

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Фомина Якова Викторовича «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

### Актуальность.

Работа посвящена чрезвычайно интересной тематике, важной как с фундаментальной точки зрения, так и в свете возможных приложений в рамках новой области исследований, бурно развивающейся в последние десятилетия, а именно, созданию гибридных систем на основе сверхпроводников и ферромагнетиков. Интерес к этой тематике обусловлен рядом причин. В первую очередь, само сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма вызывает фундаментальный интерес, поскольку эти два явления требуют принципиально разного спинового упорядочения. Важно, что в гибридных системах возникают качественно новые фундаментальные эффекты, например, генерация триплетной сверхпроводящей компоненты в контактах синглетный сверхпроводник—неоднородный ферромагнетик. Эта компонента является дальнедействующей и проникает в ферромагнетик на существенно большую длину, чем синглетная.

Не менее важен прикладной интерес, поскольку совмещение этих явлений в современных инженерных устройствах на основе сверхпроводников, в первую очередь в гибридных контактах, позволяет расширить функциональные возможности этих приборов или осуществить их работу на новых физических принципах. Например, в контакте сверхпроводника с двухслойным ферромагнетиком, появляется возможность управления критической температурой путем изменения относительных направлений магнитных моментов в разных слоях. Соответственно, возникает возможность создания спинового вентиля, в котором можно «включать» или «выключать» сверхпроводимость в системе, управляя магнитными моментами ферромагнетиков. В последнее время интерес к этой тематике существенно возрос, причем имеется большое количество ярких экспериментов, требующих квалифицированного теоретического описания.

Таким образом, диссертационная работа Я.В. Фомина, посвященная фундаментальным проблемам взаимного влияния сверхпроводимости и магнетизма, написана на пике интереса к данной области и актуальность темы диссертации несомненна.

### Научная новизна и достоверность.

Принципиальная новизна работы связана с последовательным рассмотрением эффектов, обусловленных взаимным влиянием сверхпроводимости и магнетизма в целом ряде систем, в том числе в неупорядоченных системах, а также в важных для приложений контактных системах. Среди большого количества новых оригинальных задач, решенных в диссертационной работе, отметим следующие. Впервые подробно исследованы особенности дальнедействующей триплетной сверхпроводимости в системах сверхпроводник-ферромагнетик (SF) с неелевскими доменными стенками. Впервые получено аналитическое выражение для локального импеданса на диффузной поверхности кирального р-волнового сверхпроводника. Впервые исследован эффект сверхпроводящего триплетного спинового клапана на основе генерации нечётных по частоте корреляций в гибридной системе сверхпроводник-слоистый ферромагнетик. Впервые детально изучен управляемый транспорт куперовских пар через баллистический СКВИД с ферромагнитными фильтрами в рукавах. Также впервые подробно исследован ряд режимов транспорта в системе сверхпроводящих и нормальных гранул.

Все задачи решены с использованием проверенных методов теоретической физики, таких как сигма-модель и диаграммная техника, а результаты поясняются на качественном уровне. Имеется очень хорошее согласие с представленными в литературе экспериментальными исследованиями и численными расчетами. Сказанное выше подтверждает **научную новизну результатов**, полученных в диссертации, а **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнения.

### Научная и практическая значимость

В диссертации детально исследован целый ряд новых физических эффектов, с подробным анализом их микроскопических механизмов и возможности практического применения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с **новыми оригинальными результатами**, библиографии и нескольких приложений. Во Введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, обоснованы новизна и практическая ценность полученных результатов, раскрыто содержание диссертации по главам.

**В первой главе** диссертации исследован ряд особенностей нечётной по частоте сверхпроводимости. Получен ряд качественно новых результатов. В частности, изучены свойства SF и SFS контактов при наличии неелевской доменной структуры в F части. Также подробно исследуется дифференциальная проводимость контакта между нормальным металлом и сверхпроводником, имеющим нечётную по частоте симметрию, предложенную Березинским. Проведен детальный анализ симметрии и магнитных свойств сверхпроводящих корреляций, возникающих как наведённые компоненты в неоднородных сверхпроводниках. Исследован динамический отклик нечётной по частоте сверхпроводящей компоненты на электромагнитное поле и проведен расчет поверхностного импеданса тонкой диффузной плёнки из нормального металла, покрывающей триплетный киральный r-волновой сверхпроводник.

**Вторая глава** посвящена детальному анализу сверхпроводящих спиновых клапанов. Построена фазовая диаграмма, показывающая поведение критической температуры трёхслойной SFF структуры, в которой при неколлинеарных намагниченностях F слоёв возникает дальнедействующая триплетная компонента, от относительного угла между намагниченностями при различных значениях параметров. Также построена теория сверхпроводящего спинового клапана на основе делителя куперовских пар, представляющего собой СКВИД, в котором в качестве джозефсоновских переходов выступают нормальные рукава с полуметаллическими ферромагнитными вставками.

**Третья глава** посвящена изучению влияния неоднородного и неупорядоченного магнетизма на сверхпроводимость. В этой главе впервые получено аналитическое выражение для минищели в SF и SFS контактах со спиральной намагниченностью. Показано, что обменное поле эффективно усредняется из-за неоднородности, и щель в плотности состояний в магнитной области сохраняется до значений много больших, чем в случае однородного обменного поля. Также исследовано влияние магнитных неоднородностей на неупорядоченные сверхпроводящие системы. Показано, что при определенных условиях эффект магнитного беспорядка может быть описан путем введения эффективного спин-флип рассеяния в уравнение Узаделя. Также построена теория отклика диффузного сверхпроводника со слабыми неборновскими магнитными примесями на внешнее электромагнитное поле. Изучено влияние магнитных примесей на спектр возбуждений и импеданс системы. В конце данной главы исследована плотность состояний в диффузных сверхпроводниках с сильными магнитными примесями, подчиняющимися статистике

Пуассона. Показано, что изученный ранее случай борновских магнитных примесей с гауссовой статистикой является предельным случаем представленного полного рассмотрения. Вычислена средняя плотность состояний за рамками приближения среднего поля.

**В четвертой главе** исследуются кулоновские эффекты в гранулированных сверхпроводниках, помещенных в магнитное поле. Построена теория, описывающая индуцированный магнитным полем переход двумерного гранулированного сверхпроводника с относительно большой межгранульной проводимостью в диэлектрическое состояние. Также проведен подробный анализ влияния магнитного поля и кулоновского взаимодействия на эффект близости в контакте между сверхпроводником и гранулой из нормального металла в пределе хорошей проводимости границы.

Таким образом, результаты, полученные в диссертации, имеют важное фундаментальное значение для развития новой, бурно развивающейся, области физики – гибридных систем на основе магнетиков и сверхпроводников. Автором детально исследован целый ряд нетривиальных явлений в таких системах, в том числе при наличии беспорядка. В частности, подробно исследованы эффекты, обусловленные наличием нечетных по частоте сверхпроводящих состояний, что может помочь экспериментально идентифицировать такие состояния. Также решен ряд имеющих фундаментальное значение задач, посвященных теоретическому описанию эффекта близости в диффузной системе, составленной из сверхпроводящих и нормальных (или ферромагнитных) областей с магнитным беспорядком. В частности, продемонстрирована возможность эффективного описания слабого магнитного беспорядка с произвольной корреляционной длиной как рассеяния с переворотом спина.

Результаты имеют важную практическую значимость и могут быть использованы для создания гибридных контактов на основе сверхпроводников и магнетиков, спиновых вентилях и управляемых СКВИДов. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что **научная и практическая значимость** результатов высока и несомненна.

Результаты диссертации Я.В. Фомина могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области теоретической физики и ведущих разработку приборов и устройств наноэлектроники (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ПИЯФ, МГУ, СПбГУ, СПбГТУ, Институт физики микроструктур РАН, ИФП СО РАН, ФИАН, ИФТТ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ УРО РАН, ГНЦ ГосНИИ ФП им. Ф.В. Лукина и др.).

Диссертация Я.В. Фомина написана ясным языком и хорошо иллюстрирована. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

### Замечания.

В процессе изучения диссертационной работы у меня возник ряд вопросов и мелких замечаний, не имеющих принципиального характера:

1) В нескольких местах автор приводит важные результаты, полученные формальным образом, без пояснения физической картины явления. Например, отрицательный знак сверхтока в формулах (1.72)-(1.73) представляет собой весьма интересный результат, который, на мой взгляд, требует более подробного обсуждения, проясняющего физическую картину явления.

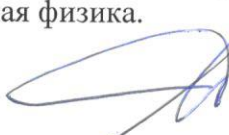
2) На рисунке 2.4 приведена зависимость критической температуры в SFF структуре от угла поворота спинов между двумя ферромагнитными слоями при различных значениях геометрических параметров структуры. Из рисунка видно, что зависимость может иметь качественно разный вид: от плавной до достаточно резкой с переходом к нормальному металлу в некоторой области углов. Соответствующий параметр, контролирующий переход от одного режима к другому, в диссертации не приводится. Также отсутствуют качественные физические пояснения.

3) На рисунке 3.3б представлена диаграмма, описывающая процесс нелокального рассеяния с переворотом спина. На первый взгляд, помимо данной диаграммы, должна быть учтена диаграмма, в которой примесная лестница накрывается «шляпкой», описывающей спин-флип процесс. Возможность отбрасывания такой диаграммы в диссертации не обсуждается ни на формальном, ни на качественном уровне.

4) В системе сверхпроводящих и нормальных гранул, изображенной на рис. 4.1, по мере увеличения поля происходит переход от двухчастичного транспорта куперовских пар к одночастичному транспорту отдельных электронов. Хотелось бы понять, происходит ли этот переход плавно, или же существует некоторое критическое значение магнитного поля, разделяющее два типа транспорта.

Сделанные замечания не являются критическими и скорее являются пожеланием для дальнейшей деятельности. Они никак не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на самом высоком уровне.

Подводя итог, следует сказать, что диссертация Я.В. Фомина является законченным исследованием, выполненном на самом высоком научном уровне, и содержит решение ряда важных задач о взаимном влиянии сверхпроводимости и магнетизма в различных системах. Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных (Письма в ЖЭТФ) и зарубежных журналах (Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B, Beilstein J. Nanotechnol.), докладывались автором на российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа содержит принципиально новые важные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные результаты – существенный вклад в фундамент нового направления теоретической физики: гибридные системы на основе сверхпроводников и магнитных материалов. Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Она удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Я.В. Фоминов безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.



3 июня 2019 г.

Качоровский Валентин Юрьевич,  
 доктор физико-математических наук,  
 специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»,  
 ведущий научный сотрудник сектора теории оптических  
 и электрических явлений в полупроводниках  
 ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.  
 30 мая 2019 г.  
 Тел. +7-921-9941081  
 e-mail: kachor.valentin@gmail.com

Подпись В.Ю. Качоровский

зав.отделом кадров ФТИ им. А.Ф.Иоффе

