

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Алексеева Павла Сергеевича
«Гидродинамические явления в наноструктурах»
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Наиболее распространенный подход к описанию кинетических явлений в твердых телах основан либо на микроскопических теориях отклика, либо на уравнении Больцмана с простыми приближениями для интеграла столкновений. До недавнего времени эти подходы вполне адекватно описывали свойства полупроводников и металлов. Однако, по мере увеличения чистоты материалов и появления двумерных и слоистых квазидвумерных соединений и структур высокой степени идеальности все большую роль начинает играть взаимодействие между электронами, а также учет конкретной геометрии образца. Когда длина рассеяния, определяемая взаимодействием между частицами, становится меньше других характерных длин рассеяния, формируется гидродинамический режим транспорта. И таких экспериментов, в которых данный режим мог бы наблюдаться, раньше не было.

В настоящее время появляется довольно много систем, в которых гидродинамический режим, видимо, может проявляться в транспортных характеристиках. Поэтому, хотя вопросы гидродинамического транспорта в твердых телах немного обсуждались и ранее, именно сейчас они приобрели актуальность. Появляется необходимость в развитии теории для того, чтобы понимать и предсказывать свойства чистых систем в гидродинамическом режиме.

Построению такой теории и посвящена диссертация П.С.Алексеева. При этом оказывается существенным рассматривать образцы конечных размеров, так как электронные токи оказываются распределенными сильно неравномерно по пространству, что сказывается на наблюдаемых характеристиках. Также интересным в этой работе является изучение различных режимов транспорта в магнитном поле, так как магнитное поле добавляет еще один параметр длины – циклотронный радиус, что позволяет изучать разные режимы и проследивать переходы от одного режима к другому.

Перечислю наиболее существенные, на мой взгляд, новые результаты, полученные в диссертации.

В первой главе диссертации показано, что при формировании в образце вязкой электронной жидкости должен наблюдаться эффект гигантского отрицательного магнетосопротивления. Наблюдение такого поведения в высокоподвижных квантовых ям GaAs может служить свидетельством появления гидродинамического режима.

Пожалуй, наиболее интересным результатом этой части является предсказание нового типа магнитного резонанса в жидкости двумерных электронов, который возникает вблизи удвоенной гармоники циклотронной частоты. Это специфический резонанс в коэффициентах сдвиговой вязкости при высокочастотных движениях жидкости. По появлению такого резонанса в отклике можно судить о появлении режима вязкого течения электронов.

В главе 2 рассмотрено, как появляется гидродинамическое описание из микроскопической картины. Здесь, в частности, приводится вывод коэффициентов вязкости для слабо неидеального ферми-газа двумерных электронов, взаимодействующих посредством экранированного кулоновского потенциала. Показано, что основную роль для вязкости играют встречные столкновения электронов с малым суммарным импульсом, приводящие к рассеянию на малые углы. Даются полезные оценки параметров, при которых возможно формирование гидродинамического режима.

Основная тема 3 главы - это образование неоднородных по ширине течений в электрон-дырочных системах, в которых дополнительно надо учитывать рекомбинацию носителей. Предсказан немонотонный характер магнетосопротивления за счет формирования приграничных слоёв, в которых происходит установление баланса между процессами сдвиговой вязкости, диффузии и рекомбинации. Интересный результат - появление линейного магнетосопротивления в образцах некоторой промежуточной ширины. Этот результат также напрямую связан с формированием приграничных слоев в двумерных образцах.

В 4 главе был подробно изучен переход от баллистического режима транспорта двумерных электронов в чистых длинных образцах к гидродинамическому режиму с увеличением магнитного поля B , перпендикулярного двумерному слою. Показано, что в длинных образцах высокого качества должны появляться резкие изломы на зависимостях продольного и холловского сопротивления от B при некотором критическом значении. Эти особенности возникают в тот момент, когда при увеличении поля ларморовский радиус становится меньше ширины образца.

Говоря о диссертации в целом, хотелось бы выделить две особенности. Во-первых, последовательно исследуется важный вопрос - о формировании специальных приграничных областей, которые могут в основном определять свойства реальных образцов конечной ширины. То есть, знания объемных характеристик образцов большого размера оказывается недостаточно для определения характеристик реального образца заданной геометрии.

Во-вторых, в диссертации в каждом разделе проводится сравнение полученных зависимостей с экспериментом, и демонстрируются реальные системы, поведение которых может определяться развитой теорией.

Хотя к основным результатам серьезных замечаний нет, есть некоторые вопросы к второстепенным деталям и утверждениям.

При сравнении теоретических результатов с экспериментальными на рис. 1.4 общая картина зависимостей довольно хорошо согласуется. Но на нижних экспериментальных кривых (низкие температуры) после падения сопротивления наблюдается подъем: отрицательное магнетосопротивление сменяется положительным. Этот эффект в тексте оставлен совсем без комментариев.

В разделе 2.2 параметры Ландау ферми-жидкости рассматриваются как феноменологические величины в духе исходной теории. В разделе 2.3 проведен расчет по теории возмущений для кулоновского взаимодействия. Но параметры Ландау - это и есть усредненное взаимодействие между частицами. Если исходно Ландау рассматривал короткодействующий потенциал между частицами, то здесь взаимодействие – кулоновское (возможно экранированное). Какие могут быть причины (параметры) того, чтобы функции F_1 , F_2 ферми-жидкости сильно отличались от вычисленных в первых порядках?

Применение безразмерных параметров часто упрощает вычисления и вид формул, однако, когда формулы написаны с использованием и безразмерных, и размерных величин, это затрудняет понимание их зависимости от каких то параметров. Например, в формулах типа (2.63), (С.142) (в Приложении С) оставлена и температура и безразмерный параметр ζ , также содержащий температуру, поэтому общая зависимость от температуры видна не сразу.

В разделе 3.4. для электронно(е)-дырочной(h) системы предполагается, что рассеяние e-h медленней, чем e-e. При одинаковых плотностях и силе кулоновского взаимодействия одного порядка надо бы объяснить, чем может обеспечиваться такая разница в рассеянии.

В разделе 4.3.2 выведены формулы (4.58) и (4.63), которые определяют объемный и краевой вклады в магнетосопротивление. В тексте объяснено, что в зависимости от конкретного образца может доминировать тот или другой. Но из самих формул, мне кажется, это не следует.

В разделе 4.5 показано, что при переходе от баллистики к гидродинамике с ростом магнитного поля появляются изломы на зависимости продольного и холловского сопротивлений (рис.4.10). Это, безусловно, резкий переход от одного режима транспорта к другому, но следует ли называть это фазовым переходом?

Эти замечания касаются некоторых уточнений изложения и не затрагивают основные результаты диссертации. Вошедшие в диссертацию результаты были своевременно опубликованы в 16 статьях в ведущих журналах по физике, рекомендованных ВАК России. Все статьи, собранные в диссертацию, представляют собой единый законченный цикл исследований. Результаты докладывались на большом количестве семинаров, российских и международных конференций, их корректность и обоснованность не вызывает сомнений. Достоверность результатов обеспечивается применением адекватных теоретических методов и дополнительно подтверждается сравнением с экспериментальными данными. В автореферате правильно и полностью изложено содержание диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Алексева Павла Сергеевича «Гидродинамические явления в наноструктурах» полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

4 апреля 2022 г.

Официальный оппонент

Арсеев Петр Иварович

Гнс Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН
Почтовый адрес: 119991 Москва,
Ленинский проспект 53
Тел. 499-1326271
ars@lpi.ru

Подпись П.И.Арсеева заверяю

Зам директора ФИАН,
к.ф.-м.н.

А.В.Колобов