

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе
Островского Павла Михайловича
«Электронные свойства неупорядоченного графена»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Актуальность темы диссертации. Исследования структур с пониженной размерностью, в первую очередь, систем с экстремальными свойствами, например, атомарно тонких кристаллов, сформировали в последнее десятилетие отдельное направление современной физики. Значительную роль в этом сыграли пионерские работы по транспортным и оптическим свойствам графена – монослоя атомов углерода, упорядоченных в гексагональную решетку. Удостоенные Нобелевской премии по физике исследования, выполненные А. Геймом и К. Новоселовым, а также работы, сделанные в других научных группах, обнаружили набор уникальных свойств графена. Особое место в этих исследованиях заняло изучение транспортных эффектов. Было найдено, что величина минимальной проводимости графена составляет по порядку величины квант проводимости ($\sim e^2/h$), а в режиме квантового эффекта Холла наблюдаются лишь «нечетные» плато. Эти факты противоречили общепринятым представлениям об электронном транспорте в двумерных системах. В результате, перед физиками-теоретиками были поставлены задачи, решение которых потребовало разработки и применения новых методов теории электронного переноса, применимых к описанию систем с линейным «дираковским» электронным спектром.

Задачи диссертационной работы П.М. Островского заключаются в (i) построении теории электронной проводимости графена с примесями, (ii) определении возможных механизмов локализации носителей заряда в графене, (iii) разработке теории переноса заряда в графене в баллистическом режиме, (iv) изучению влияния вакансий и других «сильных» примесей на энергетический спектр и транспортные свойства графена, а также в (v) развитии теории локализации в двумерных киральных металлах. **Это определяет высокую актуальность темы диссертации П.М. Островского.**

Анализ содержания диссертации, новизна и достоверность полученных результатов. Диссертация П.М. Островского содержит постановку и решение важных задач теории транспортных эффектов в системах с киральным спектром, главным образом, в графене, где носители заряда описываются безмассовой моделью.

Диссертация П.М. Островского состоит из введения, где приводится мотивация исследований, обосновывается новизна и актуальность задач диссертации, дается краткий, но вполне адекватный литературный обзор, а также формулируются основные результаты работы, шести глав, содержащих новые и оригинальные научные результаты, заключения, двух приложений, списка публикаций автора по теме диссертации и библиографии.

Первая глава диссертации посвящена разработке модели беспорядка в графене и описанию плотности состояний и транспортных свойств графена с примесями в случае, когда уровень Ферми лежит вдали от дираковской точки. Автор выбирает симметричный подход, классифицируя беспорядок по тому, какая симметрия безмассового дираковского гамильтониана оказывается нарушенной. Такой подход в силу его независимости от конкретной модели дефектов оказывается исключительно продуктивным и обладает значительной предсказательной силой. Анализируются транспортные эффекты как в рамках стандартного самосогласованного борновского приближения, так и в оригинальном методе самосогласованной T -матрицы. Проводится ренорм-групповой анализ проводимости графена.

Из изложенного в первой главе материала очевидным образом возникает вопрос о том, чему будет равна проводимость графена в условиях, когда уровень Ферми электронов находится вблизи дираковской точки. Наивные рассуждения в духе теории андерсоновской локализации приводят к нулевому значению проводимости, однако это резко противоречит эксперименту. Разрешению этого противоречия и посвящена *вторая глава* диссертационной работы П.М. Островского. В этой главе получен яркий и важный для сопоставления с экспериментами результат: для кирального беспорядка проводимость равна $4e^2/\pi\hbar$ с точностью до экспоненциально малых поправок. Развита в той же главе нелинейная сигма-модель для дираковских электронов в плавном беспорядке содержит топологический член, наличие которого подавляет локализационные эффекты. Эта же модель объясняет «нечетное» квантование проводимости σ_{xy} в режиме квантового эффекта Холла.

Третья глава диссертации посвящена изучению статистики переноса заряда в баллистическом образце графена с двумя контактами. Автором получен неожиданный, на первый взгляд, результат: если уровень Ферми оказывается в точке касания валентной зоны и зоны проводимости, то функция распределения коэффициента прохождения в чистом образце имеет вид, характерный для диффузионных одномерных систем. В этой же главе исследуются перенормировки плотности состояний графена из-за наличия контактов с металлом, а также изучена роль слабого беспорядка в баллистических графеновых системах.

Глава 4 диссертации П.М. Островского содержит анализ транспортных свойств каналов на основе графена, содержащих «сильные» примеси. Автором развит метод развернутых функций Грина, который оказался особенно уместным для анализа проводимости графена с вакансионными дефектами. Найден интересный режим, в котором проводимость образца имеет супердиффузионный характер, транспортные свойства графена описаны с помощью метода самосогласованной T -матрицы.

Наконец, *главы 5 и 6* диссертационной работы посвящены своего рода обобщению полученных результатов на широкий класс двумерных киральных металлов, описываемых гамильтонианом $\hat{H} = -C\hat{H}C^{-1}$, где оператор $C^2 = 1$. Развита репличная нелинейная сигма-модель для описания транспортных свойств таких систем, исследованы уравнения ренорм-группы, проведены аналогии с переходом Березинского-Костерлица-Таулесса. Важным результатом, полученным в диссертации, является предсказание возможности локализации в киральных металлах при достаточно сильном беспорядке. Также автор детально исследовал плотность состояний в киральных металлах, уделив особое внимание случаю, когда в качестве дефектов выступают вакансии.

Приложения к диссертации содержат описание двухпетлевой перенормировки слабого потенциального беспорядка в графене и изложение алгоритма обращения матриц, используемого для расчета транспортных параметров графена с сильными примесями методом развернутых функций Грина.

В *заключении* приведены основные научные результаты, полученные в диссертации П.М. Островского, и подведен итог выполненным исследованиям. Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе.

Достоверность основных полученных результатов и выводов сомнений не вызывает. Достоверность обусловлена адекватным выбором формализма, основанного на применении наиболее продвинутых методов современной теоретической физики, включая симметричный анализ, метод функций Грина, сигма-модель, метод ренорм-группы. Во многих случаях выполнено сравнение результатов, полученных в различных подходах, а также, где это возможно, сопоставление численных и аналитических расчетов. В пользу высокой достоверности результатов свидетельствует их внутренняя непротиворечивость, а также широкая апробация на научных семинарах и конференциях.

Научная и практическая значимость диссертации П.М. Островского для теоретической физики и для физики графена несомненна. Основные результаты диссертации позволяют сформулировать обоснованные модели транспортных свойств графена, описывающие эксперимент и обладающие значительной предсказательной силой. Развита в диссертации теория локализации в киральных металлах объясняет наблюдаемые в таких системах необычные критические свойства и позволяет одновременно учитывать эффекты как классических флуктуаций, так и квантовой интерференции. Разработанные в диссертационной работе модели и методы могут быть обобщены для другие киральных металлов, а также систем со схожими гамильтонианами (топологические изоляторы, полуметаллы Вейля, монослои дихалькогенидов переходных металлов). Сильной стороной диссертации является краткое обсуждение в конце пятой главы открытых вопросов и нерешенных задач теории локализации в киральных металлах.

Как и всякое значительное исследование диссертационная работа П.М. Островского, однако, обладает некоторыми недостатками, что позволяет сформулировать приведенные ниже **замечания**:

1. В диссертации автор сосредоточился на одночастичных эффектах в графене, анализ которых, безусловно, является краеугольным камнем для понимания электронного транспорта. Тем не менее, был бы уместен комментарий о том, в какой мере полученные результаты устойчивы к влиянию межэлектронного взаимодействия.
2. При обсуждении в главе 2 механизмов, приводящих к «универсальному» значению проводимости графена, уровень Ферми которого находится в дираковской точке, открытым остается вопрос, насколько предложенные автором модели могут объяснить наблюдаемое значение проводимости ($\approx 4e^2/h$) и отсутствие зависимости проводимости от температуры.
3. Неясно, могут ли полученные в разделах 6.2 и 6.6 результаты для плотности состояний (и, в частности, для «хвостов» плотности состояний) в неупорядоченном киральном металле быть выведены в рамках теории оптимальной флуктуации?

В значительной мере эти замечания, однако, носят формальный характер и демонстрируют значительную сложность поставленных и решенных в диссертации задач. Они не умаляют общей высокой оценки работы П.М. Островского.

Диссертация Павла Михайловича Островского является завершенной научной работой, выполненной на высочайшем научном уровне. Фактически, в диссертационной работе сформулировано полное теоретическое описание транспортных эффектов в графене. Материалы диссертации опубликованы в авторитетных физических журналах (Physical Review Letters и Physical Review, Semiconductor Science and Technology), докладывались автором на тематических конференциях в том числе и в виде приглашенных сообщений. Некоторые работы автора уже стали классическими, они цитируются в научной литературе многие сотни раз. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

По моему мнению, по актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа П.М. Островского «Электронные свойства неупорядоченного графена» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от

01.10.2018), а ее автор, Островский Павел Михайлович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.



Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
Глазов Михаил Михайлович
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.
Тел.: + 7 911 913 04 36
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Подпись М.М. Глазова удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ РАН,
доктор физико-математических наук, профессор
Шергин А.П.



«10» июня 2019 года