

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Циберкина Кирилла Борисовича**

на тему **«Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Перспективными материалами для создания управляемых сверхрешёточных структур с уникальными электронными и магнитными свойствами являются низкотемпературные парамагнетики, называемые так в литературе за отсутствие магнитного упорядочения вплоть до единиц и долей градуса Кельвина. К ним относятся тонкие плёнки некоторых соединений редкоземельных элементов, ядерно-спин-волновые материалы, образованные внедрением ионов переходных элементов в ядерный парамагнетик, иных двухкомпонентных системах, образованных внедрением примеси в электронный парамагнитный кристалл, осаждением кластеров магнитных атомов на проводящей подложке. Обменное и дипольное взаимодействие в них имеют близкий масштаб энергии, что определяет нетривиальную структуру основного состояния при отсутствии внешнего поля, но при его наличии в перечисленных системах реализуются коллективные спиновые моды как отклонения магнитных моментов от насыщения.

Для повышения быстродействия, снижения энергопотребления и дальнейшей миниатюризации компонентов электронных и вычислительных устройств, созданных на базе перечисленных материалов, значимо изучение наносистем, содержащих порядка 10–1000 атомов. На таких масштабах не применима в полной мере статистическая теория, а с другой стороны, не представляется возможным описание из первых принципов микроскопической динамики классических и квантовых систем ввиду чрезвычайной громоздкости соответствующих математических построений, которые быстро усложняются по мере роста числа частиц и размерности пространства состояний системы. Поэтому важно построение масштабируемых теоретических моделей электронной и спиновой динамики наноструктур, для чего эффективен синтез методов теории сплошной среды, коллективных явлений и нелинейной динамики.

Анализ уравнений эволюции спиновых операторов методами теории нелинейных волн в приближении сплошной среды позволяет описать динамику интегральной и локальной намагниченности таких структур. Для численного моделирования свойств ансамблей примесных атомов и димерных систем эффективно также осреднение по случайным пространственным распределениям магнитных центров.

В диссертационной работе «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» Циберкина К. Б. развит систематический подход к теоретическому описанию поведения на мезоскопическом масштабе порядка десятков и сотен атомов низкотемпературных парамагнетиков и наноматериалов со сложной структурой. Сочетание подхода на основе теории коллективных явлений с использованием методов нелинейной динамики и перехода к пределу сплошной среды позволяет сформулировать динамические модели, эффективно описывающие поведение локальной намагниченности, электронной плотности рассматриваемых наноматериалов и структур, и построить описание интегральных наблюдаемых характеристик систем и устройств.

**Целью диссертационной работы** является 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 осреднённых сигналов намагниченности в условиях реализации коллективных мод, а также построение модели коллективной динамики электронов в углеродных наноструктурах с магнитной примесью.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы.

**Во введении** дана общая характеристика работы.

**В первой главе** представлен обзор современных тенденций в исследовании коллективных магнитных явлений в конденсированных средах и их приложений, и основных достижений в применении методов нелинейной динамики к физике конденсированных сред. Из литературы следует, что анализ коллективных мод и осреднённой намагниченности даёт возможность получить описание затухания спиновой корреляции, процесс поперечной релаксации и хаотизации однокомпонентных и многокомпонентных дипольных систем на основе уравнений, полученных из микроскопического подхода. Этот подход расширяется и на разбавленные магнитные полупроводники, углеродные композитные материалы. Таким образом, сделан вывод, что применение методов коллективной динамики и приближения сплошной среды к описанию конденсированных сред даёт широкие возможности для построения моделей динамических явлений в электронных и спиновых системах, ансамблях электронов, доступных изучению методами теории нелинейных колебаний и волновых процессов.

**Во второй главе** на основе метода коллективных мод и приближения сплошной среды получены уравнения 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. Построены уравнения динамики локальной намагниченности в эффективном поле решётки, которые проанализированы разложением по малому параметру энергии дипольного взаимодействия. Непосредственно показано, что существует единая иерархия динамических явлений на различных временных масштабах, получены волновые и солитонные решения, определены области их устойчивости.

**В третьей главе** на базе приближения сплошной среды сформулирована динамическая 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. Реализуются связанные колебания и волны намагниченности в подсистемах, солитоны. Определены характерные параметры волновых решений, границы областей их существования. Кроме того, в этой главе исследованы также равновесные свойства примесной подсистемы без учёта взаимодействия с основной решёткой в рамках димерной модели и модели Изинга. Найдены области параметров, при которых в системе реализуется немагнитная фаза, обусловленная переходом части димеров в микросостояния с нулевым полным спином либо конкуренцией знаков взаимодействия в первой и второй координационной сферах.

**В четвертой главе** приведены результаты численного моделирования намагниченности систем с большим числом частиц посредством сложения сигналов от не взаимодействующих спиновых кластеров малой размерности. Проведено моделирование свойств сферических углеродных оболочек и неупорядоченных систем, аналитически и численно реализовано осреднение пробных функций Абрагама, описывающих огибающие сигналов поперечной намагниченности от отдельных элементов – наноманитных кластеров случайного размера с заданной функцией распределения параметров – в ансамбле, продемонстрирован переход от осциллирующих сигналов суммарной намагниченности к монотонному спаду.

**В пятой главе** с использованием спин-волнового подхода построено 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. Смоделирована динамика намагниченности системы под влиянием возмущений внешнего поля, и найдено, что на малых временах наблюдается экспоненциальная релаксация, обусловленная расфазировкой спиновых мод, тогда как на больших временных масштабах реализуется степенной диффузионный закон затухания поперечной намагниченности, который отвечает экспериментальным и теоретическим данным о спиновой динамике ансамблей азотно-замещённых вакансий в алмазе, и одномерных спиновых цепочках с анизотропными взаимодействиями

**В шестой главе** представлена 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. В совокупности с измерениями проводимости он позволяет оценить осреднённые транспортные свойства системы. Получена оценка ширины запрещённой зоны, описан электронный пара- и диамагнетизм сферической оболочки, оценки подтверждены экспериментально.

**В заключении** сформулированы основные выводы, обобщающие результаты исследований в рамках диссертационной работы.

Диссертационная работа Циберкина К. Б. содержит подробное описание исследованных задач, методов и подходов к их решению, полученных результатов с необходимыми иллюстрациями. Результаты диссертации являются новыми, их достоверность подтверждается согласованием аналитических и численных результатов, полученных независимыми подходами, с фундаментальными закономерностями физики магнитных явлений и известных экспериментов. Выводы и результаты обоснованы теоретическими, численными и экспериментальными исследованиями, не противоречат известным научным данным. Выносимые на защиту положения обладают необходимой научной новизной.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на авторитетных семинарах, международных и всероссийских конференциях. Автором опубликованы 15 статей в ведущих журналах по магнетизму и физике конденсированного состояния, включенных в Белый список, индексируемых Web of Science и Scopus, также 3 статьи в изданиях Перечня ВАК, получено свидетельство на программный продукт. Автореферат в полной мере передаёт содержание диссертационной работы.

Тем не менее, работа не свободна от недостатков. По диссертации можно сформулировать следующие основные замечания:

1. При анализе намагниченности дипольной решётки на различных временных масштабах в первом и втором порядках разложения по малому параметру (относительной дипольной энергии) несекулярные слагаемые сохранены в уравнениях, однако в решениях соответствующих порядков ими пренебрегается. Более полный учёт вклада несекулярных слагаемых производится только в третьем порядке разложения при определении границ устойчивости солитонного решения. Полезно привести обоснованные оценки, которые показывают, что несекулярная часть дипольного взаимодействия действительно становится существенной только в старших порядках разложения по малому параметру.
2. В модели двухкомпонентного магнетика, представленной в третьей главе, для учета дипольного взаимодействия между различными компонентами системы используется  $zz$ -приближение и указывается, что вклад «флип-флоп»-членов определяет переходы с пренебрежимо малыми вероятностями, без обсуждения того, как полный учёт дипольного взаимодействия основной решетки и примеси может повлиять на поведение описанных в работе волновых решений.
3. В ходе обсуждения вклада коллективных возбуждений в намагниченность дипольной спиновой структуры отдельно рассматриваются случаи, когда в решётке присутствуют волны намагниченности всех разрешённых длин, и когда возбуждения близки к длинноволновому пределу. Последний вариант легко достижим – короткий импульс поперечного радиочастотного поля в ЯМР/ЭПР-спектрометре приведёт к повороту всех магнитных моментов в образце на малый угол, одинаковый по всему объёму образца, что эквивалентно генерации коллективной моды с максимальной длиной волны. В то же время, в тексте работы не описано, при каких условиях можно обеспечить в эксперименте возбуждение широкого спектра волн.
4. При рассмотрении свойств массива углеродных сфер нанометрового размера дано подробное описание вычисления энергетического спектра и связанных с ним наблюдаемых свойств наносфер для их заданного постоянного размера. Однако нет примера расчётов, например, спектра оптического поглощения, где было бы учтено логнормальное распределение углеродных наночастиц по размерам, описанное для реальных образцов.
5. В тексте имеются отдельные опечатки, несогласованности обозначений, и, местами, их избыточность. Например, для волнового числа и номеров атомов в решётке по тексту чередуются обозначения  $k$  и  $q$ . В системе (3.37) введены дополнительные параметры  $p$ ,  $\epsilon$ , которые лишь позволяют чуть сократить запись формул. В (3.40) не указаны характерные значения параметра  $C$ . При описании димерных систем в главе 3 не указано явно, что температура измеряется в энергетических единицах. В главе 4 размер спиновых кластеров вводится как дополнительный свободный параметр, хотя для полного описания достаточно уже имеющейся величины дипольного взаимодействия  $p_d$ . Символ  $\gamma$  использован для обозначения гиромагнитного отношения и неполной гамма-функции. В (5.38) не указаны пределы суммирования. В п. 5.4 не дано определения для регуляризующего параметра  $\epsilon$ .

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы К. Б. Циберкина. Диссертация выполнена на высоком квалификационном уровне, обладает внутренним единством и развивает новое тематическое направление теоретических исследований магнитных наноматериалов и углеродных структур.

Диссертационная работа «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» удовлетворяет требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 16 октября 2024), а её автор, Циберкин Кирилл Борисович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

**Официальный оппонент**

Ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики,  
Международная межправительственная научно-исследовательская организация  
Объединенный институт ядерных исследований,  
доктор физ.-мат. наук  
специальность 01.04.02 – Теоретическая физика



\_\_\_\_\_/ В. И. Юкалов

29 07 2025 г.

Я, Юкалов Вячеслав Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

<http://www.jinr.ru/>

Тел./Факс: +7 (49621) 6-50-59, +7 (49621) 6-51-46

Email: [yukalov@theor.jinr.ru](mailto:yukalov@theor.jinr.ru)

Подпись ведущего научного сотрудника ЛТФ ОИЯИ  
Юкалова В.И. заверяю.

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ Андреев А.В.



