

603087, Нижегородская область,  
Кстовский район, д. Афоново,  
ул. Академическая, д. 7  
Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
Российской академии наук  
Диссертационный совет Д002.069.03

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертацию Вадимова Василия Львовича «Неоднородные состояния и неравновесные явления в сверхпроводящих структурах с нарушенной симметрией относительно обращения времени», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния).**

Исследование сверхпроводников с необычной симметрией спаривания является актуальной задачей физики конденсированного состояния. В диссертации В. Л. Вадимова изучаются киральные  $p$ -волновые сверхпроводники, характеризующиеся нарушенной симметрией относительно обращения времени, гибридные сверхпроводящие структуры, в которых нарушение симметрии обращения времени происходит за счет взаимодействия сверхпроводника с ферромагнетиком, а также неравновесные процессы в гибридных структурах сверхпроводник/нормальный металл.

**Актуальность** теоретического исследования киральных  $p$ -волновых сверхпроводников, связана с тем, что результаты этих исследований могут быть использованы для экспериментального детектирования киральной  $p$ -волновой сверхпроводимости в реальных материалах, в частности в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , в котором предположительно реализуется такой тип спаривания. Актуальность изучения гибридных структур сверхпроводник/ферромагнетик связана с возможностью их использования в приложениях, в частности, особый интерес представляет изучение структур с неоднородным распределением намагниченности в магнитной подсистеме. Частным случаем таких неоднородных состояний являются магнитные скирмионы, рассмотренные в диссертации. Также в последнее время стала актуальной проблема низкотемпературной когерентной динамики сверхпроводников, интерес к которой возрос после недавнего непосредственного

экспериментального наблюдения мод Хиггса в сверхпроводящих системах; исследования в этом направлении имеют важное междисциплинарное значение.

Представленные в диссертации теоретические работы являются важными для дальнейшего развития физики неравновесных процессов в сверхпроводниках и сверхпроводящих систем с нарушением симметрии относительно обращения времени. Все опубликованные результаты относятся к тематике, находящейся на острие современной физики конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка использованной литературы из 147 наименований. Она изложена на 119 страницах, включая 17 рисунков.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы работы, формируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечисляются положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации изложен теоретический анализ генерации магнитного поля за счет локального разогрева кирального  $p$ -волнового сверхпроводника лазерным излучением. Также исследован механизм Киббла-Зурека генерации киральных доменов в данных сверхпроводниках при температурном фазовом переходе и при переходе во внешнем магнитном поле. Эффект генерации магнитного поля за счет локального подавления сверхпроводимости представляется **новым**.

Во второй главе изучается спектр квазичастиц в вихрях, запиннигованных на колумнарных дефектах в киральных  $p$ -волновых сверхпроводниках. На основе найденного спектра вычислены локальная плотность состояний и отклик на внешнее СВЧ излучение. Найденный спектр и результаты вычислений экспериментально наблюдаемых характеристик являются **новыми**.

В третьей главе диссертации изучается влияние мейсснеровской экранировки на устойчивость магнитного скирмиона в ферромагнитной пленке с анизотропией типа “легкая ось”. Результат о возможности стабилизации скирмиона в наноструктурированных гибридных структурах сверхпроводник является **новым**.

Четвертая глава диссертации посвящена теоретическому изучению мод Хиггса в гибридной структуре сверхпроводник/нормальный металл. В предположении о туннельной границе между сверхпроводником и нормальным металлом найден спектр собственных колебаний параметра порядка в пределе нуля температуры. Вывод о существовании дополнительных мод Хиггса, обеспечиваемых эффектом близости сверхпроводника и нормальным металлом, является **новым**.

Выводы, приведенные Вадимовым В. Л. в заключении к диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Заключение завершается списком опубликованных работ. Приведенный выше анализ диссертации по главам подчеркивает научную новизну основных результатов диссертации. 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. Материалы диссертации опубликованы в 6 (шести) статьях в научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования материалов диссертационных исследований, и индексируемых базой данных «Web of Science», включая статьи в Physical Review Letters и Physical Review B.

Вместе с тем по диссертации **можно сделать некоторые замечания:**

1. При рассмотрении магнитного поля, которое генерируется вблизи горячего пятна в киральном сверхпроводнике делается вывод о том, что само наличие такого поля может служить однозначным свидетельством нетривиальной симметрии спаривания. Однако не вполне ясно, откуда следует, что в обычных сверхпроводниках вблизи горячего пятна не происходит генерации слабых магнитных полей из-за резкого возмущения системы? В частности, легко себе представить, что в горячем пятне и вблизи него происходит не только подавление модуля параметра порядка, но и имеет место локальное искажение фазы параметра порядка (или флуктуации фазы), пространственные градиенты которой могут приводить к появлению слабых магнитных полей и токов. Следует добавить, что реальная физика горячего пятна весьма сложна и не вполне описывается феноменологическими моделями. В рассмотренной же ситуации магнитные эффекты должны быть малы, так как вызваны сцеплением между различными компонентами параметра порядка, которое обычно слабо.
2. При рассмотрении магнитных полей, образующихся в сверхпроводнике из-за механизма Киббла-Зурека, делается вывод о качественном различии соответствующих распределений в случае обычных и киральных сверхпроводников. Вывод иллюстрируется результатами численных симуляций, однако при этом не приводятся значения параметров задачи, для которых произведены расчеты (Рис. 4). Вывод о качественном различии кажется не вполне понятным, ведь отличия в магнитных свойствах сверхпроводников обычных и необычных (с многокомпонентным параметром порядка) связаны преимущественно со

взаимодействиями между компонентами, которое слабо. Если симметрия параметра порядка столь радикально влияет на магнитные свойства, которые являются достаточно грубыми характеристиками сверхпроводника и обычно мало что говорят о симметрии спаривания, почему экспериментально факт существования киральных сверхпроводников так и не был надежно подтвержден?

3. Насколько оправдана двумерная модель расчета при рассмотрении скирмиона в главе 3? В этой же главе не обсуждается, почему скирмион обязан образоваться в том месте, где расположена точка или антиточка.
4. В главе 4 опущены зарядовые эффекты, что в явном виде упоминается на стр. 84. Можно сказать, изменятся ли качественные выводы при их учете?

Приведенные замечания, конечно, не снижают общей положительной оценки представленной диссертации, выполненной на высоком уровне, и значимости полученных результатов. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Следует отметить, что диссертационная работа Вадимова В. Л. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-теоретика и является существенным вкладом в развитие физики сверхпроводящих систем с нарушенной симметрией относительно обращения времени. Отдельно стоит отметить широкий арсенал теоретических методов, умение применять которые продемонстрировал автор. Детальные расчеты в диссертации сочетаются с качественными аргументами и простыми физическими оценками.

Диссертационная работа Вадимова Василия Львовича «Неоднородные состояния и неравновесные явления в сверхпроводящих структурах с нарушенной симметрией относительно обращения времени» представляет собой законченное научное исследование, которое содержит решения поставленных научных задач, имеющих большое значение для развития физики конденсированного состояния, и содержит новые важные результаты, которые могут быть рекомендованы к использованию **для решения различных теоретических и прикладных задач физики конденсированного состояния.**

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 научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным «Положением о порядке присуждения

ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Вадимов Василий Львович, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния».

Погосов Вальтер Валентинович,  
доктор физико-математических наук,  
начальник лаборатории физики микро- и наноструктур ФГУП "ВНИИА им. Н. Л. Духова"



18.11.2019

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»  
Почтовый адрес: 127055, Москва, ул. Суцневская, 22  
Тел.: +7 (499) 978-78-03  
E-mail: pogosov@yandex.ru  
www.vniia.ru

Подпись д.ф.-м.н. В.В. Погосова заверяю.

Ученый секретарь НТС ФГУП ВНИИА,  
кандидат технических наук  
Л. В. Феоктистова

