

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Степанова Николая Анатольевича «Флуктуационная проводимость и плотность состояний в низкоразмерных сверхпроводниках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.02 — «Теоретическая физика»).

Исследование явлений сверхпроводимости остается важной и актуальной задачей современной теоретической физики. Открытие сверхпроводимости и таких квантовых явлений, как эффект Джозефсона, во многом определило развитие научной мысли как в физике конденсированного состояния, так и во многих других, на первый взгляд, далеких от этой области направлениях. Особенности сверхпроводящего состояния вещества являются отсутствие сопротивления, то есть возможность протекания бездиссипативного электрического тока, макроскопическая квантовая когерентность, абсолютный диамагнетизм и многое другое. Неугасающий интерес к сверхпроводимости так же связан с принципиальной возможностью эксплуатировать квантовую когерентность в сложных сверхпроводящих системах для построения сверхпроводящих кубитов и реализации квантовых вычислений. Сверхпроводимость так же является одним из редких явлений в физике конденсированного состояния, где теория способна не только качественно, но и количественно соответствовать эксперименту. Данная диссертация содержит результаты, которые, несомненно, обеспечивают существенный прогресс в этом направлении.

Теория флуктуационных поправок к проводимости сверхпроводников была заложена Асламазовым и Ларкиным, а также Маки и Томпсоном, в 1968 – 1970 годах прошлого столетия. Несмотря на то, что физическая картина флуктуационной проводимости была достаточно хорошо понята уже в те годы, количественное описание этого явления в широком диапазоне параметров оставалось нерешенной теоретической задачей. Представленная диссертация практически полностью восполняет этот пробел. В частности, в ней представлен полный анализ флуктуационной проводимости в присутствии практически произвольного беспорядка и во всем релевантном диапазоне температур.

**Актуальность** теоретического исследования флуктуационных поправок напрямую связана с необходимостью полного и глубокого понимания широкого массива экспериментальных данных, касающихся низкоразмерных сверхпроводящих систем. В этой связи, особое внимание в диссертации уделено описанию сверхпроводящего состояния в квазиодномерных проводках, где теория среднего поля оказывается вообще не применимой. Для решения этой задачи разработан оригинальный подход с привлечением метода усреднения Паризи-Сурла, а также подробно разобрана стохастическая задача Уитни, которая оказывается важной для качественного понимания проблемы. Представленные исследования являются исключительно актуальными ввиду большого интереса к различным экспериментальным реализациям квазиодномерных сверхпроводящих систем, например, в контексте реализации Майорановских краевых состояний.

Диссертация С. А. Степанова состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 136 страниц текста с 17 рисунками. Список литературы содержит 101 наименование.

Во введении к диссертации обосновывается актуальность темы работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, производится подробный обзор известных научных результатов, перечисляются положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации получено общее выражение для флуктуационной поправки к проводимости тонких сверхпроводящих пленок выше критической температуры для произвольной силы беспорядка. Расчет выполнен в технике Келдыша с учетом стандартных вкладов Асламазова-Ларкина, Маки-Томпсона и вклада от плотности состояний, которые аккуратно проанализированы за пределами диффузионного приближения. Приведен критический анализ имеющейся литературы по флуктуационным поправкам.

Во второй главе показано что теория среднего поля, предложенная Ларкиным и Овчинниковым, не применима для описания размытия плотности состояний в неоднородных квазиодномерных сверхпроводниках и представлен новый подход для решения этой задачи. Для усреднения по беспорядку применяется метод Паризи-Сурла, что приводит к эффективной теории поля, которая в пространстве одного измерения может быть точно сведена к изучению трансфер-матричного гамильтониана.

В третьей главе представлен новый подход к описанию статистических свойств нелинейных стохастических уравнений, которые имеют прямое отношения к вопросам рассмотренным в предыдущей главе. Такой подход подробно обсуждается для задачи Уитни: движение перевернутого маятника в поле тяжести под действием горизонтальной случайной силы. Статистика никогда не падающей траектории выражена здесь через нулевую моду трансфер-матричного оператора. Как один из результатов данного подхода, получена совместная функция распределения угла и угловой скорости маятника на никогда не падающей траектории.

Четвертая глава посвящена дальнейшему развитию теории представленной в третьей главе на случай конечных временных интервалов и многоточечной корреляционных функций непадающей траектории. Исследования представленные в данной главе представляют значительный интерес с методологической и фундаментальной точек зрения.

Выводы, приведенные в заключении к диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в работе. Заключение завершается списком опубликованных работ и приложением, в которых представлены технические детали вычислений. 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 международных конференциях.

**Новизна и практическая значимость** полученных результатов подтверждаются публикациями в ведущих физических журналах — *Physical Review B* и *Письмах в ЖЭТФ*, — рекомендованных ВАК

для опубликования материалов диссертационных исследований, и индексируемых базой данных «Web of Science». А именно, материалы диссертации опубликованы в 3 (трех) статьях, две из которых изданы в печатных изданиях в журналах, рекомендованных ВАК, и одна работа представлена в виде препринта и получила одобрительный отзыв из научного журнала, рекомендованного ВАК.

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

1. Анализ флуктуационных кладов в проводимость ограничен случаем гауссова беспорядка, хотя и произвольного по силе. Вместе с тем присутствие сильных примесей может существенно изменить полученные ответы особенно в режиме кроссовера от чистой к неупорядоченной системе. Влияние сильных примесей не может быть сведено к анализу белого шума представленного функционально гауссовым интегралом. Более того, такие примеси характеризуются, вообще говоря, большим количеством фаз рассеяния, некоторые из которых могут быть не малы, а в случае резонансных примесей стремиться к числу пи. В этой связи было бы интересно. В этой связи было бы интересно услышать от автора хотя бы качественное обсуждение влияния сильных примесей на флуктуационную проводимость двумерных сверхпроводников в рамках подхода разработанного в Главе 1..
2. Вторая глава непосредственно начинается рассмотрением стохастической задачи Уитни, которая сводится к анализу одномерного уравнения Фоккера-Планка на функцию распределения. Несмотря на то что эта задача связана с темой первой главы, эта связь практически не обсуждается в диссертации. Таким образом создается впечатление что первая и последующие главы никак не связаны друг с другом. Так же сложно понять насколько рассмотрение квазиодномерной сверхпроводящей проволоки может быть сведено к чисто одномерной эволюционной модели соответствующей задаче Уитни. Какие то комментарии по этим вопросам были бы весьма уместны в начале второй главы.

Приведенные замечания, конечно, нисколько не снижают общей положительной оценки представленной диссертации, выполненной на исключительно высоком уровне, и значимости полученных результатов. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Следует отметить детальную проработку автором всех вопросов, затронутых в работе, и полноценном анализе полученных результатов. Отдельно стоит отметить очень ясное и подробное изложение вводных частей в каждой из глав, которые представляют собой развернутые обзоры по каждому из направлений исследований.

Диссертационная работа Степанова Николая Анатольевича **«Флуктуационная проводимость и плотность состояний в низкоразмерных сверхпроводниках»** представляет собой законченное научное исследование, результаты которого которые могут быть рекомендованы к использованию **для решения различных теоретических и прикладных задач.** А именно, результаты могут применяться как для дальнейших теоретических исследований в области сверхпроводимости, так и для практических исследований, направленных на создание сверхпроводящих болометров, фотонных детекторов на нанопроволоках, и других сенсорных устройств.

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

Подводя итог, 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, Николай Анатольевич Степанов, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Титов Михаил Леонидович,  
кандидат физико-математических наук,  
профессор (исследователь) физико-технического факультета  
Национального исследовательского университета ИТМО



*Handwritten signature*  
01.12.2020

Национальный исследовательский университет ИТМО  
Почтовый адрес: Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101  
Тел.: +7 (812) 232-97-04  
E-mail: [mikhail.titov@gmail.com](mailto:mikhail.titov@gmail.com)

*Титов М.Л.*  
*С. Корейкина*  
*С. Вн.*