

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXVI Международного  
симпозиума**

*14–17 марта 2022 г., Нижний Новгород*

*Том 1*

*Секции 1, 2, 4, 5*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского  
2022

УДК 538.9  
ББК 22.37; 22.33  
Н-25

**Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXVI Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 14–17 марта 2022 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2022. — 643 с.  
ISBN 978-5-91326-720-7

#### Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;  
Отделение физических наук РАН;  
Научный совет РАН по физике полупроводников;  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;  
Институт физики микроструктур РАН;  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;  
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

#### Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН  
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

#### Учёный секретарь Симпозиума

Д.А. Татарский, к. ф.-м. н., ИФМ РАН

#### Программный комитет

А.Ю. Аладышкин, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород

#### Организационный комитет

В.Г. Беллюстин	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.С. Михайленко	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Е. Пестов	ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-720-7

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет  
им. Н.И. Лобачевского, 2022  
© Институт физики микроструктур  
РАН, 2022

# Моделирование и теоретическое описание скирмионных мешков

М.С. Шустин<sup>1,\*</sup>, М.Н. Поткина<sup>2,3,§</sup>

1 Институт физики им. Л. В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок 50/38, Красноярск, 660036.

2 Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.

3 Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034.

\*mshustin@yandex.ru, §spotkina.maria@yandex.ru

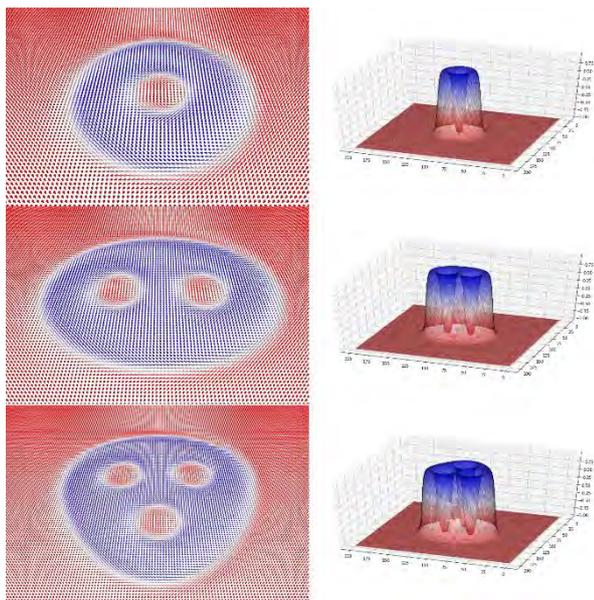
Развита теория топологически нетривиальных магнитных структур (скирмионных мешков) с произвольными топологическими индексами в предположении о классической природе магнитных моментов. Предложена аналитическая параметризация поля намагниченности скирмионных мешков. При использовании последней в качестве пробной функции проведена минимизация энергетического функционала магнитной подсистемы и описаны зависимости энергии и размеров скирмионных мешков от микроскопических магнитных параметров. При этом результаты аналитического описания сравнивались с результатами микроскопического численного моделирования.

## Введение

После экспериментального открытия магнитных скирмионов (МС) [1] топологически нетривиальные магнитные структуры стали активно исследоваться как перспективные объекты для создания элементной базы устройств логики и памяти нового поколения [2]. Основное преимущество практического применения МС связано с использованием их конфигурационной устойчивости: невозможности перевести нетривиальное распределение поля намагниченности, отвечающее топологическому индексу  $Q$  в распределение, отвечающее другому значению  $Q$ , без преодоления энергетического барьера. До недавнего времени рассматривались только магнитные скирмионы с  $Q = -1$ . Однако в недавних работах [3, 4] для 2D случая на основе численных расчетов было предсказано существование скирмионов с произвольными значениями  $Q$ , получивших название скирмионные мешки (skyrmion bags). Данное открытие существенно расширяет перспективы исследования топологических магнитных структур. В частности, приобретает актуальность нахождение аналитической параметризации пространственного профиля скирмионных мешков и аналитическое описание их пространственных размеров, отсутствующее в настоящее время. Так, при моделировании динамики скирмионных мешков используется полуаналитический подход, в рамках которого в аналитические уравнения динамики МС подставляются магнитные профили, найденные в рамках численного моделирования [5]. Также отсутствует анализ роли квантовых флуктуаций в скирмионных мешках, требующий параметризации профилей последних.

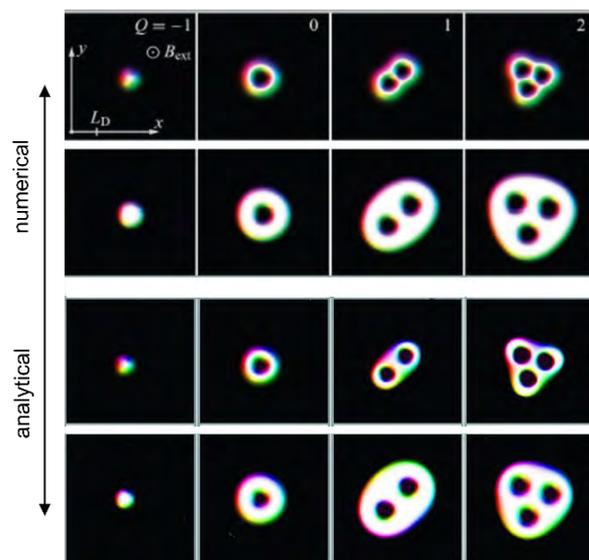
## Полученные результаты

В работе на основе микроскопического численного моделирования рассматривается вопрос о минимизации классического энергетического функционала гейзенберговского типа, учитывающего обменное взаимодействие, взаимодействие Дзялошинского-Мории (ДМ), зеемановское расщепление и одноионную анизотропию типа «легкая ось». Минимизация функционала осуществлялась в многомерном пространстве углов между ближайшими магнитными моментами единичной длины  $|\mathbf{m}(\mathbf{r})|=1$ . Показано, что, если в качестве начальной конфигурации поля намагниченности  $\mathbf{m}(\mathbf{r})$  реализуется состояние с  $|Q|+1$  расположенными рядом магнитными скирмионными мешками, метастабильному конечному состоянию соответствуют скирмионные мешки с топологическим индексом  $Q$  (см. рисунок 1). Таким образом, «базовыми структурными элементами» скирмионных мешков являются МС с  $|Q|=1$  (простой скирмион) и  $Q=0$  (скирмиониум). Учитывая это, в работе проведено развитие аналитической теории магнитного скирмиониума, которая аналогична уже развитой теории МС с  $|Q|=1$  [6]. В частности, найдены приближенные аналитические выражения, описывающие зависимость энергии и размеров скирмиониума от параметров микроскопического гамильтониана. Дальнейшее обобщение предложенных аналитических параметризаций аксиально-симметричных структур с  $|Q|=0,1$  на случай произвольных значений топологических индексов, позволило провести дальнейшее обобщение развитой аналитической теории энергий и размеров на случай скирмионных мешков.



**Рис. 1.** Пространственная структура полей намагниченности  $\mathbf{m}(\mathbf{r})$  (левые столбцы), а также их проекций  $m_z(\mathbf{r})$  на ось  $z$ , перпендикулярную плоскости  $(x,y)$  (правые столбцы) для 2D магнитных структур с топологическими зарядами (сверху вниз):  $Q = 0$  – скирмиониум;  $Q = 1$ ;  $Q = 2$ . Зависимости были получены путем численной минимизации магнитного функционала с киральным взаимодействием ДМ

В частности, для магнитных мешков с  $Q > 0$  предложена аналитическая параметризация профиля пространственной намагниченности (см. рисунок 2), а также найдены приближенные аналитические формулы, описывающие зависимости энергий и размеров скирмионных мешков от микроскопических параметров системы. Важно отметить, что точные решения уравнений Эйлера-Лагранжа, описывающие профиль МС не были получены даже для простейшего скирмиона с  $|Q| = 1$ . В связи с этим при аналитическом описании свойств скирмионных мешков проводилось сравнение с результатами численного моделирования. Показано, что в пределе скирмионных мешков с тонкой доменной стенкой, предложенные аналитические формулы позволяют дать оценки их энергиям и размерам с точностью, достаточной для решения некоторых физических задач. Например, предложенная аналитическая теория скирмионных мешков может быть использована при моделировании их динамических свойств, анализе их устойчивости по отношению к квантовым флуктуациям, и в поиске майорановских состояний в 2D структурах сверхпроводник / ферромагнетик со скирмионными мешками [7].



**Рис. 2.** Пространственные профили магнитных скирмиона ( $Q=-1$ ), скирмиониума ( $Q=0$ ), а также скирмионных мешков с  $Q=1, 2$ . Верхние две строки – профили, полученные в работе [3] путем численного моделирования при различных параметрах магнитного гамильтониана; нижние две строки – профили, построенные по аналитическим формулам. Черный цвет соответствует  $m_z=1$ , белый цвет –  $m_z = -1$

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки (проект № 20-42-243001), Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (проекты № 20-1-4-25-1, 19-1-1-12-2) и Совета по грантам Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (проект МК-4687.2022.1).

## Литература

1. C. Moreau-Luchaire, C. Moutafis, N. Reyren *et al.* // *Nature Nanotechnology*, V. 11, 444 (2016).
2. G. Yu, P. Upadhyaya, Q. Shao *et al.* // *Nano Letters*, V. 17, 1, 261 (2017).
3. F. N. Rybakov, N. S. Kiselev // *Physical Review B*, V. 99, 064437 (2019).
4. D. Foster, C. Kind, P. J. Ackerman *et al.* // *Nature Physics*, V. 15, 655 (2019).
5. V. M. Kuchkin, K. Chichay, B. Barton-Singer *et al.* // *Physical Review B*, V. 104, 165116 (2021).
6. X. S. Wang, H. Y. Yuan, X. R. Wang // *Communications Physics*, V. 1, 31 (2018).
7. S. Rex, I. V. Gornyi, A. D. Mirlin // *Physical Review B*, V. 100, 064504 (2019).