

## Отзыв официального оппонента

*на диссертационную работу 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.*

В диссертации Я.В.Фомина, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика», приведены результаты исследований по ряду современных направлений теории сверхпроводимости, включая физику эффекта близости в гибридных системах сверхпроводник – ферромагнетик, влияние магнитного беспорядка на сверхпроводимость, влияние кулоновского взаимодействия на сверхпроводящее состояние в магнитном поле, электродинамику сверхпроводников с нетривиальным спариванием. Спектр решенных задач довольно широк и свидетельствует о разнообразных научных интересах и в то же время о высокой квалификации автора диссертации, позволяющей ему получать интересные результаты для разных направлений физики сверхпроводников. В то же время следует подчеркнуть, что значительная часть рассмотренных задач имеет экспериментальную мотивацию, предлагая либо объяснение текущим экспериментам, либо новые экспериментальные постановки. Такая ориентация на современные экспериментальные работы безусловно усиливает диссертацию, показывает **актуальность** ее результатов и их **значимость**. В качестве конкретного примера можно указать на работы автора по теоретическому анализу экспериментов по реализации триплетного спинового клапана. Говоря об актуальности диссертации, нельзя не отметить ее значение для приложений в возникшей недавно новой области сверхпроводящей электроники, а именно в **сверхпроводящей спинтронике**. Успехи современной технологии привели к появлению этой совершенно новой области криоэлектроники, основанной на возможности управления бездиссипативным зарядовым и спиновым транспортом в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик путем изменения магнитной текстуры ферромагнитной подсистемы. Статьи по этой тематике постоянно появляются в ведущих российских и зарубежных изданиях. Результаты 3х из четырех глав диссертации имеют непосредственное отношение к развитию данной области, поскольку их содержание включает в себя целый ряд задач, направленных на развитие основ теории дальних сверхпроводящих корреляций в ферромагнетике, спиновых вентилей, инверторов сверхпроводящей фазы (пи-контактов) и других возможных устройств. Большое значение как с фундаментальной точки зрения, так и для целого ряда перспективных приложений имеют **новые** результаты автора в области электродинамики сверхпроводников, а именно, представленные в диссертации расчеты микроволнового импеданса для ряда интересных случаев. Измерения поверхностного импеданса являются одной из базовых методик определения ключевых параметров сверхпроводников и, безусловно, расчетам поверхностного импеданса было посвящено большое количество теоретических работ. Тем не менее автору диссертации удалось внести свой существенный вклад в развитие данной теории, получив ряд актуальных результатов для сверхпроводников с анизотропным спариванием и с магнитными примесями. Необходимо упомянуть еще одно важное направление современной физики

сверхпроводников, к которому относится часть результатов работы, а именно физику перехода сверхпроводник – изолятор. Развитие теоретических представлений в этой области чрезвычайно важно для понимания результатов экспериментов в гранулированных сверхпроводниках. Диссертационная работа Фоминова Я.В. содержит весьма **актуальные** теоретические предсказания и в этой области. Для решения поставленных задач диссертации автор использовал разнообразные теоретические подходы, включая теорию Узалея и Эйленбергера, а также технику сигма модели.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Она изложена на 248 страницах, включая 55 рисунков.

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

**Первая глава** полностью посвящена изложению работ автора по теории триплетных сверхпроводящих корреляций, нечетных по мацубаровской частоте. Корреляции такого типа возникают, например, в гибридных структурах сверхпроводник – нормальный ферромагнетик в условиях эффекта близости, когда сверхпроводящие электроны подвержены воздействию обменного поля ферромагнетика. Замечательным образом в случае неоднородного обменного поля упомянутые триплетные корреляции могут стать дальнедействующими и проникать в ферромагнетик на значительные расстояния. Физика таких дальних триплетных корреляций в контактах типа сверхпроводник – ферромагнетик в последнее время привлекала большое внимание экспериментаторов и теоретиков, работающих в данной области. Диссертанту удалось внести весьма существенный вклад в эти работы. В частности, в грязном пределе получен важный результат: рассмотрено влияние неелевской доменной структуры на джозефсоновский ток в контакте сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник и на поведение плотности состояний в ферромагнитном слое в контакте сверхпроводник – ферромагнетик. Выяснены соответствующие особенности проникновения триплетных сверхпроводящих корреляций в ферромагнетик на длину, существенно превосходящую длину когерентности в ферромагнетике. Следующим важным результатом является исследование свойств андреевского отражения и проводимости контакта между нормальным металлом и материалом с триплетными сверхпроводящими корреляциями, нечетными по частоте. Значительная часть первой главы посвящена обсуждению вкладов разных типов корреляций в электромагнитный отклик сверхпроводника и классификации типов сверхпроводящих фаз различной частотной, пространственной и спиновой симметрии. Глава завершается интересным и важным анализом температурной зависимости поверхностного импеданса сверхпроводника с собственными (не наведенными) триплетными корреляциями р-типа со слоем нормального диффузного металла на поверхности. Решение этой задачи мотивировано недавними экспериментами (в ИФТТ РАН) по измерению поверхностного импеданса в сверхпроводнике  $Sr_2RuO_4$ , который рассматривается как вероятный кандидат на обнаружение триплетной сверхпроводимости р-типа. Качественное сходство результатов расчета с экспериментальными данными – безусловный успех диссертанта.

Во **второй главе** автор приводит результаты своих работ по исследованию спиновых вентилях (или клапанов), представляющих собой трехслойные системы сверхпроводник – ферромагнетик – ферромагнетик, в которых критическая температура сверхпроводящего перехода определяется углом разориентации магнитных моментов в ферромагнитных слоях. Автором сделано весьма интересное предсказание так называемого «триплетного» эффекта спинового вентиля. Благодаря влиянию дальней триплетной компоненты минимум критической температуры системы реализуется при неколлинеарной ориентации магнитных моментов. Замечательным образом, данное предсказание находится в прекрасном согласии с экспериментами группы И.А. Гарифуллина. В диссертации представлен анализ этих экспериментов, выполненный автором. Здесь мы видим действительно успешный результат сотрудничества теоретика с экспериментаторами. Вторая глава завершается описанием еще одной задачи, решенной диссертантом – расчет характеристик баллистического СКВИД – интерферометра с двумя вставками из ферромагнетика с электронами, полностью поляризованными по спину (half-metal). Особенностью предсказываемых эффектов является наблюдение интерференции Ааронова - Бома с периодом, характерным для электронов, а не для куперовских пар.

В **третьей главе** автор приводит результаты своих работ по исследованию влияния различных магнитных неоднородностей, включая магнитный беспорядок, магнитные примеси различного типа на сверхпроводящие свойства. Глава начинается с задачи о влиянии детерминированного спирального распределения обменного поля в ферромагнитном слое на индуцированные в нем сверхпроводящие корреляции (в частности, определяется минимум в спектре квазичастиц). Далее рассматривается задача с общим типом неколлинеарного беспорядка в распределении обменного поля с произвольной корреляционной длиной. Получены выражения для эффективного спин-флип вклада в уравнения Узаделя, описывающие данную ситуацию. Далее автор обращается к расчетам поверхностного импеданса с учетом влияния магнитных примесей. Переходя здесь к анализу случая неборновских примесей, автору удается получить новые результаты для поверхностного импеданса. Переходя к случаю сильных магнитных примесей, автор находит новые особенности в поведении плотности состояний.

**Четвертая глава** стоит, на мой взгляд, несколько в стороне от основного содержания диссертации: она посвящена кулоновским эффектам в гранулированных сверхпроводниках в магнитном поле. Автором решена здесь любопытная задача – показано, что переход гранулированный сверхпроводник - диэлектрик в магнитном поле возможен и при хорошей прозрачности межгранульных границ. Решена также задача о фазовой диаграмме гранулы с наведенной сверхпроводимостью в условиях кулоновской блокады в зеэмановском поле.

Выводы, приведенные автором в **заключении** диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Заключение завершается списком опубликованных работ.

**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 успешным сравнением ряда теоретических предсказаний с экспериментальными данными.

Вместе с тем по диссертации необходимо сделать некоторые замечания:

1. Прежде всего мне представляется несколько искусственным и немотивированным представленный в первой главе избыточно подробный анализ нечетной по частоте сверхпроводимости, возникающей самостоятельно, а не как наведенные сверхпроводящие корреляции. Все дело в том, что, как в итоге продолжительного анализа заключает сам автор, такие корреляции оказываются нереализуемыми ни в какой разумной физической модели, гамильтоново описание таких систем оказывается невозможным, а их появление приводит к различным противоречиям. В свете этого отрицательного вывода самого диссертанта не вполне ясна целесообразность введенной автором новой классификации сверхпроводящих фаз по симметрии, учитывающей диамагнитные сверхпроводящие корреляции, нечетные по частоте. Эта классификация даже включена в третий основной результат диссертации. И в этом же результате сам автор указывает на невозможность физической реализации упомянутых выше сверхпроводящих фаз. Я бы считал, что физически нереализуемые состояния в системах, не описываемых никаким гамильтонианом, не следовало бы обсуждать с самого начала, и тем более не имело смысла упоминать их в основных результатах.

2. Мне представляется, что в разделе 1.2, посвященном анализу проводимости контакта нормального металла и системы с нечетными по частоте корреляциями, следовало бы больше внимания уделить сопоставлению результата в пределе малой прозрачности интерфейса с предыдущими работами. Дело в том, что в этом пределе ответ должен быть пропорционален плотности состояний в системе с наведенными нечетными по частоте корреляциями. Если в качестве экспериментально возможной реализации решаемой задачи мы рассматриваем контакт между нормальным электродом и ферромагнетиком с нечетными по частоте сверхпроводящими корреляциями наведенными за счет эффекта близости (в структуре сверхпроводник – ферромагнетик), то соответствующая плотность состояний в ферромагнетике и ее превышение над плотностью состояний в отсутствие сверхпроводящих корреляций обсуждались во многих предшествующих работах (см., например, обзор А.Буздина в Rev.Mod.Phys. 2005 г.).

3. Мне представляется, что при анализе поведения поверхностного импеданса сверхпроводника с р-спариванием в первой главе следовало бы проанализировать возможное появление вблизи поверхности спонтанных токов, проблема наблюдения которых для  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  обсуждается в литературе. Учтены ли эти токи в представленном расчете? Если нет, то каковы аргументы диссертанта в пользу их отсутствия? Появление таких токов могло бы существенно повлиять на ответ для импеданса.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Я.В.Фомина является существенным вкладом в развитие новых направлений физики конденсированного состояния – сверхпроводящей спинтроники и мезоскопической 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, Фоминов Яков Викторович, заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

6 июня 2019г.

Гнс, Зав. Лаб.

Института физики микроструктур РАН

доктор физико-математических наук



А.С.Мельников

Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), Мельников Александр Сергеевич, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теории мезоскопических систем (телефон: +7 910 3929860, e-mail: [melnikov@ippras.ru](mailto:melnikov@ippras.ru)).  
Почтовый адрес: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ИФМ РАН.

"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