

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
государственного университета  
С. В. Микушев



2019 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Терехова Ивана Сергеевича  
**«Исследование эффектов в физике твердого тела и процессов передачи  
информации вне рамок теории возмущений»,**  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
01.04.02 — теоретическая физика

### Актуальность темы исследования.

Диссертация И.С. Терехова посвящена решению актуальных задач, возникших в последнее время в физике твердого тела и теории информации. Одной из важных задач в физике твердого тела является объяснение высокой проводимости графена. Для этого необходимо понимание того, как устроено экранирование примесей электронным газом в графене и как устроено электрон-электронное взаимодействие в нем. В диссертации изучается плотность индуцированного заряда и индуцированного тока во внешних электрических и магнитных полях в графене. Эти исследования позволяют понять, как экранируются примеси в графене и как проявляется эффект Бома-Ааронова. Также в диссертации исследуется взаимодействие двух электронов в графене и влияние на это взаимодействие положения энергии Ферми. Кроме того, в диссертации исследуется экранирование примеси со спином в трехмерном антиферромагнетике, который находится вблизи квантовой критической точки. Эти исследования необходимы для понимания влияния примесей на положение квантовой критической точки. Третья часть диссертации посвящена исследованию нелинейных линий связи с шумом. Данные исследования необходимы для понимания максимальной пропускной

способности современных оптоволоконных линий связи. Эти исследования также могут привести к повышению пропускной способности линий связи.

## **Оценка структуры и содержания работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений.

Во введении формулируются задачи и обосновывается актуальность рассматриваемых задач. Также описывается современное состояние и последние достижения в рассматриваемых областях физики.

В первой главе решаются две задачи. Первая задача — вычисление точно по полю примеси плотности заряда, индуцированного кулоновской примесью в графене. Показано, что индуцированный заряд локализован на примеси. Получено, что, с учетом самосогласования, кулоновская примесь с зарядовым номером равным единице остается в докритическом режиме при произвольной постоянной взаимодействия.

Вторая задача посвящена исследованию индуцированного заряда в присутствии локализованного потенциала. Для исследования индуцированного заряда точно по полю вычисляется лидирующая асимптотика плотности индуцированного заряда на расстояниях много больших размера локализации потенциала. Показано, что асимптотика плотности индуцированного заряда существенно меняется при небольшом изменении характеристик потенциала вблизи его критических параметров.

В второй главе изучается индуцированный ток в графене в поле соленоида малого радиуса. Данные исследования имеют прямое отношение к эффекту Бома-Ааронова. Индуцированный ток вычисляется в двух постановках задачи. В первой постановке электроны могут проникать в область ненулевого магнитного поля, во второй — нет. Демонстрируется, что на расстояниях много больших радиуса соленоида лидирующая асимптотика индуцированного тока существенно зависит от постановки задачи.

В третьей главе изучается взаимодействие двух электронов в графене. Исследуется зависимость этого взаимодействия от положения энергии Ферми относительно положения дираковской точки. Для описания взаимодействия двух электронов рассматриваются две модели. В первой модели гамильтониан взаимодействия двух электронов является суммой гамильтонианов невзаимодействующих электронов и потенциальной энергии взаимодействия. Эта модель соответствует случаю, когда энергия Ферми расположена много ниже дираковской точки (энергия Ферми стремится к минус бесконечности). Показано, что в рамках этой модели в процессе рассеяния возникают локализованные состояния двух электронов. В результате, несмотря на эрмитовость гамильтониана, с точки зрения внешнего наблюдателя процесс рассеяния выглядит как неупругий. Во второй модели для учета произвольного положения энергии Ферми рассматривается

уравнение Бете-Солпитера. Показано, что в рамках второй модели также возникают локализованные долго живущие состояния двух электронов в графене. Кроме того, в этом случае возникает дискретный спектр локализованных состояний двух электронов с размером локализации обратно пропорциональным энергии Ферми.

В четвертой главе исследуется экранирование магнитного момента примеси в трехмерном антиферромагнетике, находящемся вблизи квантовой критической точки. В рамках самосогласованного борновского приближения и ренорм-группового подхода показано, что при приближении к квантовой критической точке магнитный момент примеси полностью экранируется, а в образце возникает намагниченность распределенная по всему образцу (эффект разделения спина и заряда).

В пятой главе рассматриваются нелинейные каналы связи, которые описываются нелинейным уравнением Шредингера с аддитивным шумом. Предложены методы вычисления функции плотности условной вероятности, которая представляется в виде континуального интеграла. Используя предложенные методы, вычислены функция плотности условной вероятности, взаимная информация, оптимальная функция распределения начального сигнала и емкость для бездисперсионного нелинейного оптоволоконного канала связи в приближении большого отношения мощности сигнала к мощности шума.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.**

Содержание диссертации соответствует указанной специальности 01.04.02 и теме диссертации. Проведено теоретическое исследование поведения электронного газа в графене во внешний полях примесей и в поле соленоида малого радиуса, теоретическое изучение экранирования магнитного момента примеси со спином в антиферромагнетике вблизи квантовой критической точки и теоретическое исследование нелинейных каналов связи.

### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию.**

В автореферате содержится достаточно полная информация о целях и задачах диссертационной работы. Кратко изложено содержание диссертации и представлены основные результаты. Указан список публикаций автора, содержащих результаты его работы. Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования.**

Изложенные в работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

## **Степень достоверности результатов исследования.**

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), The University of New South Wales (г. Сидней, Австралия), Aston University (г. Бирмингем, Великобритания).

## **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.**

Исследования экранирования полей примесей в графене точно по полю примеси и электрон-электронного взаимодействия позволяют понять высокую проводимость графена. Исследование экранирования магнитного момента примеси в антиферромагнетике вблизи квантовой критической точки могут привести к пониманию влияния концентрации примесей на положение квантовой критической точки. Развитый метод вычисления функции плотности условной вероятности позволяет исследовать нелинейные оптоволоконные каналы связи. Найденная емкость нелинейного бездисперсионного оптоволоконного канала связи позволяет оценить пропускную способность современных оптоволоконных линий связи и найти способ её увеличения.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Исходя из вышесказанного, результаты теоретических исследований электронного газа в графене и магнитных примесей в квантовых антиферромагнетиках могут быть применены при анализе результатов экспериментальных работ, проводимых в ИФП им. Ржанова СО РАН, Санкт-Петербургском государственном университете, The University of New South Wales и многих других организациях, где проводятся соответствующие исследования. Результаты, полученные для емкостей оптоволоконных каналов связи, позволяют понять как необходимо изменить статистику начального сигнала для увеличения пропускной способности современных линий связи.

## **Новизна и научная ценность полученных результатов.**

Впервые вычислена плотность индуцированного заряда в поле кулоновской примеси в графене точно по полю примеси, что позволило впервые показать, что примесь с зарядовым номером равным единице остается в докритическом режиме. Впервые исследована лидирующая асимптотика плотности индуцированного заряда в поле локализованного потенциала в докритическом и сверхкритическом режимах в графене. Впервые исследован индуцированный ток в поле соленоида малого радиуса в графене. Впервые

показано, что в задаче взаимодействия двух электронов в графене с потенциалом отталкивания возникает локализованное состояние. Впервые получено уравнение на волновую функцию двух взаимодействующих электронов в графене при произвольном положении энергии Ферми. Впервые исследовано экранирование магнитного момента примеси в трехмерном антиферромагнетике, который находится вблизи квантовой критической точки. Впервые представлен метод вычисления функции плотности условной вероятности для нелинейного оптоволоконного канала связи с шумом. Впервые найдена функция плотности условной вероятности для нелинейного бездисперсионного канала связи с аддитивным шумом. Это позволило впервые найти оптимальную функцию плотности вероятности входящего сигнала и емкость для нелинейного оптоволоконного канала связи с нулевой дисперсией и аддитивным шумом.

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

По диссертации можно сделать следующие замечания:

- 1) При вычислениях плотности индуцированного заряда и индуцированного тока в графене в диссертации никак не обсуждается вопрос об отсутствии конечных ложных вкладов, которые могут возникать при использовании регуляризации, нарушающей калибровочную инвариантность.
- 2) Известно, что в случае обычной электродинамики в сильном кулоновском поле при переходе к сверхкритическому полю крайне важным становится учет конечного распределения заряда по ядру. В диссертации практически ничего не говорится о роли подобного эффекта в случае графена, который мог бы оказаться важным, например, при решении самосогласованного уравнения (1.13).
- 3) При исследовании электрон-электронного взаимодействия в графене остается не понятным насколько одно приближение лучше другого. Следует ли ожидать, что решение уравнения Бете-Солпитера в лестничном приближении будет давать более достоверные результаты, чем гамильтониан, описываемый уравнением (3.3)? Существуют какие-либо оценки для вкладов за рамками лестничного приближения?
- 4) Нет сомнений, что рассматриваемые в диссертации вопросы имеют важное значение как для текущих и будущих экспериментов, так и для практических приложений (последнее особенно касается 5-й главы). В то же время в диссертации отсутствуют какие-либо прямые сравнения теории и эксперимента.
- 5) В целом, диссертации написана достаточно хорошо, хотя и не лишена полностью неточностей и опечаток. Так, например, в подписи к рис. 1.2

нужно заменить “пунктирная линия отвечает однопетлевому приближению” на “пунктирная линия отвечает линейному однопетлевому приближению”.

Разумеется, указанные замечания не влияют на общую очень высокую оценку диссертации.

### **Апробация и публикации научных материалов.**

Основные результаты докладывались и обсуждались на многих международных конференциях, семинарах Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, University of New South Wales, Aston University. По теме диссертации опубликовано 11 научных статей в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Заключение по диссертации о соответствии её требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» по пунктам 9 и 10.**

Диссертация И.С. Терехова «Исследование эффектов в физике твердого тела и процессов передачи информации вне рамок теории возмущений» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Терехов Иван Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв подготовил профессор кафедры квантовой механики, доктор физико-математических наук В. М. Шабаев. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры квантовой механики 10 мая 2019 г. (протокол № 11).

Доктор физ.-мат. наук, профессор  
кафедры квантовой механики СПбГУ  
с возложенными обязанностями  
заведующего кафедрой

В. М. Шабаев

#### **Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7-9.

Тел. +7 (812) 328-20-00, эл. почта [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru), сайт <http://spbu.ru>  
Кафедра квантовой механики СПбГУ, тел. +7 (812) 428-45-52, эл. почта [qmech@spbu.ru](mailto:qmech@spbu.ru), сайт <http://fock.phys.spbu.ru>

