

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Циберкина Кирилла Борисовича «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность темы исследования

Диссертация Циберкина К.Б. посвящена развитию теории коллективных мод намагниченности в концентрированных системах с дипольным и РККИ-взаимодействием вблизи состояния насыщения, в том числе описанию спин-спиновой релаксации и спиновой диффузии, нелинейных волн и осреднённых сигналов намагниченности в условиях реализации коллективных мод, а также построению модели коллективной динамики электронов в углеродных наноструктурах с магнитной примесью.

Развитие микроэлектроники на современном этапе связано с поиском новых материалов и физических эффектов для разработки быстродействующих и экономичных вычислительных устройств. Направления исследования, связанные с реализацией устройств обработки и передачи данных на базе спиновых волн в диэлектриках, низкотемпературных парамагнетиках, разбавленных магнитных полупроводниках и др. получили названия спинтроники и магноники. Помимо устройств электроники и вычислительной техники важным выходом данных направлений является разработка высокоэффективных накопителей энергии и высокочувствительных датчиков угловой скорости. Кроме того, акцент исследования смещается в сторону низкоразмерных структур: фуллерены, нанотрубки, графены, атомные кластеры и т.д. Геометрическая размерность рассматриваемых систем мала по сравнению с пределами применимости статистической физики, поэтому важно построение легко масштабируемых и адаптируемых теоретических моделей коллективной спиновой динамики различных материалов и наноструктур.

Таким образом, тема диссертационного исследования Циберкина К.Б., направленная на развитие научных направлений спинтроники и магноники, является весьма актуальной и имеет практическую значимость. Полученные автором новые знания также являются актуальными и имеют теоретическую и практическую значимость.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа выполнена на кафедре теоретической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет». Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы; содержит 251 страницу текста, включая 70 иллюстраций и 7 таблиц. Библиография содержит 360 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определен личный вклад автора работы, приведены сведения об апробации работы, ее структуре и объеме.

В первой главе представлен обзор исследований и основных достижений в области коллективных магнитных явлений и их потенциальных приложений, а также развития приложения подходов нелинейной динамики к физике конденсированного состояния и магнетизму. Методы анализа коллективных явлений глубоко проработаны применительно к магнитоупорядоченным материалам – ферро-, антиферромагнетиках.

Во второй главе построена модель динамики намагниченности низкотемпературного парамагнетика на основе подхода вторичного квантования и приближения сплошной среды. Дан анализ особенностей динамики намагниченности на различных временных масштабах, установлена иерархия динамических процессов от однородной ларморовской прецессии, дипольного уширения спектральных линий до формирования нелинейных волн, в том числе солитонов намагниченности.

В третьей главе описываются свойства двухкомпонентного магнетика, состоящего из парамагнитной решётки с внедрёнными в неё примесными ионами. Построена модель динамики намагниченности взаимодействующих подсистем – основной решётки и ансамбля примесных атомов, проанализированы волновые решения и условия их устойчивости. На основе димерной модели со случайными параметрами проанализированы равновесные свойства примесной подсистемы в материале.

В четвертой главе описаны результаты численного моделирования динамики намагниченности в парамагнитных системах, полученные методом сложения сигналов, рассчитанных для невзаимодействующих спиновых кластеров малой размерности случайной или регулярной структуры. Получены аналитические оценки асимптотики намагниченности на больших временах, моделирование верифицировано методом моментов.

В пятой главе рассматривается реализация коллективных мод в низкотемпературном парамагнетике и её применение к расчёту свойств системы вблизи состояния насыщения, обусловленного наложением сильного внешнего поля. Получены дисперсионные соотношения линейных волн намагниченности при различной ориентации внешнего поля для структур различной размерности, вычислены вклады коллективных мод в равновесные параметры материала, отклики на возмущения внешнего поля.

Шестая глава посвящена описанию результатов применения приближения сплошной среды к модели Хаббарда для описания сферической углеродной наноболочки радиусом порядка единиц нм, и расчёта её электронных, оптических и магнитных свойств. Получены уравнения для эволюции плотности электронных состояний, найдены энергетические

спектры, рассчитаны оптические спектры и особенности намагниченности композита, состоящего из независимых углеродных сферических оболочек.

В заключении перечислены основные результаты исследования и сделаны основные выводы, подтверждающие решение поставленных задач диссертационной работы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» в части направлений исследования, определенных следующими пунктами Паспорта специальности: п. 2. – «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности»; п. 5 – «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения»; п. 7 – «Теоретические расчеты и экспериментальные измерения электронной зонной структуры, динамики решётки и кристаллической структуры твердых тел».

Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов определяется строгой теоретической аргументацией выбора задач исследования, применением теоретических методов исследования в рассматриваемой области, подтверждена широкой апробацией результатов на региональных, российских и международных научных конференциях, а также научных семинарах ПГНИУ, ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт», ИРЭ РАН, ФТИ им. Иоффе, КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается построением теоретических моделей на базе установленных фундаментальных соотношений и представлений квантовой механики, квантовой и статистической теории твёрдых тел, методов нелинейной динамики, сопоставлением результатов аналитических расчётов и численного моделирования, и данными ряда экспериментов, согласованием результатов с фундаментальными закономерностями физики магнитных явлений.

Основные научные результаты диссертационной работы

С использованием спин-волнового подхода реализовано описание намагниченности дипольной системы вблизи насыщения в сильном внешнем поле. Спектр коллективных мод локализован вблизи ларморовской частоты, что определяет экспоненциальное убывание их вкладов в намагниченность и

теплоёмкость при низких температурах. В рамках теории линейного отклика смоделирована динамика намагниченности системы под влиянием возмущений внешнего поля.

Подход на основе коллективных мод применён к уравнениям динамики отдельных магнитных моментов в концентрированной системе частиц с дипольным или РККИ-взаимодействием в пределе сплошной среды, и сформулированы уравнения эволюции суммарной намагниченности системы, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию в сильном внешнем поле вблизи состояния насыщения без введения эмпирических параметров. Определены области устойчивости волн намагниченности, которые ограничиваются вкладом несекулярных членов дипольного взаимодействия.

На базе приближения сплошной среды сформулирована модель динамики намагниченности двухкомпонентного материала, состоящего из парамагнитной решётки с равномерно внедрёнными в неё примесями с другим гиромагнитным отношением, с учётом дипольного взаимодействия атомов основной решётки между собой, с атомами примеси, и РККИ-взаимодействия примесных центров. Дисперсионные соотношения спиновых волн содержат две ветви, описывающие связанные колебания в подсистемах. Возможна реализация солитонных решений, устойчивых при положительном знаке взаимодействия ближайших примесных атомов, и значении угла между внешним полем и направлением движения, меньшим 57.3° .

В системе, образованной тесными магнитными димерами с РККИ-взаимодействием внутри пар частиц, со случайной величиной взаимодействия или размером димеров, возможна реализация немагнитной фазы, обусловленной переходом части димеров в микросостояния с нулевым полным спином. Область существования немагнитного состояния расширяется при увеличении дисперсии распределения энергии взаимодействия в димерах или их размера. Аналогичное немагнитное состояние для концентрированной системы найдено численно для модели Изинга с конкурирующими знаками обменного взаимодействия в первой и второй координационной сферах.

Аналитически и численно проведено осреднение пробных функций Абрагама, описывающих огибающие сигналов поперечной намагниченности элементов ансамбля спиновых кластеров случайного размера с заданной функцией распределения, продемонстрирован переход от осциллирующих сигналов суммарной намагниченности к монотонному спаду. Для ансамбля кластеров случайной структуры реализуется такая же зависимость.

Реализация приближения сплошной среды к уравнениям эволюции операторов электронной плотности, полученных из модели Хаббарда для сферической углеродной оболочки с примесями, позволяет рассчитать энергетический спектр углеродной структуры. Найденный спектр оптического поглощения массива нанооболочек случайного размера согласуется с экспериментальными данными ИК-спектроскопии. Получена

оценка ширины запрещённой зоны, описан электронный пара- и диамагнетизм сферической оболочки, подтверждаемый экспериментальными измерениями намагниченности.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что: получены уравнения динамики локальной намагниченности, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию без применения феноменологических моделей; методом многих масштабов проанализирована иерархия режимов эволюции намагниченности концентрированного низкотемпературного парамагнетика в приближении сплошной среды, показан эффект учёта несекулярных членов дипольного взаимодействия; сформулирована динамическая модель двухкомпонентного материала, описывающая связанные колебания намагниченности его подсистем в приближении сплошной среды с учётом дипольного взаимодействия атомов основной решётки между собой, с атомами примеси, и РККИ-взаимодействия примеси; найдено, что немагнитное состояние ансамбля димеров реализуется при отрицательном среднем значении АФМ-взаимодействия и малой дисперсии, и разрушается по мере роста последней; проведено осреднение пробных функций, описывающих огибающие сигналов поперечной намагниченности малых спиновых кластеров для нахождения суммарного сигнала их ансамбля; аналитически и численно продемонстрирован переход от осциллирующих сигналов к монотонному затуханию; реализовано осреднение уравнений эволюции операторов электронной плотности для углеродной наносферы в пределе сплошной среды, на основе полученной модели рассчитаны оптические, электронные и магнитные характеристики массива наносфер случайного размера, согласующиеся с экспериментальными результатами.

Публикация основных материалов диссертационной работы

Материалы диссертации опубликованы в 18 статьях в рецензируемых журналах, в том числе 15 статей – в изданиях, индексируемых в научных базах Scopus, Web of Science и включённых в ядро РИНЦ, 3 статьи – в изданиях из перечня ВАК, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Опубликовано 23 материала конференций, тезиса докладов и статьи в изданиях и сборниках.

Публикации соответствуют диссертационной работе по всем существенным признакам: поставленным целям и задачам работы, обоснованию актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости и основным положениям, выносимыми на защиту.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. В главе 2 в п. 2.1 построена модель парамагнетика в состоянии близком к насыщению, помещённого в сильное постоянное однородное

магнитное поле. Предложен спиновый гамильтониан такой системы. Модель применена для простой кубической решётки, для которой введённый угол между полем и радиус-вектором узлов $\theta_{jk}=0, \pi/2$ и π . В этом случае должны обращаться в ноль коэффициенты c_{jk} из несекулярной части гамильтониана, а также коэффициенты b_{jk} для узлов на оси z , в формуле (2.6) и дальнейших формулах.

2. В главе 3 получены нелинейные уравнения (3.7) динамики намагниченности парамагнитной решётки и примесей. Для получения дисперсионных уравнений (3.10) используется приближение плоских волн. Однако, на мой взгляд, решёточная и примесная намагниченности должны иметь разные частоты и волновые векторы, как в формуле (3.32) для солитонных решений.

3. В главе 4 автор развивает теоретическую модель для описания динамики намагниченности ансамбля парамагнитной примеси на поверхности сферической диамагнитной оболочки. Несомненным достоинством модели является «упрощающий подход, основанный на моделировании характеристик отдельных кольцевых спиновых кластеров малой размерности и различного радиуса». Однако, представляется, что в этом случае теряется информация о симметрии геометрической структуры сферических оболочек и магнитной структуры примесей, распределённых на её поверхности. Эти особенности должны проявляться в экспериментальных спектрах намагниченности.

4. В большей части работы отсутствует сравнение полученных результатов по динамике намагниченности парамагнетиков с экспериментальными данными и результатами других исследователей, как это сделано в главе 6 для углеродных нанооболочек. Качественное и количественное сравнение позволило бы определить методическую погрешность результатов аналитических и численных расчётов и расширить рамки применимости развитых моделей.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Циберкина К.Б. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладающую новизной, практической и теоретической значимостью, в которой решены актуальные задачи, имеющие значение для развития физики конденсированного состояния: построение аналитических моделей динамики локальной намагниченности концентрированных систем с дипольным или РККИ-взаимодействием в рамках приближения коллективных мод и сплошной среды, и установление общих закономерностей динамики намагниченности таких спиновых систем; исследование равновесных и динамических свойств низкотемпературного парамагнетика при реализации спин-волнового режима вблизи насыщения в сильном внешнем магнитном поле; выявление условий существования волновых режимов одно- и двухкомпонентных магнитных систем; установление границ применимости построенных моделей к

описанию электронных и магнитных свойств макро- и мезоскопических спиновых систем, углеродных наноструктур с магнитными примесями; анализ влияния степени беспорядка в системе димеров на равновесную намагниченность системы; изучение перехода от индивидуальных осциллирующих сигналов намагниченности, полученных от элементов ансамбля спиновых кластеров, к осреднённому монотонно убывающему сигналу.

Аннотация в достаточной мере отражает содержание работы.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» и полностью отвечает требованиям п. 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, в редакции, принятой Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 октября 2024 г. № 1382, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Циберкин Кирилл Борисович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук по специальности
02.00.04 – Физическая химия, профессор,
профессор кафедры теоретической физики и волновых процессов,
Институт математики и информационных технологий,
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»,

Лебедев Николай Геннадьевич

Сер-
«15» 08 2025

Сергей Лебедев Н.Г. заведующий
Профессор



работе
А. Цыбу *Лебедев Н.Г.*

Контактные данные:

ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»,
Адрес: 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100.
Тел. (8442) 460-812. e-mail nikolay.lebedev@volsu.ru