

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет

«Высшая школа экономики»

д.р.н., профессор Вадим Валерьевич Радаев



*В.В. Радаев*

*декабрь* 2020 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Даниила Сергеевича Антоненко  
«Эффекты топологии и взаимодействия в неупорядоченных  
сверхпроводниках»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

*Актуальность темы диссертации.* Диссертационная работа посвящена изучению мезоскопических проявлений беспорядка в электронной подсистеме неупорядоченных сверхпроводников. Работа состоит из трех частей. Первые две, соответствующие главам 1 и 2, посвящены изучению баллистических вкладов в характеристики транспортных явлений, которые прежде изучались лишь в контексте диффузного движения. В главе 1 такое продолжение в баллистическую область делается для поправки к туннельной плотности состояний трехмерного металла. В главе 2 такое продолжение производится для сдвига критической температуры сверхпроводящей пленки. Это исследование особенно актуально, поскольку объясняет расхождение между существовавшей теорией, не учитывавшей баллистический вклад, и многочисленными экспериментальными данными.

Третья часть работы самая внушительная и посвящена транспортным свойствам неупорядоченных одномерных проволок класса симметрии D в критическом состоянии. Такие проволоки могут находиться в одной из двух

топологических фаз в зависимости от реализации беспорядка, и под критическим состоянием подразумевается ансамбль, в котором среднее (по беспорядку) состояние находится на границе фазового перехода. Топологические сверхпроводники активно исследуются в последние десять лет в связи с возникновением в них топологических краевых состояний – майорановских фермионов. Большинство способов обнаружить их базируется на транспортных измерениях в (квази)одномерных системах, что делает проведенное исследование особенно актуальным.

*Новизна полученных результатов и выводов.* Основные результаты диссертации получены впервые:

1. Изучена баллистическая поправка к туннельной плотности состояний во всем диапазоне энергий, в том числе вдали от поверхности Ферми.
2. Впервые вычислен вклад трехмерного баллистического рассеяния в сдвиг критической температуры сверхпроводящих пленок.
3. Впервые вычислены старшие моменты кондактанса в топологических проводах класса симметрии D.
4. Впервые построен радиальный базис и описана структура собственных функций оператора Лапласа-Бельтрами на многообразии суперсимметричной сигма-модели ранга 2.

*Апробация работы и публикации.* Результаты работы доложены на нескольких конференциях и семинарах ученого совета ИТФ им. Л.Д.Ландау РАН и опубликована в трех публикациях:

1. Antonenko D., Skvortsov M. Ballistic correction to the density of states in an interacting three-dimensional metal // Phys. Rev. B. — 2020. — февр. — т. 101, вып. 6. — с. 064204. — DOI: 10.1103/PhysRevB.101.064204.

2. Antonenko D. S., Skvortsov M. A. Superconductivity Suppression in Disordered Films: Interplay of Two-dimensional Diffusion and Three-dimensional Ballistics // JETP Letters. — 2020. — сент. — т. 112, вып. 7. — с. 466. — DOI: 10.1134/S0021364020190017.

3. Antonenko D. S., Khalaf E., Ostrovsky P. M., Skvortsov M. A. Mesoscopic conductance fluctuations and noise in disordered Majorana wires // submitted to Phys. Rev. B. —. — arXiv:2007.10815.

*Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.* В диссертации подробно и ясно изложены как сами положения и выводы, так и промежуточные выкладки и обоснования. В работе используются современные методы теоретической физики, в первую очередь диаграммная техника и метод нелинейной суперсимметричной сигма-модели. Где возможно, результаты сравниваются с существующими экспериментальными данными, а отдельные положения проверены численно.

Текст написан ясным и точным языком, сопровождается большим количеством ссылок на предшествующие работы в этой области. Также имеется большое количество подробных приложений, в которых приведены дополнительные детали вычислений.

*Соответствие содержания диссертации автореферату и указанной специальности.* Содержание диссертации полностью соответствует автореферату и специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

*Значимость результатов для науки и производства.* Проведенная работа – теоретическая и развивает существующую теорию неупорядоченных сверхпроводников и теорию топологических сверхпроводников. Результаты первой и второй глав демонстрируют существенную роль (квази)баллистических процессов в неупорядоченных системах. Особую значимость имеют результаты второй главы, так как они разрешают существовавшие до сих пор разногласия между теорией и экспериментом в отношении зависимости критической температуры сверхпроводящих пленок от силы беспорядка.

Наиболее тонкая и сложная работа выполнена в третьей главе, где существенно развит аппарат вычисления транспортных характеристик (в первую очередь, моментов проводимости) квазиодномерных систем средствами нелинейной суперсимметричной сигма-модели старших рангов. В частности, значительно углублено понимание структуры радиального собственного базиса оператора Лапласа-Бельтрами на многообразии сигма-модели, подробно описаны семейства собственных функций для модели ранга  $n=2$  и сформулированы гипотезы о похожей структуре базиса в других суперсимметрических пространствах. Эти достижения не только позволили решить поставленную в диссертации задачу о нахождении моментов

проводимости для произвольной длины провода, но и имеют самостоятельную ценность для развития теоретической и математической физики систем на сложных многообразиях.

*Замечания по диссертационной работе.* 1) На Рисунке 2.4 (а-в) приведены экспериментальные данные (черные точки) и теоретическая подгонка (красная кривая) для трех материалов. На подрисунке а) теоретическая кривая построена только начиная с  $k_{F1} = 3.5$ , так что примерно треть точек остается левее области, в которой изображена теоретическая кривая. В то же время на подрисунках б) и в) кривые изображены во всей области, в которой есть точки. Соответственно, непонятно, что случилось подрисунке а): (i) теория применима только для определенной параметрической области, т. е. для данных с  $k_{F1} < 3.5$  формула неприменима и они поэтому не учтены? Или же (ii) эти данные сами по себе ненадежные и поэтому не учтены? Или (iii) - просто случайность: подгонка произведена по всем точкам, но кривая изображена только для  $k_{F1} > 3.5$ ? Если имеет место (i) или (ii), следовало бы пояснить это обстоятельство.

2) В пунктах 3.2 и 3.5.2 обсуждается фактор Фано, при этом вычислен «псевдоусредненный» фактор Фано, а не «настоящий» усредненный фактор Фано. По-видимому, это связано с тем, что средний фактор Фано в рамках используемой модели сосчитать невозможно. Стоило пояснить, почему сосчитано именно псевдоусредненное значение и насколько оно информативно. Казалось бы, физические величины определяются фактором Фано, поэтому понятен смысл среднего фактора Фано. Псевдоусредненный фактор Фано прямого физического смысла, вроде бы не имеет (?). Почему, тем не менее, его полезно рассматривать?

3) В диссертации немало опечаток и тому подобных мелочей. Например, во введении, при обсуждении формулы (1) всюду стоят ссылки на формулу (2.1), дублирующую формулу (1) в другой, более поздней главе. При описании структуры матрицы  $\Lambda$  в пункте 3.4.1 (стр. 67) говорится о нулевых элементах, хотя имеются в виду ННулевые, и т.п.

Приведенные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

*Вывод.* Диссертационная работа Даниила Сергеевича Антоненко «Эффекты топологии и взаимодействия в неупорядоченных сверхпроводниках», соответствует требованиям пунктов 9-10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником Международной лаборатории физики конденсированного состояния федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» Владимиром Исааковичем Юдсоном.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Международной лаборатории физики конденсированного состояния федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», протокол № 5 от «4» декабря 2020 года.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)

Адрес: 101000 г. Москва, ул. Мясницкая, 20.

Тел.: (495) 771-32-32

Электронная почта: [hse@hse.ru](mailto:hse@hse.ru)

Сайт: <http://www.hse.ru>

Заведующий Международной лабораторией физики конденсированного состояния д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Юрий Генрихович Махлин

Главный научный сотрудник Международной лаборатории физики конденсированного состояния д.ф.-м.н., профессор

Владимир Исаакович Юдсон

*подпись за*

СПЕЦИАЛИСТ

УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛА  
ПРОТОПОВ А.А.

