ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.228.01 (Д 003.075.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН) ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело №_____

решение диссертационного совета от 25 июня 2021 года № 5

о присуждении Аксенову Сергею Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Кинетические и топологические свойства квантовых структур с сильным взаимодействием зарядовых и спиновых степеней свободы» по специальностям 01.04.11 – физика магнитных явлений, 01.04.07 – физика конденсированного состояния принята к защите 19 марта 2021 года, протокол № 2 Диссертационным советом Д 003.075.01 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки № 1514/нк от 25.11.2016.

Соискатель Аксенов Сергей Владимирович, 1986 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук «Влияние неупругих эффектов на спин-зависящий транспорт в наноструктурах» по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния защитил в 2011 году, в диссертационном совете Д 003.055.02, созданном на базе Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН. Работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), обособленное подразделение «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории теоретической физики ИФ СО РАН.

Научные консультанты: 1) доктор физ.-мат. наук, профессор Вальков Валерий Владимирович, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской

академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики; 2) доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, профессор Каган Максим Юрьевич, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты: *Аверкиев Никита Сергеевич*, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий сектором теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН; *Мельников Александр Сергеевич*, доктор физ.-мат. наук, заведующий отделом физики сверхпроводников Института физики микроструктур РАН - филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»; *Манцевич Владимир Николаевич*, доктор физ.-мат. наук, доцент кафедры полупроводников и криоэлектроники, физического факультета ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, в своем положительном заключении, подписанном и.о. заведующего лабораторией теории твердого тела, отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма, доктором физ.-мат. наук, член-корреспондентом РАН Арсеевым Петром Иваровичем, отметила, что представленные в диссертации новые результаты вносят существенный вклад в теорию неравновесного транспорта через наноразмерные системы с внутренними степенями свободы.

Соискатель имеет 23 работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, все они выполнены на тему диссертации, в том числе: Phys. Rev. B – 2 работы, J. Phys.: Cond. Mat. – 1, J. Magn. Magn. Mat. – 3, Письма в ЖЭТФ – 4, ЖЭТФ – 3, J. Low Temp. Phys. – 1. Общий объем 13 п.л.

Наиболее значимые работы: **1.** Вальков В.В., Аксенов С.В., Уланов Е.В. Индуцирование спин-флип процессами резонанса Фано при туннелировании электрона через спиновые структуры атомного масштаба. // ЖЭТФ. – 2013. – Т.143. – С.984. **2.** Val'kov V.V., Aksenov S.V. Electron transport through Josephson junction containing dimeric molecule. // J. Low Temp. Phys. – 2016. – V.185. – P.446. **3.** Kagan M.Yu., Val'kov V.V., Aksenov S.V. Coulomb interactions-induced perfect spin-filtering effect in a quadruple quantum-dot cell.// J. Magn. Magn. Mat. – 2017. – V.440. – P.15. **4.** Val'kov V.V., Aksenov S.V. Electronic spin polarization in the Majorana bound state in one-dimensional wires. // J. Magn. Magn. Mat. – 2017. – V.440. – P.112. **5.** Kagan M.Yu., Val'kov V.V., Aksenov S.V. Effects of anisotropy and Coulomb interactions on quantum transport in a quadruple quantum-dot structure. // Phys. Rev. B. – 2017. – V.95. – P.035411. **6.** Вальков В.В., Аксенов С.В. Неравновесные функции Грина в атомном

представлении и проблема квантового транспорта электронов через системы с внутренними степенями свободы. // ТМФ. – 2018. – Т.194. – С.277. **7.** Val'kov V.V., Aksenov S.V. Spin-polarized-current switching mediated by Majorana bound states. // J. Magn. Magn. Mat. – 2018. – V.465. – P.88. **8.** Val'kov V.V., Kagan M.Yu., Aksenov S.V. Fano effect in Aharonov-Bohm ring with topologically superconducting bridge. // J. Phys.: Cond. Mat. – 2019. – V.31. – P.225301. **9.** Аксенов С.В., Каган М.Ю. Коллапс резонанса Фано вследствие нелокальности майорановского состояния. // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т.111. – С.321. **10.** Aksenov S.V., Zlotnikov A.O., Shustin M.S. Strong Coulomb interactions in the problem of Majorana modes in a wire of the nontrivial topological class BDI. // Phys. Rev. B. – 2020. – V.101. – P.125431.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные):

Ведущая организация (ФИАН). Отзыв положительный. Замечания: **1).** Хотя это относится только к вводной части, а не к содержанию диссертации, заметим, что сравнение моделей типа Китаева с реальными экспериментальными системами с наведенной в полупроводниковых проволоках сверхпроводимостью, не очень обоснованно. В реальных системах наведенные сверхпроводящие корреляции всегда будут большого радиуса, а в модели Китаева аномальные средние локализованы (атомного масштаба); **2).** В первой главе используется очень упрощенный подход, фактически основанный на одночастичных коэффициентах прохождения через систему, полученных для равновесного случая. Для взаимодействующей системы этот подход не учитывает возможность нахождения спиновой системы в неравновесном состоянии. Впрочем, во второй главе построена более аккуратная теория; **3).** При обсуждении в разделе 2.3.3 сравнения полученных формул с подходом Ландауэра – Буттикера не имеет большого смысла рассматривать вид эффективного коэффициента прохождения при всех энергиях. При конечных напряжениях eV в системе с взаимодействием имеет физический смысл только эффективный коэффициент прохождения от 0 до eV. Поэтому при малых напряжениях совершенно неважно как ведет себя коэффициент прохождения во взаимодействующей системе при больших энергиях и его отличия от одночастичного коэффициента прохождения; **4).** В диссертации есть случаи употребления неправильной терминологии (хотя, видимо, удобной как жаргон). Например, на: стр. 227 говорится «(будем)… учитывать слагаемые с тремя и более ферми-операторами для описания майорановских состояний…». Такие многочастичные состояния уже не являются «настоящими» майорановскими состояниями, которые одночастичны. Это, в лучшем случае, какие-то специальные локализованные состояния в многочастичной системе. Также неправильно говорить, что для операторов Хаббарда выполняется теорема Вика. Есть правила, позволяющие построить определенную диаграммную технику, но собственно тео-

рема Вика для операторов Хаббарда не выполняется; **5).** При изучении в главе 5 влияния кулоновского взаимодействия на топологические фазы проволоки в модели Шубина – Вонсовского учтено исходно только одноузельное хаббардовское отталкивание. Между тем, межузельное взаимодействие вносит в систему нелокальные корреляции, которые, видимо, существенны для топологических фаз; **6).** Есть также общее замечание, касающееся дальнейшего развития теории в этой области. В работе рассмотрены строго одномерные системы, нет обобщения результатов, полученных для одномерных цепочек, на квазиодномерный случай. В то же время, в экспериментах в большинстве случаев имеют дело с квазиодномерными системами.

Д.ф.-м.н. Аверкиев Н.С. – официальный оппонент. Отзыв положительный. Замечания: **1).** Стр.31 На рисунке 1.4 разница в положении пиков равна 3*I, хотя разница в энергии состояний с полным спином $S = 1$ и 0 равна I? **2).** Стр.70 Поведение магнетосопротивления при замене знака магнитного поля, несимметричное, в чем причина? **3).** Стр.98 Указано, что параметры Γ_σ много меньше всех характерных энергий E_α. Нужно ли сохранять параметры Γ_σ в знаменателях выражений 2.78? **4).** Стр.172 Приведено выражение для условия возникновения топологически нетривиальной фазы для параметров одночастичных состояний. В случае континуальной модели для спектра с квадратичным спектром это условие означает закрытие щели при каких то значениях волнового вектора.Что физически означает условие 4.4? **5).** Стр.198 Приведен коррелятор шума в устройстве, но далее никаких вычислений не приведено. Наверное, эту часть вычислений не следовало бы приводить? **6).** Общее замечание касается обзора литературы в начале четвертой главы. Анализ работ по экспериментальному и теоретическому исследованию свойств майорановских состояний кажется чрезмерно затянутым. Это мешает более целостному восприятию материала, изложенному в данной главе. *Д.ф.-м.н. Мельников А.С. – официальный оппонент.* Отзыв положительный. Замечания: **1).** Основной недостаток работы, на мой взгляд, заключается в том, что при изложении целого ряда интересных утверждений автор не приводит качественных физических аргументов, которые могли бы прояснить ситуацию для читателя и усилить результаты диссертации. В качестве конкретных примеров можно упомянуть отсутствие качественного объяснения изменения числа майорановских состояний в полупроводниковом проводе с усложненным типом сверхпроводящего спаривания в главе 5, или недостаточное, на мой взгляд, пояснение эффекта подавления критического тока джозефсоновского контакта в главе 2; **2).** Также, мне представляется, что автор уделяет недостаточное внимание мотивации рассматриваемых им моделей с точки зрения реального эксперимента. Было бы очень правильно привести, например, более подробный анализ возможных экспериментальных реализаций задачи о транспортных свойствах сис-

темы с парой взаимодействующих магнитных примесей, включая оценки характерных параметров как обменного, так и кулоновского взаимодействий. Было бы также полезно для читателей обсудить диапазон возможных параметров кулоновского взаимодействия в майорановском проводе и степень экспериментальной адекватности модели с усложненным сверхпроводящим параметром порядка. В отсутствие таких пояснений, обсуждений и оценок экспериментально доступных величин выбор теоретических моделей выглядит недостаточно мотивированно; **3).** Мне представляется, что автору следовало бы уделить больше внимания обоснованности одночастичного подхода типа Ландауэра к расчету транспортных свойств контактов с магнитными примесями в главе 1. При каких условиях возможны проявления эффекта Кондо в такой задаче с квантовыми точками? **4).** Проблема детектирования майорановских состояний и подтверждения их нелокальности, рассматриваемая в главе 4, тесно связана с вопросом сохранения четности числа частиц в проводе. Фиксация четности может быть осуществлена, например, в условиях кулоновской блокады. Возникает ли необходимость в такой фиксации четности в предлагаемом автором интерференционном эксперименте (рис.4.5)? Как будут отличаться транспортные характеристики интерферометра при наличии и отсутствии кулоновской блокады (для майорановского провода) в этой системе? *Д.ф.-м.н. Манцевич В.Н. – официальный оппонент.* Отзыв положительный. Замечания: **1).** Представление обзора литературы в качестве введения к каждой отдельной главе является неудобным и мало информативным с точки зрения оценки масштабности и единства результатов, полученных в диссертационной работе. Написание единого обзора литературы позволяет подвести к формулировке проблемы, решаемой в диссертационной работе, и явным образом демонстрирует логическое единство решаемых в работе задач; **2).** Обзор литературы не является полным и четко структурированным. В частности, в первой главе не упоминаются работы, в которых исследовано сосуществование эффекта Фано и эффекта Кондо, а также их взаимное влияние. Обзор литературы ко второй главе написан в самом общем виде без упоминания основополагающих работ в области спинового транспорта, например работы группы под руководством Дитера Вайса (Dieter Weiss) или работы Игоря Зутича (Igor Zutic), опубликованные после обзора в Review of Modern Physics; **3).** При описании транспортных характеристик в первой главе не учтено кулоновское взаимодействие (хаббардовские члены), что может приводить к потере ряда эффектов, наблюдаемых в эксперименте. Как скажется учет кулоновского взаимодействия на полученных в первой главе результатах; **4).** В третьей главе проведено исследование структуры из четырех квантовых точек в геометрии ромба, расположенного между берегами туннельного контакта. Возникает ряд вопросов по исследуемой модели и полученным результатам: **а)** с чем связан выбор модели, в которой от-

талкивание между электронами на разных квантовых точках учитывается только в центральной части. Как такое условие может быть реализовано на практике, особенно в рассматриваемом случае одинаковых квантовых точек; **b)** в реальности создать настолько симметричную структуру невозможно, насколько критично для полученных результатов отсутствие симметрии в исследуемой системе, например, если все четыре амплитуды туннельных переходов по периметру структуры будут отличны или будут отличаться уровни энергии квантовых точек; **c)** каким образом в эксперименте магнитное поле можно приложить только к области, в которой локализованы квантовые точки и избежать его влияния на состояния в берегах туннельного контакта; **d)** каким образом выполнен расчет неравновесных чисел заполнения; **e)** кулоновское взаимодействие в исследуемой системе учтено в самой простой модели в методе среднего поля, который позволяет уловить качественные особенности поведения системы, но обычно переоценивает роль кулоновского взаимодействия. Подход, основанный на уравнениях Гейзенберга позволил бы учесть кулоновские корреляции точно и, возможно, получить ряд новых интересных эффектов; **f)** интересным и важным представляется исследовать поведение вольт-амперных характеристик, которые в данной главе отсутствуют; **5).** В четвертой главе исследованы туннельные процессы через нанопроволоки, соединенные сверхпроводящим мостиком для симметричного случая. Из текста диссертационной работы неясно насколько важным является выполнение условия симметрии процессов между проволокой и мостиком, и как изменятся результаты в случае, если туннельные процессы между нанопроволокой и мостиком перестанут быть симметричными; **6).** В четвертой и пятой главах диссертационной работы проведен анализ особенностей квантового транспорта и особенностей реализации фаз топологической сверхпроводимости в проволоке. Во введениях этих глав утверждается, что спин-орбитальная связь в такой структуре должна быть достаточно сильной. Однако, из текста диссертации остается неясным: по сравнению с какими параметрами системы она является сильной, а также насколько это условие является критическим для возникновения майорановских состояний. Кроме того, следовало бы привести примеры конкретных материалов; **7).** Следовало бы привести оценки получаемых в работе характеристик для параметров реальных наноструктур.

Д.ф.-м.н. Ляпилин И.И. Отзыв положительный. Замечания: **1).** На мой взгляд, автором недостаточно подробно дано объяснение эффекта отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) в главе 2. В частности, автор ссылается на условие полноты, которое выполняется всегда, а ОДП реализуется лишь при активации определенных переходов. *Д.ф.-м.н. Михеенков А.В.* Отзыв положительный. Замечания: **1).** В качестве технического замечания отмечу несамодостаточность подписей к большинству рисунков, что заставляет

неоднократно переключаться между текстом и иллюстрациями. Было бы разумно расшифровывать аббревиатуры (кроме стандартных), а также давать ссылки на формулы, где вводятся используемые на рисунке параметры.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается строгим соответствием направлений научных исследований, выполняемых оппонентами и реализуемых в ведущей организации, тематике представленной диссертационной работы, наличием публикаций в соответствующей области исследований.

Совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Впервые показана реализация эффекта Фано при одноэлектронном неупругом транспорте через спиновые структуры атомного масштаба. Показано, что спиновый эффект Фано определяет физический механизм аномально высокого магнитосопротивления.

2. На основе метода неравновесных функций Грина в атомном представлении развита теория, позволяющая описывать кинетические процессы в микроконтактах, которые содержат структуры с внутренними степенями свободы.

3. На основе развитого подхода описан ряд эффектов неравновесного туннельного транспорта в системах с магнитными примесями при строгом учете сильных спиновых и электронных корреляций.

4. Предложен способ спиновой фильтрации в системе из четырех квантовых точек, основанный на особенностях интерференции в присутствии электрон-электронных взаимодействий.

5. Изучена возможность детектирования майорановских состояний в проволоке со спин-орбитальным взаимодействием Рашба, когда такая наноструктура выступает в роли мостика, соединяющего рукава интерференционного устройства.

6. Описан механизм переключения спин-поляризованного тока в системе полуметалл/сверхпроводящая проволока/полуметалл за счет зависимости спиновой поляризации майорановского связанного состояния от направления внешнего магнитного поля.

7. Впервые численно получена диаграмма топологических фаз проволоки со спин-орбитальным взаимодействием и сверхпроводящим спариванием расширенного s-типа в режиме сильных зарядовых корреляций.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что обнаружен механизм реализации эффекта Фано за счет спин-спиновых взаимодействий. В диссертации впервые проведено обобщение метода неравновесных функций Грина и диаграммной техники Келдыша на случай атомной статистики, что позволяет рассчитать электронный ток через наноразмерную структуру с произвольным числом уровней и, в частности, описать осо-

бенности вольт-амперных характеристик, вызванные сильной неравновесностью. Предсказан ряд транспортных эффектов в системах, содержащих сверхпроводящие проволоки со спин-орбитальной связью в магнитном поле, которые вызваны присутствием майорановских состояний. Проведено обобщение метода ренорм-группы для матрицы плотности на случай операторов Хаббарда, что позволило изучить вопрос о влиянии сильных зарядовых корреляций на реализацию фаз топологической сверхпроводимости в проволоке с аномальным спариванием расширенного s-типа.

Значение полученных результатов исследования для практики заключается в том, что соискателем обнаружен ряд эффектов, которые могут быть использованы при экспериментальном изучении наноразмерных систем и в устройствах электроники, например, магнитосопротивление спиновых структур на основе эффекта Фано; отрицательная дифференциальная проводимость и переключение между состояниями с разными проекциями полного спина устройства с магнитной молекулой; разная заселенность триплетных состояний димера в нулевом магнитном поле; спиновая фильтрация и отрицательная дифференциальная проводимость в системе квантовых точек. Кроме того, в диссертации анализируются особенности квантового транспорта в системах с топологическими сверхпроводниками. Полученные в рамках этого направления результаты перспективны для решения проблемы обнаружения майорановских квазичастиц.

Достоверность полученных результатов определяется тем, что теория построена на основе надежных и общепризнанных методов, таких как неравновесные функции Грина, диаграммная техника Келдыша, атомное представление, гейзенберговские уравнения движения, метод неэрмитова эффективного гамильтониана и других. Полученные результаты демонстрируют совпадение с экспериментальными данными и теоретическими результатами других авторов в тех случаях, когда такое сравнение является возможным.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах исследования, таких как постановка задач, выбор аналитических и численных методов исследования, выработка и уточнение плана исследований, собственно выполнение исследований, анализ и интерпретация результатов, подготовка публикаций к печати, доклады и обсуждения результатов на научных конференциях.

На заседании 25 июня 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Аксенову Сергею Владимировичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении голосования совет в количестве 17 человек (2 члена участвовали дистанционно), из них 8 докторов физико-математических наук по специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений», 9 докторов физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 17 человек, вхо-

дящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 17, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета 24.1.228.01 (Д 003.075.01) Шабанов В.Ф.
д.ф.-м.н., академик РАН

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.228.01 (Д 003.075.01) Втюрин А.Н.
д.ф.-м.н.

25 июня 2021 г.