

На правах рукописи

Марченко Владимир Иванович

К ТЕОРИИ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

01.04.02 - теоретическая и математическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

Москва 1980

Работа выполнена в Институте физических проблем АН СССР.

Научный руководитель д.ф.-м.н. А.Ф.Андреев

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н. Л.А.Прозорова

к.ф.-м.н. Г.Е.Воловик

Ведущее предприятие Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова,
Москва

Защита диссертации состоится ¹² июня 1980 г. в 10 часов на
заседании специализированного Совета (Д 003.04.01) Института
физических проблем АН СССР

Адрес: П17334, Москва, Воробьевское шоссе, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФП АН СССР

Автореферат разослан /5 мая 1980 г.

Ученый секретарь Совета

д.ф.-м.н.

М.С.Хайкин

Общая характеристика работы

Известные в настоящее время магнетики характеризуются большим разнообразием магнитных структур, но лишь для ферромагнетиков обычно используемый теоретический подход является удовлетворительным. В этом простейшем случае микроскопическая задача о структуре основного состояния и спектре возбуждений может быть точно решена. С другой стороны, макроскопические свойства ферромагнетиков последовательно описываются уравнением Ландау и Лифшица.

Во всех более сложных случаях микроскопическая задача может быть решена лишь для больших (классических) спинов, каковыми они обычно не являются. В такой ситуации особенно важной становится феноменологическая теория типа теории Ландау и Лифшица. Обычно используемая феноменологическая теория подрешеток приводит в ряде случаев к правильным результатам, однако эта теория является модельной. Сложные магнитные структуры рассматриваются в ней как совокупность некоторого числа вставленных друг в друга взаимодействующих ферромагнетиков, каждый из которых описывается уравнением Ландау и Лифшица. Для этого, вообще говоря, нет оснований. Андреев и автор (1, 2) построили феноменологическую теорию, основанную лишь на общих соображениях симметрии и не использующую никаких модельных представлений о состоянии магнетика, т.е. столь же общую теорию, как, например, гидродинамика или теория упругости. Теория применима к любым магнетикам, в которых возникновение магнитной структуры является результатом действия обменных сил, значительно превосходящих релятивистские взаимодействия.

Решение поставленной задачи включает в себя вопрос о классификации магнитных структур. Обычно используется классификация, основанная на введении магнитных моментов подрешеток или магнит-

ных векторов, являющихся их линейными комбинациями. Такое описание, хотя и использует модельное представление о локализованных спинах, дает наглядное и полное описание структуры, достаточное для выяснения макроскопической динамики магнетика и, в частности, его поведения в не слишком сильном (малом по сравнению с обменными полями) магнитном поле. Однако, если иметь в виду эту последнюю задачу, то описание с помощью моментов подрешеток является в большинстве случаев избыточным. Число подрешеток может быть как угодно велико или вообще бесконечно. Между тем, каждая структура может быть охарактеризована не более, чем тремя, причем взаимно перпендикулярными векторами, задание которых достаточно для написания макроскопических динамических уравнений. Их введение не использует представление о локализованных спинах и основано на исследовании симметрии магнетика. Вводимые нами магнитные векторы определяют симметрию обменных сил магнетика как такового, без каких-либо предположений о характере и числе фазовых переходов, отделяющих рассматриваемое состояние от парамагнитного.

Макроскопические динамические свойства, т.е. свойства во временных и пространственных масштабах, значительно превосходящих соответственно обратные обменные частоты и межатомное расстояние, могут быть описаны на основе следующего общего свойства состояний, обладающих магнитной обменной структурой. Возникновение таких состояний всегда сопровождается явлением спонтанного нарушения симметрии обменных взаимодействий — гамильтониан обменных взаимодействий инвариантен относительно любого поворота всех спинов на одинаковый угол, но никакая магнитная структура не является инвариантной относительно всех таких поворотов. Всегда существуют повороты, которые переводят равновесное состояние тела в другое состояние.

Если углы поворота одинаковы для спинов, находящихся в разных пространственных точках, то полученное состояние столь же равновесно, как и исходное. Если углы поворота являются медленно меняющимися функциями координат, то в системе появляется слабая нестационарность. Вместе с малыми пространственными производными углов поворота появляются малые же временные производные. Только те степени свободы магнетика, которые локально сводятся к некоторым поворотам структуры и описываются медленно меняющимися в пространстве и во времени углами поворотов, являются существенными в макроскопическом описании. Такое описание вполне аналогично теории упругости. Роль компонент вектора смещения среди играют углы поворота спинов, роль скорости и деформации — соответственно временные и пространственные производные углов поворота. В отличие от пространственных смещений различные повороты, вообще говоря, не коммутируют между собой. Поэтому уравнения магнитной динамики отличаются от теории упругости тем, что они нелинейны даже при малых скоростях и деформациях.

Вывод динамических уравнений произведен на основе лагранжева формализма. Эффекты, связанные с диссипацией, не учитывались, поэтому полученные уравнения, строго говоря, применимы лишь при нуле температуры. Однако, поскольку уравнения нелинейны, использование стандартной процедуры квантования позволяет исследовать на их основе взаимодействие тепловых спиновых волн и получить динамические уравнения с учетом диссипации.

Магнитные векторы, характеризующие состояние магнетика, могут занимать несколько эквивалентных по симметрии положений относительно кристаллографических осей. Если магнетик обладает спонтанной намагниченностью (ферромагнетик, ферримагнетик, антиферромагнетик со слабым ферромагнетизмом), то в условиях термодинамического рав-

новесия его состояние существенно неоднородно - возникает доменная структура. Конкретный вид этой структуры в существенной степени определяется внешней формой кристалла. Магнетик расслаивается на большое число областей с различным направлением намагниченности так, чтобы энергия создаваемого им магнитного поля была по возможности минимальной.

Интересным вопросом теории является исследование поведения доменных структур во внешнем магнитном поле. В диссертации дано решение 3 этой задачи для ферромагнитной структуры Ландау-Лифшица.

На границе между доменами должно выполняться термодинамическое условие сосуществования фаз, полученное Привороцким. В диссертации приведен последовательный вывод этого условия, а также исследован вопрос о так называемых наклонных границах в одноосных ферромагнетиках - выяснено, какие наклонные границы возможны и определена их энергия 4 .

Существуют магнетики (антиферромагнетики, сверхпроводники), в которых доменная структура возникает лишь при приложении внешнего магнитного поля. В этом случае говорят, что магнетик находится в промежуточном состоянии. Различные фазы отличаются здесь более существенно: в сверхпроводниках это нормальное и сверхпроводящее состояния; в антиферромагнетиках - магнитные векторы в разных фазах находятся в неэквивалентных по симметрии положениях и намагниченности фаз, отличаются не по направлению, а по величине из-за разной восприимчивости. В диссертации предложена структура 4 промежуточного состояния антиферромагнетиков в случае, когда мала одна из релятивистских констант. Эта структура похожа на структуру Ландау-Лифшица в ферромагнетиках. В промежуточном состоянии

сверхпроводников исследованы три случая, когда должны наблюдаться существенные отклонения от теории Ландау. 1. В сильно наклонном поле важными становятся капиллярные эффекты, связанные с поверхностными натяжениями на границе сверхпроводящей и нормальной фаз и на границе сверхпроводник - вакуум 5. 2. Определена слоистая структура в случае, когда ее период сравним и больше толщины образца 5. 3. Предложена полосовая структура промежуточного состояния сверхпроводников в пластинке, толщина которой больше глубины проникновения магнитного поля, но меньше длины когерентности.

В диссертации рассмотрены также особенности магнитных структур в квантовом кристалле. Как показали Андреев и Лифшиц в таких кристаллах возможно существование нулевых вакансий. В гелии-3 это явление тесно взаимосвязано с магнитной структурой спинов. Андреев, Мейерович и автор 6 построили теорию вакансионного ферромагнетика и показали, что экспериментальные данные указывают на то, что в гелии-3 осуществляется это новое состояние.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и списка цитированной литературы.

Введение. Во введении изложена постановка задач, решаемых в диссертации, и кратко сформулированы полученные результаты. Фактически это несколько расширенный текст первой части настоящего автореферата.

Глава I. Симметрия и макроскопическая динамика магнетиков.

В § I вводится понятие обменной симметрии магнетиков и на его основе проводится классификация возможных типов магнитных структур в кристаллах. Каждая структура характеризуется спиновыми векторами, свойства которых полностью определяются кристаллографической

симметрией магнетика. В коллинеарных магнетиках отличен от нуля только один вектор — намагниченность в ферромагнетиках и вектор антиферромагнетизма в антиферромагнетиках. Более сложные неколлинеарные структуры характеризуются двумя или тремя взаимноортогональными векторами. Один из этих векторов может быть намагниченностью, тогда структура является неколлинеарным ферромагнетиком, в противном случае — неколлинеарным антиферромагнетиком.

Исследован вопрос об устойчивости магнитных структур и указана разница между понятием о геликоидальных структурах и понятием о геликоидальной неустойчивости.

Проведено полное исследование всех возможных обменных магнитных структур в объемноцентрированных тетрагональных кристаллах, пространственная группа симметрии которых есть группа C_{4h}^6 .

На нескольких характерных примерах ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Cr_2O_3 , YMnO_3 , UO_2) продемонстрировано решение задачи определения числа и характера преобразования магнитных векторов, соответствующих известной из эксперимента магнитной структуре.

В § 2 производится вывод уравнения динамики коллинеарных антиферромагнетиков. Показано, что зануление продольной восприимчивости при нуле температуры в коллинеарных магнетиках является следствием законов квантовой механики при наличии высокой обменной симметрии.

В § 3 производится вывод уравнений динамики неколлинеарных антиферромагнетиков на двух конкретных примерах YMnO_3 и UO_2 . Приведены выражения для частот магнитного резонанса и спектра спиновых волн.

Глава II. Магнитные фазы твердого гелия-3. В полностью поляризованном состоянии гелия-3 вакансии являются хорошими квазичас-

типами. Если в их спектре имеются отрицательные уровни, то при температуре равной нулю в основном состоянии системы будет определенное количество нулевых вакансий. Эти вакансии представляют собой ферми-газ и они осуществляют в гелии-3 эффективное ферромагнитное обменное взаимодействие, значительно превосходящее обычное обменное взаимодействие антиферромагнитного знака. Такая фаза - вакансионный ферромагнетик, по-видимому, осуществляется в гелии-3 при приложении достаточно большого поля. На это указывает обработка экспериментальных данных при помощи теории молекулярного поля. Отмечено, что антиферромагнитный переход в нулевом поле можно предсказать по поведению межфазной границы при более высокой температуре во внешнем поле. Построена фазовая диаграмма гелия-3 в координатах температура-магнитное поле, на которой представлены области существования парамагнитного состояния, антиферромагнитного и вакансионного ферромагнетика.

Глава III. Ферромагнитные домены. В § 1 приведен вывод граничного условия сосуществования магнитных фаз. Показано, что скачок плотности энергии на границе между доменами непосредственно связан с нелокальным изменением магнитного поля при локальном изменении намагниченности. В § 2 выяснено, какие магнитные фазы могут сосуществовать в одноосном ферромагнетике при произвольном направлении границы между ними. На основе решения этой задачи дано микроскопическое определение положения наклонной границы между доменами и выяснен вопрос о ее поверхностной энергии. В § 3 исследовано поведение доменной структуры Ландау-Лифшица в произвольном магнитном поле, направленном под углом к ферромагнитной пластинке. Эту задачу удается решить точно, в отличие от других структур: Киттеля и разветвленной.

Глава IV. Промежуточное состояние антиферромагнетиков. В этой главе построена теория структуры промежуточного состояния антиферромагнетиков, в которых мала одна из релятивистских констант. Промежуточное состояние в антиферромагнетиках осуществляется в некотором интервале полей, близких к полю опрокидывания. Предложенная структура напоминает структуру Ландау-Лифшица. Определена зависимость периода структуры от внешнего поля.

Глава V. Промежуточное состояние сверхпроводников. В § 1 исследовано поведение промежуточного состояния в сверхпроводящей пластинке во внешнем поле близком по величине к критическому и направленном под малым углом к пластинке. В такой ситуации определяющими становятся капиллярные эффекты, связанные с нулевой энергией границы сверхпроводник-вакуум. Существенно изменяется форма границы между сверхпроводящей и нормальной фазами. Период структуры оказывается большим толщины пластинки. В § 2 рассмотрено поведение структуры промежуточного состояния в полях, близких к критическому, но направленных под произвольным не малым углом к пластинке. Показано, что эта задача может быть решена точно при произвольных соотношениях между периодом и толщиной пластинки. При стремлении поля к критическому, период структуры неограниченно возрастает. Найдена поправка к критическому полю за счет капиллярных сил, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными Дэвиса. В § 3 предложена полосовая структура промежуточного состояния в сверхпроводящей пленке, толщина которой меньше длины когерентности, но больше глубины проникновения магнитного поля. Исследование проведено в рамках теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау. Определены параметры структуры и найдено критическое поле, выше которого структура исчезает и образец находится в чис-

то нормальном состоянии.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. А.Ф.Андреев, В.И.Марченко. Макроскопическая теория спиновых волн. ЖЭТФ, 1976, т.70, с.1522.
2. А.Ф.Андреев, В.И.Марченко. Симметрия и макроскопическая динамика магнетиков. УФН, 1980, т.130, с.39.
3. В.И.Марченко. Доменная структура Ландау-Лифшица в магнитном поле. ЖЭТФ, 1978, т.74, с.1797.
4. В.И.Марченко. К теории магнитных доменов. ЖЭТФ, 1977, т.72, с.2324.
5. В.И.Марченко. К теории промежуточного состояния сверхпроводников. ЖЭТФ, 1976, т.71, с.2194.
6. А.Ф.Андреев, В.И.Марченко, А.Э.Мейерович. Магнитные фазы твердого He^3 . Письма в ЖЭТФ, 1977, т.26, с.40.

Подписано к печати 24/1У-1980 г. Т-00482
Объем 0,5 п. л. Тир. 150 экз. Зак. 266

Оформление производства 3-я типография
издательства "Наука"
Москва К-45, ул. Жданова, 12/1