

ОТЗЫВ

официального оппонента Пятакова Александра Павловича на диссертационную работу Сапожникова Максима Викторовича «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Большой интерес к микро- и наносистемам, обусловленный их многочисленными практическими применениями, требует глубокого понимания роли коллективных эффектов, возникающих при взаимодействии составляющих их микро- и нанообъектов. Несмотря на очевидность необходимости учета дальнедействующих взаимодействий при анализе свойств систем, состоящих из микро и нанообъектов, в настоящее время общие подходы к экспериментальному и теоретическому исследованию таких систем не разработаны. Вместе с тем, микро- и наносистемы с дальнедействующими взаимодействиями широко распространены в самых различных областях физики конденсированного состояния: матрицы магнитных наночастиц, атомы, адсорбированные на поверхность кристалла, взвеси и коллоидные растворы, микробиологические объекты. Масштабы структурных элементов таких систем составляют величины порядка характерных длин взаимодействия: толщины доменной стенки в магнитоупорядоченных средах, длины волн в фотонных, фононных и магнонных кристаллах, длины экранировки Дебая в коллоидных растворах и др. В представленной диссертации М.В. Сапожникова проведено рассмотрение соответствующих взаимодействий: магнитоэлектростатического в магнитных наносистемах и электростатического в коллоидных системах. Исследования, проведенные автором, являются пионерскими и открывают новые возможности для дальнейшего успешного развития нанотехнологии функциональных материалов. Все вышесказанное обуславливает **актуальность** выбранной темы диссертации.

Исследования, проведенные в диссертационной работе, имеют **практическую значимость** для создания устройств сверхплотной магнитной памяти. Невзаимные эффекты, продемонстрированные в системах частиц с тороидным моментом в распределении намагниченности, могут быть использованы при создании невзаимных СВЧ и оптических элементов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, включающего 233 наименования. Объем диссертации составляет 226 страниц текста, диссертация содержит 110 иллюстраций.

Во введении излагаются цели и задачи работы, актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, научные положения, выносимые на защиту, анализ современного состояния исследований в данной области, прогресс, достигнутый в диссертации и личный вклад автора.

В первой главе приведены результаты теоретических исследований, численного моделирования и экспериментальных наблюдений цепочек магнитных наночастиц двух типов: с размерами меньше обменной длины, находящихся в однородно намагниченном состоянии и частиц больших размеров с вихревым состоянием намагниченности. Показано, что перемагничивание систем первого типа происходит путем перехода через последовательность метастабильных состояний, задавая ступенчатый и самоподобный вид кривой намагничивания (канторовой лестницы). В системах второго типа дальнедействующие магнитостатические взаимодействия, доминирующие над прямым обменом, приводят к появлению особенности в виде ступеньки на кривой магнитосопротивления.

Вторая глава посвящена задаче стабилизации скирмионных структур с высокой плотностью топологического заряда в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мории за счет локальной модификации параметра анизотропии магнитной пленки или ее толщины. Представлена оригинальная идея такой стабилизации, аналитически решена задача об устойчивости скирмиона, методами численного моделирования исследованы свойства решеток магнитных скирмионов, успешно получены образцы пленок с латерально модулированными свойствами и, наконец, методами зондовой микроскопии продемонстрирована возможность стабилизации скирмионных структур.

Третья глава посвящена другому типу магнитных наноструктур, полученных напылением магнитного покрытия на поверхность коллоидного кристалла. Проведено комплексное исследование таких структур, как путем измерения интегрального сигнала – петель намагничивания образца в целом, так и локальным исследованием распределений намагниченности методами МСМ, показавшие возможность реализации двух состояний – вихревого и квазиоднородного, при различных соотношениях обменной и магнитостатических энергий. Также проведено исследование оптических свойств пленок в видимом, УФ и ИК диапазонах, показана возможность возбуждения поверхностных плазмонов.

В четвертой главе рассматриваются те же типы магнитных наноструктур, что и в предыдущих двух главах, но акцент делается на другом их свойстве – наличии тороидного момента у реализующихся в них вихревых и скирмионных состояний, и, как следствие, проявление невзаимных свойств. В магнитных пленках кобальта и пермаллоя, напыленных на поверхность коллоидного кристалла, было обнаружено возбуждение особых резонансных мод, не наблюдающихся в плоских пленках: спиралевидных мод с невзаимной прецессией. Также исследованы невзаимные оптические эффекты на двумерных решетках магнитных наноточек с вихревым распределением намагниченности.

В пятой главе представлены результаты теоретического и экспериментального изучения явлений коллективного поведения и самоорганизации в суспензиях электростатически взаимодействующих микрочастиц металлов и полимеров.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа обладает несомненной **научной новизной**, многие идеи, такие как стабилизация скирмиона за счет латеральной модуляции материальных параметров и толщины пленки, а также создание магнитного наноструктурированного материала путем напыления магнитного покрытия на поверхность коллоидного кристалла предложены впервые. Последнее особенно актуально в контексте нарождающихся новых направлений: магнетизма искривленных поверхностей (флексомагнетизма), гибкой электроники и т.п.

Достоверность результатов, полученных соискателем, следует из согласованности теоретических моделей, результатов численного эксперимента и экспериментальных наблюдений с использованием взаимодополняющих экспериментальных методик.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на множестве международных конференций по магнетизму, наноматериалам и оптике, и были опубликованы в ведущих мировых журналах (Nature Comm, PRL, APL, журналах серии Physical Review и др.).

В целом, диссертационная работа представляет совокупность исследований, проведенных на высоком научном уровне. Экспериментальные методики описаны четко и подробно. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

При общей высокой оценке диссертационной работы следует сделать ряд **замечаний**:

1) Основная трудность, с которой сталкивается оппонент диссертации, связана с особенностью ее структуры — отсутствие литературного обзора в виде отдельной главы. В результате, отделить оригинальный вклад автора от литературных данных можно только после внимательного изучения ссылок.

2) В тексте первой главы смешиваются понятия однодоменной и однородно намагниченной частицы. Несмотря на то, что в большинстве рассмотренных случаев, однодоменная частица является однородно намагниченной, тем не менее, это два разных состояния, характеризующимся различными критическими размерами: характеристической и обменной длиной, соответственно;

3) На рис.1.14 а) при конвертации графического файла пропала часть стрелок, что создает ложное впечатление искусственного введенного дефекта;

4) В ряде подрисуночных надписей во второй главе (Рис. 2.4, 2.14) штриховые линии названы «пунктирными»;

5) Во введении к четвертой главе на с. 111, утверждение, почерпнутое из литературы, о том, что наличие топологического заряда всегда сопровождается тороидным моментом является спорным;

6) К сожалению, в работе имеется ряд опечаток, как орфографического свойства, так и более значимые: на с. 49 ошибка в цитировании: ссылка [88] в тексте должна быть [87]; на с.53, Главы 2: в формулировке условий равновесия имеется опечатка в формуле для второй производной, она должна быть не равна нулю, а больше нуля; на с. 104 ссылка на рисунок 3.8 b) на самом деле соответствует рис. 3.9 b) ; на с. 194 в размерности подвижности отсутствуют скобки, должно быть $(V \cdot c)^{-1}$;

Приведенные замечания, большая часть из которых носит характер редакторской правки, нисколько не умаляют значимости диссертационной работы и общего положительного впечатления. По разнообразию представленных в работе проблем и глубине их рассмотрения, диссертация, несомненно, относится к разряду докторских.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа Сапожникова Максима Викторовича по актуальности, новизне, научному уровню и практической значимости полностью соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней. Автор работы, Сапожников Максим Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 физика конденсированного состояния.

Профессор кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Подпись ректора А.П. Пятакова

г. Москва, Ленинские горы, д.1, строение 2,
физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
тел. +7 (495)939-41-38,
e-mail. pyatakov@physics.msu.ru



А.П. Пятаков

28.09.18

Декан физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор



Н.Н. Сысоев