

Національна академія наук України

Інститут металофізики

На правах рукопису

Львов Віктор Анатоліяович

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ В АНТИФЕРОМАГНЕТИКАХ,
ЗУМОВЛЕНІ СЛАБКИМ ФЕРОМАГНЕТИЗМОМ

Спеціальність 01.04.11 - магнетизм

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Київ - 1995





00755737 (У)

АВ 32.793

дисертацією в рукописі.

Роботу виконано в Інституті металофізики НАН України.

Офіційні опоненти -

1. Доктор фізико-математичних наук, професор Г.А. Мелков.
2. Доктор фізико-математичних наук І.М. Вітебський.
3. Доктор фізико-математичних наук С.І. Денисов.

Провідна організація - Донецький фізико-технічний інститут НАН України, м. Донецьк.

Захист відбудеться " 20 " вересня 1995 р., о 14-я годині, на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 01.75.01 при Інституті металофізики НАН України (252680, м. Київ-142, просп. Вернадського 36)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту металофізики, за просп. Вернадського 36.

Автореферат розіслано " 2 " серпня 1995 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради Д 01.75.01

Д. ф.-м. н., с.н.с.

В.К. Піщак

В.К. Піщак

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

новою структурою. Питання, що стосуються трикутного спінового впорядкування, є зараз вельми популярними. Проте, більшість публікація на цю тему або стосується гексагональних квазідвовимірних кристалів на кшталт $CsCoCl_3$, або містить досить абстрактний аналіз гамільтоніанів, які описують суто двовимірну ситуацію. Теоретичних праць, присвячених магнетизму кубічних перовскитів зовсім мало (Ю.А. Ізюмов, В.С. Найш, М.Ю. Скрабін, В.М. Сиром'ятников 1981; Ю.А. Ізюмов, С.В. Петров 1983) і жодна з них не містить аналізу властивостей, котрі зумовлені взаємодією Дзялошинського та виявляють себе у низці експериментів (Bertaut E.F., Fruchart D., Madar R. et al., 1971; Fruchart D., 1976; Fruchart D., Bertaut E.F., 1978).

У дисертації розглянуто також спін-переорієнтаційні фазові переходи в одному з "базових" високотемпературних надпровідників - La_2CuO_4 . Актуальність дослідження цієї сполуки є загальновідомою і тому не потребує додаткового обґрунтування. Слід відзначити лише те, що квазідвовимірна чотирьохпідгратова спінова структура цього антиферомагнетика робить його цікавим не лише у зв'язку з проблемою високотемпературної надпровідності.

Врешті, дисертація має відношення також до нелінійних динамічних ефектів, оскільки тут докладно проаналізовано доданок взаємодії Дзялошинського до нелінійних диференціальних рівнянь, що описують рух доменних стінок в антиферомагнетиках з двома підгратами та кристалах з трикутним спіновим впорядкуванням.

Мета роботи. Головне завдання досліджень, які було здійснено, полягало в послідовному теоретичному аналізі обумовлених взаємодією Дзялошинського фазових переходів у неколінеарних антиферомагнітних структурах, а також, у вивченні впливу цих переходів на статичні та динамічні магнітні властивості монокристалічних зразків.

Наукова новизна. У дисертації вперше вивчено зумовлені взаємодією Дзялошинського фазові переходи в обмінно неколінеарних антиферомагнітних структурах та просторово неоднорідних неколінеарних станах, що існують у стінках магнітних доменів. При цьому вперше сформульовано та вирішено проблему класифікації доменних стінок за симетрією, і таким чином, формально строго визначено поняття фазового переходу від одного типу стінки до іншого. Вперше показано необхідність врахування тетрагональної анізотропії міжшарового походження, коли йдеться про магнітні властивості купрату лантану. Отримано такі нові результати.

1. Побудовано магнітну фазову діаграму кубічних перовскитів з трикутним спіновим впорядкуванням та оцінено величину сталей, які характеризують магнітну підсистему цих кристалів.

2. Запропоновано теоретичне пояснення аномалія магнітних властивостей кристала Mn_3AgN з ряду кубічних перовскитів.

3. Розраховано спектр спінових хвиль в кубічних перовскитах та оцінено порядок величини частот магнітного резонансу.

4. Знайдено нові кутові фази антиферромагнетиків зі структурою La_2CuO_4 та побудовано фазову діаграму таких антиферромагнетиків у магнітному полі, яке прикладене перпендикулярно до атомних $Cu - O$ шарів.

5. Визначено магнітні класи, що описують симетрію просторово неоднорідного магнітовпорядкованого стану в доменних стінках, знайдено структуру стінок, які належать до різних класів.

6. Побудовано загальну теорію неоднорідного магнітоелектричного ефекту та визначено відмінні від нуля складові електричної поларизації доменних стінок приналежних до різних магнітних класів.

7. Розраховано характеристики спін-переорієнтаційних фазових переходів у стінках, що рухаються.

8. Вищайдено нові механізми вимушеного руху доменних стінок в антиферромагнетиках.

Теоретична та практична цінність роботи. Цінність результатів першої глави полягає в тому, що визначено кількісні значення параметрів, що характеризують магнітну підсистему кубічних кристалів з трикутним упорядкуванням спінів. Наведено діапазон частот для здійснення магніторезонансних експериментів у таких антиферромагнетиках, оцінено порядок величини сталих магнітострикції та складових тензора п'єзомагнітних коефіцієнтів.

У другій главі отримано результати, що свідчать про перспективність дослідження магнітної фазової діаграми La_2CuO_4 за допомогою акустичних методів. Поряд з цим, друга

глава містить дані, які можуть бути використані (і вже частково були використані, дивися нижче) у суто магнітних експериментах.

Значення результатів третьої та четвертої глави полягає в тому, що вони дали змогу строго визначити поняття фазового переходу другого роду у стінках магнітних доменів, вперше дослідити фазові переходи у стінках, що рухаються, та завбачити новий ефект, який було названо неоднорідним магнітоелектричним ефектом.

Використання результатів. Головні висновки та результати дисертації було використано в ході поглибленого дослідження фазової діаграми купрату лантану (А.Д. Балаєв, А.Б. Биков, Л.М. Дем'янець та ін., 1991; В.Г. Бар'яхтар, Б.О. Іванов, Ю.М. Міцай та ін., 1991), під час вивчення фазових переходів у доменних стінках (О.М. Богданов, В.Т. Телеца, П.П. Шатський та ін., 1988; М.А. Шамсутдінов, М.М. Фарзтдінов, А.А. Халфіна, 1989), для класифікації за симетрією доменних стінок з блохівськими лініями (В.Г. Бар'яхтар, О.Б. Кротенко, Д.А. Яблонський, 1988), під час вивчення статичних та динамічних проявів неоднорідного магнітоелектричного ефекту (Є.В. Синицин, М.В. Баранов, П.Є. Маркін 1985; Є.П. Стефановський, П.П. Шатський, Д.А. Яблонський, 1988, 1989; С.І. Денисов, 1989).

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі узагальнено результати теоретичних розрахунків, що проведені безпосередньо автором (глави 2 - 4, частина матеріалу глави I), або

спіробітниками під його керівництвом (решта матеріалу глави I). В останньому разі автор формулював ідеї та завдання досліджень, аналізував та узагальнював результати, які було одержано. В дисертації немає ідей або результатів, які не належать її автору.

Публікації за темою дисертації. Матеріали дисертації опубліковано у 28-ох друкованих працях, серед яких 17 статей, 6 препринтів та 5 тез представницьких конференцій (перелік публікацій наведено наприкінці автореферату).

Апробація роботи. Основні результати було викладено у доповідях та обговорено на таких конференціях та семінарах.

XVI Всесоюзна конференція з фізики магнітних явищ, Тула, 1983;

XVII Всесоюзна конференція з фізики магнітних явищ, Донецьк, 1985;

III міжнародний семінар "Теоретико групові методи в фізиці", Юмала, 1988;

XVIII Всесоюзна конференція з фізики магнітних явищ, Калінін, 1988;

Всесоюзний семінар зі спінових хвиль, Ленінград, 1988;

II Всесоюзна конференція з ВНП, Київ, 1989;

XIX Всесоюзна конференція з фізики магнітних явищ, Ташкент, 1991;

INTERMAG-93, Stockholm, 1993.

Крім того, результати роботи неодноразово доповідалися на традиційних школах симпозіумах з теоретичної фізи-

ли "Коуровка" (Росія), на об'єднаному семінарі теоретичних відділів у Донецькому фізико-технічному Інституті НАНУ, на семінарі відділу ОІ у НВО "Монокристалреактив", (м. Харків), на семінарах відділів Теоретичної фізики та Теорії неідеальних кристалів в Інституті металофізики НАНУ (м. Київ).

Вчасне та повне опублікування результатів сприяло їх знаності серед фахівців. Згідно довідника "Science Citation Index" у період з 1984 р. до 1992 р., включно, статті в яких опубліковано матеріали дисертації було 41 раз процитовано у роботах, що виконані без участі автора дисертації.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація містить 263 сторінки машинописного тексту, 19 малюнків та 13 таблиць. Вона складається із вступу, чотирьох глав, закінчення та списку літератури (зі 178-ми найменувань).

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність теми, задано загальну характеристику роботи, стисло викладено її зміст та сформульовано основні положення, що винесені на захист. Тут також надано найважливіші відомості про явище слабкого феромагнетизму антиферомагнетиків і роль взаємодії Дзялошинського у формуванні магнітних властивостей кристалів, симетрія яких дозволяє існування цієї взаємодії. Сформульовано принципи феноменологічного підходу до вивчення зазначеного вище явища.

У першій главі побудовано феноменологічну теорію спін-переорієнтаційних фазових переходів у кристалах Mn_2Mn

($M = Ag, Ga, Ni, Sn, Zn$) приналежних до сімейства кубічних перовскитів (просторова група $Rm3m$). Вивчено фізичні явища, пов'язані з такими переходами.

В розділі 1.1 описано магнітну структуру кристалів Mn_3MN , яка виникає внаслідок спінового впорядкування підсистеми атомів марганця, розташованих у центрах граней кубічної елементарної комірки (тобто на одну кристалічну комірку припадає 3 атома Mn). Зроблено огляд експериментальних даних з магнітних властивостей кубічних перовскитів та вказано на наукові праці в яких обґрунтовано застосовність до цих кристалів моделі локалізованих спінів. У наступних розділах цю модель використано для феноменологічного розрахунку статичних та високочастотних властивостей антиферромагнетиків Mn_3MN . Розрахунку передують теоретико-груповий аналіз, що забезпечує адекватний вибір феноменологічної моделі та повноту розгляду проблеми.

В розділі 1.2 проаналізовано обмінну (ізотропну) частину спін-спінової та спін-ґратової взаємодії. Доведено, що аналізуючи переходи між фазами з різною обмінною енергією необхідно враховувати біквадратичний обмін (В.Г. Бар'яхтар, О.В. Гомонай, Р.А. Львов, 1985), тобто використовувати такий вираз для густини магнітної енергії:

$$w_{ex} = 9M_0^2 (Jm^2/2 - D(l_1 m)^2 + (l_2 m)^2)/2 + D'm^4/4, \quad (1)$$

де J - константа що визначає енергію парної обмінної взаємодії, D, D' - константи біквадратичного обміну, m, l_1 та l_2 - вектори феро- та антиферромагнетизму, котрі є нормованими ($m^2 + l_1^2 + l_2^2 = 1$) лінійними комбінаціями намагніченостей M_x, M_y, M_z .

M_3 трьох магнітних підгруп кристала (розглядаються переходи, які не супроводжуються мультиплікацією елементарної комірки), $M_0 = |M_{1-3}|$. Вектор феромагнетизму m перетворюється за тототним незвідним зображенням групи переставлень магнітних атомів, вектори антиферомагнетизму $l_{1,2}$ утворюють двовимірне незвідне зображення цієї групи.

У подальшому, шляхом аналізу обмінної симетрії знайдено всі різні обмінні фази зі співпадаючими кристалічною та магнітною комірками. За допомогою виразу (1) знайдено межі стійкості обмінних фаз в області значень параметрів J , D , D' та визначено можливі послідовності фазових переходів другого роду між цими фазами. Надалі найбільш важливою є можливість фазового переходу з трикутної антиферомагнітної (АФМ) фази з кутом 120° між підгратами до некопланарної феромагнітної фази (ФІМ н.к.), в якій напрям підгруп можна собі уявити як напрям ребер рівнобічної піраміди.

У даному розділі вивчено також п'єземагнітний ефект, який у кристалах Mn_3MN повинен мати переважно обмінну природу. З використанням експериментальних даних щодо магнітострикції кристалів Mn_3MN надано сідку величини обмінних п'єземагнітних модулів. Отримана величина на один - два порядки перевищує значення, які є типовими для п'єземагнітних коефіцієнтів спин-орбітальної природи. Доведено, що структура п'єземагнітного тензора повинна змінюватися у перебігу спінової переорієнтації, яку експериментально виявлено (D. Fruchart, E.F. Bertaut, R. Madar et al., 1971, 1974, 1978) в низці антиферомагнетиків з сімейства Mn_3MN .

У розділі 1.3 побудовано фазову діаграму антиферромагнетиків Mn_3MN на площині змінних магнітне поле - температура та вивчено аномалії в поведінці намагніченості, що супроводжують фазові переходи.

Згідно з даними нейтронної дифракції, в перовскитах з $M = Ag, Ga, Ni, Sn, Zn$, залежно від металу M та температури T може бути стабільною одна з трьох магнітних фаз різної симетрії. В антиферромагнітній фазі 1 магнітні підграти зорієнтовані вздовж кристалографічних напрямків $[1\bar{1}0]$, $[\bar{1}01]$, та $[01\bar{1}]$, під кутом 120° одні до одних. При температурі переходу з фази 1 у фазу 2 починається спільний поворот підграт у площині (111) , тобто навкруги осі симетрії третього порядку $z \parallel [111]$. Поворот завершується при температурі переходу до фази 3, коли кут повороту $\theta_0(T)$ сягає значення 90° .

Напрямок підграт відносно осей кристала визначається умовами мінімальності анізотропних доданків в енергії магнітної підсистеми кубічних перовскитів. Математичний вигляд цих доданків (який є абсолютно незвичайним для антиферромагнетиків з кубічними ґратами) визначається тим, що компоненти векторів m , l_1 та l_2 утворюють дев'ятивимірне звідне зображення точкової групи кристала $m3m$, яке двічі містить у собі аксіально-векторне незвідне зображення F_{2g} та один раз - тривимірне незвідне зображення F_{1g} . Таким чином, з цих компонент можна утворити дві незалежні трикомпонентні величини (m, q) , що трансформуються як проєкції аксіального вектора, та одну величину (p) , що трансформується за допомогою матриць зображення F_{1g} . Утворення з цих величин інваріантних

розклад енергії магнітної анізотропії має такий вигляд (Ю.О. Ізюмов, В.С. Найш та ін., 1981):

$$w_A = 9M_0^2 \{ a_1 p^2 / 2 + a_2 q^2 / 2 + b_1 p^4 / 4 + b_2 (pq)^2 / 2 + b_3 p^2 q^2 / 2 \}, \quad (2)$$

де $a_{1,2}$ та b_{1-3} - сталі анізотропії 2-го та 4-го порядку.

У дисертації доведено, що побудова магнітної фазової діаграми не є можливою, якщо не врахувати інваріант (mq) , не розглянутий іншими авторами. Він відповідає енергії взаємодії Дзялошинського

$$w_D = 9M_0^2 d (mq), \quad (3)$$

де d - константа Дзялошинського.

Параметром порядку фазового переходу з фази I до фази 2 є величина $q_z = -\sin\theta$, яка сягає максимального значення $q_z = 1$ у точці переходу до фази 3. Звідси випливає, що вищезгадана спінова переорієнтація може бути ініційована не лише зміною температури кристала, а й дією магнітного поля, якщо воно прикладене вздовж осі третього порядку z . Таке поле дає від'ємний внесок до енергії (3), який дорівнює за порядком величини $-(d/J)H_z(\sin\theta - \sin\theta_0)$, $\theta = \theta_0(T) + \theta(H)$. Фаза I може існувати тільки в нульовому пслі, а перехід до фази 3 здійснюється на лінії

$$H = H_{zC}(T) = 3M_0(Jb/d)[1 - a(T)/b], \quad (4)$$

де $a(T)$ - перенормований величиною d^2/J параметр анізотропії, який зрівнюється з нулем при температурі $T = T_1$ переходу з фази I до фази 2 та сягає значення $a = b$ в точці $T = T_2$ температурного переходу в фазу 3. Отже, величина поля фазового переходу (4) зменшується коли $T > T_2$ й може бути пере-

міщена у зручну для експериментів область полів шляхом зміни температури зразка. Перехід супроводжується стрибком магнітної сприйнятливості, причому $(\Delta\chi / \chi) \sim d^2 / Jb$.

Порівняння теоретичної та експериментальної залежності феромагнітного моменту кристала Mn_3NiN від температури надало змогу отримати оцінки $3M_0 b \sim 1$ кЕ, $3M_0 d \sim 30$ кЕ, $3M_0 J \sim 10^4$ кЕ.

На ґрунті теоретико-групового підходу, який було розроблено в роботі [2], доведено, що спів-переорієнтаційні переходи другого роду є можливими також в тому разі, якщо поле прикладене вздовж осі симетрії 2-го або 4-го порядку. У першому випадку поле фазового переходу визначається виразом на кшталт (4), у другому випадку перехід здійснюється у сильному полі порядку обмінного поля $3M_0 J$.

У розділі I.4 запропоновано й обґрунтовано пояснення аномалій магнітних властивостей перовскиту Mn_3AgN у районі температури переходу з фази I до фази 2.

У цьому кристалі спостерігається надзвичайно висока величина феромагнітного моменту $m \sim 0,1$ (пор. з $m \sim 10^{-3}$ для Mn_3NiN). Для декількох значень температури виміряно суттєво нелінійні залежності $m(H)$, які свідчать, між іншим, про немонотонну зміну початкової магнітної сприйнятливості $\chi(0, T)$ в широкому довір'ї температури фазового переходу та незвичайно великі значення функції $\chi(H, T)$.

Ці експериментальні факти дали змогу припустити, що у випадку Mn_3AgN спінова переорієнтація зумовлена температурною залежністю обмінного параметру $J(T)$, а не сталої анізо-

тропії, як це притаманно іншим представникам ряду. Інакше кажучи, тут ми маємо справу з обмінним переходом АФМ + ФІМ н.к., який розглянуто у розділі 1.2. З метою остаточного обґрунтування цього припущення був проведений кількісний розрахунок залежностей $m(H)$ для чотирьох різних значень температури. Підгонку параметрів було проведено при одному значенні температури. Для всіх температур була досягнена пристайність теоретичних та експериментальних кривих за цілком прийнятних значень $3M_0J = [114(T - T_1)/T_1]$ кЕ, $3M_0D = 3$ оКЕ, $3M_0d = 37$ кЕ, $3M_0a = 4,5$ кЕ, $3M_0b = 3$ кЕ. Внутрішні поля Дзялошинського та анізотропії виявилися близькими до оціночних величин отриманих у попередньому розділі для Mn_3NiN .

У розділах 1.5 - 1.6 побудовано магнітний лагранжіан кубічних перовскитів і за його допомогою вивчено спектр спінових хвиль, який складається з частоти $\omega_s(k)$ коливань спінів у площині (111) та двох частот $\omega_+(k)$, $\omega_-(k)$, що відповідають коливанням з виходом із цієї площини. Показано, що взаємодія Дзялошинського якісно впливає на структуру спектра, а саме, розщеплює частоти $\omega_+(0)$ и $\omega_-(0)$ у фазах зі слабким феромагнетизмом (в антиферромагнітній фазі ці частоти є виродженими).

Частота $\omega_s(0)$ занулюється при температурах T_1 і T_2 фазових переходів між фазами 1 - 3. Включення магнітного поля призводить до зникнення температурного фазового переходу з фази 1 до фази 2 й відповідного нуля функції $\omega_s(0)$.

Розділ 1.7 містить в собі обговорення результатів першої глави. У цьому розділі продемонстровано також,

яким чином досвід набутий під час вивчення магнітних фазових переходів з багатокомпонентним параметром порядку стає у пригоді для розгляду так званих термопружних фазових перетворень у металевих сплавах.

У другій главі вивчено фазові переходи у чотирьохпідгратовому антиферромагнетикі зі структурою Ls_2CuO_4 (просторова група $Rmcb$). Побудовано фазову $n - T$ діаграму в поперечному відносно $Cu - O$ шарів полі, вивчено особливості поглинання звуку поблизу лінії цієї діаграми. Доведено, що спін-переорієнтаційні фазові переходи в структурі купрату лантану та магнітні властивості цього кристала слід розглядати з врахуванням магнітної анізотропії, яка обумовлена взаємодією спінів приналежних до різних мідно-кисневих шарів.

Удалені від температури магнітного впорядкування спінову підсистему купрату лантану доцільно описувати за допомогою внутрішньопідгратових векторів антиферромагнетизму $\mathbf{l}_1 = (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)/2s$ і $\mathbf{l}_2 = (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4)/2s$, де спіни $\mathbf{s}_{1,2}$ є локалізованими на сусідніх атомах міді приналежних до одного атомного шару, а спіни $\mathbf{s}_{3,4}$ - до іншого шару, що є найближчим до першого.

У перших роботах з магнітних властивостей купрату лантану поряд з внутрішньшаровими спіновими взаємодіями було враховано також і міжшаровий обмін, якому відповідає доданок $2M_0 h'_e (\mathbf{l}_1 \mathbf{l}_2)$ у виразі для магнітної енергії. У дисертації вперше враховано специфічний доданок $2M_0 h'_A (\mathbf{l}_{1x} \mathbf{l}_{2y} - \mathbf{l}_{1y} \mathbf{l}_{2x})$. Сталі h'_e та h'_A є за своїм фізичним змістом внутрішніми полями міжшарового обміну та анізотропії (відповідно), осі x та

У спрямовано вздовж осей симетрії 2-го порядку, які лежать у площині мідно-кисневих шарів. Поле міжшарового обміну є малим, мірою малості ромбічного викривлення кристалічної комірки, а тому, за деякими даними (наприклад, В.Д. Дорошев, В.М. Криворучко, М.М. Савоста та ін., 1992) поле H_A може перевищувати його за величиною.

У розділі 2.1 в рамках розробленого теоретико-групового підходу [2] було знайдено можливі симетричні магнітні фази купрату лантану в полі H_z . Після цього використано фізичні міркування, які доводять, що розгляд може бути обмежений чотирма з тих фаз (надалі позначатимемо їх як фази $\Phi_1 - \Phi_4$). Зазначені фази можуть бути охарактеризовані кутами $\theta_{1,2}$ між напрямком векторів $l_{1,2}$ та віссю Y. Φ_1 : $\theta_1 = \theta_2 = 0$; Φ_2 : $\theta_1 = -\theta_2 \neq 0, \pi$; Φ_3 : $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$; Φ_4 : $\theta_1 = \theta_2 \neq 0, \pi$. Фазу Φ_1 - високопольову, було розглянуто вже в перших публікаціях, що стосувалися магнітних властивостей купрату лантану, Φ_3 відповідає основному станові системи у нульовому магнітному полі, фази Φ_2 та Φ_4 вперше розглянуто в дисертації.

У розділах 2.2 - 2.3 проведено феноменологічний розгляд спин-переорієнтаційних фазових переходів у структурі купрату лантану. Показано, що окрім вивченого рядом авторів переходу $\Phi_3 \rightarrow \Phi_1$ поле H_z може викликати переходи $\Phi_3 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_1$ або $\Phi_3 \rightarrow \Phi_4 \rightarrow \Phi_1$. Зважаючи на такі переходи, надано можливе пояснення трьох зламів на експериментальній залежності $m(H_z)$ у зразках легованих стронцієм (F. Zuo, X.D. Gaines, A.J. Epstein, 1989). Обов'язковою умовою існування фази Φ_2 є

LIBRARY
 INSTITUTE FOR
 PHYSICS

справдження нерівності $h'_e > h'_A$. У випадку оберненої нерівності енергетично вигідною є фаза Φ_4 . Оскільки ця фаза стабілізується саме полем h'_A його врахування є необхідним для побудови магнітної фазової діаграми купрату лантану. Значення зовнішнього магнітного поля, які відповідають лініям лабільності фаз $\Phi_1 - \Phi_4$ та лініям фазових переходів між ними, є пропорційними відношенню H_e/H_D внутрішніх полів, що характеризують внутрішньошаровий обмін та взаємодію Дзялошинського (відповідно). Отже, якщо симетрія купрату лантану не припускає з б слабого феромагнетизму ($H_D \neq 0$), зовнішнє поле не призводить б до фазових переходів між зазначеними фазами.

У дисертації показано, що на $H_z - T$ діаграмі купрату лантану можуть бути присутніми як трикритична так і тетракритичні особливі точки, розташовані поблизу точки Нееля $(0, T_N)$. Знайдено координати цих точок.

У розділі 2.4 вивчено особливості поглинання звуку поблизу ліній $H_z - T$ діаграми. Актуальність цієї задачі визначається, між іншим, тим, що магнітнорезонансні вимірювання в купраті лантану наражаються на певні труднощі а тому, їх висновки поки що не мають однозначного тлумачення. Отже, необхідно й надалі шукати динамічні ефекти, які були б чуттєвими до магнітного стану кристала. Поглинання звуку є одним з таких ефектів.

У роботі отримано вираз для магнітопружної енергії антиферомагнетика La_2CuO_4 і проаналізовано систему рівнянь, яка складається з рівняння Ландау - Халатнікова для магнітного параметра порядку та рівняння, що описує розповсюдження

звуку в кристалі. Завдяки цьому, зроблено такі висновки. Поблизу всіх трьох переходів $\Phi_1 + \Phi_2$, $\Phi_1 + \Phi_3$ і $\Phi_1 + \Phi_4$ виникає пік поглинання повздовжнього звуку, його інтенсивність істотно підвищується при наближенні до трикритичної особливої точки. Пік поглинання поперечного звуку повинен спостерігатися лише на лінії переходів $\Phi_1 + \Phi_4$, оскільки ці переходи належать за симетрією класифікацією до дійсно фероеластичних, тоді як переходи $\Phi_1 + \Phi_2$ та $\Phi_1 + \Phi_3$ не є дійсно фероеластичними.

Таким чином, акустичні вимірювання можуть бути корисними, по-перше, для уточнення координат і визначення типу особливої точки, що існує на експериментальній діаграмі купрату лантану, а по-друге, для перевірки припущення про існування фази Φ_2 або Φ_4 на магнітній діаграмі зразків легованих стронцієм.

У розділі 2.5 надано загальний погляд на температурну поведінку магнітної сприйнятливості двох- та багатопіддратових антиферомагнетиків, симетрія яких припускає існування слабого феромагнетизму.

У розділі 2.6 обговорено результати другої глави.

У третій главі вперше поставлено і розв'язано задачу симетрією класифікації макроскопічно широких стінок, що відокремлюють магнітні домени. Це надало змогу формально строго визначити поняття фазового переходу другого роду, який відбувається завдяки переорієнтації спінів у домінній стінці (ДС). Таким чином, закладено основу для наступного

розгляду обумовлених взаємодією Дзялошинського фазових переходів у ДС.

У розділі 3.1 введено поняття магнітної групи доменної стінки, як сукупності всіх операцій Шубніковської групи парамагнітної фази кристала таких, що не змінюють просторового розташування спінових моментів атомів у кристалі, поділеному на два магнітних домена. Показано, що стінки макроскопічної ширини можуть бути описані за допомогою магнітних класів доменних стінок, які одержуємо з означених вище груп шляхом отожднювання всіх елементарних трансляцій з одиничним елементом групи.

Якщо радіус кривизни доменної стінки набагато перевищує її ширину, стінку можна поділити на майже плоскі ділянки. Отже, доцільно вивчити симетрію плоских ДС. Для цього зручно ввести ортонормований базис $\vec{n}, \vec{\tau}_1, \vec{\tau}_2$ (\vec{n} - нормаль до площини стінки, $\vec{\tau}_1, \vec{\tau}_2$ лежать у цій площині). Магнітні класи ДС відрізняються від звичайних магнітних класів з тієї причини, що вони характеризуються не лише тим, які операції симетрії входять до їх складу, а ще й тим, як зорієнтовані відносно площини стінки кристалографічні осі та площини відповідні кожній з операцій. При цьому всі операції \hat{g} магнітних класів ДС можуть бути віднесені до одного з двох типів - $\hat{g}^{(1)}$ або $\hat{g}^{(2)}$, визначенням яких є рівності $\hat{g}^{(1)}\vec{n} = \vec{n}$ та $\hat{g}^{(2)}\vec{n} = -\vec{n}$.

Якщо ві. мо. до якої класу належить ДС, неважко дати якісну характеристику координатної залежності векторів феро- та антиферомагнетизму в області простору, яку займає стінка. Нехай, наприклад, магнітний клас поряд з одиничним елементом

містить в собі таку операцію другого типу, яка змінює знак α -ї компоненти вектора антиферомагнетизму: $\hat{g}^{(2)} I_{\alpha}(\xi) = -I_{\alpha}(-\xi)$, де ξ - координата вздовж \hat{n} . З іншого боку, за означенням магнітної групи ДС $\hat{g}^{(2)} I_{\alpha}(\xi) = +I_{\alpha}(\xi)$. Отже, для стінок, що приналежні до цього класу, координатна залежність α -ї компоненти вектора антиферомагнетизму має бути антисиметричною: $I_{\alpha}(\xi) = -I_{\alpha}(-\xi)$.

У цьому розділі дисертації побудовано всі можливі класи симетрії доменних стінок в феромагнетиках та охарактеризовано залежності $m_{\alpha}(\xi)$ у стінках, що приналежні до кожного з класів. Доведено, що повна кількість магнітних класів ДС у феромагнетиках дорівнює 42-м.

У розділі 3.2 надано повну симетріану класифікацію доменних стінок у двохпідгратових антиферомагнетиках. Доведено, що для кристалів, у яких магнітна комірка збігається з хімічною, кількість магнітних класів дорівнює 134-м. З'ясовано, що в доменній стінці феромагнітний момент може існувати не лише завдяки взаємодії Дзялошинського. Коли слабкий феромагнетизм заборонений симетрією кристала, взаємодія, що обумовлює величину $m(\xi)$, описується інваріантами на кшталт $(m \text{ rot} l)$ у виразі для енергії магнітної підсистеми кристала.

У розділі 3.3 введено поняття кінематичного класу доменної стінки. Кінематичний клас є підгрупою магнітного класу доменної стінки, яка містить в собі всі операції, що не змінюють напрямку вектора $v = v_n$. За фізичним змістом цей вектор є швидкістю поступового руху доменної стінки.

За допомогою кінематичних класів вдалося охарактеризувати ті зміни вигляду функцій $m(\xi)$ та $l(\xi)$, до яких спричиняє рух стінки.

У випадку феромагнетиків теоретико-груповий аналіз привів, серед іншого, до відомого результату Уокера, згідно з яким рух стінок Блоха та Нееля спричиняє до виходу вектора $m(\xi)$ з тієї площини, у якій він обертався до початку руху стінки, причому кінематична складова вектора $m(\xi)$ є симетричною відносно заміни $\xi \rightarrow -\xi$.

У випадку антиферомагнетиків вперше виділено 4 типи кінематичної поведінки ДС, а саме I) рух без зміни симетрії; II) рух, що супроводжується втратою геометричного центру (при такій поведінці у стінці, що рухається, кожна компонента магнітних векторів має як симетричну, так і антисиметричну частину, а це не дозволяє означити поняття центральної площини стінки); III) рух, що супроводжується виходом вектора $l(\xi)$ із площини розвороту з виникненням антисиметричної відносно заміни $\xi \rightarrow -\xi$ кінематичної компоненти; IV) рух, що супроводжується виходом вектора $l(\xi)$ із площини розвороту з виникненням симетричної відносно вищезазначеної заміни кінематичної складової.

У розділі 3.4 для демонстрації можливості застосування формалізму магнітних класів до магнетиків з більш ніж двома підратами вивчено симетрію, структуру та кінематичну поведінку стінок, що відокремлюють домени слабоферомагнітної фази у кубічних перовскитах з трикутним спіновим впорядкуванням.

У розділі 3.5 у загальному вигляді побудовано феноменологічну теорію неоднорідного магнітоелектричного ефекту, суть якого полягає в тому, що в області просторово неоднорідного магнітного впорядкування виникає електрична поляризація кристала $P(\mathbf{r})$. Як один з можливих напрямків застосування теорії, розглянуто поляризацію доменних стінок. Задачу розв'язано як у межах феноменологічного підходу, так і за допомогою магнітних класів ДС. Спостережено повну взаємодповідність результатів двох підходів.

У розділі 3.6 обговорено результати третьої глави.

У четвертій главі вперше розглянуто фазові переходи, які пов'язані зі зміною симетрії доменних стінок, що рухаються.

У розділах 4.1 - 4.3 проаналізовано рівняння, що описують структуру доменних стінок, які рухаються у одній з трьох зовсім різних фізичних систем, а саме, в антиферомагнетиках зі структурою ортоферитів, у кубічних кристалах з трикутним спінним впорядкуванням та, врешті, у двошпідгратових антиферомагнетиках без взаємодії Дзялошинського. На прикладі цих систем вивчено всі чотири типи кінематичної поведінки доменних стінок, які було передбачено у попередній главі на основі теоретико-групових міркувань.

Доведено, що у випадку ортоферитів (кристалографічний клас $m3m$) висновки, що випливають з аналізу динамічних рівнянь, набувають цілкомитої узгодженості з результатами теоретико-групового аналізу, лише якщо врахувати в енергії спі-

нової підсистеми інваріант $d(m_x I_z + m_z I_x)$, де координати x , z відкладено вздовж осей симетрії кристала. Інші автори, які вивчали рух ДС в ортоферитах, цей інваріант відкидали, а тому, доходили висновку, що рух ДС не спричиняє до якісних змін у структурі ДС. У дисертації доведено, що такий результат треба вважати суто наближеним.

Адекватний розгляд кінематичної поведінки ДС у кубічних перовскитах потребує врахування інваріанту (3).

Щодо антиферомagnetиків, симетрія яких забороняє слабкий феромагнетизм, їх треба розглядати враховуючи інваріанти на кшталт $(m \text{ rot} 1)$.

Спінові взаємодії, що відповідають інваріантам, про які йшлося, не лише призводять до пониження симетрії ДС у момент початку руху, а й до фазових переходів при певних критичних значеннях швидкості стінки $v = v_*$. Є можливими переходи не лише другого, а й першого роду. Переходи другого роду супроводжуються підвищенням симетрії ДС при $v \geq v_*$. Фазові переходи першого роду можуть відбуватися як зі зміною симетрії, так і у вигляді ізоморфних переходів. В роботі знайдено критичні значення швидкості ДС в ортоферитах. Для кубічних перовскитів та кристалів, симетрія яких припускає інваріант $(m \text{ rot} 1)$ вдалося лише оцінити різницю $c - v_*$ за порядком величини (c є за фізичним змістом, по-перше, швидкістю спінових хвиль, а по-друге, найбільшою принципово можливою швидкістю ДС).

У розділі 4.4 запропоновано фізичні механізми, які дозволяють здійснити вимушений рух 180° -х стінок, що

відокремлюють антиферомагнітні ($m = 0$) домени. Об'єктивні підстави для розгляду цієї задачі виникли завдяки унікальним експериментам В.В. Єрьоменко та М.Ф. Харченко зі співробітниками, які здійснили безпосереднє візуальне спостереження антиферомагнітних доменів. У контексті дисертації це питання виникло у зв'язку з тим, що у попередніх розділах було передбачено наявність у стінках моменту $m(\xi)$ та можливість різних типів їх кінематичної поведінки.

Перший з розглянутих механізмів вимушеного руху ДС є наслідком дії неоднорідного магнітного поля на локалізований у стінці момент $m(\xi)$. Оцінки, які було проведено для антиферомагнітних доменів в ортоферитах свідчать про те, що за допомогою цього механізму може бути досягнуто швидкість $10^4 + 10^5$ см/сек, тобто близько 10^{-2} с.

Другий механізм використовує дію на антиферомагнетик змінного магнітного поля і подає меншу надію на досягнення високої швидкості руху стінки. Проте, як було показано В.С. Герасимчуком та О.Л. Сукстанським (з посиланням на нашу роботу [5]), цей механізм відіграє істотну роль у явищі дрейфу ДС під впливом змінного поля.

У розділі Висновки надано перелік та стислу характеристику найважливіших результатів дисертації.

За результати досліджень сформульовано

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ВИНЕСЕНО НА ЗАХИСТ

1. Слабкий феромагнетизм кубічних кристалів з трикутним спіновим впорядкуванням вирішально впливає на їх магнітні властивості, а саме: спричиняє фазові переходи в зовнішньому

магнітному полі, визначає характер залежності намагніченості від температури і поля, знімає вирождення спектра спінових хвиль.

2. Вигляд фазової діаграми антиферомагнетика зі структурою La_2CuO_4 визначається конкуренцією анізотропної магнітної взаємодії між мідно-кисневими атомними шарами з міжшаровою обмінною взаємодією та ромбічною анізотропією внутрішньошарового походження; якщо зовнішнє магнітне поле спрямовано поперек атомних шарів, то при певному співвідношенні між цими факторами на фазовій діаграмі антиферомагнетика повинні існувати кутові фази, які розрізняються за особливостями поглинання звуку на лініях фазових переходів.

3. Існує 42 класи магнітної симетрії доменних стінок у феромагнетиках та 134 класи магнітної симетрії доменних стінок у двопіддратових антиферомагнетиках з немультіплікованою магнітною коміркою; у багатьох випадках рух доменної стінки спричиняє зміну її магнітного класу та фазовий перехід при певному критичному значенні швидкості руху.

4. Просторово неоднорідне магнітне впорядкування може спричинити електричну поляризацію навіть тих кристалів, які не є магнітоелектриками.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Львов В.А. О температурной зависимости скорости звука в феррите иттрия// ФТТ. - 1979 - Т. 21, №2. - С. 3666-3670.
2. Львов В.А., Яблонский Д.А. Симметрия и спин-флип переходы в антиферромагнитных кристаллах//ФНТ. - 1982 - Т.8,

- №9. - С. 951-962.
3. Барьяхтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А. Теория неоднородного магнитоэлектрического эффекта//Письма в ЖЭТФ. - 1983. - Т. 37, №12. - С. 565-567.
 4. Барьяхтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А. Магнитная симметрия доменных границ в магнитоупорядоченных кристаллах//ЖЭТФ. - 1984. - Т. 87, №(II). - С. 1833-1876.
 5. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А., Лагченко В.Ф., Львов В.А. О возможности вынужденного движения доменных границ в коллинеарных антиферромагнетиках// ФНТ. - 1987. - Т.12, №5. - С. 551-553.
 6. Гомоная Е.В., Львов В.А. Феноменологический расчет спектра спиновых волн в неколлинеарном антиферромагнетике Mn_3NiN // УФЖ. - 1989. - Т. 34, №4. - С. 578-583.
 7. Гомоная Е.В., Львов В.А. Обменный пьезомагнетизм в неколлинеарном антиферромагнетике Mn_3NiN // ФТТ. - 1989. - Т. 31, №5, С. 262-263.
 8. Барьяхтар В.Г., Локтев В.М., Львов В.А., Яблонский Д.А. К теории спин-переориентационных фазовых переходов и спиновых волн в La_2CuO_4 // СФХТ. -1989. - Т. 2, №8. - С. 59-69.
 9. Барьяхтар В.Г., Локтев В.М., Львов В.А., Яблонский Д.А. Магнитная фазовая диаграмма антиферромагнетика La_2CuO_4 в поперечном магнитном поле// СФХТ. - 1990. - Т. 3, №8, ч 2. - С. 1795-1804.
 10. Гомоная Е.В., Иванов Б.А., Львов В.А., Оксюк Г.К. Симметрия и динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках

тиках// ЖЭТФ. - 1990. - Т.97, №1. - С. 307-322.

- II. Gomonaj E.V., L'vov V.A. Phenomenological Consideration of Spin-Wave Spectrum in Noncollinear Antiferromagnet Mn_3NiN // JMMM. - 1990. - V. 86. - P. 301-306.
12. Gomonaj E.V., L'vov V.A. Phenomenological Study of Phase Transitions in Noncollinear Antiferromagnets of Metallic Perovskite Type// Phase Transitions. - 1992. -V. 38.- P. 15-31.
13. Gomonaj E.V., L'vov V.A. A Theory of Spin Reorientation and Piezomagnetic Effect in Noncollinear Mn_3AgN Antiferromagnet// Phase Transitions. - 1992. - V. 40.- P. 225-237.
14. Барьяхтар В.Г., Варюхин В.Н., Львов В.А. Особенности поглощения звука в антиферромагнетике типа La_2CuO_2 // СФХТ. - 1992. - Т. 5, №8. - С. 1383-1393.
15. Gomonaj E.V., L'vov V.A. Martensitic Phase Transition with Two-Component Order Parameter in a Stressed Cubic Crystal// Phase Transitions. - 1994. - V. 47.- P. 9-21.
16. Bar'yakhtar V.G., L'vov V.A., Yablonskii D.A. Theory of Electric Polarization of Domain Boundaries in Magnetically Ordered Crystals/ In: "Problems in Solid-State Physics" ed. by A.M. Prokhorov and A.S. Prochorov. -M.: Mir Publishers, 1984. P. 56-80.
17. Барьяхтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А. Магнитная симметрия доменных границ в магнитоупорядоченных кристаллах (статические и кинематические аспекты) / В кн. "Теоретико-групповые методы в физике", под ред. М.А.

- Маркова, т. I. - С. 563-570. - М.: Наука, 1986.
18. Барьяхтар В.Г., Львов В.А. Намагниченность неоднородно упорядоченных антиферромагнетиков и динамика доменных границ. - Киев, 1985. - 21 с. - (Препринт/ ИТФ-85-47Р).
 19. Барьяхтар В.Г., Гомоная Е.В., Львов В.А. Магнитоупругие эффекты в трехподрешеточных антиферромагнетиках со структурой перовскита (Mn_3NiN , Mn_3GaN). - Киев, 1985. - 24 с. - (Препринт/ ИТФ-85-IIIР).
 20. Гомоная Е.В., Львов В.А. Структура движущихся доменных границ в ортоферритах. - Киев, 1986. - 12 с. - (Препринт /ИТФ-86-22Р).
 21. Гомоная Е.В., Иванов Б.А., Львов В.А. Симметрия и динамика доменных границ в ортоферритах. - Киев, 1988. - 27 с. - (Препринт/ ИТФ-88-129Р).
 22. Bar'yakhtar V.G., Loktev V.M., L'vov V.A., Yablonekii D.A. Magnetic Phase Diagram and Spin Wave Spectrum of La_2CuO_4 in a Magnetic Field Perpendicular to CuO_2 Layers. - Kiev, 1990. - 25p. - (Preprint/ITP-90-45E).
 23. Bar'yakhtar V.G., Gomonaj E.V., L'vov V.A. A Theory of Domain Wall Motion in Cubic Perovskites with Triangular Magnetic Structure. - Kiev, 1993. - 24 p. - (Preprint/ITP-93-66E).
 24. Барьяхтар В.Г., Львов В.А. Намагниченность неоднородно упорядоченных антиферромагнетиков и динамика доменных границ. - Тезисы докл. 17-й Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. - Донецк, 1985.
 25. Барьяхтар В.Г., Локтев В.М., Львов В.А., Яблонский Д.А.

Магнитная симметрия и спиновые волны в La_2CuO_4 . - Тезисы докл. 2-й Всесоюз. конф. по ВТСП. - Т. I. - С. 23-24. - Киев, 1989.

26. Львов В.А., Михайлов И.Г., Толпыго С.К. К вопросу об аномалии магнитной восприимчивости соединений La_2CuO_4 , $LaNiO_4$. - Тезисы докл. 2-й Всесоюз. конф. по ВТСП. - Т. I. - С. 266-267. - Киев, 1989.
27. Барьяхтар В.Г., Варюхин В.Н., Львов В.А. Особенности поглощения звука при магнитных фазовых переходах в La_2CuO_4 . - Тезисы докл. 19-й Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. - Ташкент, 1991.
28. Bar'yakhtar V.G., Gomonaj E.V., L'vov V.A. A Theory of Domain Wall Motion in Cubic Weak Ferromagnets of Perovskite Type. INTERMAG-93, Stockholm, Sweden, April 13-16, - 1993.

L'vov V.A. Phase Transitions in Antiferromagnets, Caused by Weak Ferromagnetism.

Thesis for a degree Doktor Fiziko-Matematicheskikh Nauk in the field of ~~solid state physics~~ ^{magnetism}, subject classification code 01.04.07; Institute of Metal Physics, Kiev, 1995.

28 scientific publications are maintained. The results of theoretical treatment of magnetic phase transitions in non-collinear spin structures are presented. Magnetic phase diagram of the cubic perovskites with triangular spin structure and this of La_2CuO_4 antiferromagnet is constructed. The problem of the symmetry classification of domain walls in magnetically ordered crystals is set up and resolved. General theory of magnetoelectric effect is developed for the case of spatially inhomogeneous magnetically ordered states.

Львов В.А. Фазовые переходы в антиферромагнетиках, обусловленные слабым ферромагнетизмом.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Институт металлофизики, Киев, 1995. ^{магнетизм}

Защищается 28 научных работ, которые содержат результаты теоретического исследования магнитных фазовых переходов в неколлинеарных спиновых структурах. Построены магнитные фазовые диаграммы кубических перовскитов с треугольной спиновой структурой и антиферромагнетика La_2CuO_4 . Поставлена и решена задача симметричной классификации доменных границ в магнитоупорядоченных кристаллах. Развита общая теория магнитоэлектрического эффекта в пространственно неоднородных магнитоупорядоченных состояниях.

Ключові слова: Фазовий перехід, симетрія, доменна стінка.

L'vov

ABSC (2)

454485

AB 32 090
AB 32.793

Степан В.А. Фазовые переходы в магнетиках.
Методология исследования.

Диссертация на степень доктора физико-математических наук по специальности физика металлов, специальность 01.04.07, Институт металлов, Киев, 1986.

В диссертации описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках. В работе описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках. В работе описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках.

Диссертация на степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика металлов, Институт металлов, Киев, 1986.

Диссертация на степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика металлов, Институт металлов, Киев, 1986.

В диссертации описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках. В работе описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках. В работе описаны научные исследования, посвященные научной проблеме исследования фазовых переходов в магнетиках.

Киевский государственный университет имени Шевченко, Киев, 1986.