

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук, доктор физ.-

математических наук П.Н. Брунков

ПЕЧАТЬ СЕРТИФИКАТА  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ФИЗИКА

4 декабря 2020 г.

ИНИЦИАЛЫ  
1972

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Проценко Владимира Сергеевича «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**

В настоящее время исследование систем квантовых точек является одним из актуальных направлений современной физики. Это связано как с бурным развитием экспериментальных методик получения данных объектов, так и с возможностью их практического применения при проектировании и создании устройств нанoeлектроники. Диссертационная работа Проценко посвящена теоретическому изучению магнитных свойств и электронного транспорта систем двух и четырех квантовых точек. Для исследования данных объектов автор использовал метод функциональной ренормгруппы, который является одним из наиболее современных и перспективных методов рассмотрения многочастичных электронных систем. Это позволило соискателю систематически изучить различные ранее не рассмотренные режимы исследуемых систем квантовых точек как в равновесных, так и в неравновесных случаях. Удалось выявить взаимосвязь между спектром проводимости и переходами между различными магнитными состояниями, что может представлять непосредственный интерес для проектирования устройств спинтроники. В целом результаты представленной работы имеют большое значение для понимания механизмов формирования локального магнитного момента и роли электрон-электронного взаимодействия в системах квантовых точек. Таким образом, актуальность темы и рассмотренных в диссертационной работе задач не вызывает сомнения.

#### **Структура и основное содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации составляет 146 страниц, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 127 наименований.

**В первой главе** приведена общая квантово-механическая модель систем квантовых точек и приводится обзор метода функциональной ренормализационной группы. Сформулирован общий гамильтониан систем квантовых точек, соединенных с двумя макроскопическими контактами (электронными резервуарами), и приведены выражения для функций Грина при отсутствии электрон-электронного взаимодействия в системе. Осуществлен вывод уравнений метода функциональной ренормализационной группы, рассмотрены схемы усечения иерархии ренормгрупповых уравнений и схемы отсечки. В качестве примера продемонстрировано применение метода функциональной ренормгруппы к системе, состоящей из одной квантовой точки, соединенной с двумя контактами. Приведены детали численной реализации метода функциональной ренормгруппы.

**Во второй главе** методом функциональной ренормгруппы исследуются электронные свойства и проводимость системы двух квантовых точек. Показано, что в силу расходимости вершин электрон-электронного взаимодействия, имеющиеся в настоящее время («стандартные») схемы метода функциональной ренормгруппы не позволяют исследовать состояние сингулярной ферми-жидкости рассматриваемой системы. Для решения данной проблемы предлагается модификация «стандартных» схем метода функциональной ренормгруппы, заключающаяся во включении дополнительного члена в функцию Грина системы — контрчлена. Показано, что предложенный подход позволяет рассматривать состояние сингулярной ферми-жидкости, описывая возможность формирования локального магнитного момента в системе. Реализовано применение предложенной модификации метода к исследованию влияния асимметрии параметров перескока между квантовыми точками и контактами. Произведен детальный анализ возможности формирования локального магнитного момента в системе и особенностей электронного транспорта при различных типах асимметрии системы, включая случай произвольной асимметрии параметров перескока. Продемонстрирована возможность осуществления непрерывного квантового фазового перехода в состояние сингулярной ферми-жидкости системы, при котором проводимость имеет асимметричный резонанс вблизи точки фазового перехода.

**Третья глава** посвящена изучению системы двух и четырех квантовых точек методом функциональной ренормгруппы, обобщенной на формализм неравновесных функций Грина. Произведен анализ формирования локальных магнитных моментов в системе четырех квантовых точек для равновесного режима, а также исследована линейная проводимость и эффекты спиновой фильтрации. Приводится анализ неравновесных режимов в системе четырех квантовых точек. В частности, изучены процессы разрушения локальных магнитных моментов в системе с ростом напряжения смещения, рассчитаны вольтамперные характеристики и дифференциальные проводимости, проанализирована их связь с фазовыми переходами и выполнен полуаналитический анализ эффектов отрицательной дифференциальной проводимости. Произведено сравнение систем двух и четырех квантовых точек и выявлены их качественные отличия.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Научная новизна результатов диссертационной работы**

В представленной диссертационной работе метод функциональной ренормализационной группы впервые был применен для описания квантовых фазовых переходов в системах квантовых точек. В частности, была проанализирована эволюция магнитных моментов в системах квантовых точек при приложении конечного напряжения к контактам. Установлена связь особенностей электронного транспорта и переходов между различными магнитными состояниями систем. Предложен оригинальный метод анализа возможности возникновения состояний с локальными магнитными моментами в системах двух и четырех квантовых точек и выполнен полуаналитический анализ влияния локального кулоновского взаимодействия на электронные свойства и проводимость для широкого диапазона параметров рассматриваемых систем.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается сравнением с данными других работ и применением других методов исследования, в том числе, сравнением с данными метода численной ренормализационной группы. Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в четырех статьях в рецензируемых журналах (три в ведущем физическом журнале - Physical Review B), включённых в перечень ВАК и индексируемых в базе Web of Science.

#### **Практическая значимость полученных результатов**

Представляемые в диссертации результаты вносят вклад в теорию квантовых фазовых переходов и позволяют глубже исследовать механизмы формирования магнитных моментов в системах квантовых точек. Разработанные в диссертационной работе подходы могут быть применены к исследованию эффектов электрон-электронного взаимодействия в реалистичных моделях наноскопических систем. В практическом плане представленные результаты могут быть востребованы при проектировании устройств квантовой электроники.

#### **Замечания по диссертационной работе**

1. В работе обсуждается система состоящая из четырех квантовых точек. Ранее аналогичные системы с учетом электрон-электронных корреляций изучались в работах Валькова и др. и Арсева и др. В диссертации нет сравнения с этими известными работами. (M. Yu. Kagan, V.V. Val'kov, S.V. Aksenov, Phys. Rev. B 95, 035411 (2017), N.S. Maslova, P.I. Arseyev, V.N. Mantsevich, Scientific Rep. 9, 15974 (2019))
2. В работе изучаются эквивалентные квантовые точки с одинаковой энергетической структурой. Однако в реальной ситуации существует разброс параметров и в связи с этим возникает вопрос как изменяться выводы относительно величины и поведения дифференциальной проводимости.

#### **Общая оценка диссертационной работы**

Представленная диссертационная работа является самостоятельным и законченным научным трудом, который содержит принципиально новые результаты в области теоретического исследования электронных свойств систем квантовых точек, а ее автор

является квалифицированным специалистом в области физики конденсированного состояния. Результаты работы опубликованы в ведущих международных научных журналах и докладывались на международных и всероссийских конференциях. Автореферат правильно и полно отражает основные результаты работы и ее выводы.

### Заключение

Считаем, что диссертационная работа «Электронные свойства и проводимость систем квантовых точек» соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и пункту 5 Паспорта специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния, а ее автор Проценко Владимир Сергеевич достоин присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Устный доклад В.С. Проценко по материалам диссертационной работы заслушан на научном семинаре Сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Отзыв подготовлен заведующим Сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктором физико-математических наук, профессором Аверкиевым Никитой Сергеевичем. Отзыв одобрен на заседании научного семинара Сектора теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе (протокол № 31 от 03.12.20).

Заведующий сектором теории оптических  
и электрических явлений в полупроводниках  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
доктор физ.-мат. наук, профессор

  
Н.С. Аверкиев

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
Тел.: +7 812 292 7155  
E-mail: Averkiev@les.ioffe.ru

Подпись Н.С. Аверкиева заверяю  
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
кандидат физ.-мат. наук

  
М.И. Патров

*С отзывом ознакомлен*

29.12.20

*Проценко В.С.*

« 7 » декабря 2020 г

### Сведения о ведущей организации

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

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Почтовый индекс, адрес организации	194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Веб-сайт	<a href="http://www.ioffe.ru">http://www.ioffe.ru</a>
Телефон	(812) 297-2245
Адрес электронной почты	<a href="mailto:post@mail.ioffe.ru">post@mail.ioffe.ru</a>
Основные научные направления организации	физика конденсированного состояния; теоретическая физика; наноструктуры: физика и технология; оптические, структурные, магнитные и электронные свойства конденсированных сред; твердотельная электроника, полупроводниковые приборы; астрофизика и космология.
Список основных публикаций работников организации по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Rozhansky I. V., Mantsevich V. N., Maslova N. S., Arseyev P. I., Averkiev N. S., Lähderanta E. Split-off states in tunnel-coupled semiconductor heterostructures for ultrafast modulation of spin and optical polarization // <i>Physical Review B</i>. – 2020. – Т. 101. – №. 4. – С. 045305.</li><li>2. Aristov D. N., Gornyi I. V., Polyakov D. G., Wölfle P. Emergent chirality in multilead Luttinger-liquid junctions out of equilibrium // <i>Physical Review B</i>. – 2019. – Т. 100. – №. 16. – С. 165410.</li><li>3. Alekseev P. S., Semina M. A. Hall effect in a ballistic flow of two-dimensional interacting particles // <i>Physical Review B</i>. – 2019. – Т. 100. – №. 12. – С. 125419.</li><li>4. Mantsevich V. N., Rozhansky I. V., Maslova N. S., Arseyev P. I., Averkiev N. S., Lähderanta E. Mechanism of ultrafast spin-polarization switching in nanostructures // <i>Physical Review B</i>. – 2019. – Т. 99. – №. 11. – С. 115307.</li><li>5. Nokelainen J., Rozhansky I. V., Barbiellini B., Lähderanta E., Pussi K. Gate-tunable magnetism of C adatoms on graphene // <i>Physical Review B</i>. – 2019. – Т. 99. – №. 3. – С. 035441.</li></ol>

6. Kraft R., Krainov I. V., Gall V., Dmitriev A. P., Krupke R., Gornyi I. V., Danneau R. Valley Subband Splitting in Bilayer Graphene Quantum Point Contacts // Physical Review Letters. – 2018. – T. 121. – №. 25. – С. 257703.
7. Maslova N. S., Rozhansky I. V., Mantsevich V. N., Arseyev P. I., Averkiev N. S., Lähderanta E. Dynamic spin injection into a quantum well coupled to a spin-split bound state // Physical Review B. – 2018. – T. 97. – №. 19. – С. 195445.
8. Smirnov D. S., Zhukov E. A., Kirstein E., Yakovlev D. R., Reuter D., Wieck A. D., Bayer M., Greilich A., Glazov M. M. Theory of spin inertia in singly charged quantum dots // Physical Review B. – 2018. – T. 98. – №. 12. – С. 125306.
9. Shumilin A. V., Smirnov D. S., Golub L. E. Spin-related phenomena in the two-dimensional hopping regime in magnetic field // Physical Review B. – 2018. – T. 98. – №. 15. – С. 155304.
10. Dmitriev A. P., Gornyi I. V., Kachorovskii V. Y., Polyakov D. G. Spin-charge separation in an Aharonov-Bohm interferometer // Physical Review B. – 2017. – T. 96. – №. 11. – С. 115417.
11. Averkiev N. S., Kokurin I. A. Current-induced spin orientation in semiconductors and low-dimensional structures // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – T. 440. – С. 157-160.
12. Smirnov D. S., Golub L. E. Electrical spin orientation, spin-galvanic, and spin-Hall effects in disordered two-dimensional systems // Physical Review Letters. – 2017. – T. 118. – №. 11. – С. 116801.
13. Krainov I. V., Klier J., Dmitriev A. P., Klyatskaya S., Ruben, M., Wernsdorfer W., Gornyi I. V. Giant magnetoresistance in carbon nanotubes with single-molecule magnets TbPc2 // ACS nano. – 2017. – T. 11. – №. 7. – С. 6868-6880.

Ученый секретарь ФТИ им.А.Ф.Иоффе  
Кандидат физ.-мат.наук

М.И.Патров