

## ОТЗЫВ

*официального оппонента на диссертационную работу*

*Нугуманова Айдара Гайсовича*

*“Топологически устойчивые спиновые структуры в наноразмерных мультиферроиках”,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика*

Магнитные скирмионы представляют собой топологически защищенные, устойчивые спиновые вихревые структуры, с многообещающими перспективами для практических приложений благодаря своей управляемости и поведением схожим с поведением взаимодействующих квазичастиц. Магнитные скирмионы широко изучаются в различных материалах, и предполагается, что они двумерном виде они могут формироваться, например в бислое CrI<sub>3</sub> и иных гетероструктурных мультиферроиках, состоящих из чередующихся магнитных и ферроэлектрических нанопленок различной толщины. На границах между слоями с различным упорядочением вследствие нарушения пространственной симметрии возможно проявление и локализация различных топологических магнитных наноструктур поэтому исследование и численное моделирование таких систем, безусловно, является **актуальной** задачей.

В рамках диссертационной работы А.Г. Нугуманова исследовано несколько типов композитных мультиферроиков с различной геометрией, проведён анализ устойчивости возникающих нетривиальных топологических магнитных структур, а также изучены конкурирующие взаимодействия, допускающих существование таких структур.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников из 122 наименований. Объем диссертации составляет 99 страниц текста, диссертация содержит 42 иллюстрации.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов исследования, анализ современного состояния исследований в данной области, полученные результаты и личный вклад автора.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В **первой главе** диссертации исследуются особенности фазовых переходов в мультиферроиках со структурой типа перовскита. Обнаружено, что фазовые переходы из антиферромагнитно-антиферроэлектрической фаз в парамагнитную и диэлектрическую соответственно являются переходами второго рода. При исследовании сверхрешеточных мультиферроиков с кубической симметрией, состоящих из чередующихся магнитных и ферроэлектрических слоев, в которых магнитоэлектрическое взаимодействие эффективно только

на границах раздела слоев, было обнаружено, что температуры фазовых переходов в магнитной и ферроэлектрической подсистемах при определенных значениях параметра магнитоэлектрического взаимодействия расходятся, то есть система является частично разупорядоченной, но при значениях выше критического фазовый переход в системе приобретает характер первого рода и происходит одновременно в обеих подсистемах.

**Вторая глава** посвящена вопросам зарождения и существования скирмионов и скирмионных решёток в основном состоянии ферромагнитно-ферроэлектрической мультиферроидной сверхрешетки с треугольной симметрией и перпендикулярным магнитоэлектрическим взаимодействием типа Дзялошинского-Мория на границах раздела магнитных и ферроэлектрических слоёв. Обнаружено, что при величине абсолютного значения параметра магнитоэлектрического взаимодействия выше критического на граничном магнитном слое возникают отдельные крупные скирмионы, при больших значениях количество скирмионов растёт с одновременным уменьшением их радиусов, что не наблюдалось при моделировании сверхрешетки с кубической симметрией.

**В третьей главе** диссертации предложен новый метод исследования условий существования нетривиальных топологических магнитных структур в основном состоянии магнитоэлектрического бислоя на основе применения искусственной нейронной сети. В первой части главы предложенная нейронная сеть была обучена ставить в соответствие набор из 8 вещественных параметров (три типа обменного взаимодействия, диполь-дипольное взаимодействие в ферроэлектрических слоях, магнитоэлектрическое взаимодействие, внешнее магнитное поле) и конфигурацию магнитного и ферроэлектрических слоев, соответствующих основному состоянию при этом наборе параметров. Рассмотрена зависимость величины топологического заряда в системе в зависимости от параметра обменного взаимодействия и магнитоэлектрического взаимодействия Дзялошинского-Мория.

В качестве замечаний к диссертации следует отметить следующее.

1. В первой главе к результатам Монте-Карло моделирования (Рис. 1.3) приведен результат, касаемо сильного различия в поведении намагниченности поверхностного слоя от намагниченности слоев пленки, но не делается предположений о причинах такого поведения.
2. Было бы полезно обсудить сопоставимость используемых значений материальных параметров модели и либо экспериментальных результатов либо значений из первопринципных методов.

Вместе с тем высказанные замечания не влияют на высокую оценку выполненной диссертационной работы. Полученные диссертантом результаты имеют **важное теоретическое и практическое значение**, могут быть использованы при разработке новейших технологий в спинтронике. **Достоверность и обоснованность** полученных результатов, и

основных положений, выводимых на защиту, не вызывают сомнений. **Научная новизна** работы А.Г. Нугуманова определяется обнаружением и изучением ряда новых физических эффектов в композитных мультиферроиках с помощью новейших методов математического аппарата в форме искусственных нейронных сетей.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, преимущественно в зарубежных, а также в трудах и тезисах международных конференций.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности **1.3.3 – «теоретическая физика»** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1. – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова; она оформлена согласно положениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

В целом, диссертационная работа «Топологически устойчивые спиновые структуры в наноразмерных мультиферроиках» удовлетворяет всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям, а ее автор, Нугуманов Айдар Гайсович, **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры квантовой статистики и теории поля физического факультета  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Савченко Александр Максимович

Контактные данные:

Тел: +7 (906) 794-51-38, e-mail: a.m.savchenko@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2

Тел: +7 (495) 939-12-90, e-mail: am.savchenko@physics.msu.ru

Подпись профессора кафедры квантовой статистики и теории поля физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, профессора А.М. Савченко, удостоверяю: