

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО

«Пермский государственный
национальный исследовательский
университета»,

канд. физ.-мат. наук,

Владимир Александрович Ирха

«14» марта 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»

Диссертационная работа «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния выполнена на кафедре теоретической физики Физико-математического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Соискатель Циберкин Кирилл Борисович, 1989 года рождения, в 2010 г. окончил бакалавриат Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский государственный университет» по направлению «Физика», в 2012 г. окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», по направлению «Физика». В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Течения и тепломассоперенос в многофазных жидкостях и пористых средах» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на заседании Диссертационного совета Д.212.189.06, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Место работы соискателя – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», доцент кафедры теоретической физики Физико-математического института.

Научный консультант – Хеннер Виктор Карлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», профессор Физико-математического института.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы

Значимой частью развития современных технологий выступает совершенствование материальной базы быстродействующих вычислительных устройств на основе спинтроники и магноники – подходов к реализации устройств обработки и передачи информации на базе спиновых волн и спиновых токов. При этом важна работа с единичными объектами и структурами, содержащими сотни и тысячи магнитных центров, для которых неприменимы расчёты из первых принципов и статистические методы. Поэтому важно построение масштабируемых теоретических моделей спиновой динамики наноструктур. Комбинирование подходов теории сплошной среды, коллективных явлений и нелинейной динамики позволяет перейти к осреднённому описанию систем и реализации эффективных моделей их свойств, получить из первых принципов эмпирические параметры, описывающие динамику спиновых и электронных систем.

Для магнитоупорядоченных веществ эффективным способом описания подобных систем выступает теория спиновых волн. Такие материалы имеют высокую характерную энергию межчастичного взаимодействия, и позволяют реализовать устойчивые спиновые волны при сравнительно высоких температурах. Теория спиновых волн в таких системах в пределе сплошной среды описывает динамику локальной намагниченности, в сочетании с экспериментом обеспечивая базу для изучения нелинейных явлений и реализации устройств типа спиновых вентилях, модуляторов и волноводов.

Малая энергия дипольного и РККИ-взаимодействия в тонких плёнках соединений редкоземельных металлов, двухкомпонентных системах, образованных внедрением примеси в парамагнитный кристалл и включающих атомы с различными гиромагнитными отношениями, димерных системах, формируемых парами атомов на проводящей подложке, спиновых кластерах случайной структуры, внедрённых в диамагнетик, исключает

спонтанное упорядочение вплоть до сверхнизких температур, однако в ряде случаев она превышает обменную энергию.

Перечисленные системы объединяются в класс низкотемпературных парамагнетиков. В сильном внешнем поле для них вводятся коллективные моды – аналоги спиновых волн – как отклонения магнитных моментов от насыщения. Анализ уравнений их эволюции методами теории нелинейных волн в приближении сплошной среды, численное моделирование свойств ансамблей примесных атомов, димерных систем с осреднением по случайным пространственным распределениям магнитных центров позволяют построить систематическое описание динамики намагниченности для низкотемпературных парамагнетиков вблизи насыщения.

Цель работы

Развитие теории коллективных мод намагниченности в концентрированных системах с дипольным и РККИ-взаимодействием вблизи состояния насыщения, в том числе описание 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.

Научная новизна

1. С применением вторичного квантования и приближения сплошной среды для низкотемпературного парамагнетика вблизи состояния насыщения получены уравнения динамики локальной намагниченности, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию без применения феноменологических моделей.
2. Методом многих масштабов проанализирована иерархия режимов эволюции намагниченности концентрированного низкотемпературного парамагнетика в приближении сплошной среды, показано, что учет несекулярных членов дипольного взаимодействия ограничивает допустимые направления движения солитонов.
3. Сформулирована динамическая модель двухкомпонентного материала, описывающая связанные колебания намагниченности его подсистем в приближении сплошной среды с учетом дипольного взаимодействия атомов основной решетки между собой, с атомами примеси, и РККИ-взаимодействия примеси.
4. Для ансамбля димеров найдено, что немагнитное состояние реализуется при отрицательном среднем значении АФМ-

взаимодействия и малой дисперсии, и разрушается по мере роста последней.

5. 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.
6. 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.

Практическая значимость

Результаты работы имеют приложения к разработке и исследованию перспективных материалов, применимых в устройствах спинтроники и магноники: резонаторах и модуляторах, ячейках памяти, позволяют прогнозировать рабочие частоты, времена хранения и скорость передачи информации в них, нахождение условий устойчивости спиновых состояний в материалах. Практическая значимость работы подтверждается также выполнением научно-исследовательских работ по тематике диссертационного исследования: проект РФФИ 17-42-590271 «Исследование электромагнитных свойств углеродных нанооболочек для накопителей энергии высокой ёмкости»; проект Совета по грантам Президента Российской Федерации МК 1422.2020.2 «Волновые явления в парамагнетиках, разбавленных ферромагнитными примесями»; проекты Международных исследовательских групп при поддержке Министерства образования и науки Пермского края: С-26/628 «Экспериментальное и теоретическое изучение физических свойств новых магнитных наноматериалов»; С-26/798 «Применение углеродных нанооболочек для создания новых типов суперконденсаторов».

Достоверность результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается построением теоретических моделей на базе установленных фундаментальных соотношений и представлений квантовой механики, квантовой и статистической теории твердых тел, методов нелинейной динамики, сопоставлением результатов аналитических расчетов и численного моделирования, экспериментов при наличии такой возможности, сопоставлением численных результатов, полученных независимыми

подходами, согласованием результатов с фундаментальными закономерностями физики магнитных явлений.

Личный вклад автора

Циберкин К. Б. лично разрабатывал и формулировал теоретические модели, проводил аналитические расчёты волновых процессов в слабо связанных магнетиках, численное моделирование динамики систем, давал интерпретацию результатов и оценку их применимости, достоверности, подготавливал тексты и иллюстрации. В работах, выполненных в сотрудничестве с экспериментаторами и разработчиками численных алгоритмов моделирования спиновой динамики, автор непосредственно участвовал в планировании исследований, формулировке конкретных задач, интерпретации результатов, верифицировал и модернизировал численные алгоритмы, принимал участие в подготовке коллективных публикаций.

Апробация работы

Результаты, описанные в диссертационной работе, представлены на конференциях: 2nd International Conference and Exhibition on Mesoscopic and Condensed Matter Physics (Чикаго, 2016), научная школа «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2018, 2024), всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2018, 2020, 2023), региональная конференция «Физика для Пермского края» (Пермь, 2018, 2019, 2020), международная школа «Коуровка» (Екатеринбург, 2020), XXI всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС (Екатеринбург, 2021), международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2021), международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance” (Казань, 2021, 2023), международный симпозиум «EASTMAG-2022» (Казань, 2022), международная конференция “Magnetic Resonance – Current State and Future Perspectives (EPR-80)” (Казань, 2024).

Результаты диссертационной работы также доложены на семинарах: ПГНИУ по теоретической физике (Пермь, 2021, 2022, 2024), ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, 2024), ИРЭ РАН, семинар «Проблемы магнитного резонанса» (Москва, 2024), ФТИ им. Иоффе, сектор теории оптических и электрических явлений в полупроводниках (Санкт-Петербург, 2024), заседании Ученого совета КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН (Казань, 2025).

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.

Основные публикации по теме диссертационной работы в рецензируемых изданиях

1. **Tsiberkin K. B.** Collective spin excitations in 2D paramagnet with dipole interaction // European Physical Journal B. – 2016. – Vol. 89 (2), 54.
2. **Циберкин К. Б.** Нелинейные волны и солитоны намагниченности в парамагнетике с дипольным взаимодействием // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 154. – № 6 (12). – С. 1151–1159.
3. **Tsiberkin K. B.,** Belozerova T. S., Henner V. K. Simulation of free induction decay at low-temperature with spin waves and classical spins // European Physical Journal B. – 2019. – V. 92, 140.
4. Rudakov G. A., **Tsiberkin K. B.,** Ponomarev R. S., et al. Magnetic properties of transition metal nanoparticles enclosed in carbon nanocages // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – V. 427. – P. 34–39.
5. **Tsiberkin K.,** Strunina Y. Magnetism of dimer ensemble with random exchange energy // European Physical Journal B. – 2021. – Vol. 94, 21.
6. **Tsiberkin K. B.** Magnetization wave dynamics within a diluted magnetic semiconductor // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – Vol. 523, 167596.
7. **Циберкин К. Б.** Волновая динамика намагниченности ферромагнитной примеси в парамагнитной матрице // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 4. – С. 384–387.
8. **Tsiberkin K. B.** Continuum model of free induction decay in diluted magnetic composite // Applied Magnetic Resonance. – 2021. – Vol. 52 – P. 867–877.
9. **Циберкин К. Б.** Моделирование энергетического спектра углеродной сферы в пределе сплошной среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 162, вып. 6 (12). – С. 968–974.

10. **Tsiberkin K. B.** Averaging of the free induction decay from an ensemble of small spin clusters // *European Physical Journal B.* – 2023. – V. 96, 70.
11. **Циберкин К. Б.,** Сосунов А. В., Целиков Г. И. Исследование спектра поглощения углеродных наносфер // *Оптика и Спектроскопия.* – 2023. – Т. 131, вып. 8. – С. 1118–1122.
12. **Tsiberkin K. B.** Verification of continuum-based model of carbon materials // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics.* – 2023. – V. 14 (5). – P. 539–543.
13. **Tsiberkin K.,** Kovycheva E. Spin-wave model of free induction decay in ring spin cluster // *Applied Magnetic Resonance.* – 2024. – V. .55 – P. 565–574.
14. **Tsiberkin K. B.** Magnetization dynamics of a linear dipole chain with accounting for all-to-all interactions // *Physica B.* – 2025. – Vol. 702, 417016.
15. **Tsiberkin K. B.,** Sosunov A. V., Govorina V. V., Neznakhin D. S., Henner V. K., Sumanasekera G. Magnetic properties of carbon nanocages: pure and with the Ni or Co inclusions // *Solid State Sciences.* – 2025. – Vol. 162, 107862.
16. Сосунов А. В., **Циберкин К. Б.,** Хеннер В. К. Влияние функционализации углеродных нанооболочек на их электрические свойства // *Вестник Пермского Университета. Физика.* – 2019. – № 2. – С. 63–68.
17. **Циберкин К. Б.** Низкотемпературный антиферромагнетизм в модели Изинга с конкурирующими взаимодействиями // *Вестник Пермского Университета. Физика.* – 2021. – № 2. – С. 64–71.
18. Ковычева Е. И., **Циберкин К. Б.** Магнитный резонанс сферических и кольцевых спиновых кластеров // *Вестник Пермского университета. Физика.* – 2022. – № 2. – С. 26–35.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния:

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.

3. Теоретическое и экспериментальное изучение свойств конденсированных веществ в экстремальном состоянии (сильное сжатие, ударные воздействия, сильные магнитные поля, изменение гравитационных полей, низкие и высокие температуры), фазовых переходов в них и их фазовых диаграмм состояния.

5. Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения.

7. Теоретические расчеты и экспериментальные измерения электронной зонной структуры, динамики решётки и кристаллической структуры твердых тел.

Диссертационная работа Циберкина К. Б. является законченной научно-квалификационной работой, в которой в ходе цикла теоретических и численных исследований детально проанализирован вклад коллективной спиновой динамики в равновесные и динамические характеристики спиновых систем с дипольным и РККИ-взаимодействием, и реализовано систематическое применение приближения сплошной среды к описанию коллективных явлений в магнитных и проводящих материалах, мезоскопических спиновых системах, установлены закономерности и условия реализации коллективных мод намагничённости, электронной плотности в одно- и многокомпонентных низкотемпературных парамагнетиках и композитных углеродных наноматериалах.

Диссертационная работа «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» Циберкина Кирилла Борисовича соответствует требованиям пп. 9–14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры теоретической физики Физико-математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет. Протокол № 3 от «13» марта 2025 г.



Барулина Марина Александровна,
д.ф.-м.н, директор Физико-математического
института, председатель заседания кафедры
нанотехнологий и микросистемной техники



Скачкова Елена Александровна,
начальник отдела сопровождения учебного
процесса Физико-математического
института, секретарь заседания кафедры
нанотехнологий и микросистемной техники

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, тел. 8 (342) 2396227, факс (342) 2371611 e-mail: info@psu.ru

