ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Антоненко Даниила Сергеевича «Эффекты топологии и взаимодействия в неупорядоченных сверхпроводниках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.02 — «Теоретическая физика»).

Исследование эффектов топологии, взаимодействия и сверхпроводящих корреляций в неупорядоченных электронных системах является важной и актуальной задачей современной теоретической физики. Неупорядоченные системы изучаются в течение многих лет, поскольку беспорядок в электронных системах приводит к квантовым явлениям, корректное описание которых требует использования микроскопических подходов. Беспорядок почти всегда присутствует в реальных материалах. Его роль особенно важна для описания свойств мезоскопических сверхпроводящих систем, в частности, неупорядоченных сверхпроводящих пленок, имеющих приложения в детекторах излучения, а также сверхпроводящих нанопроволок, которые могут быть использованы для реализации как обычных, так и топологических кубитов с майорановскими нулевыми модами. Взаимное влияние топологического порядка и сверхпроводящих корреляций в неупорядоченных системах является активно развивающейся областью теории конденсированного состояния.

В основополагающих работах по исследованиям неупорядоченных систем с межэлектронным взаимодействием, главным образом, рассматривался диапазон энергий в окрестности энергии Ферми, в котором электроны имеют диффузный характер движения. Такое рассмотрение может иметь ограниченную применимость, если говорить об интерпретации экспериментов для реальных материалов. Более общее описание может предполагать учет баллистических режимов межэлектронного рассеяния и рассеяния на примесях. Это может приводить к существенным модификациям известных формул для плотности состояний или критической температуры сверхпроводящего перехода в тонких пленках.

Указанным проблематикам и посвящена диссертационная работа Д. С. Антоненко.

Актуальность теоретического исследования эффектов топологии и взаимодействия в неупорядоченных сверхпроводниках связана с тем, что эти системы имеют большой потенциал для применений в элементной базе считывающих и квантово-информационных устройств. Помимо этого, исследования связаны с применением методов нелинейной сигма-модели, что также является актуальным для теории сверхпроводящих систем с топологическим порядком.

Диссертация Д. С. Антоненко состоит из введения, трех глав, заключения и семи приложений. Полный объем диссертации составляет 125 страниц текста с 20 рисунками и двумя таблицами. Список литературы содержит 140 наименований.

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 изучается баллистическая поправка к туннельной плотности состояний в трехмерном металле, учитывающая одновременно как беспорядок, так и электрон-электронное взаимодействие. Обсуждается универсальность величины разрыва производной в плотности состояний на уровне Ферми.

Во второй главе изучается эффект подавления температуры сверхпроводящего перехода T_c в разупорядоченных пленках, вызванный одновременным эффектом беспорядка и отталкивания из-за межэлектронного взаимодействия. Показано, что экспериментальные данные по подавлению T_c могут быть удовлетворительно объяснены в предположении о том, что основной вклад происходит от процессов трехмерного баллистического движения электронов с типичным расстоянием между точками взаимодействия и рассеяния на примеси порядка нескольких длин волн. Обсуждается описание экспериментальных данных с помощью предложенной модифицированной формулы для T_c.

В третьей главе в рамках сигма-модели вычисляется дисперсия безразмерного кондактанса, определенного через тепловой кондактанс, его третий кумулянт, фактор Фано и дисперсия топологического индекса в сверхпроводящей многоканальной проволоке в критической точке между топологической и тривиальной фазами. Получены результаты для разных масштабов длин проволоки. А именно, получено решение для диффузного режима, когда длина проволоки меньше корреляционной длины. Помимо этого, построенный подход воспроизводит результат Дорохова-Мелло-Перейра-Кумара для противоположного предела длинной системы с супер-омическим поведением кондактанса. Стоит отметить, что исследования 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. На рис.1.1 в тексте диссертации не достаточно ясно сделано сравнение вкладов в плотность состояний вблизи энергии Ферми от 3D баллистики и 2D диффузии. На рисунке построены зависимости безразмерных баллистических вкладов сплошными линиями, а пунктиром схематично показана диффузионная корневая часть. Было бы полезно графически сравнить их абсолютные величины или изобразить их сумму.
2. В главе 3 рассмотрение касается критической точки между топологической и тривиальной фазами, когда закрывается щель в спектре и майорановские моды становятся делокализованы. При этом реализация топологических гейтов с хорошо определенными майорановскими состояниями подразумевает топологическую фазу с конечной щелью. Было бы желательно, если автор диссертации обсудил более детально, как именно будут отличаться полученные

результаты для флуктуаций кондактанса в случае конечной щели в спектре? Будет ли результат легко предсказуемым в случае одного канала?

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 Антоненко Даниила Сергеевича **«Эффекты топологии и взаимодействия в неупорядоченных 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 неупорядоченных и топологических сверхпроводников, так и для практических исследований, направленных на создание ультрачувствительных фотонных детекторов на основе сверхпроводящих пленок, и на реализацию прототипов топологических кубитов с майорановскими фермионами, которые могут существовать в нанопроволоках с наведенной сверхпроводимостью и спин-орбитальной связью.

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, Даниил Сергеевич Антоненко, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Шапиро Дмитрий Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории физики микро- и наноструктур
ФГУП "ВНИИА им. Н. Л. Духова"

26.11.2020

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
Почтовый адрес: 127055, Москва, ул. Сущевская, 22
Тел.: +7 (977) 261-18-74
E-mail: shapiro.dima@gmail.com

Подпись к.ф.-м.н. Д. С. Шапиро заверяю

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