

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Денисова Константина Сергеевича "Теория транспортных явлений в системах с киральным спиновым порядком", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.02 - теоретическая физика)

Актуальность. Развитие спиновой электроники базируется на знаниях о спин-зависимых транспортных эффектах в твердых телах. Безусловные успехи этого направления, достигнутые за последние два десятилетия, обусловлены пониманием природы эффектов гигантского (туннельного) магнитосопротивления. Дальнейшее продвижение связано с решением проблемы уменьшения потерь энергии при работе приборов, содержащих магнитные элементы. Одним из путей решения этой задачи является переход к новому типу носителей информации - магнитным скирмионам, которые являются солитоноподобными образованиями с некомпланарным распределением намагниченности. Понимание особенностей рассеяния носителей тока на таких магнитных неоднородностях необходимо для ответа на вопрос о возможности применения скирмионов в устройствах обработки информации. Проблема движения частиц со спином $1/2$ в неоднородном магнитном поле имеет давнюю историю и охватывает широкий круг задач физики твердого тела и нейтронографии. Однако, вопрос о спин - зависимом рассеянии частиц на системах с топологически нетривиальным распределением намагниченности еще не получил исчерпывающего ответа. Поэтому диссертация К.С.Денисова, посвященная теории транспортных явлений в системах с киральным спиновым порядком, является актуальной как с прикладной, так и с фундаментальной точки зрения. В диссертации решены задачи о топологическом эффекте Холла при рассеянии носителей тока на магнитных скирмионах и о возможности формирования таких распределений в двумерных электронных системах со спин-орбитальным взаимодействием.

Диссертация состоит из главы, посвященной обзору литературы и трех глав, в которых описаны оригинальные исследования. Диссертация К.С. Денисова написана понятным и грамотным языком, аккуратно оформлена. В ней четко сформулированы цели исследования, подробно описаны теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

Во второй главе диссертации дан детальный теоретический анализ особенностей матрицы рассеяния электрона на магнитной неоднородности с топологически нетривиальным

распределением намагниченности. Анализ проводится в рамках хорошо апробированной $s-d$ модели. Замечательным результатом этой работы является определение матрицы рассеяния при произвольном значении параметра адиабатичности. Ранее были известны ответы только для предельных случаев сильной и слабой связи спина электрона с неоднородной намагниченностью.

В третьей главе, на основе квазиклассического кинетического уравнения решена задача о топологическом эффекте Холла в неупорядоченных системах с киральными спиновыми текстурами. При этом вид интегралов столкновений в этих уравнениях определялся с помощью волновых функций, найденных в предыдущей главе. Эти результаты могут быть положены в основу метода диагностики топологически заряженных распределений намагниченности.

В четвертой главе диссертации рассмотрены микроскопические механизмы формирования киральных спиновых текстур в магнитных полупроводниках. В данной главе показано, что киральный спиновый порядок в магнитных системах может возникать в результате электростатического беспорядка, присущего любой реальной структуре.

Новизна и достоверность. Достоверность результатов диссертации обусловлена использованием хорошо апробированных моделей и методов, таких как $s-d$ модель и квазиклассические кинетические уравнения. Кроме того, в предельных случаях результаты работы совпадают с известными ранее. Новизна диссертационной работы состоит в построении теории асимметричного рассеяния носителей заряда на некомпланарных магнитных неоднородностях типа скирмионов при произвольном значении параметра адиабатичности. На основе этих результатов в работе дано описание электросопротивления систем с киральными спиновыми текстурами в широком диапазоне параметров. В диссертации исследованы новые механизмы кирального спинового упорядочения, обусловленные электростатическим беспорядком в двумерных системах со спин-орбитальным взаимодействием.

Научная и практическая значимость. Научная значимость диссертации состоит в результатах, полученных в ходе ее подготовки

- развита техника точного решения задачи рассеяния электрона на магнитных неоднородностях. Разработанная схема основывается на методе фазовых функций и позволяет численно рассчитать сечение рассеяния и исследовать его антисимметричную часть в случае произвольного профиля спиновых текстур.

- продемонстрировано существование различных режимов топологического эффекта Холла в зависимости от силы связи между электронным спином и некомпланарной спиновой текстурой. Переключение между этими режимами, обусловленное изменением размера спиновой текстуры, сопровождается осцилляционными особенностями спинового и зарядового тока.

- получено выражение для тензора проводимости скирмионной системы, компоненты которого немонотонно зависят от как от энергии Ферми, так и от характерного размера скирмиона.

- построена теория, описывающая формирование равновесных киральных спиновых текстур за счет электростатического беспорядка в двумерных системах со спин-орбитальным и зеемановским взаимодействиями. Предложен механизм кирального спинового упорядочения в магнитных полупроводниках, основанный на локализации носителей заряда и формировании магнитных поляронов в условиях спин-орбитального взаимодействия.

Результаты работы могут быть положены в основу метода диагностики топологически заряженных распределений намагниченности в магнитных средах, а также могут использоваться при разработке устройств спинтроники, основанных на хранении информации в виде отдельных скирмионов.

Результаты диссертации К.С.Денисова могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области спинтроники ИРЭ РАН, ИФМ РАН им. Михеева, КФТИ РАН им. Завойского, ФИАН, ИФТТ РАН, ИПФ РАН и др.

Замечания. По диссертации можно сделать следующие замечания

1. Для определения исследуемых магнитных текстур автор использует термин "киральные", что представляется неточным. Для топологического эффекта Холла наиболее важной является некомпланарность распределения намагниченности в скирмионе, а не его завихренность. Этот эффект будет наблюдаться и для других топологически заряженных распределений, таких, например, как конусные магнитные вихри в магнитных наночастицах. При этом киральность вихревого распределения не важна.

2. Проблема спин-зависимого рассеяния электронов, с точки зрения математического описания, аналогична проблеме рассеяния нейтронов на магнитных неоднородностях. Рассеяние тепловых нейтронов описывается в рамках теории возмущений, что совпадает с описанием рассеяния электронов в приближении "слабой" связи. К сожалению, соответствующих ссылок и обсуждений диссертация не содержит.

3. Обращаясь к точным решениям задачи рассеяния частиц со спином $1/2$ на системах с некомпланарным распределением намагниченности, следовало обсудить точные решения, имеющиеся для конусной магнитной спирали (см., например, Матвеев В. М., Нагаев Е. Л., *ЖЭТФ* **69** 2151 (1975))

4. При расчете тензора диэлектрической проницаемости следует учесть асимметричность рассеяния электрона на немагнитной примеси, которая возникает в силу некомпланарности распределения намагниченности и связи между спиновым и орбитальным движением электрона в такой среде.

Сделанные замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы К.С.Денисова. В работе решена важная задача о рассеянии электронов на топологически заряженной магнитной неоднородности. Решение этой задачи вносит заметный вклад в физику спиновых явлений в твердых телах. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах (Письма в ЖЭТФ, Phys. Rev.Lett., Phys. Rev. B и др.), доложены на престижных конференциях. Автореферат диссертации правильно передает ее содержание. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней" утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, К.С.Денисов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.02 - теоретическая физика**.

доктор физико - математических наук
зав.отделом магнитных наноструктур
Института физики микроструктур РАН -
филиала ФГУБ "Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики РАН"
Фраерман Андрей Александрович
14 января 2020 года

Академическая ул., 7, Нижний Новгород, Нижегородская обл., 603087
тел. 8 (831) 417-94-73, e - mail: andr@ipmras.ru

Подпись А.А.Фраермана заверяю
ученый секретарь ИФМ РАН
к.ф.-м.н. А.А.Дубинов