

## Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Владимира Сергеевича Проценко

«Электронные свойства и проводимость систем квантовых точек»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

**Актуальность темы диссертации.** Системы квантовых точек представляют собой объект активных экспериментальных и теоретических исследований на протяжении как минимум последних сорока лет. Высокий интерес к таким структурам вызван тем, что динамика электронов в очень ограниченном объеме порядка десятков нанометров определяется уникальными квантовыми явлениями. Из самых известных можно упомянуть эффект Кондо, кулоновскую блокаду, эффект четности в сверхпроводящих гранулах, явления мезоскопического магнетизма. Электронные свойства низкоразмерных структур также имеют решающее значение для развития современной электроники, в том числе для перспектив построения квантовых компьютеров. С чисто научной точки зрения, изучение физических процессов в квантовых точках, где эффекты взаимодействия электронов наиболее сильны, также имеет первостепенную важность. Помимо описания многочисленных явлений физики низкоразмерных структур, результаты подобных исследований также находят применение в области сильно коррелированных систем больших масштабов, например высокотемпературных сверхпроводников и спиновых жидкостей. Поэтому диссертация В. С. Проценко, несомненно является высоко актуальной научной работой.

**Содержание работы.** Диссертация посвящена развитию новых подходов и подробному анализу электронных корреляций и транспортных свойств туннельных структур из нескольких квантовых точек. Полный объем работы 146 страниц заметно больше большинства кандидатских диссертаций по естественным наукам. По своей структуре диссертация В. С. Проценко состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность работы, дан краткий обзор современного состояния науки о квантовых точках, сформулированы решаемые в диссертации задачи и перечислены основные результаты.

**Первая глава** также носит преимущественно вводный характер и содержит детальный вывод метода функциональной ренорм-группы для численного моделирования низкоразмерных сильно взаимодействующих систем. Подробно изложен вывод основных уравнений метода. Также детально обсуждаются преимущества и недостатки избранного подхода по сравнению с другими численными схемами, проанализированы различные варианты функциональной ренорм-группы с точки зрения способа усечения системы уравнений и ультрафиолетовой регуляризации. Приведены варианты уравнений в мадубаровском и келдышевском представлении, позволяющие изучать неравновесные свойства. Все выводы в пользу того или иного численного подхода протестированы на основе простой задачи с одной квантовой точкой, для которой в равновесном случае известно точное решение в рамках метода Бете-анзаца.



Во **второй главе** с помощью избранного метода изучается электронное состояние и транспорт в структуре из двух параллельных квантовых точек. Такие структуры замечательны тем, что в них могут возникать особенные коррелированные состояния, называемые сингулярной ферми-жидкостью. В этих состояниях в системе возникают локальные магнитные моменты, что вызывает трудности при применении стандартного метода функциональной ренорм-группы (также как и многих других численных методов). В диссертации предложена модификация подхода при помощи введения нарушающего спиновую симметрию контрчлена, который затем в процессе перенормировки постепенно выключается. Таким образом удастся добиться правильного основного многочастичного состояния системы. Продемонстрировано впечатляющее согласие полученных результатов с результатами более точных (и экспоненциально более затратных) численных методов. Также проведен подробнейший анализ различных режимов намагниченности и проводимости системы двух квантовых точек в зависимости от туннельных параметров, напряжения на затворе и внешнего магнитного поля, в том числе в частично и в полностью асимметричном случае. Показано, что, в зависимости от параметров, состояние сингулярной ферми-жидкости может возникать как посредством квантового фазового перехода со скачкообразным изменением проводимости, так и непрерывным образом. Для каждого из режимов предложено качественное, а также полуаналитическое объяснение полученных результатов.

**Третья глава** содержит дальнейшее развитие полученных ранее результатов в двух направлениях. Во-первых, изучаются системы из четырех квантовых точек, для которых применение альтернативных и более трудоемких численных методов становится практически невозможным. Во-вторых, рассмотрен случай неравновесного транспорта и построены вольт-амперные характеристики как двух-, так и четырехточечных структур. В системах с четырьмя квантовыми точками обнаружен особенный режим с двумя локальными магнитными моментами. В этом режиме протекающий ток оказывается поляризован по спину, то есть система из четырех квантовых точек может работать в качестве спинового фильтра. Также вычислены зарядовый и спиновый ток, спиновые корреляторы и локальная электронная плотность в системе квантовых точек при конечном внешнем напряжении в режиме неравновесного транспорта. Продемонстрировано, что состояние сингулярной ферми-жидкости (и соответствующий ему локальный магнитный момент) может разрушаться по мере роста напряжения в два этапа. Причем для системы с четырьмя квантовыми точками в промежуточном режиме наблюдается дробное значение локального момента и отрицательное дифференциальное сопротивление: ток убывает с увеличением приложенного напряжения.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

**Новизна** и высокая **научная значимость** полученных результатов не вызывают сомнений. Особенно стоит подчеркнуть большой вклад В. С. Проценко в развитие метода функциональной ренорм-группы, который может быть использован для решения широкого круга других физических задач. **Обоснованность** и **достоверность** полученных результатов подтверждается их сравнением с результатами альтернативных численных методов, в том числе полученных другими учеными, качественным и



полуаналитическим объяснением всех наблюдаемых особенностей, проверкой предельных случаев на соответствие здравому смыслу. Диссертация основана на материале четырех научных статей, три из которых опубликованы в *Physical Review B*. Научная репутация журнала также подтверждает достоверность и актуальность полученных результатов.

Диссертация написана очень хорошим языком, она легко читается, все утверждения и выводы даются с подробными пояснениями. Впечатляет высокий технический уровень проделанной работы, требующей большой аккуратности и проработки многочисленных деталей. Полученные результаты также очень интересны. Несомненно, проделанная В. С. Проценко работа заслуживает высокой оценки.

Также стоит высказать несколько **замечаний** к представленной диссертации.

1. Метод функциональной ренорм-группы допускает большой произвол в выборе схемы регуляризации. При этом в зависимости от выбранной схемы может получаться разная зависимость собственной энергии и эффективной вершины взаимодействия от частоты. В то же время, истинная собственная энергия и параметр взаимодействия зависят от частоты вполне определенным образом. Можно ли использовать хотя бы приблизительное знание физической частотной зависимости для выбора наиболее «правильной» схемы обрезания? Какой из использованных в диссертации способов наиболее близок к такой «правильной» схеме?
2. Использованный численный метод основан на мацубаровской технике и допускает изучение эффекта конечной температуры. Результаты диссертации могли бы быть еще более полными, если бы включали обсуждение таких эффектов. Особенно интересно было бы узнать, что происходит с квантовым фазовым переходом в состоянии сингулярной ферми-жидкости, когда температура конечна.
3. В относительно недавней научной работе [P. Mehta, N. Andrei, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 216802 (2006)] предлагается точное решение задачи о неравновесном эффекте Кондо; впрочем, справедливость и точность этого решения до конца не ясны. Было бы интересно сравнить результаты метода функциональной ренорм-группы с предполагаемым точным решением. Это позволило бы оценить надежность вычислений в технике Келдыша, а заодно подтвердило бы (или опровергло) справедливость предложенного точного решения.
4. В диссертации магнитное поле рассматривается только в качестве силы, действующей на спин электронов по механизму Зеемана. В то же время в кольце из квантовых точек может наблюдаться интерференционный эффект Ааронова-Бома за счет орбитального действия магнитного потока через кольцо. Как мог бы такой эффект повлиять на состояние сингулярной ферми-жидкости и на проводимость?



Все перечисленные вопросы и замечания носят исключительно технический характер и скорее служат пожеланиями для возможных будущих исследований. Они ни в коей мере не снижают высокую оценку диссертации и не ставят под сомнение ее научную обоснованность.

Подводя итог, по актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне и достоверности полученных результатов диссертация В. С. Проценко «Электронные свойства и проводимость систем квантовых точек» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Владимир Сергеевич Проценко, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

24 декабря 2020

Старший научный сотрудник сектора квантовой мезоскопии  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН  
доктор физико-математических наук  
Павел Михайлович Островский

142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1А  
телефон: +7 916 3452697  
e-mail: ostrov@itp.ac.ru

С отзывом ознакомлен  
11.01.21

(Проценко В.С.)

Подпись П. М. Островского удостоверяю  
Ученый секретарь ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
к.х.н. С. А. Крашаков



## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Проценко Владимира Сергеевича  
на тему «Электронные свойства и проводимость систем квантовых точек»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

ФИО	Островский Павел Михайлович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень	доктор физико-математических наук
Научная специальность	01.04.02 – Теоретическая физика
Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук
Краткое наименование организации	ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
Место нахождения	Моск. обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1А
Почтовый адрес	Россия, 142432, Моск. обл., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1А
Телефон организации	+7 (495) 702-93-17
Адрес электронной почты; адрес официального сайта организации	office@itp.ac.ru; <a href="https://www.itp.ac.ru/">https://www.itp.ac.ru/</a>
Должность	старший научный сотрудник сектора квантовой мезоскопии ФГБУН ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
Адрес электронной почты; телефон официального оппонента	Тел.: +7 (916) 345-26-97; E-mail: ostrov@itp.ac.ru
Список основных публикаций в сфере исследований, которым посвящена диссертация (за последние 5 лет)	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Antonenko D. S., Khalaf E., Ostrovsky P. M., Skvortsov M. A. Mesoscopic conductance fluctuations and noise in disordered Majorana wires // Physical Review B. – 2020. – Т. 102. – №. 19. – С. 195152.</li><li>2. Ioselevich P. A., Ostrovsky P. M., Fominov Y. V. Mesoscopic supercurrent fluctuations in diffusive magnetic Josephson junctions // Physical Review B. – 2018. – Т. 98. – №. 14. – С. 144521.</li><li>3. Khalaf E., Ostrovsky P. M. Dynamics of Anderson localization in disordered wires // Physical Review B. – 2017. – Т. 96. – №. 20. – С. 201105.</li><li>4. Ado I. A., Dmitriev I. A., Ostrovsky P. M., Titov M. Sensitivity of the anomalous Hall effect to disorder correlations // Physical Review B. – 2017. – Т. 96. – №. 23. – С. 235148.</li></ol>




- |  |   |
|--|---|
|  | <ol style="list-style-type: none"><li>5. Khalaf E., Ostrovsky P. M. Localization effects on magnetotransport of a disordered Weyl semimetal // Physical Review Letters. – 2017. – Т. 119. – №. 10. – С. 106601.</li><li>6. Khalaf E., Skvortsov M. A., Ostrovsky P. M. Semiclassical electron transport at the edge of a two-dimensional topological insulator: Interplay of protected and unprotected modes // Physical Review B. – 2016. – Т. 93. – №. 12. – С. 125405.</li><li>7. Ioselevich P. A., Ostrovsky P. M., Feigel'Man M. V. Josephson current between topological and conventional superconductors // Physical Review B. – 2016. – Т. 93. – №. 12. – С. 125435.</li><li>8. Khalaf E., Ostrovsky P. M. Boundary scattering effects on magnetotransport of narrow metallic wires and films // Physical Review B. – 2016. – Т. 94. – №. 16. – С. 165431.</li><li>9. König E. J., Ostrovsky P. M., Dzero M., Levchenko A. Anomalous Hall effect on the surface of topological Kondo insulators // Physical Review B. – 2016. – Т. 94. – №. 4. – С. 041403.</li></ol> |
|--|---|

Даю согласие на обработку персональных данных и размещение их в свободном доступе в сети «Интернет» и в единой информационной системе.

Официальный оппонент:

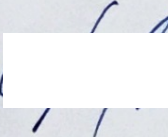
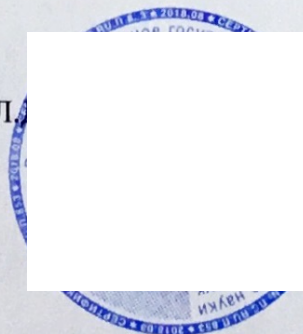
Старший научный сотрудник сектора квантовой мезоскопии ФГБУН ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
доктор физико-математических наук



П.М. Островский

«24» декабря 2020 г.

Подпись П.М. Островского заверяю  
ученый секретарь ФГБУН ИТФ им. Л.  
кандидат химических наук



С.А. Крашаков