



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

мкр. Орлова роща, д. 1, г. Гатчина, Ленинградская область, 188300
Телефон: (81371) 4-60-25, факс: (81371) 3-60-25. E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru
ОКПО 02698654, ОГРН 1034701242443, ИНН 4705001850, КПП 470501001



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

№ 22

«09» декабря 2020 г.

д.ф.-м.н. **В.В. Воронин**

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Степанова Николая Анатольевича

«Флуктуационная проводимость и плотность состояний в низкоразмерных сверхпроводниках», представленной к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Львиную долю современной физики конденсированного состояния составляет изучение свойств взаимодействующих (и, зачастую, скоррелированных) неупорядоченных систем многих тел. Особенности поведения таких систем, связанные с необходимостью одновременного учета взаимодействия квазичастиц и беспорядка, их взаимовлияния, а также совместного влияния на корреляции и дальний порядок (в случае существования последнего) представляют собой значительную часть современного «поля битвы за урожай» в физике конденсированного состояния. При этом с понижением размерности сложность явлений и нетривиальность их описания, как правило, возрастает. В качестве примеров можно упомянуть неупорядоченные магнетики, сегнетоэлектрики и жидкие кристаллы; бозевские (квантовые) жидкости, стекла и конденсаты; «грязные» металлы и полупроводники вблизи перехода металл-диэлектрик, квантовые проволоки;

сильнокоррелированные тяжелофермионные и кондовские системы, различные вариации квантового эффекта Холла (двумерный электронный газ, графен, топологические изоляторы), неупорядоченные БКШ- и ВТСП-сверхпроводники, и т.п.

Представленная диссертация посвящена современным проблемам физики неупорядоченных БКШ-сверхпроводников, т.е. именно скоррелированной неоднородной взаимодействующей системе, притом с акцентом на явления в низких размерностях. Данное исследование является **весьма актуальным** как с точки зрения фундаментальной ценности полученных результатов и разработанных методов в свете изучения фазовой диаграммы сверхпроводник-диэлектрик, так и с прикладной точки зрения --- в связи со значительно возросшим в последнее время интересом к технологическим применениям неупорядоченных сверхпроводников в микро- и наноэлектронике, включая задачу построения квантового компьютера на сверхпроводящих кубитах.

Целью диссертации является подробный анализ влияния флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка на проводимость металла в нормальном состоянии (этому вопросу посвящена первая часть работы), а также разработка адекватного теоретического подхода к описанию неоднородного сверхпроводящего состояния в квазиодномерных сверхпроводниках (вторая часть).

Первая задача была поставлена в конце 60-х годов прошлого столетия и за последующую более чем полувековую историю привлекла внимание большого числа выдающихся специалистов в области теории твёрдого тела. При наличии по сути всего двух варьируемых параметров (сила беспорядка и температура; иногда - магнитное поле) задача оказалась весьма богатой на разнообразные режимы в связи с тем, что оба эти параметра входят в нее несколькими способами: соотношение температуры и силы беспорядка определяет как близость к/удаленность от сверхпроводящего перехода, так и режим (диффузионный или баллистический) распространения электронов в случайном примесном потенциале, причем упругая длина пробега в последнем должна еще сравниваться с размером куперовской пары. Вдобавок, существуют три основных типа процессов (и, соответственно, три класса диаграмм), дающих существенный вклад в флуктуационную проводимость. Это так называемая параводимость, или прямой вклад в проводимость от куперовских пар, существующих выше T_c в меру наличия флуктуаций сверхпроводящего параметра порядка (диаграммы Асламазова-Ларкина); вклад, связанный с рассеянием электронов на сверхпроводящих флуктуациях (диаграммы Маки-Томпсона), а также вклад, происходящий из-за уменьшения в нормальной фазе выше T_c низкоэнергетической плотности одноэлектронных состояний (ПОС) --- реминисценция щели в упорядоченной фазе, --- который также индуцирован сверхпроводящими флуктуациями (диаграммы ПОС). Все три процесса дают вклады, различные по важности в разных упомянутых выше режимах. Как правило, многочисленные режимы и вклады изучались разными авторами по отдельности и в рамках неунифицированных подходов, что сделало картину неполной, а иногда неверной и/или противоречивой.

В настоящей диссертации описанная задача исследовалась в рамках диаграммной техники Келдыша и в подходе, позволяющем единообразно описать как диффузионный, так

и баллистической области параметров. В результате проделанной кропотливой работы ряд результатов предыдущих авторов был подтвержден; для других вкладов было продемонстрировано взаимное сокращение; наконец, была вычислена флуктуационная проводимость в физически важных областях, которые ранее не попадали в поле зрения теоретиков. Это позволило создать единую теорию флуктуационной проводимости БКШ-сверхпроводников, верную во всём релевантном диапазоне температур и силы беспорядка (всего было найдено и проанализировано пять параметрических областей и соответствующих режимов), с детализацией её для квазидвумерных систем. Решение данной задачи изложено в первой главе диссертации.

Вторая проблема, исследованная в диссертации, также имеет весьма долгую историю: полуфеноменологическая теория типа теории среднего поля для существенно неоднородных сверхпроводников, в которых источником неоднородности служат случайные пространственные флуктуации константы электрон-электронного взаимодействия была предложена Ларкиным и Овчинниковым в 1971 году --- подход, идейно (и, отчасти, результативно) схожий с теорией сверхпроводников с магнитными примесями Абрикосова-Горькова в версии Ю-Шибы-Русинова. Однако, вследствие наличия инфракрасных расходимостей данная теория оказывается неприменимой в низких размерностях, и особенно в квантовых проволоках. Это потребовало разработки и применения адекватных (и, как оказалось, весьма нетривиальных) методов описания, пригодных в одномерии.

Соответствующий подход к описанию локальной ПОС и функции распределения ПОС в неоднородных квантовых проволоках сформулирован, а соответствующие уравнения выписаны в четвертой главе диссертации для случая гауссово скоррелированных короткодействующих (по сравнению с эффективным размером куперовской пары в «грязном» пределе») пространственных флуктуаций параметра порядка. При этом отправной точкой исследования является уравнение Узаделя, сформулированное в терминах зависящего от энергии и координаты спектрального угла --- величины, однозначно связанной с локальной ПОС.

Две предшествующих главы диссертации (вторая и третья) посвящены разработке математического метода решения вышеупомянутой задачи и его обкатке на модельной задаче Уитни о нахождении никогда не падающей траектории (ННПТ) перевернутого математического маятника в поле стохастической горизонтально приложенной силы --- задаче, также имеющей восьмидесятилетнюю историю и определенную важность в математической физике. Уравнение, описывающее динамику угла доворота маятника в задаче Уитни (при условии его непереворота) формально схоже с пространственным уравнением Узаделя для спектрального угла при очевидном условии положительности плотности состояний (единственное существенное различие состоит в вещественности первого и комплексности второго параметров).

Для решения этих задач разработана и/или адаптирована впечатляющая совокупность сложных и современных теоретико-полевых методов. По мнению диссертанта, суперсимметричное описание в трактовке Паризи-Сула, скомбинированное с

методом трансфер-матрицы в интерпретации Ефетова-Ларкина является кратчайшим путем, приводящим к наиболее полному решению поставленной задачи.

Полученные в рамках вышеупомянутого подхода к проблеме ННПТ маятника результаты при отсутствии видимых ограничений на применимость метода позволяют заключить, что он пригоден для решения целого класса задач математической и теоретической физики, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями с дополнительным условием, наложенным на область существования решения. Совместная функция распределения углов и скоростей и функция распределения углов (вторая глава), а также ляпуновская экспонента (третья глава) найдены и проанализированы аналитически в важных предельных случаях и численно при произвольном соотношении между параметрами.

В заключении приведены основные результаты работы, а в двух обширных приложениях многочисленные технические детали используемого метода, что делает диссертацию ценным и подробным путеводителем по разработанным подходам. Список литературы, приведенный в конце диссертации, исчерпывающе полон.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных научных форумах. **Новизна и важность** представленных результатов и разработанных методов не вызывают сомнений.

Следует отметить, что диссертация написана удивительно прозрачным и ясным языком, весьма подробно и с полным пониманием как физического смысла описываемых явлений, так и деталей, используемых в ходе решения методов, что довольно нетипично при изложении физических задач такого уровня технической сложности.

Говоря о **недостатках** работы, упомянем единственный аспект --- некоторую неоднородность материала. А именно, диссертация, озаглавленная как посвященная свойствам неоднородных сверхпроводников, по факту содержит (а) законченное исследование флуктуационной проводимости сверхпроводников; (б) разработку оригинального математического подхода к описанию стохастических дифференциальных уравнений с решением в полосе; (в) полномасштабное применение этого подхода к задаче Уитни и (г) его формулировку для сверхпроводящего уравнения Узаделя.

Указанный недостаток, впрочем, полностью искупается тем, что объем выносимого на защиту материала даже избыточен для кандидатской диссертации. Также очевидно, что сложность разработанного подхода требовала, как дополнительного времени и усилий, так и дополнительной обкатки метода на модельной задаче Уитни, решение которой имеет самостоятельную ценность.

Диссертация «Флуктуационная проводимость и плотность состояний в низкоразмерных сверхпроводниках» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор Степанов Николай Анатольевич безусловно заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доклад Н.А. Степанова заслушан и обсужден на научном семинаре по физике конденсированного состояния НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 25 ноября 2020 г.

Отзыв обсужден и утвержден на Учёном совете Отделения Теоретической Физики (ОТФ) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ (протокол № 130 от 25 ноября 2020 года).

Отзыв подготовил:

Старший научный сотрудник
ОТФ НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,
к.ф.-м.н.

А.Г. Яшенкин
ayash@thd.pnpi.spb.ru

Учёный секретарь НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, к.ф.-м.н.



С.И. Воробьев
Vorobyev_SI@pnpi.nrcki.ru

Контакты ведущей организации:

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».
188300, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.
Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru.