

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук К. Э. Нагаева  
на диссертационную работу Островского Павла Михайловича  
"Электронные свойства неупорядоченного графена",  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Диссертация П. М. Островского направлена на теоретическое исследование переноса заряда в графене. В ней рассматривается влияние различных типов беспорядка на его среднюю проводимость, дробовой шум и квантовый эффект Холла в нем. Графен представляет собой моноатомный слой углерода с гексагональной кристаллической решеткой, и его электрические свойства вблизи точки зарядовой нейтральности радикально отличаются от других двумерных проводящих систем, поскольку электроны в нем обладают нулевой эффективной массой.

Диссертация состоит из шести глав, введения, заключения и двух приложений. В первой главе строятся модели беспорядка в графене и исследуются его электронный спектр и транспортные свойства вдали от точки Дирака. Во второй главе рассматриваются транспортные свойства графена со слабым беспорядком вблизи точки Дирака. В третьей главе вычисляются распределение прозрачностей и полная статистика переноса заряда при произвольном положении уровня Ферми относительно точки Дирака. В четвертой главе рассматриваются транспортные свойства графена в случае резонансного рассеяния на примесях и переход от баллистического к диффузионному режиму, когда уровень Ферми находится вблизи точки Дирака. В пятой главе рассматриваются общие вопросы локализации в киральных двумерных металлах на основе репличной нелинейной сигма-модели. В шестой главе вычисляется плотность состояний в двумерном киральном металле с вакансиями.

В диссертации получен ряд очень важных результатов, касающихся минимальной проводимости графена в точке Дирака. В частности, в ней объясняется, почему в этой точке не происходит локализация носителей заряда даже при сильном беспорядке. Оказывается, что такая локализация возможна лишь при наличии рассеяния носителей из одной долины в пространстве квазиимпульсов в другую, которое может обеспечиваться

лишь дефектами с короткодействующим потенциалом, например, вакансиями в графене. Другой важный результат - объяснение различий в поведении неупорядоченного графена и двумерного металла со случайным спин-орбитальным взаимодействием. Хотя гамильтонианы обеих систем имеют одинаковую симметрию, в двумерном металле при малой проводимости происходит переход в изолирующее состояние, а в графене - нет. В диссертации построена квантово-полевая теория неупорядоченного графена и показано, что по сравнению со случаем обычного металла со спин-орбитальным взаимодействием, в его эффективном действии возникает дополнительный топологический член, который и препятствует переходу в изолирующее состояние. Отдельно следует упомянуть представленные в диссертации результаты по дробовому шуму в графеновом проводнике конечных размеров при переходе от баллистического к диффузионному режиму. В диссертации получено, что отношение дробового шума к шуму классического пуассоновского процесса, называемое фактором Фано, имеет немонотонную зависимость от размеров проводника. В баллистическом режиме, когда размеры проводника меньше длины свободного пробега, фактор Фано равен  $1/3$ . Затем он убывает, проходит через минимум при промежуточных размерах, и вновь возвращается к  $1/3$  в диффузионном режиме, когда размеры проводника становятся много больше длины свободного пробега. Такое поведение фактора Фано радикально отличается от его поведения в обычных металлических проводниках, в которых он монотонно увеличивается с ростом размеров от нуля до  $1/3$ .

Большим достоинством диссертации является разнообразие теоретических методов, которые использовались в ней для анализа одного и того же явления. Проводящие свойства графена рассматривались в ней с помощью нелинейной сигма-модели, обычной диаграммной техники и просто с помощью численных методов. Следует отметить высокий технический уровень диссертации.

Диссертация написана хорошим языком и легко читается.

В качестве недостатка диссертации можно указать некоторую неполноту решения проблемы проводимости графена. Неупорядоченный графен рассматривается в ней как макроскопически однородный материал, и при этом игнорируются плавные флуктуации химического потенциала, связанные со случайностью распределения дефектов. Между тем, эти флуктуации могут играть важную роль вблизи точки Дирака. Также в

