии нормированной электронной плотности состояний сверхпроводящих нанопроволок при нулевой температуре. По

какой причине плотность состояний при энергиях ниже щелевой особенности обращается в нуль в этом пределе? Если предполагать, что влияние мод Муи-Шена на плотность состояний связано с доплеровским сдвигом щели в спектре квазичастиц за счет флуктуирующей сверхскорости, то не ясно, почему такое понижение энергетической щели в спектре возбуждений не происходит в пределе нулевых температур за счет квантовых флуктуаций. Кроме того, профили плотности состояний на данном рисунке на первый взгляд противоречат тождеству 1.29, указывающему на то, что флуктуации только перераспределяют состояния между различными энергиями, но не изменяют полное (проинтегрированное по энергии) число состояний.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, следует отметить, что диссертационная работа А.А.Радкевича является существенным вкладом в развитие физики сверхпроводящих флуктуационных явлений.

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, Радкевич Алексей Андреевич, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика».

5 февраля 2022г.

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



Александр Сергеевич 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](mailto: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 proximitized 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