

УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр
Российской академии наук»
420111, Российская Федерация, Татарстан,
г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.
Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.  Калачев А.А.
«18» августа 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации 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

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа К.Б. Циберкина посвящена исследованию коллективных возбуждений в двухкомпонентных парамагнетиках, димерах и кольцевым магнетиках. В последние годы возрос интерес научного сообщества к изучению низкоразмерных углеродных соединений как в виде сферы, так и в виде плоскости, легированные дополнительно переходными металлами. Для интерпретации экспериментальных данных и предсказанию поведения магнитных характеристик таких систем необходимо дальнейшее развитие теории поведения намагниченности. Современное развитие физики конденсированного состояния направлено на манипуляции спиновыми объектами с малым числом спинов, когда существующие модели для микро и макро- объектов неприменимы и требуется развитие теоретических подходов, достоверно описывающее спиновое поведение систем до 10^4

спинов. Поэтому проведенные исследования по поведению намагниченности вблизи насыщения, развитие теории коллективных мод является актуальной задачей. Для систем малой размерности неприменимы статистические подходы, и необходимо построение эффективных масштабируемых теоретических моделей спиновой динамики мезоскопических структур. Комбинирование подходов теории сплошной среды, коллективных явлений и нелинейной динамики позволяет сформулировать осредненное описание таких систем и построить эффективные теоретические модели, получить из первых принципов эмпирические параметры, описывающие динамику спиновых и электронных систем.

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

В связи с этим, проведенные К. Б. Циберкиным теоретические исследования магнитных характеристик двухкомпонентных систем, связанных димеров, динамики намагниченности парамагнитных частиц на диамагнитной оболочке, являются значительными как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах.

2. Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, изложена на 251 страницах машинописного текста, включает в себя 70 иллюстраций, 7 таблиц и список литературы из 360 наименований.

Во введении обсуждается актуальность выбранной тематики, научная значимость и практическая ценность проведенных исследований.

В первой главе приведен литературный обзор современного состояния применения волновых процессов для создания элементной базы в спинтронике. Приведены характеристики работы спинового вентиля на примере гетероструктуры $\text{YIG}/\text{CoO}/\text{Co}$. Рассмотрено влияние спиновых волн на перенос спинового тока. Рассмотрены особенности работы магнитного вентиля, созданного на базе железо иттриевого граната. Показано, что мультиферроики используются для создания СВЧ устройств с оптимальным контролем рабочей частоты. Указано на формирование спиновых солитонов

и геликоидальных состояний в слабых магнитных полях в Cu_2VO_4 . Рассмотрены особенности поведения намагниченности в разбавленный магнетиках. Введено понятие низкотемпературного парамагнетика, в котором магнитное упорядочение не наблюдается при нулевой температуре. Приведены история рассмотрения вопроса о коллективной динамике спиновых волн в парамагнетике при учете диполь-дипольного взаимодействия между спинами. Описано влияние спинового обмена на скорость химических реакций, особенностей в различных материалах, влияющих на спиновое ток. Представлены предпосылки для рассмотрения легированного примесями графена в предельном случае как ансамбля невзаимодействующих димеров.

Показано, что сдвиги плазмонной частоты зависят от характерного размера наночастиц и их элементного состава. Происходит разделение на поверхностные и объемные плазмоны.

Во второй главе рассмотрены нелинейные волны намагниченности в низкотемпературном парамагнетике в состоянии, близком к насыщению. Сформулированы уравнения эволюции суммарной намагниченности системы, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию в сильном внешнем поле вблизи состояния насыщения без введения эмпирических параметров.

В главе 3 автор рассматривает динамику намагниченности парамагнетика, состоящего из парамагнитной матрицы и введенных в нее магнитных примесей. Рассматривается гамильтониан, включающий только секулярную часть диполь-дипольного взаимодействия. Приведен расчет спада поперечной намагниченности при определенных значениях обменного интеграла и секулярной части диполь-дипольного взаимодействий. Фурье образ показывает наличие двух волновых процессов.

Была получена оценка скорости движения сформированных солитонов в таких системах, и оценки дали величину 10^{-1} нм/с. Автор пришел к выводу, что распространение локализованных волн должно выполняться, при условии, что косинус угла меньше магического угла. Также рассмотрены особенности магнитного поведения примесных атомов со спином $S=1/2$, которые образуют димер, на проводящей поверхности. Аналитически было получено, что при ферромагнитных взаимодействиях между спинами кривая намагниченности близка к функции Бриллюэна для спина $S=1$.

Проведено численное моделирование на квадратной двумерной решетке с антиферромагнитными взаимодействиями первой и второй координационной сфер на основе модели Изинга. Расчеты проводились методом Монте-Карло. Приведены рассчитанные температурные

зависимости магнитной восприимчивости, теплоемкости, намагниченности и свободной энергии при различных значениях параметров отношения гиромангнитных частот примеси и парамагнитной матрицы. Из аппроксимации получены зависимости температуры фазовых переходов. Рассмотрены модели как с ферромагнитным, так и антиферромагнитным характером взаимодействий между спинами через соседа при ферромагнитном характере взаимодействий между ближайшими спинами.

Получена формула для определения среднего размера домена, формирующегося в данной системе.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования намагничивания кольцевых кластеров разного радиуса. В качестве объекта исследований выступали углеродные структуры. Расчет проведен для модели, у которой магнитные моменты равномерно распределены по кольцу. Программный код был реализован на языках Python и Fortran 90.

Новым и интересным результатом является установление эмпирической зависимости времен релаксации от радиуса колец. Автор выбрал для моделирования системы из 6–10 спинов для описания магнитных свойств системы. Проведены расчеты второго и четвертого моментов и времени релаксации линии магнитного резонанса для кластера из восьми спинов с различной ориентацией. Получено выражение для спада сигнала свободной индукции восьми спинов с различной ориентацией. Приведена эмпирическая оценка времени релаксации, которое прямо пропорционально кубу среднего радиуса кольца и обратно пропорционально величине диполь-дипольного взаимодействия.

Рассчитан сигнал спада свободной индукции для ансамбля свободных кубических кластеров с равномерным распределением их по объему. Было произведено моделирование сигнала затухания намагниченности для частиц, случайно расположенных в пространстве для которой было показано, что амплитуда убывает по степенному закону.

Рассмотрены особенности намагниченности для магнитной примеси, используя приближения сплошной среды.

В главе 5 рассмотрены коллективная динамика парамагнетика во внешнем магнитном поле. Получены кривые спада свободной индукции при наложении напряженности импульсного внешнего продольного магнитного поля. Рассмотрено поведение системы с учетом диполь-дипольных взаимодействий вблизи магнитного поля насыщения для парамагнитной системы, используя формализм Хольстейна–Примакова. В результате рассмотрения было получено, что в системе происходит разделение на слои с различной скоростью прецессии магнитных моментов, обусловленные

анизотропией дипольного взаимодействия. Получено, что при распространении волны рождается один или несколько фононов, и энергия преобразуется в акустические и тепловые колебания. Выполнены расчеты для квадратной и гексагональной решеток при условии, что магнитное поле направлено параллельно и перпендикулярно плоскости решетки, рассматривая только секулярную часть диполь-дипольного взаимодействия. Интересным результатом представляется расчет для кольцевого спинового кластера.

Приведены вычисления зависимости частот линейных волн намагниченности от направления внешнего магнитного поля для одномерной цепочки частиц. Изучены термодинамические свойства двумерного парамагнетика. Показано, что намагниченность вблизи насыщения имеет экспоненциальную асимптотику. Установлены границы разрушения однородного магнитного порядка. Проведены расчеты вкладов в удельную теплоемкость от волнового процесса.

Рассмотрено поведение спада сигнала свободной индукции с учетом секулярной и несекулярной частей диполь-дипольного взаимодействия. Показано, что характерные времена поведения намагниченности полностью совпадают в том и другом случае, а различие наблюдается только при длительных временах. Рассчитаны ориентационные зависимости для спада сигнала свободной индукции при направлении внешнего магнитного поля вдоль осей 001, 011 и 111. Установлено существование двух резонансных частот при направлении магнитного поля вдоль 011 и одной линии, если магнитное поле лежит вдоль оси 111. Показано, что полная зависимость от времени определяется функцией Бесселя с асимптотикой $t^{-1/2}$.

В шестой главе описываются транспортные, магнитные и оптические свойства сферических углеродных наноболочек. В качестве объекта исследований выступают ядра ферромагнитного металла, покрытого одним или двумя слоями углерода. После травления металла получается полая, углеродная оболочка, свойства которой изучались экспериментально и сравнивались с полученными теоретическими оценками. В рамках приближения сплошной среды на основе уравнений эволюции операторов электронной плотности рассчитаны энергетический спектр углеродной структуры, спектр оптического поглощения массива наноболочек, дана оценка запрещенной зоны, диамагнитной восприимчивости сферической оболочки произвольного размера. Результаты согласуются с экспериментальными данными ИК-спектроскопии, измерениями проводимости и намагниченности.

3. Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. С применением вторичного квантования и приближения сплошной среды для парамагнетика вблизи насыщения получены уравнения эволюции намагниченности, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию без применения феноменологических моделей.
2. Методом многих масштабов в приближении сплошной среды получены области наблюдения волновых процессов и солитонов, показано, что учет несекулярных членов дипольного взаимодействия ограничивает области устойчивости волн.
3. Предложена модель двухкомпонентного материала, образованного внедрением или осаждением примесных атомов на основную парамагнитную решетку, которая описывает связанные колебания намагниченности двух подсистем, получены волновые решения в приближении сплошной среды с учетом дипольного взаимодействия атомов основной решетки между собой с атомами примеси, и РККИ-взаимодействия примеси.
4. 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.
5. 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.

Среди новых полученных результатов следует особо выделить расчеты коллективной динамики для кольцевой структуры спинов, и полученные при численном моделировании эмпирические зависимости времени релаксации от радиуса кольца. Существенный интерес представляет подход, разработанный для описания углеродных наносфер.

4. Практическая значимость

Результаты работы имеют приложения к разработке и исследованию перспективных материалов, применимых в устройствах спинтроники и магноники для создания СВЧ-резонаторов и модуляторов, быстродействующих ячейках памяти. Результаты исследования позволяют прогнозировать рабочие частоты, времена хранения и скорость передачи

информации в них, определять условия устойчивости спиновых состояний в материалах.

Исследования, вошедшие в диссертацию, проводились в рамках работ по грантам РФФИ, Совета по грантам Президента РФ, по проектам Международных исследовательских групп при поддержке Министерства образования и науки Пермского края.

5. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертации могут быть использованы в работе научно-исследовательских организаций (Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Институт физики микроструктур РАН, Институт физики металлов УрО РАН и др.), а также в высших учебных заведениях при разработке ряда учебных дисциплин по направлениям материаловедения, радиофизики и спектроскопии (КФУ, СГУ, УрФУ, СПбГУ, БФУ, ПГНИУ, МГУ и др.).

6. Достоверность и обоснованность результатов работы

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается построением теоретических моделей на базе представлений квантовой механики, квантовой и статистической теории твердых тел, методов нелинейной динамики, сопоставлением результатов аналитических расчетов и численного моделирования с экспериментом, согласованием результатов с фундаментальными закономерностями физики конденсированного состояния.

В совокупности результаты диссертационной работы Циберкина К. Б. демонстрируют существенный вклад коллективной спиновой динамики в равновесные и динамические характеристики одно- и многокомпонентных материалов с дипольным и РККИ-взаимодействием. В ней развито систематическое применение приближения сплошной среды к описанию коллективных явлений в магнитных и проводящих материалах, мезоскопических спиновых системах

Содержание диссертационной работы соответствует пп. 2, 3, 5 и 7 паспорта научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния по физико-математическим наукам.

Основное содержание диссертационной работы изложено в 18 статьях в рецензируемых журналах, в том числе 15 статьях в изданиях, индексируемых Scopus, Web of Science и включенных в RSCI, ядро РИНЦ, 3 статьях в изданиях из перечня ВАК, также в 23 материалах конференций, тезисах докладов и статей в иных изданиях. Получено 1 свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты доложены на профильных конференциях и научных семинарах.

Автореферат диссертации соответствует установленным требованиям, в полной мере передает содержание диссертационной работы, полученные результаты и выводы.

7. Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе может быть сформулирован ряд замечаний:

1. Подробное сравнение полученных теоретических результатов с экспериментом представлено только для модели углеродных наноструктур.
2. В главе 1 автор рассматривает низко температурный парамагнетик, а ниже пишет о дипольном парамагнетике, это одно и тоже? Или же есть отличия?
3. Некоторые фразы вызывают недоумение. Например, на стр. 32: «при легировании возможно и формирование тесных магнитных кластеров, слабо связанных между собой» может им не тесно, а они плотно упакованы? Почему тогда не взаимодействуют? А следующая фраза «их возникновение приводит к большой интенсивности взаимодействия примесных ионов» противоречит предыдущему предложению.
4. Автор пишет о возможном наблюдении высокотемпературный сверхпроводимости в соединениях KCuF_3 и CuGeO_3 . Свойства данных соединений хорошо изучены и сверхпроводимость там не обнаружена.
5. Страница 50 текста. Приведена формула (2.8), ниже которой приводится объяснение величины n_j , которая отсутствует в формуле.
6. В гамильтониане для диполь-дипольного взаимодействия есть слагаемое $c_{jk} S_j^+ S_k^-$ (формула (2.6)), а после преобразования в формуле (2.10) это слагаемое отсутствует. Причина данного приближения не указана. В уравнение (2.12) появляются три величины N , N_z и V , которые никак не комментируются.
7. На странице 54 автор пишет, что полученное им выражение уравнение динамики намагниченности включает эмпирический параметр «интенсивность взаимодействия». Ранее по тексту об этом параметр ничего не говорится. Преобразования (2.23) записаны как в информатике, когда величина равна самой себе умноженной на экспоненту.

8. В выражении (2.27) компонента M' выражена через константу c , выше в формуле (2.21) эта же компонента выражена через константу a .
 9. Анализируя полученные выражения, автор пришел к выводу, что устойчивые солитоны существуют в кубической решетке только в ограниченном интервале направлений [110]. Было бы интересно узнать предел в градусах этих ограничений.
 10. На странице 69 автор пишет, что для димеров с нулевым полным спином, если в системе преобладают ферромагнитные взаимодействия, намагниченность уменьшается при низкой температуре, а для антиферромагнитных взаимодействий наоборот. Совершенно непонятно, как это может быть.
 11. Фурье образ двухкомпонентной системы показывает наличие двух волновых процессов. Возникает вопрос, как связаны эти частоты с собственными частотами каждой составляющей двухкомпонентной системы?
 12. Вдруг в формуле (3.31) появляется величина $\langle J_\mu \rangle$, можно предположить, что это среднее обменное взаимодействие, тогда как выше по тексту оно обозначалось j .
 13. На рисунке 4.14 приведены зависимости намагниченности при случайном расположении частиц. Есть описание для рисунков а), б), в), каждый из которых состоит еще из нескольких. Нет описания, чем отличаются рисунки внутри подпункта. Тоже замечание можно отнести к рисунку 4.15 и 4.17.
 14. Автор рассматривает парамагнетик, который не упорядочивается до нулевой температуры. Как может повлиять на результат расчетов возможное упорядочение при определенной температуре спиновой системы.
 15. На рисунке 5.10 приведена зависимость намагниченности от величины t_d . Что такое t_d , не понятно. В описании рисунка 5.10, б частоты приведены как числа, не имеющие размерности.
 16. В диссертации не приведена история вопроса влияния диполь-дипольного взаимодействия на поведение намагниченности системы, что сильно затрудняет понимания новизны проведенных исследований.
- Перечисленные замечания, тем не менее, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научную и практическую значимость.

8. Заключение

Диссертационная работа «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в редакции от 25.01.2024), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Циберкин Кирилл Борисович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертационной работы представлен Циберкиным К. Б. на заседании Ученого совета КФТИ – ОСП КазНЦ РАН 22 января 2025 г. Отзыв одобрен на заседании Ученого Совета КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН протокол №20 от 25 июня 2025 г.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 89600460812
E-mail: REremina@yandex.ru
д. ф.-м. н., доцент



Еремина Рушана Михайловна

Научный руководитель
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 272 05 03
E-mail: kevsalikhov@mail.ru
Академик РАН
д. ф.-м. н., профессор



Салихов Кев Минуллинович