

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук профессора Фельдмана Эдуарда Беняминовича 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»

Диссертация Циберкина Кирилла Борисовича посвящена развитию теории коллективных мод намагниченности в концентрированных системах с дипольным и РККИ взаимодействиями, а также описанию спин-спиновой релаксации и спиновой диффузии, нелинейных волн и осредненных сигналов намагниченности, связанной с коллективными модами. Значение проведенных в диссертации исследований непосредственно связано как с усовершенствованием элементной базы быстродействующих классических вычислительных устройств, так и с развитием квантовых вычислений (квантовых компьютеров). Разработанные в работе модели коллективных волновых процессов дают сравнительно простые методы расчета декогеренции, являющейся одной из основных проблем в создании квантовых компьютеров. Поэтому тематика диссертации К.Б.Циберкина, безусловно, является актуальной.

Среди многочисленных результатов, полученных автором, особый интерес представляет развитый в работе подход, основанный на осреднении решеточных уравнений Гейзенберга для спиновых электронных операторов, которые дают модели динамики микроскопической и интегральной намагниченности системы и позволяют выяснить природу различных вкладов в спиновую динамику, а также получить оценку феноменологических параметров из первых принципов.

Диссертационная работа Циберкина К.Б. изложена на 251-ой страницах, включая 70 иллюстраций и 7 таблиц, и состоит из введения, шести глав и заключения. В диссертации цитируются 360 источников.

Во **введении** дана общая характеристика представленной диссертации, показана ее актуальность, сформулированы основные цели и задачи и практическая значимость исследования.

В **первой главе**, носящий обзорный характер, проанализированы современные тенденции в исследовании коллективных магнитных явлений в конденсированных средах. Изложены основные достижения методов нелинейной динамики для исследования проблем физики конденсированных сред.

Вторая глава посвящена исследованию динамики намагниченности низкотемпературного парамагнетика с простой кубической решеткой в постоянном магнитном поле, ориентированным вдоль ребра элементарной ячейки. Методами вторичного квантования и с помощью преобразования Дайсона-Малеева автором получены нелинейные уравнения, описывающие эволюцию намагниченности на узлах решетки. Используя предел сплошной среды, К.Б.Циберкин проанализировал динамику намагниченности с применением метода многих масштабов. В результате установлена иерархия динамических явлений в парамагнитной среде. Показано, что локализованные в пространстве возмущения возбуждают в среде бегущие волны большой длины, а в низкотемпературном парамагнетике с дипольным взаимодействием установлено существование солитонов.

В **третьей главе** рассматриваются свойства двухкомпонентного материала – ансамбля магнитных ионов, внедренных в парамагнитную решетку, или осажденных на поверхность парамагнитного материала. В приближении сплошной среды диссертант реализовал спин-волновую модель динамики двухкомпонентного низкотемпературного парамагнетика – магнитного композита, образованного внедрением или осаждением примесных атомов в объем (на поверхность) парамагнитной решетки. К.Б.Циберкин рассчитал и проанализировал спад свободной индукции поперечной намагниченности под действием прямоугольного

радиочастотного импульса, а также спектр и асимптотику возникающего сигнала.

Четвертая глава посвящена анализу результатов численного моделирования динамики намагниченности низкоразмерных систем спинов, связанных дипольным и обменным взаимодействиями, объединенных в компактные независимые кластеры разных размеров. Численное моделирование динамики намагниченности выполнено с применением квантово-механического подхода, основанного на диагонализации матрицы гамильтониана. Полученные автором результаты позволяют прогнозировать свойства различных ансамблей магнитных центров, в частности, оценивать собственные резонансные частоты и времена релаксации, а также температуру перехода в парамагнитное состояние.

В пятой главе дано спин-волновое описание парамагнитных систем с дипольной связью. Рассмотрен переход от спинового гамильтониана к спин-волновому на основе преобразования Холстейна – Примакова. К.Б.Циберкин рассчитал равновесные термодинамические характеристики решетки (намагниченность, продольная статическая восприимчивость, удельная внутренняя энергия и удельная теплоемкость). Также проведен расчет компонент тензора восприимчивости и кривых спада свободной индукции, соответствующих возмущениям поперечного и продольного поля.

В шестой главе диссертации разработана и реализована квантово-механическая модель углеродного композита, состоящего из сферических одно- и многослойных оболочек. Рассчитаны энергетические уровни и оптические спектры сферической оболочки, численно построены функции плотности состояний. Показано существенное влияние осаждения ионов примеси на наблюдаемые свойства материала, что связано с перераспределением плотности состояний и возникновением запрещенной зоны в спектре энергетических уровней.

В совокупности, данные исследования демонстрируют существенный вклад коллективной спиновой динамики в равновесные и динамические характеристики одно- и многокомпонентных материалов с дипольным и РККИ взаимодействиями. Диссертант уверенно владеет современными методами физики конденсированного состояния, а также соответствующим математическим аппаратом для обработки экспериментальных данных. По материалам диссертации опубликовано 18 статей, в основном, в авторитетных отечественных и международных журналах. Результаты работы многократно докладывались на престижных Международных конференциях.

Диссертационная работа не лишена недостатков. Отметим некоторые из них.

1. Автору не удалось сформулировать в выводах основное содержание работы в ясной и краткой форме. Выводы 1-6 чрезмерно затянуты и содержат информацию, как о полученных результатах, так и разъяснительные комментарии.

2. Хотя в диссертации получено достаточное количество теоретических результатов, имеющих прямое отношение к многочисленным экспериментальным исследованиям в физике конденсированного состояния, подробное сравнение с экспериментальными данными проведено только в одном случае (для сферических углеродных наноболочек).

3. Нуждается в дополнительном разъяснении вопрос о возникновении немагнитной фазы в системе магнитных димеров за счет перехода части димеров в микросостояния с нулевым полным спином. Речь идет о фазе, состоящей из невзаимодействующих частиц? Какова устойчивость такой фазы? Можно ли ее наблюдать экспериментально?

4. В диссертации и автореферате “магический ” угол $\arccos(1/3^{1/2})$ полагается равным 57.3° . Общеизвестно, что этот угол равен $54,74^\circ$. В чем причина расхождения?

В то же время, указанные недостатки больше являются пожеланиями, нежели существенными упущениями в представленной диссертации. Их наличие никоим образом не ставит под сомнение достоверность, новизну и значимость полученных результатов.

Методы, развитые диссертантом, способствуют построению достоверных и эффективно масштабируемых моделей для прогнозирования свойств магнитных и проводящих материалов, а также мезоскопических спиновых систем.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Заключение по диссертационной работе

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Циберкина Кирилла Борисовича «Коллективная динамика низкотемпературных парамагнетиков и углеродных композитов» по актуальности темы, научной новизне, практической значимости полученных результатов, обоснованности сделанных выводов и уровню исполнения является логически законченным исследованием и соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года (в редакции от 16 октября 2024 года). Автор работы, Циберкин Кирилл Борисович, заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент главный научный сотрудник лаборатории спиновой динамики и спинового компьютинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН (ФИЦ ПХФ и МХ РАН),	
д.ф.-м.н., профессор	 Э.Б. Фельдман
Подпись сотрудника ФИЦ ПХФ и МХ РАН Э.Б. Фельдмана заверяю: Ученый секретарь ФИЦ ПХФ и МХ РАН	
д.х.н.	 Б.Л. Психа



23 июля 2025 г.