

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **ТЕРЕХОВА Ивана Сергеевича** «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ В ФИЗИКЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ВНЕ РАМОК ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Среди разделов физики теоретическая физика занимает особое место, поскольку её методы обладают универсальностью в том смысле, что, будучи разработанными для решения конкретной проблемы в одной области, они оказываются применимы в совершенной других областях, подчас весьма отдалённых от исходной. В особенности это относится к квантовой теории поля. Первоначально разработанная для нужд физики элементарных частиц, впоследствии она с успехом стала применяться и для решения задач физики конденсированного состояния, в физике твёрдого тела, гидродинамике и т.д. Изначально подход, основанный на квантовой теории поля, подразумевал использование теории возмущений по взаимодействию, т.е. разложение физических величин в ряды по малой константе связи. В квантовой электродинамике такой константой является постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$. В ситуациях, когда константа связи не мала, нужно было использовать точные выражения необходимых для расчётов величин, таких как функции Грина. Другим весьма плодотворным подходом для выхода за рамки теории возмущений явился аппарат фейнмановских интегралов по траекториям. В нём естественным образом выделялся непертурбативный вклад фона и возбуждений на этом фоне. Учёт вклада возбуждений уже допускал применение методов теории возмущений.

Диссертационная работа И.С. Терехова посвящена разработке приложений и методов квантовой теории поля, выходящих за рамки теории возмущений, для применения в физике твёрдого тела и в задачах, связанных с передачей информации по каналам связи. Рассмотренные в ней эффекты характеризуются сложными нелинейными зависимостями, учёт которых невозможен в рамках стандартной теории возмущений. Важность такой работы как для задач фундаментальной физики, так и при изучении возможностей конкретных технологических приложений подтверждает **актуальность темы** диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и двух приложений. Список литературы содержит 130 наименований, объём текста 198 страниц. Во введении дан краткий обзор проблем, которые предлагаются для

решения, описано современное состояние исследований по этим проблемам и излагаются положения, выносимые на защиту.

Первые три главы посвящены решению ряда задач из физики графена. Этот материал является двумерным аллотропом углерода. Он привлекает внимание теоретиков в основном как полигон для проверки базовых принципов микрофизики. Материаловеды активно изучают возможности его потенциального применения в устройствах микроэлектроники. Особенностью графена является то, что эффективная постоянная тонкой структуры в нём не мала, $\alpha_{eff} = e^2 / \hbar v_F \sim 1$, поскольку роль скорости света играет скорость электронов $v_F = c/300$. Поэтому обычно применяемые методы теории возмущений не работают, и для вычисления физических эффектов необходим точный учёт взаимодействия.

В **главе 1** решается задача об экранировке кулоновской примеси в графене и об экранировании локального потенциала общего вида. В первом случае сильное кулоновское взаимодействие в графене учитывается путём использования точных функций Грина в кулоновском поле, адаптированных к двумерной ситуации. Это позволило точно учесть зависимость индуцированного заряда от эффективной константы связи α_{eff} . Выяснено, как электрон-электронное взаимодействие влияет на эффективный заряд примеси. Во втором случае найдена функция Грина в произвольном азимутально-симметричном поле, спадающем быстрее кулоновского. Это позволило получить пространственное распределение плотности индуцированного заряда в зависимости от эффективной константы взаимодействия электрона с таким полем.

В **главе 2** проведено вычисление индуцированного тока, вызванного присутствием соленоида в графеновом листе. Для решения этой задачи автором были найдены точные по магнитному полю функции Грина, отвечающие бесконечно тонкому соленоиду и соленоиду конечных размеров. Это позволило рассчитать зависимость индуцированного тока от величины магнитного потока, проходящего через соленоид. Показано, что характер этой зависимости принципиально различен для случаев бесконечно тонкого соленоида, где зависимость периодична, и для соленоида с конечным радиусом. В последнем случае рассмотрены две возможности, когда электрон не проникает и проникает в область ненулевого магнитного поля. Показано, что периодичность от захваченного потока при этом теряется. В этой же главе получено пространственное распределение индуцированного тока в указанных выше ситуациях.

Глава 3 посвящена решению проблемы двух электронов в графене, взаимодействующих посредством потенциала $V(r)$. Здесь неожиданным оказалось то обстоятельство, что разделение движения центра масс и относительного движения в двухчастичной задаче допустимо только при нулевом полном импульсе. Более того, как показал детальный анализ решений, проведённый диссертантом, в секторе относительного движения имеется точка с особенностью решения. Рассмотрев нестационарную задачу и изучив распространение волнового пакета, автор обнаружил, что в этой точке имеет место рост плотности вероятности со временем, т.е. происходит «залипание» двух частиц.

В **главе 4** диссертации решается задача о разделении спина и заряда в антиферромагнетике вблизи квантовой критической точки g_c . Эта точка возникает в пространстве параметров задачи и определяется отношением энергий взаимодействия между узлами решётки $g = J'/J$, $g_c = 4.013$. Построив эффективный лагранжиан магнонов, примеси и их взаимодействия, автор исследовал пространственное распределение спиновой плотности, индуцированной примесью, в зависимости от параметра $\Delta = g - g_c$. Рассмотрение проведено в рамках двух подходов, основанных на квантовой теории поля. Для спина примеси $s = 1/2$ использовалось самосогласованное борновское приближение, фактически являющееся аналогом $1/N$ -разложения. Для более высоких спинов анализ проводился методом ренорм-группы, который эквивалентен учёту бесконечной последовательности выделенного класса диаграмм.

Глава 5 посвящена исследованию нелинейных каналов связи. Проблема состоит в том, что, согласно формуле Шеннона, пропускную способность канала можно увеличить за счёт увеличения отношения сигнал-шум, однако с ростом этого отношения начинают сказываться нелинейные эффекты. Такие эффекты учитываются в задаче на основе нелинейного уравнения Шрёдингера для формы распространяющегося сигнала, дополненного ланжевеновским источником шума. Это уравнение содержит два параметра: коэффициент нелинейности и эффективную величину отношения сигнала к шуму. Для выяснения возможностей оптимизации канала связи автор применил мощный метод интегралов по траекториям, в котором плотность условной вероятности, необходимая для вычисления пропускной способности, является аналогом квантовомеханической амплитуды перехода. При этом аналогом эффективного лагранжиана выступает квадрат левой части уравнения, описывающего распространение сигнала, а роль постоянной Планка играет величина мощности шума. При малой величине коэффициента нелинейности его эффект можно учесть по теории возмущений. При произвольном коэффициенте нелинейности и

большом отношении сигнал-шум эффективная «постоянная Планка» мала, поэтому можно применить известный из квантовой теории поля метод фонового поля, когда выделяется большой классический вклад и к нему вычисляются квантовые поправки. Вычислив функциональный интеграл в явном виде, автор получил конкретные формулы для определения пропускной способности канала связи при различных предположениях о величинах параметров канала (мощности сигнала, шума, коэффициента нелинейности и т.д.).

В **заключении** дан перечень основных результатов, полученных в диссертации. В **приложениях** приведены детали вывода выражения для условной вероятности передачи сигнала в терминах интеграла по траекториям и проведено фактическое вычисление как классического «фонового» вклада, так и «квантовых» поправок к нему.

Научная новизна диссертации И.С.Терехова несомненна. В ней впервые удалось вычислить индуцированный примесью заряд в графене точно по сильному полю примеси. Впервые удалось показать, что индуцированный присутствием соленоида ток в графене определяется только полным потоком через соленоид. При решении задачи о взаимодействии двух электронов с учётом электронов ниже поверхности Ферми был получен аналог уравнения Дайсона, редуцированного до уравнения Бете-Солпитера, что позволило трактовать его как волновое уравнение. Впервые было обнаружено влияние границы Ферми на взаимодействие электронов в графене и их необычное поведение. При решении задачи, связанной с наличием магнитной квантовой критической точки в антиферромагнетике впервые удалось показать возможность эффекта разделения спина и заряда в трёх пространственных измерениях. Исследование методами квантовой теории поля пропускной способности нелинейных каналов связи впервые позволило указать возможности увеличения этой характеристики, важной для задач оптоволоконной связи.

Научная ценность диссертации обусловлена следующим. В ней была показана возможность того, что ряд методов теоретической физики, разработанных для решения проблем физики элементарных частиц, можно адаптировать для совершенно других задач. В частности, аппарат вычисления точных по полю функций Грина, созданный для задач описания поведения электронов в сильных полях ядер, был использован автором при решении ряда проблем в бурно развивающейся физике графена. Мощный метод эффективных лагранжианов, применяемый при исследовании непертурбативных эффектов в физике элементарных частиц и техника ренормализационной группы, позволил диссертанту рассмотреть эффект разделения спина и заряда в антиферромагнетике. Наконец, совершенно нетривиальным явилось применение техники интегралов по траекториям и теоретико-полевых методов при решении ряда задач в области оптоволоконной связи. Это позволило указать пути повышения пропускной способности канала связи с нелинейным сигналом.

Практическая ценность диссертации обусловлена применением развитых в ней методов к конкретным задачам физики твёрдого тела и к проблемам передачи информации по нелинейным каналам связи. Рассмотренные диссертантом эффекты в физике графена важны для анализа потенциальных применений этого материала для нужд микроэлектроники. Тщательный теоретический анализ в диссертации проблемы распространения сигнала по нелинейным оптоволоконным каналам связи и выяснение ограничений пропускной способности, вызванных нелинейностью, имеет особую ценность ввиду широкого распространения информации именно по таким каналам связи.

Обоснованность научных положений диссертации не вызывает сомнений, поскольку её материалы основаны на использовании методов теоретической физики, многократно проверенных при решении задач в других областях. Научная обоснованность методов квантовой теории поля доказана признанными результатами в физике элементарных частиц и физике конденсированного состояния. Аппарат функциональных интегралов также надёжно обоснован полученными с его помощью результатами как в указанных областях, так и в гидродинамике, теории информации, экономике и т.д.

Достоверность результатов диссертации подтверждается тем, что их получение проводилось в рамках различных теоретических подходов, с дальнейшим сопоставлением и анализом полученных выводов. В частности, сложные аналитические расчёты пропускной способности каналов связи были проверены численными вычислениями, причём в рамках двух разных вычислительных схем.

Работа хорошо оформлена, полученные аналитические выражения проиллюстрированы многочисленными графиками. Каждая глава завершается кратким резюме полученных в ней результатов. Список цитированной литературы позволяет понять важность рассматриваемых проблем и оценить вклад диссертанта в их решение. Изучение автореферата диссертации показало, что он правильно отражает основные её положения.

Вместе с тем имеются несколько замечаний, которые касаются деталей представления материала. Использование безразмерных переменных несомненно удобно при проведении расчётов, однако конечные выражения и критерии их применимости для читателя были бы гораздо более информативны в обычных единицах. При решении задачи о взаимодействии двух электронов в графене в главе 3 было бы полезно привести на рисунке хотя бы схематический вид потенциала $V(r)$, поскольку в тексте встречаются указания на V_{max} . Материал главы 4 основан на методах квантовой теории поля, поэтому было бы полезно выписать исходные правила Фейнмана для элементов диаграмм (вершин, пропагаторов и т.д.). В отсылках к различным частям текста диссертации фигурирует указание на главы, хотя речь идёт о разделах внутри

глав. Разумеется, вышеперечисленное не влияет на научную ценность самой работы.

Таким образом, учитывая актуальность избранной темы, обоснованность основных научных положений диссертации, новизну и достоверность полученных результатов, их своевременную публикацию в ведущих рецензируемых международных журналах Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B, Phys. Rev. E и т.п. можно заключить, что диссертация **И.С.Терехова** «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ В ФИЗИКЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ВНЕ РАМОК ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, является законченным трудом, в котором на основании выполненных автором расчётов, использующих методы современной теоретической физики вне рамок теории возмущений, были решены важные научные проблемы в области физики твёрдого тела и в проблеме передачи информации по оптоволоконным каналам связи. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор **Иван Сергеевич Терехов** заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составлен 14 мая 2019 г.

Официальный оппонент доктор
физико-математических наук

Кожевников

Аркадий Алексеевич Кожевников

ведущий научный сотрудник лаборатории
теоретической физики ФГБУН «Институт
математики им. С.Л. Соболева СО РАН»,
адрес: 630090, Новосибирск, пр. акад. Коптюга, 4
тел.: +7383 329 75 19
e-mail: kozhev@math.nsc.ru

Подпись А.А. Кожевникова удостоверяю.
Учёный секретарь ИМ СО РАН
кандидат физико-математических наук



И.Е. Светов