

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию 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

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка трудов автора и списка цитируемой литературы, изложена на 226 страницах. Библиографический список содержит 233 наименования.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, обоснована ее научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, приведены методы исследования и положения, выносимые на защиту, подробно отражен личный вклад автора, представлена апробация результатов и общая структура работы.

*В первой части*, обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей поведения систем магнитных наночастиц, обусловленных дальнедействующим магнитостатическим взаимодействием между ними, решена задача о перемагничивании регулярных решеток магнитных диполей во внешнем магнитном поле и показано, что перемагничивание системы происходит путем перехода системы через последовательность метастабильных состояний, каждое из которых имеет свой диапазон устойчивости относительно величины приложенного внешнего поля, Методами микромагнитного симулирования решена задача о термоактивационном перемагничивании цепочки магнитостатически взаимодействующих наночастиц.

*Во второй части* исследуются топологические распределения намагниченности - магнитные скирмионы в магнитных пленках с перпендикулярной анизотропией. Там же представлены результаты теоретических работ, в которых впервые были предложены и обоснованы

методы наноструктурирования магнитных пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией, а также результаты экспериментов, в которых эти идеи были практически реализованы.

*Третья часть* диссертации посвящена подробному теоретическому и экспериментальному исследованию магнитных наноструктур, которые были получены напылением магнитной пленки на поверхность коллоидного кристалла (микросферы из ПММА). Изучены распределения намагниченности, возникающие в тонких криволинейных слоях.

*В четвертой части* автор изучает специфические свойства рассмотренных в предыдущих главах нетривиальных магнитных конфигураций - магнитных скирмионов, магнитных вихрей в магнитных нанополусферах и наночастицах, связанные с тем, что эти объекты обладают тороидным моментом. Проведено экспериментальное и численное исследование спектров и мод ферромагнитного резонанса в магнитных пленках Co и NiFe на поверхности коллоидного кристалла, а также исследованы невзаимные эффекты при дифракции света на двумерных решетках магнитных наночастиц с вихревым распределением намагниченности.

*В пятой части* изучаются суспензии и коллоидные растворы металлических и полимерных частиц в слабо проводящей жидкости под действием электрического поля в электростатической ячейке - статических преципитатов образованных неподвижными частицами, так и различных динамических структур образованных согласованным движением большого количества частиц. Исследована зависимость процессов самоорганизации в системе, как от величины приложенного поля, так и от электропроводности жидкости в ячейке. Построена теория, описывающая формирование экспериментально наблюдающихся в системе динамических и статических структур.

*В заключении* приводятся основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

К несомненным достоинствам данной работы надо отнести хорошую продуманную структуру, ясность изложения материала, глубокое понимание физики процессов, происходящих в сложных мезоскопических структурах и наносистемах, а также гармоничное сочетание разнообразных экспериментальных и теоретических методов исследования.

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время получены искусственные структуры с масштабами неоднородности сравнимыми с характерными физическими масштабами однородных систем, таких как толщина доменной стенки (однодоменные частицы), длина волны света (фотонные коллоидные кристаллы), длина спиновой волны (магنونные кристаллы), длина свободного пробега носителей тока (многослойные структуры), длина экранировки Дебая (коллоидные растворы). Макроскопические свойства таких структур можно варьировать в широких пределах и создавать искусственные среды с заранее заданными свойствами. Настоящая диссертация посвящена теоретическому описанию свойств искусственных микро- и наноструктур, а также методикам определения их фактических свойств, как в статическом состоянии, так и в динамике. Таким образом, **тема диссертационной работы, безусловно, является актуальной.**

**Высокая научная и практическая значимость** связана, главным образом, с тем обстоятельством, что развитые представления о влиянии магнитостатического взаимодействия на свойства ансамблей магнитных наночастиц могут быть использованы при разработке устройств с высокой плотностью магнитной записи, обнаруженные эффекты невзаимности в системах с изменяемым тороидным моментом могут быть использованы для разработки невзаимных оптических или СВЧ элементов, а эффекты самоорганизации в коллоидных растворах металлических и полимерных частиц, изученные в работе, могут быть использованы для развития технологий конденсированных "мягких" материалов.

**Научная новизна** представленной Сапожниковым М.В. диссертационной работы не вызывает сомнений. В качестве наиболее важных новых результатов работы можно указать следующие:

1. Теоретически детально изучены эффекты взаимодействия в цепочках магнитных коэрцитивных частиц, показано, что эффективный антиферромагнитный характер диполь-дипольного взаимодействия приводит к появлению фрустрации и, как следствие, к тому, что при перемагничивании система проходит через последовательность метастабильных состояний проявляющихся в виде ступенек различной ширины на кривой перемагничивания.
2. В работе впервые предложены и обоснованы методы наноструктурирования магнитных пленок переходных металлов с

перпендикулярной магнитной анизотропией, позволяющие создавать в них топологически заряженные распределения намагниченности (скирмионы) в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория в нулевом внешнем поле. Проведены эксперименты, в которых эти идеи были практически реализованы.

3. В результате исследования магнитных, оптических и СВЧ свойств обнаружено возникновение фрустрированных решеток магнитных вихрей в новых магнитных наноструктурированных материалах - пленках переходных металлов (Co, Ni, NiFe) на поверхности коллоидного кристалла полиметилметакрилата.
4. Обнаружены невзаимные эффекты при рассеянии света и возбуждении ферромагнитных спин-волновых резонансов в решетках магнитных вихрей и магнитных скирмионов.
5. Предложен новый класс материалов - суспензии и коллоидные растворы металлических и полимерных частиц в слабопроводящей жидкости, и исследованы их свойства при возбуждении электрическим полем. При промежуточном значении радиуса Дебая (1–100  $\mu\text{м}$ ) обнаружены и подробно изучены новые коллективные эффекты.

**Надежность и достоверность результатов** работы обеспечена использованием известных и надежных экспериментальных (магнитооптические методы Керра и Фарадея, холловская магнитометрия, зондовая магнитосиловая микроскопии, инфракрасная Фурье-спектроскопия и т.д.) и теоретических методик исследования (аналитические методы, а также численные расчеты в пакетах программ SIMMAG (ИФМ РАН) и OOMMF (NIST)).

**Основные результаты диссертации хорошо апробированы:** они опубликованы в реферируемых научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также докладывались на крупных российских и международных конференциях.

**По работе имеются следующие замечания:**

1. В диссертации представлена модель термоактивированного перемагничивания цепочки магнитных моментов с диполь-дипольным взаимодействием между ближайшими соседями (стр. 28-31). В ней

предполагается термоактивированный разворот магнитного момента вдоль магнитного поля, но непонятно, почему отсутствует возможность обратного процесса, который может происходить при конечной температуре. В целом, эта модель, по-видимому, соответствует теории Глаубера, в которой перевороты в обоих направлениях учитывались ([R.J.Glauber, J. Math. Phys. 4, 294 (1963)], см. также обобщения глауберовой динамики на 2D решетки в [K.Park et al., PRL 92, 015701 (2004)] и Ю.Б.Кудасов и др., УФН 182, 1249 (2012)).

2. При обсуждении модели движения слабопроводящей жидкости в электростатической ячейке (стр.173-176) не учитывается тот факт, что напряженность вертикального электрического поля должна быть крайне неоднородна по ячейке, т.е. оно в основном сосредоточено в дебаевских слоях вблизи поверхностей пластин (или частиц), а вне этих тонких слоев, в объеме, предположительно поле будет много меньше, чем  $U/d$ , где  $U$  – напряжение на пластинах,  $d$  – расстояние между ними. Кроме того, при рассмотрении вертикальных движений жидкости, формирующих вихри (формулы 5.13-5.15), не затрагивается вопрос о перезарядке жидкости на верхнем электроде (верхний электрод положительный), что приводит к ее опусканию, т.е. восходящий поток должен замыкаться нисходящим потоком после передачи части отрицательного заряда на верхнем электроде.

3. В работе имеется ряд опечаток и мелких неточностей.

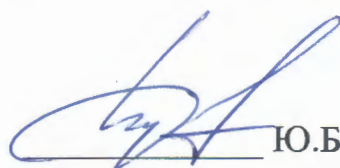
Приведенные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация оставляет очень хорошее впечатление и является законченной научно-технической работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне.

**Заключение.** Содержание диссертации соответствует Паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Автореферат диссертации полностью соответствует самой диссертационной работе.

Диссертацию Сапожникова Максима Викторовича на тему «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем» можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное культурное и хозяйственное значение; в ней также изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация полностью отвечает требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Сапожников Максим Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

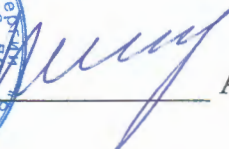
Кудасов Юрий Бориславович,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
главный научный сотрудник научно-производственного  
центра физики (НПЦФ)  
Российского федерального ядерного центра –  
Всероссийского научно-исследовательского института  
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)  
Шифр специальности: 01.04.07  
607188, г. Саров, пр. Мира, 37, Тел.: 8313027239  
E-mail: [kudasov@ntc.vniief.ru](mailto:kudasov@ntc.vniief.ru)



Ю.Б. Кудасов

Подпись Ю.Б. Кудасова удостоверено

И.о. Директора НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ



А.Е. Дубинов

### Список публикаций Кудасова Ю.Б.

1. Ю.Б. Кудасов, А.С. Коршунов, В.Н. Павлов, Д.А. Маслов, Фрустрированные решетки изинговских цепочек, УФН 182 (2012) 1249
2. В.В. Платонов, Ю.Б. Кудасов, О.М. Таценко, Магнитоиндуцированные фазовые переходы в  $\text{LaCoO}_3$  в полях до 500 Т, ФТТ, том 54, вып.2, С. 264 (2012)
3. Yu. B. Kudasov, D. A. Maslov, Frustration and charge order in  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. B 86, 214427 (2012)
4. D.Yu. Kudasov, Yu.B. Kudasov, High-field magnetic phase diagram of  $\text{CsCoCl}_3$  revised, Phys. Lett. A 377 (2013) 2638
5. A. V. Ikonnikov, S. S. Krishtopenko, O. Drachenko, Yu.B.Kudasov et al., Temperature-dependent magnetospectroscopy of  $\text{HgTe}$  quantum wells, Phys. Rev. B 94, 155421 (2016)
6. Ю.Б.Кудасов, О.М.Сурдин, А.С.Коршунов и др., Динамика решетки и фазовая диаграмма алюминия при высоких давлениях, ЖЭТФ 144 (2013) 765
7. A M Shikin, A A Rybkina, A S Korshunov, Yu B Kudasov et al., Induced Rashba splitting of electronic states in monolayers of Au, Cu on a W(110) substrate, New Jour. Phys. 15 (2013) 095005
8. Ю. Б. Кудасов, И. В. Макаров, Д. А. Маслов, В. В. Платонов, Е. Я. Попов, О. М. Сурдин, С. Л. Воронов, А. Ю. Малышев, С. В. Коротков, В. М. Водовозов, Компактная исследовательская установка сильных импульсных магнитных полей до 50 Тл, ПТЭ №6 (2015) 78
9. В.В. Платонов, Ю.Б. Кудасов, И.В. Макаров и др. , Исследование магнитопоглощения при различных температурах в гетероструктурах  $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$  с квантовыми ямами в импульсных магнитных полях, ФТП 49 (2015) 1660
10. G. R. Hearne, E. Carleschi, W. N. Sibanda, P. Musyimi, G. Diguët, Yu. B. Kudasov et al., Coexistence of site- and bond-centered electron localization in the high-pressure phase of  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. B 93, 105101 (2016)
11. Yu.B.Kudasov, M.Markelova, D.A.Maslov et al., Biased dielectric response in  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ , Phys. Lett. A 380 (2016) 3932
12. V.V. Platonov, Yu.B. Kudasov, A.V. Filippov, et al., High Magnetic Field Facility for Cyclotron Resonance Investigation in Semiconductors, IEEE Plasma Sci. 43 (2015) 365

13. С.И. Белов, Г.В.Борисков, А.И.Быков, М.И.Долотенко, Ю.Б.Кудасов и др.,  
Электрофизические свойства воды и льда при изоэнтропическом сжатии до  
мегабарных давлений, Письма в ЖЭТФ 105 (2017) 182

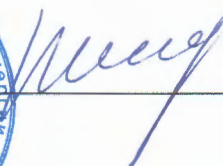
Д. ф.-м. н., доцент



Ю.Б. Кудасов

Подпись Ю.Б. Кудасова заверяю

И.о. Директора НПЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, д.ф.-м.н



А.Е. Дубинов