

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Мищенко Ильи Никитича «Развитие многоуровневых моделей магнитной динамики однодоменных частиц для описания кривых намагничивания и мёссбауэровских спектров магнитных наноматериалов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Наночастицы и функциональные материалы на их основе на сегодняшний день имеют широкую область применения в различных областях промышленности: микроэлектронике, экологии, фармацевтике, медицине. При разработке новых функциональных наноматериалов необходимость в использовании возможностей высокочувствительных неразрушающих методов исследования структуры и свойств весьма высока. К настоящему времени существует целый спектр методов, которые позволяют исследовать дисперсные системы на атомно-молекулярном уровне, которые при переходе к наномасштабу имеют ограничения. Серьезные трудности возникают при изучении систем наночастиц, при установлении связи между их структурой и реакционной способностью, при исследовании поведения системы как целого, ее магнитных и динамических характеристик. Для изучения свойств наночастиц и наноструктурных материалов весьма информативными являются магнитные методы и гамма-резонансная (мессбауэровская) спектроскопия. Однако, большинство существующих к настоящему времени экспериментальных данных зачастую сложных и неоднозначных активно интерпретируются в простейших классических моделях, в рамках которых проводятся оценки ряда параметров, описывающих размерные, морфологические и магнитные свойства (температура перехода в суперпарамагнитное состояние, коэрцитивность, средний размер частиц, константа магнитной анизотропии). Имеющиеся к настоящему времени модели и аналитические подходы к интерпретации экспериментальных данных по намагничиванию магнитных наноматериалов, мессбауэровских спектров и их температурных и полевых зависимостей, анализа динамических свойств наночастиц, имеют односторонний упрощенный характер и требуют обобщения и развития с учетом различных аспектов физики наноразмерного состояния.

В этой связи цель диссертационной работы Мищенко И.Н., состоящая в развитии многоуровневых моделей магнитной динамики частиц нанометрового размера и создание на их основе комплексов программ для согласованного анализа температурных и полевых серий экспериментальных мессбауэровских спектров, является весьма **актуальной**, имеет важное **научное и практическое значение**, её научная **новизна** не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных выводов и содержит 125 страниц, включая 2 приложения, 28 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 104 наименований.

**Во введении** сформулированы цели и задачи работы, обоснованы её актуальность и практическая значимость, приведены защищаемые положения.

**Первая глава** состоит из нескольких разделов, в которых освещены аспекты стандартных подходов к описанию магнетизма однодоменных частиц, их сравнительный анализ и применение к исследованию магнитных флуктуаций в тяжелофермионном интерметаллиде  $\text{CePdSn}$ .

Подробно рассмотрены классические модели Стонера–Вольфарта, Нееля и Брауна. Дано обстоятельное введение в теорию эффекта Мёссбауэра и основанного на нём метода гамма-резонансной спектроскопии. Особое внимание уделено форме мёссбауэровских спектров магнитных наночастиц в представлении Джонса–Шриваставы, позволяющем свести стохастическое двумерное уравнение Брауна к случайным переходам между соседними уровнями одномерного набора стационарных состояний частицы. Рассмотрено обобщение этого подхода на случай наличия электрического квадрупольного расщепления ядерных уровней.

В этой же главе обосновывается простой способ определения скорости релаксации частицы между двумя эквивалентными потенциальными ямами посредством расчёта наименьшего по абсолютной величине ненулевого собственного значения трёхдиагональной матрицы случайных переходов. Помимо этого, на основании анализа мёссбауэровских спектров соединения  $\text{CePdSn}$  в релаксационных моделях магнитной динамики показывается существенное влияние флуктуаций на его магнитные свойства, что служит подтверждением ранее предложенной модели нарушенной магнитной структуры этого соединения и позволяет автору трактовать её как разбиение всего объёма образца на антиферромагнитные домены.

**Вторая глава** содержит 5 разделов и посвящена развитию теории магнитной динамики анизотропных частиц во внешнем магнитном поле, анализу механизмов формирования равновесных кривых намагничивания и релаксационных мёссбауэровских спектров однодоменных наночастиц, а также анализ коммерческих образцов медицинской феррожидкости.

В рамках квантового обобщения многоуровневой модели на случай аксиально-анизотропных частиц во внешнем поле проводится развёрнутое компьютерное моделирование равновесных кривых намагничивания ансамблей однодоменных частиц и для случая нетекстурированных систем доказывается универсальное ланжевеновское поведение начальных участков этих кривых. Предлагается дальнейшее расширение указанной многоуровневой модели для самосогласованного учёта релаксационных переходов между стационарными состояниями частицы в поле и обосновывается квазиклассическое приближение для их вероятностей.

На базе разработанных моделей магнитной динамики однодоменных частиц автором созданы комплексы программ для диагностики магнитных наноматериалов по температурным и полевым сериям их мёссбауэровских спектров. Разработанное

программное обеспечение применяется для исследования процессов магнитной релаксации в образцах фармацевтической феррожидкости и позволяет получить такую важную информацию об исследуемых объектах как распределение частиц по размерам, величины энергий их магнитной анизотропии и критические поля перемагничивания.

В **третьей главе**, содержащей три раздела, описываются магнитное поведение и термодинамика идеальных антиферромагнитных частиц, их специфичные проявления в мессбауэровском эксперименте, а также демонстрируются возможности мессбауэровской спектроскопии при установлении фазового состава в частицах мелкодисперсного оксидного порошка по типу локального магнитного упорядочения.

Автор проводит сравнительный анализ моделей магнитной динамики и квантовой статистики для идеальных антиферромагнитных частиц и доказывает их эквивалентность в пределе больших спинов магнитных подрешёток. Применение рассматриваемых моделей к трактовке мессбауэровских данных ультрадисперсного порошка трёхвалентного оксида железа позволяет автору сделать заключение об антиферромагнитном упорядочении его кристаллических зёрен, соответствующих  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематиту).

К **основным результатам** диссертационной работы следует отнести следующие:

1. Предложен простой способ расчёта скорости релаксации в ансамбле однодоменных частиц как наименьшего собственного значения трёхдиагональной релаксационной матрицы.
2. Установлена универсальная форма равновесных кривых намагничивания ферромагнитных частиц в слабых полях.
3. Описан механизм релаксации магнитных моментов частиц в поле и подтверждено классическое приближение для вероятностей случайных переходов.
4. Доказана тождественность макроскопической и квантовой статистики идеальных антиферромагнитных частиц.
5. Исследованы особенности магнитных фазовых переходов в Кондо-соединении  $\text{CePdSn}$ .
6. Предложена методика диагностики магнитных наночастиц на базе одновременного анализа их мессбауэровских спектров.
7. Предложены доказательства предпочтительного формирования фазы гематита в ультрадисперсных частицах трёхвалентного оксида железа.

Полученные в работе результаты, разработанные методы и подходы представляют интерес для широкого круга специалистов, работающих в области физики конденсированных сред. Практический интерес результаты диссертационной работы Мищенко И.Н. могут представлять для научно-исследовательских организаций, занимающихся созданием новых магнитных наноматериалов и устройств на их основе, в частности МИРЭА, МИСИС, ИФТТ РАН, могут быть рекомендованы для использования в МГУ им. М.В.Ломоносова, СПб-ГГУ, Институте кристаллографии им.

А.В. Шубникова РАН (г. Москва), НИИ физики Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону).

Результаты исследований опубликованы в 40 печатных работах, из них 16 статей в рецензируемых журналах, включенных ВАК Минобрнауки РФ в перечень рецензируемых научных журналов и изданий. Результаты работы многократно докладывались на международных и российских научных конференциях. Содержание диссертации полностью отражено в автореферате и опубликованных работах.

По диссертационной работе Мищенко И.Н. можно сделать несколько **замечаний:**

1. В литературном обзоре при обсуждении свойств наночастиц не указано о каких размерах идет речь, и что понимается под понятием «наночастица». Однако, известно, что для железосодержащих частиц размеры однодоменности могут быть разные в зависимости от состава.
2. Не обсуждаются возможные зернограничные или поверхностные эффекты, которые присущи наночастицам и наносостоянию, их возможное влияние на форму мессбауэровских спектров.
3. Модельные расчеты проводятся автором для простых однофазных и бездефектных систем частиц. Полезным было бы обсуждение эффектов, превносимых наличием фазовой гетерогенности, неоднородности по составу в предлагаемые модели, предложить пути дальнейшего развития защищаемых положений.
4. В литературном обзоре обсуждаются разные имеющиеся к настоящему времени физические модели к интерпретации мессбауэровских спектров наномангнетиков с указанием фамилий зарубежных авторов, именем которых они и названы. Однако, мне кажется, что было бы важным указать известных отечественных ученых, заложивших основы теоретического описания ультрадисперсных и наноструктурных материалов.
5. Считаю, что необходимо было указать, кем были синтезированы исследованные соединения или источник их происхождения. Полезным было бы привести изображения (например, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии) частиц, о которых идет речь. Из текста непонятно, в каком виде исследовался образец состава  $\text{CePdSn}$ .
6. Технически диссертационная работа прекрасно оформлена, написана грамотно и аккуратно. Однако, в тексте встречается много жаргонизмов. Например: «ультратонкий порошок оксида железа» (наверно, имеется в виду - ультрадисперсный), датчики взаимодействий, Кондо-соединение (стр.8), матобеспечение (с.8), снос в направлении локальных максимумов (стр.21).

Кроме того, в ряде предложений встречаются формулировки без указаний ссылок на источники информации: «хорошо известной многоуровневой модели магнитной динамики (нет ссылки на кем разработана, (стр.7)», «в рамках *недавно предложенного* квантового обобщения многоуровневой модели (когда предложено, кем (стр.7)), «недавно разработанные модели» (кем, как давно). В тексте

встречается также ряд опечаток, например, пропущены буквы доплеровск[ое] сдвиг (с.26), «.. энергия бóльшая» (стр. 27), игнорируются запятые в оборотах также, как, проис{ }одит (стр.49), ядрахатомов (слитно) (стр.79), дублирование последних строк (стр. 76).

7. Отсутствующий список сокращений затрудняет восприятие излагаемого текста.
8. Хотелось бы также видеть в работе освещение вклада диссертанта в копилку интеллектуальных продуктов – программ аналитической обработки мессбауэровских спектров- в виде их названий, ссылок на информационный ресурс, где она расположена или на патент.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации. Представленная работа Мищенко И.Н. «Развитие многоуровневых моделей магнитной динамики однодоменных частиц для описания кривых намагничивания и мессбауэровских спектров магнитных наноматериалов» по объему, актуальности и практической значимости полностью удовлетворяет требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а её автор, Мищенко Илья Никитич, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент  
Доцент, к.ф.м.-н.

Т.Ю.Киселева

МГУ им.М.В.Ломоносова, Физический факультет  
119192, Москва, Ленинские горы, стр.2,  
Тел. 8-495-939-1226  
E-mail: [Kiseleva.TYu@gmail.com](mailto:Kiseleva.TYu@gmail.com)

Подпись доцента Киселевой Т.Ю. заверяю,

Декан Физического факультета  
МГУ им. М.В.Ломоносова,  
профессор



Н.Н.Сысоев