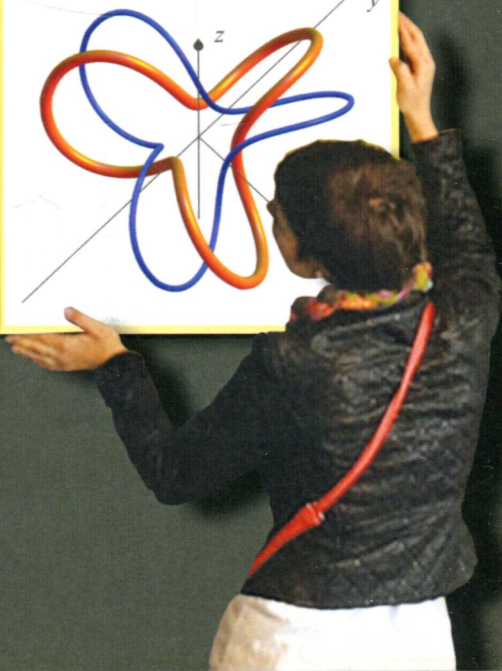
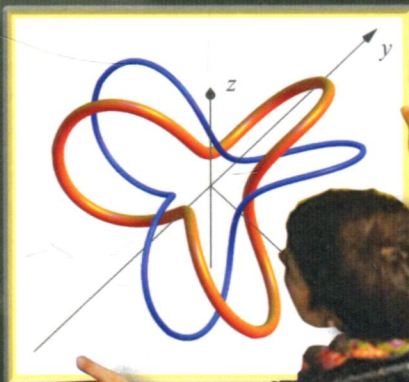
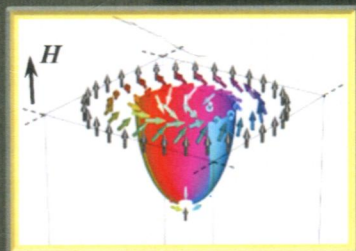


А.Б. Борисов, В.В. Киселев

Двумерные и трехмерные топологические дефекты, солитоны и текстуры в магнетиках



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ им. М.Н. Михеева УрО РАН

А.Б. Борисов, В.В. Киселев

**Двумерные и трехмерные
топологические дефекты,
солитоны и текстуры
в магнетиках**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2022**

УДК 530.182:537.6:517.9

ББК В311:В334

Б 82

РФФИ

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 21-12-00012, не подлежит продаже

Борисов А. Б., Киселев В. В. Двумерные и трехмерные топологические дефекты, солитоны и текстуры в магнетиках. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. — 456 с. — ISBN 978-5-9221-1924-5.

Монография содержит изложение теории двух- и трехмерных солитонов и локализованных структур в магнитных средах. Прямые методы интегрирования, а именно: специальные подстановки, метод Хироты, преобразования Бэклунда, процедура «одевания», используются для построения и анализа пространственно неоднородных решений типичных моделей ферро- и антиферромагнетиков. С их помощью аналитически описаны вихревые солитоны и решетки из солитонных вихрей не только на фоне однородного основного состояния магнитной среды, но и на фоне полосовой доменной структуры или нелинейной спиновой волны. Исследованы кольцевые волны в магнетиках, солитонные состояния вблизи магнитных дисклинаций, проявляющие макроскопическое квантование энергии.

Для решения нелинейных краевых задач, связанных с вычислением полей топологических дефектов, предложены специальные варианты метода обратной задачи рассеяния, развиты новые приемы интегрирования нелинейных уравнений, основанные на методах дифференциальной геометрии. В рамках рассматриваемых моделей это позволило найти решения, описывающие спиральные мезоструктуры обменного происхождения, «мишени» из кольцевых доменов, струнные конфигурации из отрезков доменных стенок, в том числе на фоне полосовой доменной структуры, трехмерные дефекты типа нитевидных геликоидально-вихревых структур и т.д.

Изложены результаты численного моделирования трехмерных солитонов в легкоосном ферромагнетике с ненулевым инвариантом Хопфа и конечной энергией, внутренняя структура которых представляет собой зацепления вихревых колец. Предсказаны и теоретически описаны новые типы магнитных скирмионов в пленках киральных магнетиков.

Монография адресована научным сотрудникам, аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

© ИФМ УрО РАН, 2022

© А. Б. Борисов, В. В. Киселев, 2022

© ФИЗМАТЛИТ, 2022

ISBN 978-5-9221-1924-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Предисловие | 6 |
| Глава 1. Двумерные магнитные структуры и солитоны в ферро- и антиферромагнетиках в обменном приближении | 13 |
| 1.1. Применение метода «одевания» к анализу цилиндрически-симмет- ричных солитонов в магнитных средах | 18 |
| 1.1.1. Основные модели и $U-V$ -пары для них | 18 |
| 1.1.2. Кольцевые волны намагниченности в неупорядоченных фер- ромагнетиках и спиновых стеклах | 23 |
| 1.1.3. Аксиально-симметричные возбуждения и структуры в изо- тропных ферро- и антиферромагнетиках | 29 |
| 1.2. Характерные свойства двумерных вихрей в ферромагнетиках | 38 |
| 1.2.1. Теорема Деррика | 38 |
| 1.2.2. Скирмионы или вихри Белавина–Полякова | 46 |
| 1.2.3. Законы сохранения | 51 |
| 1.2.4. Движение вихря в поле градиента внешнего магнитного поля | 59 |
| 1.3. Комбинированные двумерные скирмион-меронные состояния в на- ночастцах | 68 |
| 1.3.1. Аналитическое описание вихрей и антивихрей в наночас- тицах | 69 |
| 1.3.2. Динамики вихрей и антивихрей в планарных наномгнетиках | 83 |
| 1.4. «Квантованные» нелинейные возбуждения дисклинаций в изотроп- ном антиферромагнетике | 87 |
| 1.5. Спиральные структуры в двумерной модели Гейзенберга | 96 |
| 1.5.1. Конформная инвариантность модели и построение решений . . | 97 |
| 1.5.2. Двумерные магнитные спирали обменного происхождения . . | 101 |
| 1.6. Численное моделирование локализованных структур двумерной гейзенберговской решетки | 110 |
| 1.6.1. Логарифмический источник. ХУ-модель | 112 |
| 1.6.2. Спиральный вихрь | 116 |
| 1.6.3. «Узельные» структуры и пространственный спиральный вихрь в гейзенберговской модели | 118 |
| Глава 2. Солитоноподобные вихри и их упорядоченные структуры в моделях магнетиков, редуцируемых к двумерной модели sine- Gordon | 123 |
| 2.1. Физические приложения двумерной модели sine-Gordon | 123 |
| 2.2. Солитонные вихри в легкоплоскостных магнетиках | 141 |
| 2.2.1. Метод Хироты. Отдельные вихри и цепочки из чередующихся вихрей и антивихрей | 141 |
| 2.2.2. Подстановка Лэмба. Прямоугольные решетки из вихрей и ан- тивихрей | 149 |
| 2.2.3. Применение метода Хироты для построения двумерных дина- мических решений модели | 151 |

| | |
|---|------------|
| 2.3. Солитоноподобные дефекты в несоизмеримых структурах и на фоне волны намагнитченности. | 155 |
| 2.3.1. Двумерная решетка вихрей в соизмеримой фазе | 161 |
| 2.3.2. Дорожка из одинаковых вихрей в несоизмеримой фазе | 163 |
| 2.3.3. Взаимодействие спиновой волны с решеткой магнитных вихрей | 165 |
| 2.3.4. Цепочка из чередующихся вихрей в несоизмеримой структуре | 167 |
| 2.3.5. Цепочка чередующихся вихрей на фоне спиновой волны. | 176 |
| 2.4. Вихри с минимальным топологическим зарядом. Численные расчеты | 177 |
| Глава 3. Обратная задача рассеяния для эллиптического уравнения sine-Gordon с асимптотикой типа кноидальной волны | 182 |
| 3.1. Прямая задача рассеяния. | 186 |
| 3.1.1. Функции Йоста. Операторы преобразования | 186 |
| 3.1.2. Матрица перехода и редукции | 190 |
| 3.1.3. Поведение функций Йоста вблизи особых точек | 194 |
| 3.1.4. Зависимость матрицы рассеяния от переменной x . Связь функций Йоста с решениями уравнения sine-Gordon | 198 |
| 3.2. Дискретный спектр. Классификация солитоноподобных дефектов | 201 |
| 3.3. Дисперсионные соотношения | 206 |
| 3.4. Обратная задача рассеяния | 208 |
| 3.5. Мультисолитонные решения эллиптического уравнения sine-Gordon с асимптотикой типа кноидальной волны | 212 |
| Глава 4. Несолитонные вихревые диполи в несоизмеримых (половых доменных) структурах | 215 |
| 4.1. Трудности метода ОЗР. Основные расчетные формулы и утверждения | 217 |
| 4.1.1. Ограничения на матрицу перехода, налагаемые асимптотическим поведением поля $u(x, y)$ при $ x \rightarrow \infty$ | 220 |
| 4.1.2. Связь недиагональных элементов матрицы перехода с решением линеаризованного уравнения sine-Gordon | 221 |
| 4.2. Решение нелинейной краевой задачи о вихревом диполе с $Q = \pm 1$ | 223 |
| 4.2.1. Ограничения на функции Йоста и матрицу перехода, обусловленные зеркальной симметрией конфигурации | 224 |
| 4.2.2. Ограничения на функцию $\Phi(x, y)$, следующие из анализа прямой и обратной задач рассеяния | 226 |
| 4.2.3. Определение параметра f по асимптотическому поведению поля $u(x, y)$ вблизи центров вихрей | 230 |
| 4.3. Другие типы вихревых диполей в решетке солитонов | 233 |
| 4.4. Анализ асимптотического поведения поля диполя при $r \rightarrow \infty$ | 241 |
| 4.5. Линейная ХУ-модель. Физические приложения | 246 |
| 4.6. Магнитные вихревые диполи в широких джозефсоновских контактах | 250 |
| 4.7. Построение решений двумерной модели sine-Gordon с асимптотикой типа «доменной стенки» при $ y \rightarrow \infty$ | 254 |
| 4.8. Блоховская линия в доменной стенке | 264 |

| | |
|---|-----|
| Глава 5. Двумерные нелинейные дефекты, аналогичные дефектам линейной теории упругости | 272 |
| 5.1. Дефекты и сингулярные источники. Поля дефектов на большом расстоянии от их центров | 281 |
| 5.2. Нелинейные дефекты на фоне однородного основного состояния. Описание методом ОЗР. | 285 |
| 5.2.1. Системы из «дислокационных», «дисклинационных» диполей, «точечных» дефектов | 289 |
| 5.2.2. Дефекты, порожденные локализованными силовыми воздействиями | 293 |
| 5.2.3. Исследование структур типа «мишеней» и спиральных вихревых диполей | 296 |
| 5.3. Дефекты плоскопараллельной доменной структуры | 307 |
| Глава 6. Трехмерные нелинейные возбуждения в магнетиках | 314 |
| 6.1. Трехмерные спиральные структуры в изотропном ферромагнетике | 314 |
| 6.2. Трехмерные антиферромагнитные дефекты и текстуры в модели главного кирального поля на группе $SU(2)$ | 324 |
| 6.2.1. Подстановки, приводящие к упрощению модели. | 326 |
| 6.2.2. Пространственные структуры, связанные с триортогональной системой координат. Дифференциально-геометрический метод интегрирования | 328 |
| 6.2.3. Пространственные структуры, связанные со второй и третьей подстановками | 338 |
| 6.3. Трехмерные локализованные топологические структуры с конечной энергией в ферромагнетике | 344 |
| 6.3.1. Классификация трехмерных топологических солитонов с помощью инварианта Хопфа | 344 |
| 6.3.2. Модель Фаддеева | 353 |
| 6.3.3. Стационарные и динамические прецессионные топологические солитоны в одноосном ферромагнетике. | 357 |
| Глава 7. Локализованные структуры в магнитных системах без центра инверсии | 373 |
| 7.1. Геликоидальные структуры в кубических киральных магнетиках | 373 |
| 7.2. Решетки скирмионов. | 382 |
| 7.3. Трехмерные скирмионы в тонких пленках киральных магнетиков. | 387 |
| 7.4. Фазовая диаграмма для пленки изотропного гелимагнетика | 392 |
| 7.4.1. Стопка спиновых спиралей | 395 |
| 7.5. Киральный боббер (поплавок) | 399 |
| 7.6. Экспериментальное наблюдение кирального боббера | 404 |
| 7.7. Взаимодействие скирмионов. | 412 |
| 7.8. Спиральные структуры в киральных магнетиках | 419 |
| Список литературы | 424 |