

ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам предварительного рассмотрения диссертации

Циберкина Кирилла Борисовича

на тему «**Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов**», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Экспертная комиссия в составе:

Председателя комиссии, доктора физико-математических наук Волынцева А.Б., **членов комиссии** – доктора физико-математических наук Перминова А.В., доктора физико-математических наук Русакова С.В., рассмотрела диссертацию Циберкина Кирилла Борисовича «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» и пришла к следующему заключению.

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и посвящена развитию теории коллективных мод намагниченности в концентрированных спиновых системах с дипольным взаимодействием и взаимодействием Рудермана–Киттеля–Касуя–Йосиды (РККИ), низкоразмерных спиновых структурах вблизи состояния насыщения, в том числе описанию спин-спиновой релаксации и спиновой диффузии, нелинейных волн и осредненных сигналов намагниченности в условиях реализации коллективных мод, а также построению моделей коллективной динамики электронов в углеродных наноструктурах с магнитной примесью. Развито систематическое применение теории коллективных явлений к классу низкотемпературных парамагнетиков (НП), объединяющему тонкие пленки редкоземельных элементов, двухкомпонентные системы, образованные внедрением примесей в парамагнитный кристалл, ансамблям димеров, спиновых кластеров малой размерности и случайной структуры. В сильном внешнем поле для концентрированных НП вводятся коллективные моды как отклонения магнитных моментов от насыщения, и дальнейший анализ уравнений эволюции спиновых операторов методами теории нелинейных волн позволяет реализовать описание динамики намагниченности в этих условиях. Для численного моделирования свойств ансамблей примесных атомов и димерных систем реализован метод осреднения по случайным пространственным конфигурациям расположения магнитных центров. Найдены универсальные закономерности динамики намагниченности НП. Подход на основе коллективных электронных мод применен для построения масштабируемой модели углеродного композитного материала, что позволяет прогнозировать его оптическое поглощение и электромагнитные характеристики.

Актуальность и научная новизна представленных исследований определяется тем, что не изучены коллективные динамические явления в НП с дипольным и РККИ-взаимодействием; не определены условия реализации динамических режимов, волн и солитонов намагниченности в одно- и многокомпонентных НП; не описаны механизмы формирования оптических и электронных свойств композитов на основе объемных углеродных наноструктур случайного размера.

В работе подробно описаны теоретические и численные результаты исследования динамических явлений в низкотемпературных парамагнетиках и композитных материалах на основе углерода, определены границы области применимости разработанных моделей и использованных для их построения подходов.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для совершенствования компонентов быстродействующих вычислительных устройств на основе низкотемпературных парамагнетиков, таких как спиновые вентили, осцилляторы, линии задержки; прогнозирования на основе сведений о динамике коллективных процессов свойств наноманитных структур, электронных систем низкой размерности.

2. Диссертация обладает внутренним единством, полнотой и последовательностью изложения.

3. Представленная диссертационная работа по своему содержанию соответствует следующим пунктам паспорта 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 прогнозирования изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения.

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

4. В диссертации получены следующие новые результаты:

➤ В рамках подхода на основе коллективных мод впервые: получены уравнения эволюции намагниченности концентрированной системы частиц с дипольным или РККИ-взаимодействием в пределе сплошной среды, описывающие спин-спиновую релаксацию и спиновую диффузию вблизи состояния насыщения без введения эмпирических параметров; установлена единая иерархия и области устойчивости динамических волновых режимов, реализующихся в системе на различных временных масштабах.

➤ В рамках приближения сплошной среды сформулирована новая математическая модель динамики намагниченности двухкомпонентного материала, образованного примесью, внедренной в парамагнитную решетку с другим гиромагнитным отношением. В диссертации показана возможность реализации связанных волн и солитонов намагниченности в подсистемах, образующих материал. Для солитонов диссертантом получены ограничения на параметры взаимодействия, найдено значение угла между внешним полем

и направлением движения, при превышении которого решение теряет устойчивость.

- Для димерной системы, образованной тесными парами частиц, осажженных на немагнитной подложке и связанных РККИ-взаимодействием, в диссертации доказана возможность реализации немагнитной фазы, обусловленной переходом части димеров в микросостояния с нулевым полным спином; определено, что границы области существования этого немагнитного состояния расширяются при увеличении дисперсии распределения энергии взаимодействия в димерах или их размера.
- Аналитически и посредством численного моделирования автором работы установлено универсальное ограничение на скорость спада поперечной намагниченности в ансамбле спиновых кластеров случайного размера с заданной функцией распределения, а также ансамбле кластеров случайной структуры.
- Впервые с использованием спин-волнового подхода описана намагниченность дипольной системы вблизи состояния насыщения, а также определен спектр коллективных мод и их вклады в намагниченность и теплоемкость при низких температурах. Автором диссертации установлено, что при воздействии на систему возмущений магнитного поля на начальном этапе происходит поперечная релаксация, обусловленная расфазировкой спиновых мод, тогда как на больших временах намагниченность затухает по степенному закону, отвечающему экспериментальным и теоретическим данным о спиновой динамике и спиновой диффузии в ансамблях NV-центров и одномерных спиновых цепочках с анизотропными взаимодействиями.
- В рамках приближения сплошной среды построена новая математическая модель эволюции операторов электронной плотности для сферической углеродной оболочки с примесями, которая позволяет рассчитать оптический спектр поглощения, оценить транспортные свойства массива сферических оболочек случайного размера согласованно с экспериментальными данными.

5. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. Соискателем лично:

- сформулированы новые математические модели динамики намагниченности низкотемпературных парамагнетиков в рамках приближения сплошной среды и коллективных мод, выполнен их анализ, построены волновые решения, описана динамика намагниченности вблизи состояния насыщения;
- установлены универсальные зависимости эволюции осредненной намагниченности ансамблей спиновых кластеров различной геометрии;
- построена математическая модель реализации немагнитного состояния в системе магнитных димеров случайного размера с конкурирующими взаимодействиями;
- построена теория эволюции операторов электронной плотности для сферической углеродной оболочки с примесями;

- выполнены аналитические и численные расчёты энергетического спектра электронов, оптического спектра поглощения оболочки, даны оценки пара- и диамагнитной восприимчивости оболочки.

6. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие теоретических основ физики коллективных и волновых явлений в магнитных материалах с дипольными и РККИ-взаимодействиями, физики электронных и магнитных свойств углеродных наноструктур.

Приведенные в диссертации ссылки на работы других авторов выполнены корректно, список литературы оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 41 работе, из которых 15 статей в журналах, индексируемых Scopus, Web of Science, 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

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., Henner V. K., Ziolkowska D. A., Jasinski J. B., Sumanasekera G. 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.

Диссертация соответствует требованиям пп. 11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024).

На основании вышеизложенного заключаем, что:

1. рассматриваемая диссертация является **законченной** научно-квалификационной работой на актуальную тему;
2. тема и содержание диссертации **соответствуют** научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния;
3. требования к публикации основных научных результатов диссертации **соблюдены**;
4. использование в диссертации заимствованного материала без ссылки на автора или источник заимствования, а также недостоверных сведений **не выявлено**.

Диссертационная работа Циберкина Кирилла Борисовича на тему **«Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов»** рекомендуется к принятию к защите в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

- **Фельдман Эдуард Беньяминович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией спиновой динамики и спинового компьютеринга, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, г. Черноголовка.

- **Юкалов Вячеслав Иванович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.
- **Лебедев Николай Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и волновых процессов, Волгоградский государственный университет, г. Волгоград.

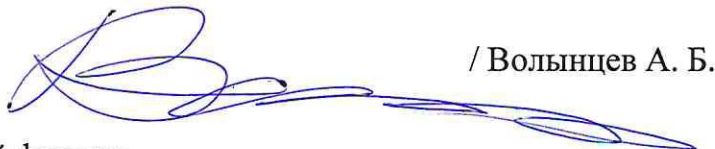
В качестве ведущей организации рекомендуется:

- **Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского** – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»», г. Казань.

Председатель комиссии:

Заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники
ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный
исследовательский университет,
доктор физико-математических наук,
профессор Волынцев Анатолий Борисович

«Я, Анатолий Борисович Волынцев, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Волынцев А. Б.

Члены комиссии:

Заведующий кафедрой общей физики
ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
доктор физико-математических наук,
доцент Перминов Анатолий Викторович

«Я, Анатолий Викторович Перминов, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Перминов А. В.

Профессор физико-математического института
ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный
исследовательский университет,
доктор физико-математических наук,
профессор Русаков Сергей Владимирович

«Я, Сергей Владимирович Русаков, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку»



/ Русаков С. В.

25 апреля 2025 года