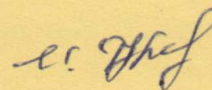


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б.І. Веркіна**

КОБЗАР (Журавльова) Ірина Павлівна



УДК 538.95, 538.915

**МАГНІТОПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУЗЬКОЗОННИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ
4f- ТА 3d- МЕТАЛІВ.**

01.04.07 - фізика твердого тіла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
Гречнев Геннадій Євгенович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б.І. Веркіна НАН України,
заступник директора з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Пащенко Олексій Валентинович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О.О. Галкіна НАН України,
провідний науковий співробітник відділу фазових
перетворень

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Шипкова Ірина Геннадіївна,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», МОН України,
старший науковий співробітник кафедри фізики
металів та напівпровідників

Захист відбудеться « 20 » березня 2018 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий

«16» лютого 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03



О.І. Юзефович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування високих тисків є унікальним і найбільш потужним методом у фізиці твердого тіла для вивчення природи фізичних властивостей матеріалів і, зокрема, їх взаємозв'язку з електронною будовою речовини. Магнітні властивості металів тісно пов'язані з їх електронною структурою, тому їх вимір під тиском найбільш підходить для металевих систем, в яких міжатомна відстань є фундаментальним параметром і визначає основні характеристики енергетичного спектра електронів провідності. Також в магнетизмі металевих систем важливу роль відіграють обмінно-кореляційні взаємодії, а їх теоретичний опис являє собою складну задачу у фізиці твердого тіла. Для того щоб побудувати теоретичну модель зонного магнетизму, корисно експериментально вивчити властивості цих взаємодій за допомогою магнітооб'ємних ефектів.

Інтерес до детальних досліджень магнітопружних характеристик, а також електронних енергетичних спектрів вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів обумовлений цільовими властивостями та перспективами використання цих сполук у сучасних технологіях.

Використані нами методи експериментального дослідження магнітопружних властивостей дозволяють проводити вимірювання у строго гідростатичних умовах, що є необхідними для отримання надійних результатів. Типова похибка вимірювань магнітної сприйнятливості при всебічному тиску складає 0.05%, що є досить високим показником.

Недавнє відкриття нового класу високотемпературних надпровідників (ВТНП) на основі заліза відродило інтерес до однієї з найінтригуючих фізичних проблем сучасності - побудові теорії високотемпературної надпровідності. Відкриття надпровідності в сполуках заліза стимулювало інтенсивні дослідження різних властивостей цих матеріалів. Воно спростувало уявлення, яке панувало більш ніж 20 років, що високотемпературна надпровідність є винятковою властивістю купратів. Більш того, надпровідними виявилися сполуки заліза - елемента, який зазвичай породжує сильний магнетизм, тобто явище, яке вважають антагоністичним надпровідності. Тому особливий інтерес представляє з'ясування умов і механізмів співіснування магнетизму і надпровідності.

З'ясування механізмів, які реалізуються на мікроскопічному рівні і визначають магнітні та електричні властивості анізотропних шаруватих сполук перехідних металів є актуальним. Особливий інтерес представляє встановлення кореляцій між особливостями магнітних властивостей цих систем і їх електронною структурою.

Усе вище сказане дає загальне уявлення про основні проблеми, розглянуті в дисертаційній роботі, і свідчить про актуальність даного напрямку досліджень, як у фундаментальному, так і в прикладному аспектах.

- **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота підготовлена й виконана у відділі магнітних і пружних властивостей

твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту, затвердженого Президією НАН України по наступних темах: «Функціональні властивості новітніх надпровідникових сполук і металовмісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (номер державної реєстрації 0117U002294, термін виконання 2017-2021 рр.), «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні властивості новітніх низьковимірних структур та надпровідних сполук» (номер державної реєстрації 0112U002635, термін виконання 2012-2016 рр.), «Взаємозв'язок магнітних і надпровідних станів у шаруватих сполуках, що містять іони магнітних перехідних і рідкісноземельних металів» (номер державної реєстрації 0112U003553, термін виконання 2012-2013 рр.), «Квантові електронні явища в нових провідних системах» (номер державної реєстрації 0110U000945, термін виконання 2007-2011 рр.)

Мета й завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є встановлення механізму магнітних та магнітопружних властивостей вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів і з'ясування впливу гідростатичного тиску на особливості електронних енергетичних спектрів та магнітні властивості цих систем.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішувалися наступні завдання:

— Вдосконалення та пристосування існуючих методів вимірювання магнітних характеристик для експериментального дослідження магнітних та магнітопружних властивостей вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів;

— Встановлення особливостей магнітної сприйнятливості при впливі температури та гідростатичного тиску на них в широкому інтервалі температур;

— Для встановлення кореляцій між магнітними та магнітопружними властивостями та особливостями електронної структури проведено аналіз літературних даних розрахунків електронної структури в рамках теорії функціоналу густини (DFT) цих систем.

Об'єкти дослідження — магнітні та магнітопружні властивості вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів та встановлення кореляції цих виявлених властивостей із змінами електронної структури, спираючись на літературні розрахунки в рамках теорії функціоналу густини (DFT) досліджуваних систем.

Предмет досліджень — особливості й аномалії в поведінці магнітної сприйнятливості під впливом температур та гідростатичного тиску металевого гадолінію, залізовмісних ВТНП FeTe та FeSe, тетраборидів рідкісноземельних металів із спільною формулою RB_4 ($R=Sm, Yb$), сполук RT_4Al_8 ($R = Sc, Y, La, Lu$; $T=Fe, Mn, Cr$) та метамагнітної сполуки YCo_2 .

Методи дослідження. При проведенні експериментальних досліджень температурних залежностей магнітної сприйнятливості у роботі використовувалися SQUID магнітометр, та магнітометр Фарадея. Для вимірювання магнітопружних властивостей у роботі використовувалися магнітометр на основі левітаційного методу і магнітометр маятникового типу. Обидва методи дозволяють проводити

прецизійні вимірювання магнітних властивостей під впливом всебічного тиску. При цьому оптимальна похибка вимірювань складає 0,05%. Аналіз отриманих результатів проводився на основі існуючих розрахунків електронної структури сполук, що вивчалися, у рамках теорії функціонала густини - сучасного методу обчислювальної фізики твердого тіла.

Наукова новизна отриманих результатів. Серед пріоритетних результатів, отриманих у дисертаційній роботі, можна виділити нижченаведені, які виносяться на захист і мають фундаментальний характер:

1) Продемонстровано новий метод визначення залежності температури Кюрі від об'єму, шляхом експериментального вивчення впливу гідростатичного тиску на магнітної сприйнятливості гадолінію в парамагнітній фазі.

2) Встановлено збереження валентного стану іона Sm^{3+} під тиском для сполуки SmB_4 . Виявлено великий додатний ефект тиску на магнітну сприйнятливості сполуки YbB_4 з проміжною валентністю $\text{Yb}^{2.8+}$.

3) Встановлені великі значення ефекту тиску на магнітну сприйнятливості в системах RMn_4Al_8 і RCr_4Al_8 , які корелюють зі зміною електронної структури під тиском.

4) Виявлено великий магнітооб'ємний ефект для сполуки YCo_2 , що зумовлений значним обмінним посиленням спінового парамагнетизму.

5) Експериментально виявлено великий додатний ефект тиску на магнітну сприйнятливості сполук FeTe і FeSe в області низьких температур, що обумовлений зміною внутрішнього структурно параметра Z під тиском.

6) Встановлено, що зміна знака анізотропії магнітної сприйнятливості в монокристалах Fe_{1+y}Te відповідає зміні орієнтації вектора антиферомагнетизму із осьового до площинного положення при зміні в зразках концентрації надлишкового заліза у.

Встановлені експериментальні результати на зазначених об'єктах були отримані вперше.

Практичне значення отриманих результатів. У даній дисертаційній роботі продемонстровано ефективність використання левітаційного методу для встановлення зміни парамагнітної температури Кюрі при прикладанні гідростатичного тиску.

Проведені в роботі експериментальні дослідження магнітних і магнітопружних властивостей вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів і залізовмісних надпровідників дозволяють прогнозувати зміни важливих магнітних характеристик при впливі всебічного тиску.

Результати досліджень прояву та співіснування магнітних і надпровідних властивостей ВТНП сполук на основі заліза є перспективними в мікроелектроніці та спінтроніці.

Особистий внесок автора. У дисертації узагальнюються результати досліджень, виконаних автором у співавторстві. Аналіз результатів і написання статей відбувалися спільно. Особистий внесок автора складається в проведенні експериментів, ретельному аналізі всіх отриманих експериментальних даних з використанням існуючих літературних даних розрахунків електронної структури для наведених систем.

Таким чином особистий внесок дисертанта є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Матеріали й результати дисертаційної роботи доповідалися на наукових конференціях і симпозіумах: 1st, 2nd, 3^d, 4th, 5th, 6th, 7th і 8th International Conference for Young Scientists “Low temperature Physics” (Ukraine, Kharkiv, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017);

International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics Neureka-2012 (Ukraine, Lviv, 2012);

міжнародній науковій конференції “Высокие давления. Фундаментальные и прикладные аспекты” (Україна, Крим, Судак, 2012);

12-й міжнародній конференції “Фізичні явища у твердих тілах” Україна, Харків, 2015);

“Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем” в рамках науково-навчальної сесії, присвяченої 70-річчю від дня заснування ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України (Україна, Київ, 2016);

Публікації. Основні результати, що ввійшли в дисертацію, опубліковані в 19 наукових працях [1-19], серед них 7 статей [1-7] у провідних фахових наукових журналах України й закордонних періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS, та у 12 тезах доповідей [8-19] у збірках праць міжнародних наукових конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел зі 172 найменувань. Повний обсяг роботи складає 137 сторінок. У роботі наведено 40 рисунків та 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В анотації коротко представлені основні результати досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, наведено ключові слова та список публікацій.

У **Вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертації, визначена мета, основні задачі та методи їх вирішення, сформульовані основні результати, отримані в роботі, їх наукова новизна та практична значимість, наведені данні про особистий внесок здобувача, надана інформація щодо публікацій і апробації отриманих результатів, а також структура дисертації.

Перший розділ «Експериментальна техніка та методика вимірювань» присвячено опису експериментальних установок, які були використані автором при

вивченні магнітних та магнітопружних властивостей вузькозонних систем на основі 4f- і 3d- металів.

Для атестації магнітних властивостей зразків, досліджується залежність магнітної сприйнятливості від температури. З цією метою використовувався магнітометр Фарадея, тому що він є найбільш традиційним методом дослідження магнітної сприйнятливості слабомагнітних речовин. Даний метод заснований на вимірюванні сили, що діє на зразок в неоднорідному магнітному полі. Основні характеристики установки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики магнітометра Фарадея.

Діапазон робочих температур, К	4,2÷350
Магнітне поле в робочій точці (макс.), кЕ	±10
Діапазон вимірюваних сприйнятливостей, е.м.о.	(1÷1000) ~10 ⁻⁷
Лінійний розмір зразка (макс.), мм	5
Чутливість методу, е.м.о.	~10 ⁻⁹

Для дослідження магнітних властивостей речовин у широких інтервалах магнітних полів і робочих температур використовувався SQUID-магнітометра.

Технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Основні технічні характеристики SQUID-магнітометра.

Діапазон робочих температур, К	4.2÷320
Точність підтримки температури, К	±0,05
Магнітне поле соленоїда (макс.), кЕ	±50
Об'єм гелієвої ємності, л	18
Об'єм азотної ємності, л	8
Лінійний розмір зразка (макс.), мм	5
Чутливість магнітометра за магнітним моментом, е.м.о.	~10 ⁻⁶

Магнітопружні властивості гадолінію досліджувалися за допомогою левітаційного методу, який полягає у визначенні магнітних характеристик за допомогою підвішування зразка неоднорідним магнітним полем.

Основні характеристики левітаційного методу представлені в таблиці 3

Таблиця 3. Основні технічні характеристики левітаційного методу.

Діапазон робочих температур, К	20÷350
Максимальне магнітне поле в робочій точці, кЕ	10
Нижня границя вимірюваної сприйнятливості, е.м.о./г	1 · 10 ⁻⁵
Оптимальна похибка вимірювань, %	0,05

Вплив тиску на магнітні властивості зонних антиферромагнетиків $R\text{B}_4$, RT_4Al_8 ($R=\text{Sc}, \text{Y}, \text{La}, \text{Lu}$; $T=\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}$), YCo_2 та $\text{FeSe}(\text{Te})$ було досліджено за допомогою магнітометра маятникового типу. Вимірюваний зразок містився всередині невеликої компенсаційної котушки, розташованої на нижньому кінці стрижня маятника. Тоді при включенні магнітного поля величина струму через котушку, при якій магнітометр повертається в своє початкове положення, є мірою магнітного моменту зразка. Для вимірювання ефектів тиску механічна частина магнітометри розташовується безпосередньо всередині циліндричної немагнітної барокамери - це дозволяє виключити внесок камери й пов'язані з нею похибки у вимірюваний сигнал, на відміну від магнітометрів із автономною камерою високого тиску. Вимірювання під тиском газоподібного гелію P до 2 кбар були виконані в режимі фіксованих температур 78, 153 і 300 К, щоб виключити вплив на сприйнятливість змін температури в процесі додавання або зняття тиску.

Основними технічними характеристиками маятникового магнітометра є: діапазон тисків $0 \div 2$ кбар; температурний інтервал $20 \div 300$ К; відносна похибка вимірів 0.05%.

Другий розділ «Вплив тиску на магнітні властивості гадолінію»

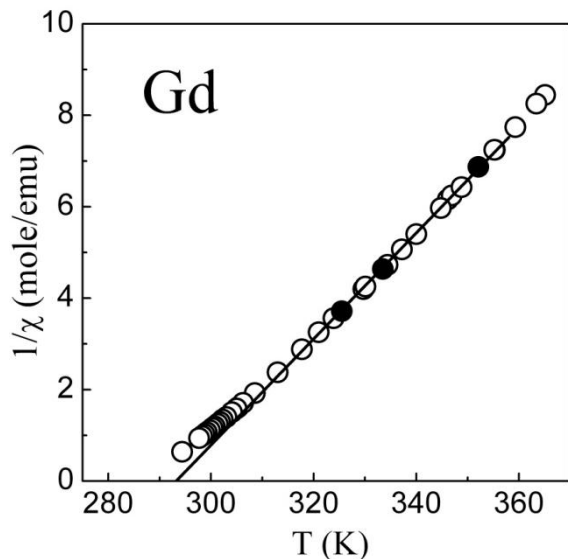


Рис. 1 Температурна залежність зворотної магнітної сприйнятливості для Gd , виміряної методом Фарадея (\circ). Дані, отримані за допомогою методу левітації при атмосферному тиску представлені суцільними квадратами (\blacksquare). Закон Кюрі-Вейса позначений суцільною лінією.

присвячений експериментальному дослідженню впливу тиску на магнітні властивості металу гадолінію, що є феромагнетиком із температурою Кюрі $T_C=293$ К

Для дослідження використовувався полікристалічний зразок гадолінію чистотою 99,9%. Температурна залежність його магнітної сприйнятливості $\chi(T)$ вимірювалася методом Фарадея в інтервалі температур 295 - 365 К.

Ця залежність при $T > 320$ К підкоряється закону Кюрі-Вейса (суцільна пряма лінія на рис.1). Відповідні значення парамагнітної температури Кюрі і ефективного магнітного моменту складають $\Theta=295$ К та $\mu_{\text{eff}}=8.18 \pm 0.1 \mu_B$ і знаходяться в згоді з літературними даними. Вимірювання $\chi(P)$ проводилися під тиском

газоподібного гелію P до 0.16 ГПа при фіксованих температурах, $T=325.5, 333.5$ і 352.1 К, за допомогою магнітометра левітаційного типу, використовуючи сферичний зразок близько 1 мм в діаметрі. Відносні помилки магнітних вимірів під тиском не

перевищували 0.1 % для використаних значень магнітного поля, близьких до $H \sim 0.1$ Тл. Поле створювалося за допомогою звичайного (не надпровідного) соленоїда.

Експериментальні залежності $\chi(P)$, представлені на рис. 2, виявляються лінійними і визначають значення похідної $d \ln \chi / dP$, наведені в таблиці. 4.

Виходячи із закону Кюрі-Вейса для поведінки $\chi(T)$, величина $d \ln \chi / dP$ визначається, головним чином, залежністю від тиску парамагнітної температури Кюрі Θ :

$$\frac{d \ln \chi}{dP} = \frac{d \ln C}{dP} + \frac{1}{T - \Theta} \frac{d\Theta}{dP} = \frac{\chi}{C} \frac{d\Theta}{dP} \quad (1)$$

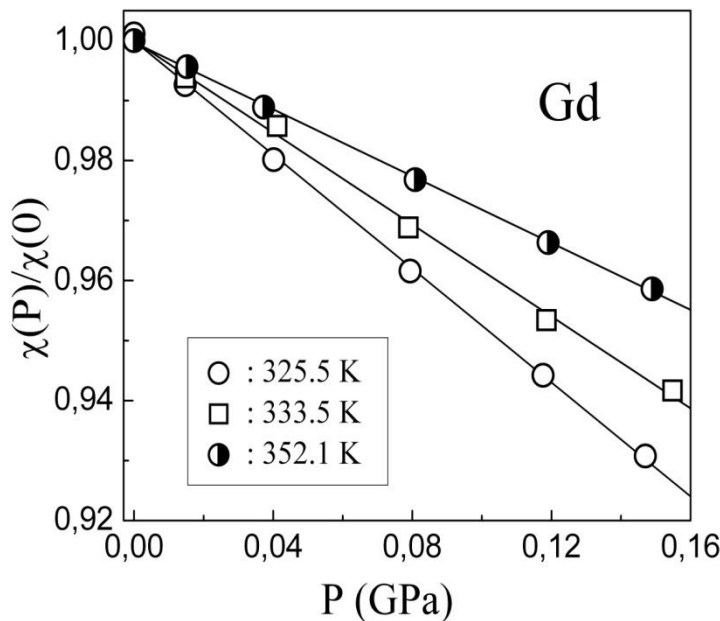


Рис. 2 Залежність магнітної сприйнятливості від тиску Gd при різних температурах, нормована на значення при тиску $P = 0$.

полікристалічного зразка гадолінію високої чистоти.

За допомогою отриманого значення $d\Theta/dP$ можна оцінити спонтанну зміну об'єму в гадолінію, що виникає внаслідок ФМ упорядкування, $\Delta V / V = \omega_m$, яка обумовлюється усередненим квадратом локального магнітного моменту $M^2(T)$:

$$\omega_m(T) = \frac{c}{B} M^2(T), \quad (2)$$

де B - модуль пружності, а c - постійна магнітопружного зв'язку. Постійну магнітопружного зв'язку c можна визначити з феноменологічного співвідношення (3):

$$\frac{c}{B} = -\frac{1}{2VC} \frac{d\Theta}{dP}, \quad (3)$$

(де χ і V_m - молярні сприйнятливості і об'єм, відповідно, а C - константа Кюрі).

Таблиця 4

Магнітна сприйнятливості $\chi(10^{-3}$ емо/моль) і її похідна по тиску $d \ln \chi / dP$ (10^{-2} ГПа $^{-1}$) для Gd при різних температурах.

T (K)	χ	$d \ln \chi / dP$
325.5	269.1	-47.5 ± 1.5
333.5	215.7	-38.5 ± 1.5
352.1	145.5	-28.0 ± 1.5

Отримана величина похідної, $d\Theta/dP = -14.9 \pm 0.3$ К/ГПа, виявилася в прекрасній згоді з найбільш надійними даними $dT_c/dP = -14.8 \pm 0.2$ К/ГПа, які були отримані у роботі [Н. Bartholin et al.// J. Appl. Phys., 1968, Vol. 39, N. 2, P. 889-891] для

Після підстановки отриманого значення c/V у рівняння (2) та експериментального значення молярного магнітного моменту Gd при $T=0$ К, отримаємо значення зміни об'єму при магнітному переході оцінку $\omega \approx 0.8\%$.

Ця оцінка розумно узгоджується з експериментальним значенням $\omega \approx 0.5\%$, яке отримане із вимірювання теплового розширення.

Третій розділ «Особливості магнітних властивостей тетраборидів RB_4 ($R=Sm$ і Yb). Ефекти тиску» присвячений вивченню магнітних властивостей тетраборидів рідкісноземельних металів RB_4 ($R = Sm$ та Yb) а також впливу тиску на їх магнетизм. RB_4 ($R=Sm$ та Yb) проявляють ознаки нестійкості 4f-оболонки.

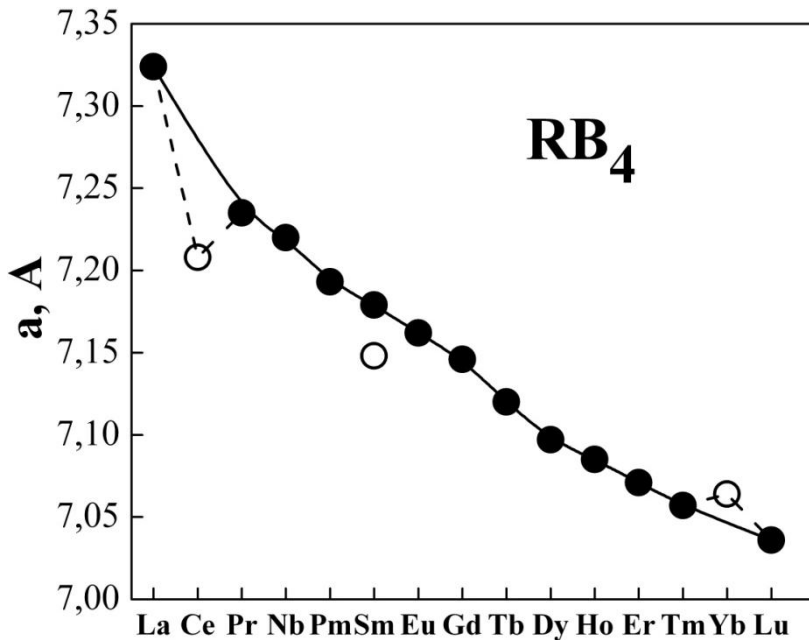


Рис. 3 Експериментальні значення параметрів кристалічної решітки в сполуках RB_4

SmB_4 і YbB_4 має місце відхилення валентності R іонів від значення 3^+ і може реалізуватися стан проміжної валентності.

Температурна залежність магнітної сприйнятливості зразків вимірювалася в інтервалі $T=4,2\div 300$ К з використанням SQUID-магнітометра. Зразки готувалися заповненням вихідним порошком капсули з алюмінієвої фольги і мали форму циліндра діаметром близько 3 мм і приблизно такої ж висоти. Вимірювання магнітної сприйнятливості зразків в умовах тиску газоподібного гелію P до 2 кбар були виконані при фіксованих температурах 78 і 300 К за допомогою маятникового магнітометра. В цьому випадку капсула з алюмінієвої фольги, заповнена порошком досліджуваного тетрабориду, мала форму паралелепіпеда із розмірами приблизно $2,4 \cdot 4 \cdot 10$ мм³. Виміри проводилися в магнітному полі 1,7 Тл і їх відносна похибка не перевищувала 0,05 % з урахуванням вкладу матеріала капсули.

На рис. 4 зображена температурна залежність магнітної сприйнятливості SmB_4 і її апроксимація законом Кюрі-Вейса $\chi(T) = \chi_0 + C/(T - \Theta)$. Знайдена величина константи Кюрі C відповідає значенню ефективного магнітного моменту іона Sm^{3+} в

Однією з таких ознак є відхилення параметрів кристалічної решітки від їх монотонної поведінки уздовж лантаноїдного ряду для ізоструктурних сполук RB_4 , в яких рідкісноземельні іони знаходяться в трьохвалентному стані. Як видно з рис. 3, ці відхилення найбільш виразно виражені для тетраборидів церію і ітербію, тоді як в разі самарію дані про параметри решітки є неоднозначними і вимагають уточнення. Оскільки об'єм R -іона тісно пов'язаний з його валентністю, можна припускати, що в сполуках

основному стані. Максимум, що спостерігається при $T = 23$ К, відповідає температурі антиферомагнітного переходу, задовільно узгоджується з наведеною в літературі величиною. Як видно з рис. 4 при $T > 200$ К в температурній залежності

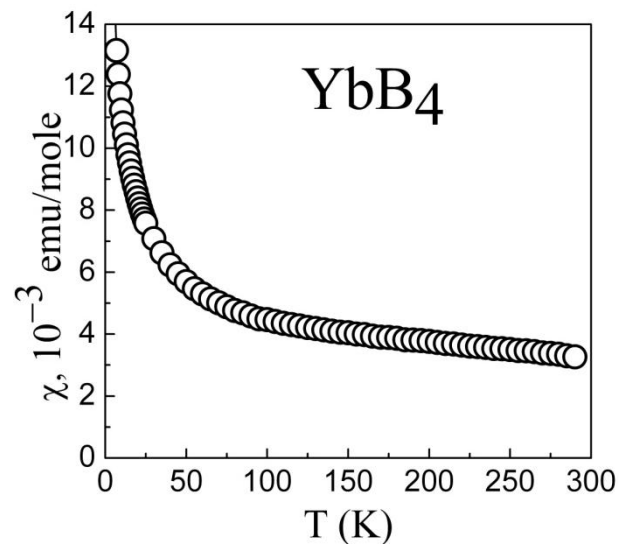
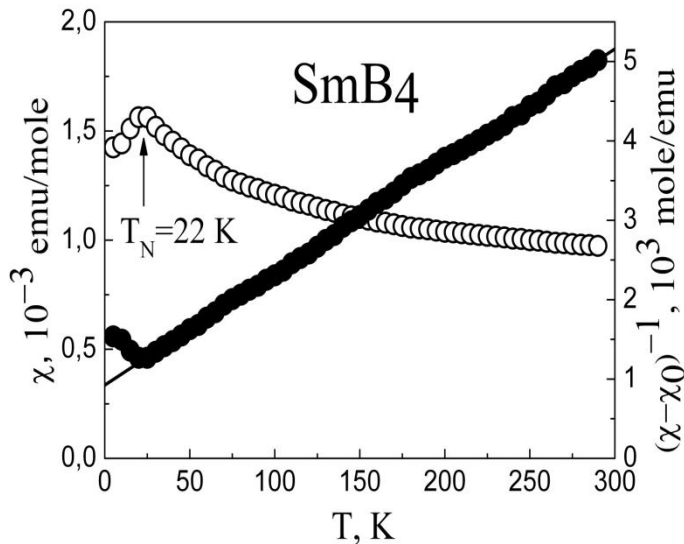


Рис. 4 Температурна залежність магнітної сприйнятливості (○) SmB_4 і її зворотної величини сприйнятливості YbB_4 . (●) в апроксимації законом Кюрі-Вейса.

сприйнятливості вже починає проявлятися внесок збудженого мультіплета. Відзначимо також, що знайдена величина χ_0 практично збігається з оцінкою χ_{Vv} , що свідчить про домінуючий внесок парамагнетизму Ван-Флека в магнітну сприйнятливості сполуки SmB_4 . На відміну від тетрабориду самарію, в сполуці YbB_4 вклад Ван-Флека практично відсутній і його магнетизм визначається лише величиною ефективного моменту іонів ітербію, який для Yb^{3+} дорівнює $\mu_{\text{eff}} = 4,54\mu_{\text{B}}$. Температурна залежність магнітної сприйнятливості YbB_4 приведена на рис. 5.

Виходячи з експериментальних даних представлених на рис. 5 для $70 < T < 350$ К залежність $\chi(T)$ можна описати у вигляді $\chi(T) = C/(T - \Theta)$. Величина ефективного магнітного моменту, яка впливає з значення константи Кюрі C , $\mu_{\text{eff}} = 4,05\mu_{\text{B}}$ виявляється істотно нижче його значення для тривалентного іона ітербію ($4,54\mu_{\text{B}}$). Цей факт, поряд з помітним відхиленням параметрів решітки в YbB_4 від їх поведінки уздовж ряду R^{3+}B_4 (рис. 3), вказує на стан проміжної валентності іона ітербію в розглянутому тетрабориді внаслідок флуктуацій між станами іона з конфігураціями $4f^{13}5d(\text{Yb}^{3+})$ і $4f^{14}(\text{Yb}^{2+})$. Оскільки для стану Yb^{2+} магнітний момент іона дорівнює нулю, магнетизм сполуки визначається відносним часом перебування іона в стані Yb^{3+} , тобто його заселеністю n . Величина n знаходиться зі співвідношення $C = nC_0$ (C_0 - константа Кюрі для іона Yb^{3+}) і дорівнює $n \approx 0,8$. Таким чином, оцінена валентність іона ітербію в YbB_4 відповідає $\text{Yb}^{2,8+}$.

Звернемося тепер до розгляду залежностей магнітної сприйнятливості досліджуваних сполук SmB_4 і YbB_4 від тиску, що наведені на рис. 6. Ефект тиску на

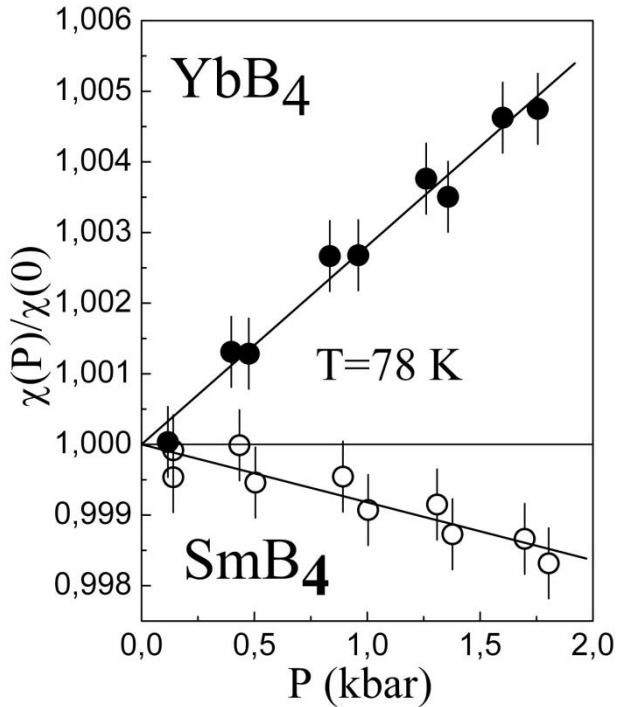


Рис. 6 Залежність від тиску магнітної сприйнятливості SmB_4 і YbB_4 при $T = 78$ К.

тиску на магнітні властивості сполук.

Вимірювання температурної залежності магнітної сприйнятливості полікристалічних зразків YFe_4Al_8 і YMn_4Al_8 проводилися в інтервалі температур $4,2 \div 300$ К з використанням СКВІД-магнітометра. Наведені на рис. 7 залежності $\chi(T)$ для YFe_4Al_8 , $ScFe_4Al_8$ та $LuFe_4Al_8$ якісно схожі і мають максимум при температурі близько 100 К, який ототожнюється з температурою Нееля T_N .

Через слабку залежність від R-елементу домінуючу роль в магнетизмі даного сімейства відіграє підсистема заліза. В парамагнітному стані ($T > T_N$) магнітна сприйнятливість згаданих сполук лише в грубому наближенні підпорядковується закону Кюрі-Вейса, проявляючи більш сильне падіння з ростом температури.

магнітну сприйнятливості SmB_4 визначається, головним чином, залежністю від тиску парамагнетизму Ван-Флека, оскільки цей внесок в сприйнятливості є домінуючим, тобто $d \ln \chi / dP \approx d \ln \chi_{VV} / dP$. Помітна додатна величина ефекту тиску на магнітну сприйнятливості, спостерігається в YbB_4 і є характерною для інтерметалічних з'єднань ітербію з проміжною валентністю. Ефект тиску на сприйнятливості YbB_4 визначається, головним чином, зміною заселеності Yb^{3+} стану n , тобто справедливо співвідношення $d \ln \chi / dP \approx d \ln n / dP$.

У четвертому розділі «Ефекти гідростатичного тиску на магнітні властивості і електронну структуру сполук RT_4Al_8 ($R = Sc, Y, La, Lu; T = Fe, Mn, Cr$)» ми вивчали дію гідростатичного

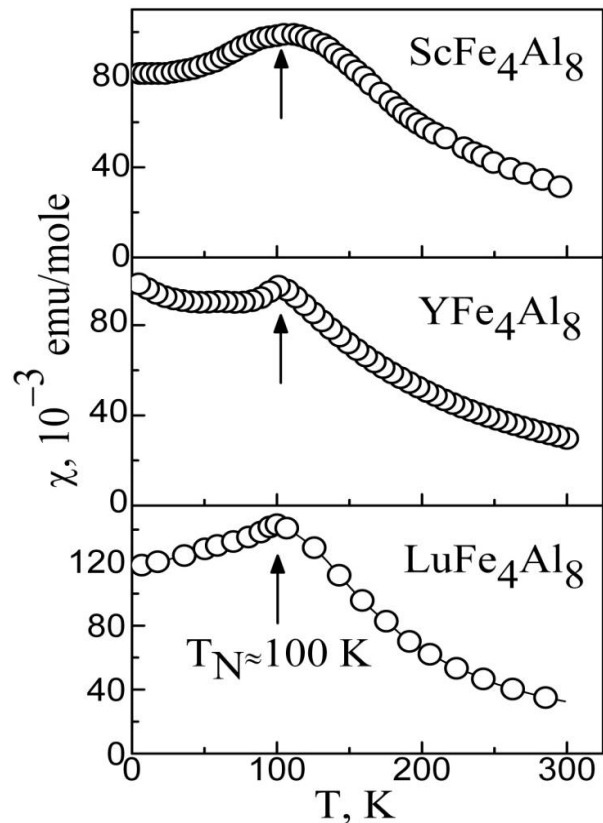


Рис. 7 температурна залежність магнітної сприйнятливості для YFe_4Al_8 , $ScFe_4Al_8$ та $LuFe_4Al_8$.

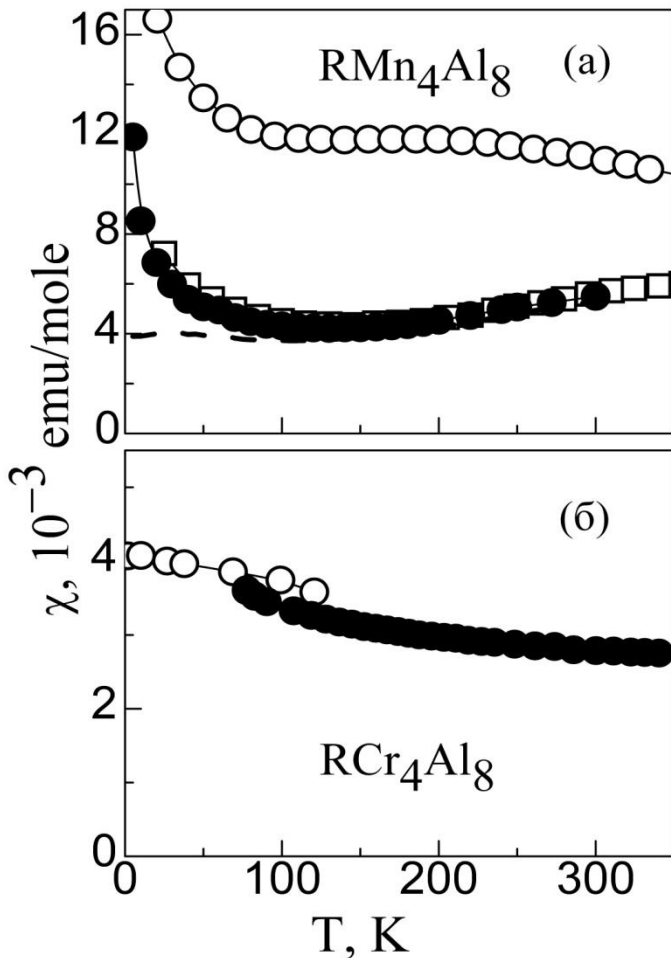


Рис. 8 Температурні залежності магнітної сприйнятливості для а) YMn_4Al_8 ; пунктирна лінія - скоректовані дані за вирахуванням домішкового низькотемпературного вкладу. б) дані цієї роботи для CeCr_4Al_8 .

прийняти для їх магнітного моменту значення $\mu_{\text{eff}} \approx 5,9 \mu_B$. Віднімаючи знайдений домішковий внесок з вимірюваних значень сприйнятливості, знаходимо скореговану температурну залежність $\chi(T)$ для нашого зразка YMn_4Al_8 , представлену на рис. 8 (а) пунктирною лінією.

Що стосується сімейства RCr_4Al_8 з немагнітними R- елементами, інформація про його магнітні властивості практично відсутня і представлена лише даними для сполуки LuCr_4Al_8 в невеликому інтервалі температур

На відміну від сімейства RFe_4Al_8 , сполука RMn_4Al_8 за відсутності магнітного впорядкування аж до найнижчих температур характеризуються приблизно на порядок величини меншим парамагнетизмом з істотно немонотонною температурною залежністю сприйнятливості. На рис. 8 (а) наведені експериментальні залежності $\chi(T)$ для YMn_4Al_8 . При низьких температурах спостерігається істотне зростання їх сприйнятливості, причиною якого прийнято вважати наявність в зразках невеликої кількості вільних іонів марганцю.

Передбачається, що відповідний внесок в сприйнятливості має вигляд C/T , де домішкову константу Кюрі C можна визначити, представляючи низькотемпературні дані про сприйнятливості як функцію зворотної температури. Зокрема, для нашого зразка YMn_4Al_8 отримана оцінка $C \approx 0,06 \text{ K} \cdot \text{cm}^3/\text{mole}$, виходячи з якої кількість домішкових іонів марганцю в зразку не перевищує 0,4%, якщо

Таблиця 5.

Експериментальні значення магнітної сприйнятливості $\chi (10^{-3} \text{ cm}^3/\text{mole})$ і її барична похідна $d \ln \chi / dP$ (Mbar^{-1}) в сполуках RT_4Al_8 разом з відповідними значеннями цих величин.

	T, K	YFe_4Al_8	YMn_4Al_8	CeCr_4Al_8
$d \ln \chi / dP$ (Mbar^{-1})	78	-4,8	-12,1	-8.6
	300	-5,1	-25,6	-6.2

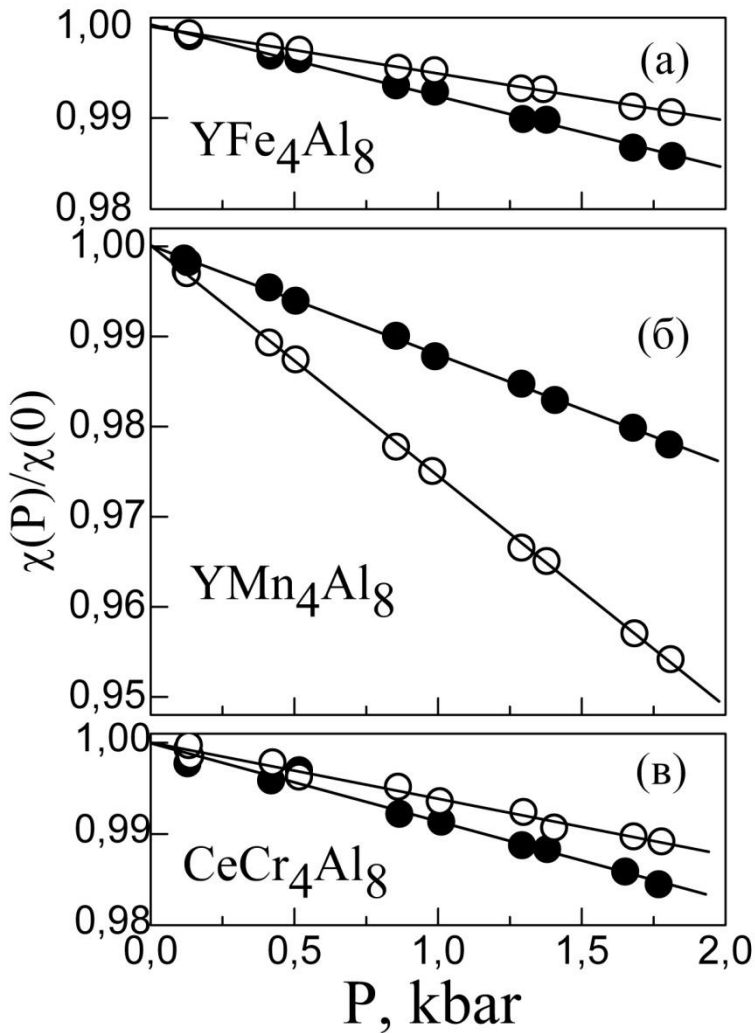


Рис. 9 Експериментальні залежності магнітної сприйнятливості деяких сполук RT_4Al_8 від тиску, нормовані на величину сприйнятливості при $P=0$. Точки (○) та (●) відповідають температурам 300 і 78 К.

типові експериментальні залежності $\chi(P)$, нормовані на величину магнітної сприйнятливості при нульовому тиску. Як видно, в межах помилок вимірювань і використовуваного діапазону тисків, величина ефекту є лінійною функцією P . Відповідні значення похідних сприйнятливості по тиску, $d\ln\chi/dP \equiv (\Delta\chi/\chi)/\Delta P$, наведені в табл. 5 разом з початковими значеннями сприйнятливості. Як видно з рис. 9 і табл. 5, в сполуках YFe_4Al_8 і $CeCr_4Al_8$ ефект тиску є помірно великим і характерним як по знаку, так і величиною для типових обмінно-посилених зонних парамагнетиків, а щодо YMn_4Al_8 підвищена величина ефекту тиску представляється досить несподіваною і вимагає детального налізу.

П'ятий розділ «Магнітооб'ємний ефект в обмінно-посиленому зонному парамагнетикі YCo_2 » присвячений вивченню сполуки YCo_2 відомої як обмінно-посилений парамагнетик Паулі, в якому експериментально спостерігався

(рис.8(б)). Наші дослідження цієї системи обмежилися вивченням наявного в нашому розпорядженні полікристалічного зразка $CeCr_4Al_8$. Залежність його магнітної сприйнятливості від температури, виміряна за допомогою магнітометра Фарадея, наведена на рис. 8(б). Вона виявляється близькою до аналогічних даними для $LuCr_4Al_8$ як за характером, так і величиною ефекту, що передбачає невеликий вклад іонів церію в магнетизм

$CeCr_4Al_8$. Як відомо, іон церію в даному з'єднанні дійсно є немагнітним, оскільки знаходиться в валентному стані Ce^{4+} .

Дослідження сприйнятливості під тиском були проведені для зразків YFe_4Al_8 , YMn_4Al_8 і $CeCr_4Al_8$ на магнітометрі маятникового типу.

Вимірювання під тиском P до 2 кбар були виконані при фіксованих температурах 78, 150 і 300 К. Відносна похибка вимірювань не перевищувала 0,1 %.

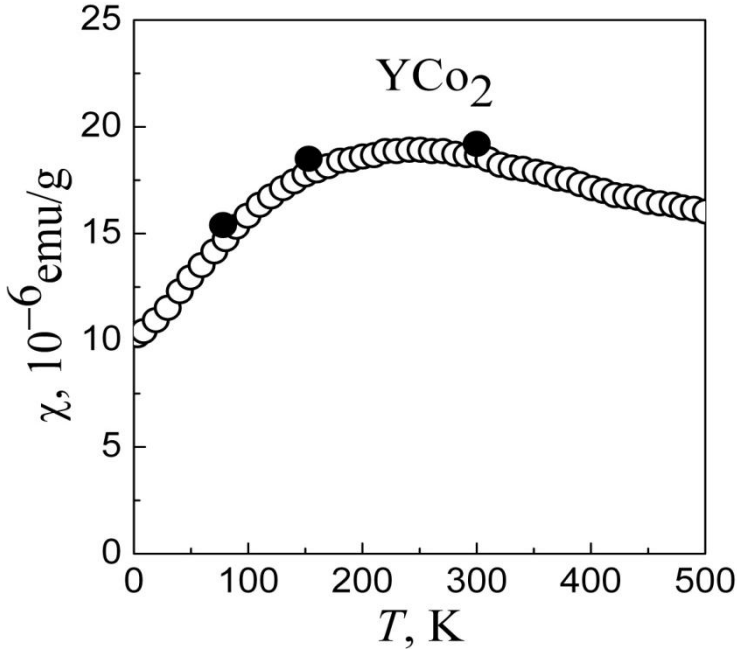


Рис.10. Температурна залежність магнітної сприйнятливості сполуки YCo_2 . (○) - з роботи [K. Yoshimura et al. // Phys. Rev. B, 1988, Vol. 37, P. 3593]; (●)- дані цієї роботи при нульовому тиску з урахуванням домішкового вкладу.

домішковий внесок величина власної сприйнятливості зразка χ визначалася з вимірюваної залежності сприйнятливості зразка від магнітного поля. Гарна згода отриманих результатів з літературними даними свідчить про досить високу якість нашого зразка, в якому кількість домішкової магнітної фази за нашими оцінками складає кілька сотих відсотка колективізованих електронів в феромагнітну фазу в магнітних полях порядку 70 Тл.

Дослідження магнітної сприйнятливості YCo_2 під тиском були проведені за допомогою згаданого вище магнітометра маятникового типу. Згідно проведених розрахунків, домінуючим вкладом у магнітну сприйнятливості YCo_2 є обмінно-посилений спіновий парамагнетизм Паулі χ_p . Відносна оцінка фактору Стонера, яка характеризує

метемагнітний перехід системи колективізованих електронів в феромагнітну фазу в магнітних полях порядку 70 Тл.

Полікристалічний зразок сполуки YCo_2 готувався електродугової плавкою вихідних елементів чистоти 99,9 % в атмосфері аргону з подальшим відпалом при $700^\circ C$ протягом двох тижнів. Структурний аналіз методом рентгенівської дифракції показав, що домінуючою фазою є фаза Лавеса C15. Подальше дослідження магнітних властивостей зразка за допомогою магнітометра маятникового типу виявило присутність в ньому невеликої кількості магнітовпорядкованих домішок, імовірно обумовлених випаданням вільного кобальту на поверхні зразка. Скоригована на

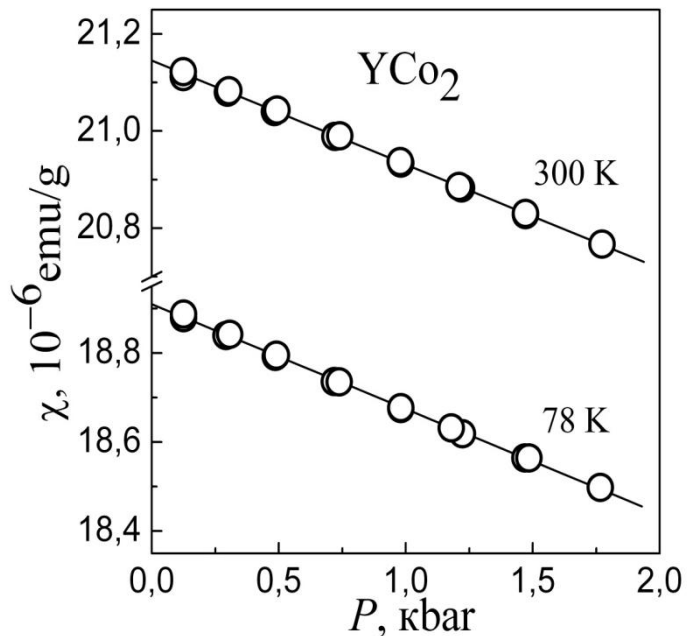


Рис. 11 Залежність магнітної сприйнятливості сполуки YCo_2 від тиску при $T=78$ та 300 К.

метамагнітний перехід системи колективізованих електронів в феромагнітну фазу в магнітних полях порядку 70 Тл.

посилення, та витікає із експериментального значення магнітної сприйнятливості χ і теоретичної оцінки χ_p , складає $S = \chi / \chi_p \sim 20$.

Відмітимо, що внаслідок великого ефекту обмінного-посилення спінового парамагнетизму величина сприйнятливості проявляє сильну залежність від параметру кристалічної решітки.

Вірогідно, це обумовлює реалізацію феромагнітного впорядкування в приповерхневих шарах монокристалу YCo_2 , де ймовірні суттєві варіації міжатомних відстаней.

Дослідження магнітної сприйнятливості YCo_2 під тиском (Рис. 11) були проведені за допомогою магнітометра маятникового типу.

Отримані з експерименту значення об'ємної похідної $d \ln \chi / d \ln V$ наведені на Рис. 12

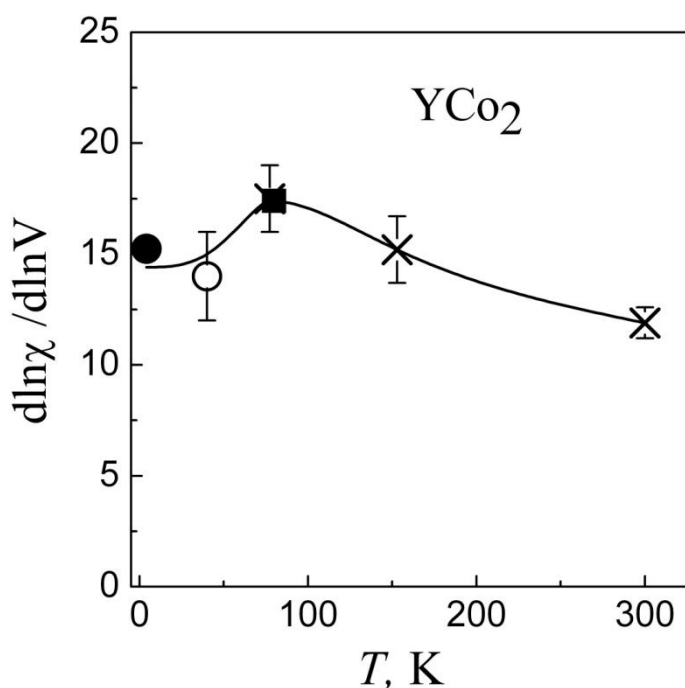


Рис.12 Експериментальні значення магнітооб'ємного ефекту, $d \ln \chi / d \ln V$, в сполуках YCo_2 при різних температурах отриманні різними методами: (+) -наші результати, (●),(○),(■)-літературні дані, що отриманні магнітною магнітострикцією.

разом з існуючими літературними даними інших методів. Використаний в роботі результат детальних розрахунків манітооб'ємного ефекту в YCo_2 при $T=0$ K, що дає значення $d \ln \chi / d \ln V = 15 \pm 2$, гарно узгоджуються із експериментом, що підтверджує адекватність існуючих методів зонного підходу для опису магнетизму металічних систем, близьких до феромагнітної нестабільності.

Отримані в роботі експериментальні значення магнітооб'ємного ефекту в YCo_2 при кінцевих температурах можуть бути використаними при аналізі властивостей дворешітчастих магнетиків для урахування у цих системах домінуючого вкладу в магнетизм, обумовленого взаємодіями між 3d-станами кобальта.

Шостий розділ «Анізотропія магнітної сприйнятливості $Fe_{1+y}Te$. Вплив тиску на магнітні властивості сполук $FeSe$ і $FeTe$ » присвячено на сьогодні досить цікавому для досліджень сімейству високотемпературних надпровідників $FeSe$ та $FeTe$. Нещодавно відкриті залізовмісні надпровідники $FeSe_{1-x}Te_x$ привертають особливу увагу дослідників внаслідок простоти їх кристалічної структури і тим, що в міру заміщення Se на Te сприйнятливості сполук монотонно збільшується і її значення в $FeTe$ приблизно на порядок вище, ніж в $FeSe$. Більш того, сполука $FeTe$ стає магнітно-нестійкою і в ній спостерігається антиферомагнітне впорядкування. В

свою чергу, залежність $T_C(x)$ круто падає, і сполука FeTe вже не є надпровідним при нормальних умовах.

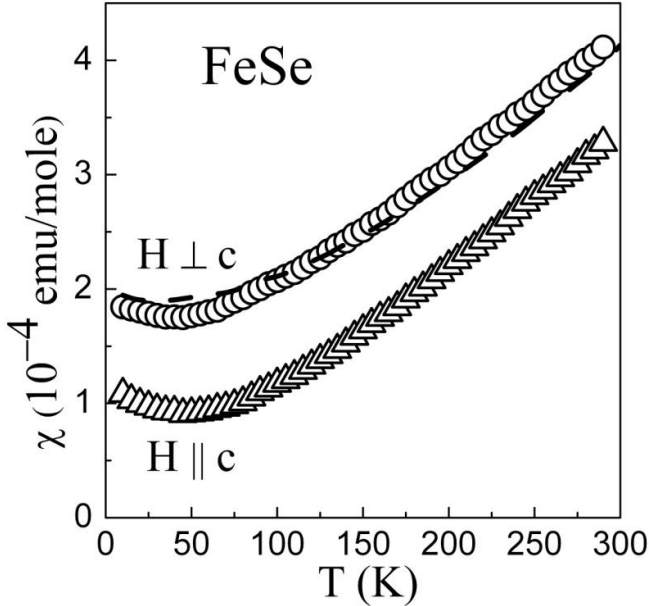


Рис.13 Температурна залежність магнітної сприйнятливості FeSe.

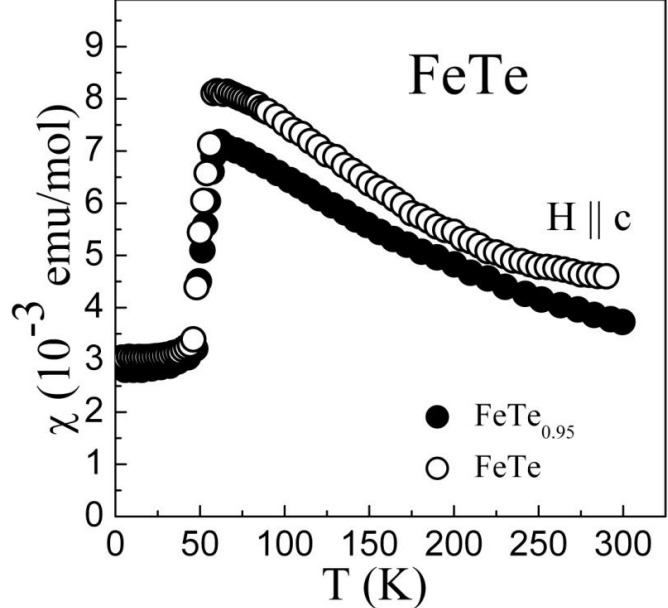


Рис.14 Температурна залежність магнітної сприйнятливості FeTe у полі.

Цей факт дозволяє припустити, що взаємозв'язок магнетизму і надпровідності носить конкуруючий характер. На рис. 13 та 14 наведені температурні залежності магнітної сприйнятливості для цих систем. Магнітні властивості зразків вимірювалися при $T=4.2\div 300$ К, використовуючи СКВІД-магнітометр. Для зразків FeSe, надпровідний перехід виявлений в діапазоні температур 6 - 8 К. Залежність намагніченості від магнітного поля до 5 Тл виявилася близькою до лінійної, що свідчить про те, що кількість феромагнітних домішок в зразках є малою.

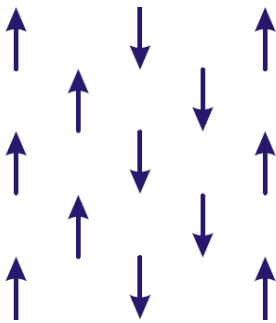


Рис.15 Схема впорядкування магнітних моментів іонів заліза в базисній площині сполуки FeTe в біколінеарній АФМ фазі.

Температурна залежність магнітної сприйнятливості $\chi(T)$ монокристала FeSe для різних напрямків магнітного поля показана на рис. 13. Як видно, спостерігається значне зростання сприйнятливості FeSe в нормальному стані при підвищенні температури, а також її помітна анізотропія. На рис. 14 показані температурні залежності $\chi(T)$ для монокристала FeTe ($H||c$). Дані демонструють чітку особливість в $\chi(T)$ при $T=70$ К, яку вважають пов'язаною з тим, що одночасно відбуваються структурний і

магнітний перехід. Останній має антиферомагнітний тип впорядкування з унікальною біколінеарною страйп-структурою («double stripe», див. рис. 15). В роботі досліджувалась магнітна анізотропія монокристалічних зразків $Fe_{1+y}Te$,

виготовлених в рамках єдиної технології з контрольованим вмістом заліза $1+y$: $1,13 \pm 0,02$, $1,15 \pm 0,02$ та $1,18 \pm 0,02$. Виміри здійснювалися за допомогою СКВІД магнітометра у полі $H = 0,05$ Тл.

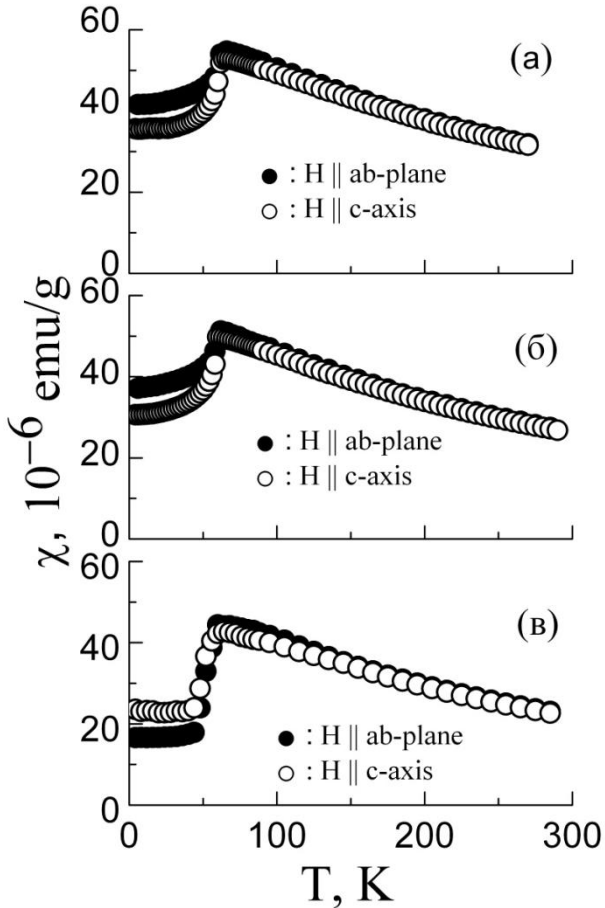


Рис.16 Температурна залежність магнітної сприйнятливості для монокристалів $FeTe$ із різною концентрацією $1+y=1,13$ (а), $1,15$ (б) та $1,18$ (в).

фіксованих температурах 78 і 300 К за допомогою маятникового магнітометра. Високий ступінь гідростатичності має важливе значення для отримання досить прецизійних залежностей сприйнятливості від тиску, оскільки сполуки $FeSe$ і $FeTe$ мають неоднорідну стисливість, пов'язану з їх шаруватою структурою. Виміри проводилися в полі $H=1.7$ Тл, і їх відносна похибка не перевищувала 0.5 % для зразка $FeSe$ і 0,2 % для $FeTe$. Експериментальні залежності сприйнятливості від тиску, $\chi(P)$, для $FeSe$ і $FeTe$ при різних температурах показані на рис. 17 і 18, які демонструють їх лінійний характер. Отримані похідні магнітної сприйнятливості по тиску, $d \ln \chi / dP$, для сполук $FeSe$ і $FeTe$ наведені в таблиці 6.

Таблиця 6. Похідні магнітної сприйнятливості по тиску, $d \ln \chi / dP$, для сполук $FeSe$ і $FeTe$

	T, K	FeTe	FeSe
$d \ln \chi / dP$ (Mbar ⁻¹)	78	$23 \pm 1,5$	10 ± 3
	300	$13 \pm 1,5$	$-6,5 \pm 1$

Для зразків $FeSe$, надпровідний перехід виявлений в діапазоні температур 6 - 8 К. Залежність намагніченості від магнітного поля до 5 Тл виявилася близькою до лінійної, що свідчить про те, що кількість феромагнітних домішок в зразках є малою.

Було встановлено, що при проміжній концентрації заліза, $1+y=1.14$, відбувається зміна знака анізотропії, при цьому її величина не змінюється. В обговорюванні отриманих результатів було встановлено, що саме зміна знака анізотропії відповідає за зміну напрямку вектора антиферомагнетизму у зразках $Fe_{1+y}Te$ із площини ab до напрямку вздовж осі c .

Тісний взаємозв'язок магнетизму і надпровідності в сімействі $FeSe_{1-x}Te_x$ визначає актуальність подальшого вивчення магнітних і надпровідних властивостей і їх еволюції при варіюванні складу, тиску і т.п. для розуміння механізму ВТНП в розглянутому новому класі сполук.

Дослідження магнітної сприйнятливості під тиском газоподібного гелію P до 2 кбар проводилися при

Для аналізу експериментальних даних про залежність $\chi(P)$ в FeSe і FeTe були використані результати розрахунків спінового і орбітального вкладів в магнітну сприйнятливості, χ_{spin} і χ_{orb} , при цьому останній становить близько 15 % від загальної парамагнітної сприйнятливості для обох сполук. Згідно з цими результатами сполуки FeSe і FeTe знаходяться в безпосередній близькості до квантової критичної точки і магнітної нестійкості, що може бути джерелом сильних спінових флуктуацій.

Спостережений великий ефект тиску на магнітну сприйнятливості FeSe та FeTe (Рис. 17 і 18) є досить не очікуваним та потребує обговорювання.

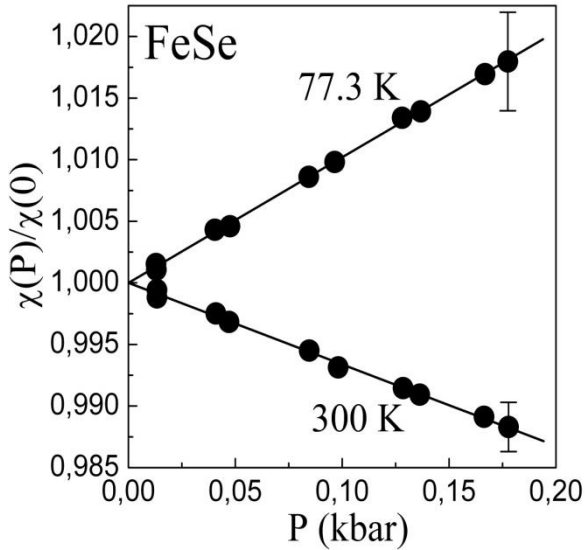


Рис.17 Експериментальні залежності сприйнятливості від тиску, $\chi(P)$ для FeSe.

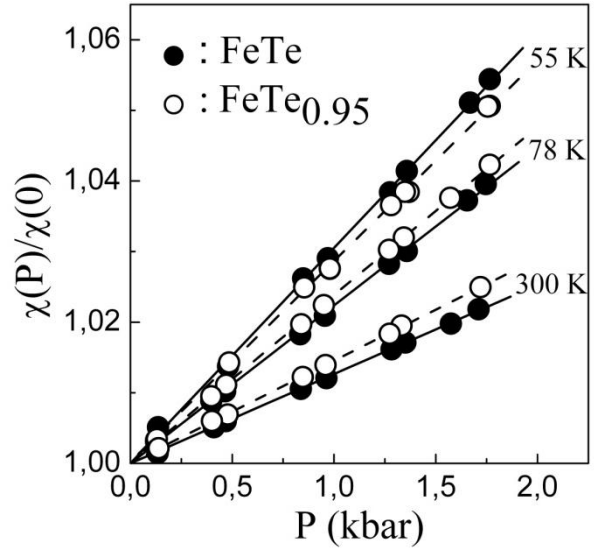


Рис.18 Експериментальні залежності сприйнятливості від тиску, $\chi(P)$ для FeTe.

По-перше, як можна бачити на рис. 17, є суттєва різниця у знаку ефекта тиску для FeSe при низьких та кімнатних температурах. Крім того розмір ефекту суттєво перевищує типові значення для інших обмінно-поосилених зонних парамагнетиків.

У FeTe ефект тиску виявляється ще більшим і додатним як для низьких, так і кімнатних температур (Рис. 18).

Для з'ясування механізму експериментально спостережуваного сильного зросту магнітної сприйнятливості сполуки FeTe під тиском був проведений аналіз ефекту тиску, що виникає при відповідних змінах об'єму елементарної комірки й структурного параметру Z_x , з використанням співвідношення:

$$\frac{d\ln\chi}{dP} = \frac{\partial\ln\chi}{\partial\ln V} \times \frac{d\ln V}{dP} + \frac{\partial\ln\chi}{\partial Z_x} \times \frac{dZ_x}{dP}, \quad (4).$$

Необхідні значення частинних похідних χ по об'єму й по параметру Z_x були встановлені з теоретичних результатів. Для експериментального значення χ при $T=78$

К ці похідні становлять: $\partial \ln \chi / \partial \ln V \sim 40$ і $\partial \ln \chi / \partial Z_x \sim 350$. У цьому випадку перший доданок $(\frac{\partial \ln \chi}{\partial \ln V} \times \frac{d \ln V}{dP})$ є негативним і становить біля -120 Мбар^{-1} , за умови що для FeTe значення модуля стискування прийняте рівним установленому для спорідненої сполуки FeSe: $d \ln V / dP \simeq -3 \text{ Мбар}^{-1}$, а другий доданок $(\frac{\partial \ln \chi}{\partial Z_x} \times \frac{d Z_x}{dP}) = 140 \text{ Мбар}^{-1}$. У цьому випадку ефект зміни параметра Z_x з тиском є визначальним і пояснює отримане в експерименті велике додатне значення $d \ln \chi / dP$.

ВИСНОВКИ

У дисертації узагальнені результати оригінальних досліджень магнітопружних властивостей та їхнього зв'язку з електронною структурою для широкого ряду вузькозонних сполук на основі 3d- і 4f- елементів. Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, можна сформулювати наступним чином:

- 1) На прикладі рідкісноземельного металу гадолінію продемонстровано новий метод визначення впливу тиску на температуру Кюрі, який ґрунтується на експериментальному вивченні впливу гідростатичного тиску на сприйнятливості феромагнетиків в парамагнітній фазі.
- 2) Для сполуки YbV₄ вперше експериментально виявлено великий додатній ефект тиску на магнітну сприйнятливості з проміжною валентністю Yb^{2.8+}, що вказує на суттєве зростання валентності Yb під тиском. Для сполуки SmV₄ достовірно встановлена стійкість валентного стану іона Sm³⁺ під тиском.
- 3) Вперше виявлений аномально великий магнітооб'ємний ефект в системах RMn₄Al₈ і RCr₄Al₈. Зміни магнітної сприйнятливості під тиском корелюють зі зміною електронної структури під впливом тиску.
- 4) Експериментально встановлено великий від'ємний ефект тиску на магнітну сприйнятливості сполуки YCo₂, обумовлений значним обмінним посиленням спінового парамагнетизму з фактором Стонера близько 20.
- 5) Вперше встановлено значний додатній ефект тиску на магнітну сприйнятливості залізовмісних сполук FeTe і FeSe в низькотемпературній області, обумовлений домінуючим механізмом зміни висоти Z шару халькогена над шаром заліза під тиском.
- 6) Достеменно встановлена залежність АФМ-структури в монокристалічних зразках Fe_{1+y}Te від концентрації надлишкового заліза у.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Grechnev G.E. Electronic structure and magnetism of Fe-based superconductors / G.E. Grechnev, A.S. Panfilov, A.V. Fedorchenko, V.A. Desnenko, **I.P. Zhuravleva**, S.L. Gnatchenko, D.A. Chareev, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev // УФЖ.-2012.- Vol. **57**. №. 2. -P. 171-176.
2. Grechnev G.E. Pressure effects on electronic structure and magnetic properties of the FeSe(Te) superconductors / G.E. Grechnev, A.S. Panfilov, V.A. Desnenko, A.V. Fedorchenko, **I.P. Zhuravleva**, S.L. Gnatchenko, V.V. Tsurkan, D.A. Chareev, E.S. Kozlyakova, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev // Физика и техника высоких давлений.- 2012.- Vol. **22**. №. 4. -P. 28-38.
3. Grechnev G.E. Effects of pressure on magnetic properties of gadolinium / G.E. Grechnev, A.V. Logosha, A.S. Panfilov, **I.P. Zhuravleva** // Physica B. -2012. - Vol. **407**. -P.4143-4147.
4. Grechnev G.E. Anisotropy of magnetic properties of Fe_{1+y}Te / G.E. Grechnev, A.S. Panfilov, A.V. Fedorchenko, A.A. Lyogenkaya, **I.P. Zhuravleva**, D.A. Chareev, A.N. Nekrasov, E.S. Mitrofanova, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev, O. Eriksson // J. Phys.: Cond. Mat. - 2014. - Vol.**26**, №43. - P. 436003-1 — 436003-7.
5. Panfilov A.S. Specific features of the magnetic properties of RB₄ (R= Ce, Sm and Yb) tetraborides. Effects of pressure / A.S. Panfilov, G.E. Grechnev, **I.P. Zhuravleva**, A.V. Fedorchenko, V.B. Muratov // Low Temperature Physics. - 2015. - Vol. **41**. №. 3. -P. 193-198.
6. **Zhuravleva I.P.** Electronic structure and magnetic properties of RT₄Al₁₈ (R= Sc, Y, La, Lu; T= Fe, Mn, Cr) compounds. Hydrostatic pressure effects / **I.P. Zhuravleva**, G.E. Grechnev, A.S. Panfilov, A.A. Lyogenkaya, O.V. Kotlyar, A.V. Fedorchenko, A. Feher // Low Temperature Physics. -2016. - Vol. **42**. №. 6. -P. 458-465.
7. **Журавлёва И.П.** Магнитообъёмный эффект в обменно-усиленном зонном парамагнетике YCo₂: теория и эксперимент / **И.П. Журавлёва**, Г.Е. Гречнев, А.С. Панфилов, А.А. Лёгенькая //Физика низких температур. -2017. - Том **43**, № - 5. -P. 748-753.
8. **Zhuravleva I.P.** Pressure effect on magnetic properties of Gd and Gd[0.9]La[0.1] / **I.P. Zhuravleva**, A.V. Logosha // International Conference of

- Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2010, Ukraine, Kharkov, June 07-11, : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2010, -P. 58.
9. Fedorchenko A.V. Magnetic and Superconducting Properties of New Iron-based Superconductors / A.V. Fedorchenko, **I.P. Zhuravleva**, V.V. Tsurkan, A.N. Vasiliev // 2nd International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2011, Ukraine, Kharkov, June 06-10, : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2011, -P. 42.
 10. Panfilov A.S. Effects of pressure on magnetic properties of gadolinium / Panfilov A.S., Grechnev G.E., Logosha A.V., **Zhuravleva I.P.** // "Высокие давления - 2012" Украина, Судак, 23-27 сентября 2012: тезисы доклада.- Судак, 2012.- С. 104.
 11. **Zhuravleva I.P.** Magnetic and superconducting properties of new iron-based superconductors / **Zhuravleva I.P.**, Fedorchenko A.V. , Chareev D.A., Kozljikova E.S. // "ЕВРИКА-2012" Украина, Львов, 19-22 апреля 2012: тезисы доклада.- Львов, 2012.- С. D72.
 12. **Zhuravleva I.P.** Effects of pressure on electronic structure and magnetic properties of gadolinium / **Zhuravleva I.P.**, Logosha A.V. // "3rd International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2012, Ukraine, Kharkov, May 14-18, : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2012, -P. 86.
 13. **Zhuravleva I. P.** Magnetic susceptibility of rare-earth borides RB_4 (R = Ce, Sm, Yb) / **Zhuravleva I. P.** , Fedorchenko A.V. , Panfilov A.S. // 4th International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2013, Ukraine, Kharkov, June 03-07, 2013 : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2013, -P. 36.
 14. Fedorchenko A.V. Anisotropy of magnetic properties of $Fe_{1+y}Te$ / Fedorchenko A.V., Lyogenkaya A.A., **Zhuravleva I.P.** , Panfilov A.S., Grechnev G.E., Chareev D.A., Mitrofanova E.S. // V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2014, Ukraine, Kharkov, June 02-06, 2014 : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2014, -P. 59.
 15. **Zhuravleva I.P.** Magnetic properties of RM_4Al_8 compounds / **Zhuravleva I.P.**, Panfilov A.S., Lyogenkaya A.A., Fedorchenko A.V., Kotlyar O.V., Grechnev G.E.// "XII МК «Фізичні явища в твердих тілах»" Україна, Харків, 01-04 грудня 2015: тези доповідей. - Харків, 2015.- С. 76.

16. Lyogenkaya A.A. Electronic structure and peculiar magnetic properties of Fe_{1-y}Te compounds / Lyogenkaya A.A., Fedorchenko A.V., Logosha A.V., Panfilov A.S., **Zhuravleva I.P.** // VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” ICYS-LTP-2015, Ukraine, Kharkov, June 02-05, 2015 : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2015, -P. 34.
17. **Zhuravleva I.P.** Electronic structure and magnetic properties RT_4Al_8 compounds (R =Sc, Y, La, Lu; T=Fe, Mn, Cr). Hydrostatic pressure effect / **Zhuravleva I.P.**, Lyogenkaya A.A., Panfilov A.S., Grechnev G.E., Fedorchenko A.V., Kotlyar O.V., Feher A. // "Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем", Україна, Київ, 25-27 травня 2016: тези доповідей .- Київ, 2016.- С. 72.
18. **Zhuravleva I.P.** Hydrostatic pressure effect. Electronic structure and magnetic properties RM_4Al_8 compounds (R =Sc, Y, La, Lu; T=Fe, Mn, Cr) / **Zhuravleva I.P.**, Lyogenkaya A.A., Panfilov A.S., Grechnev G.E., Fedorchenko A.V., Kotlyar O.V., Feher A. // " VII International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” - ICYS LTP 2016, Ukraine, Kharkov, June 06-10, 2016 : book of abstract.- Ukraine, Kharkov, 2016, -P. 67.
19. **Zhuravleva I.P.** Magneto - volume effect in exchange-enhance paramagnet YCo_2 / **Zhuravleva I.P.**, Lyogenkaya A.A., Grechnev G.E., Panfilov A.S.// VIII International Conference for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics” - ICPYS LTP 2017, Ukraine, Kharkov, May 29 - June 02, 2017 : book of abstract.- Kharkov, 2017, -P. 90.

АНОТАЦІЯ

Кобзар І. П. Магнітопружні властивості вузькозонних систем на основі 4f- та 3d- металів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла. - Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей в магнітній сприйнятливості вузькозонних систем на основі 4f- та 3d- металів при прикладанні гідростатичного всебічного тиску. Вивчені залежності магнітних властивостей від температури, всебічного тиску, а також при зміні складу системи. Магнітні та магнітопружні властивості і їх зв'язок з електронною структурою були експериментально досліджені для гадолінію, тетраборидів рідкісноземельних металів SmB_4 і YbB_4 , багатокомпонентних сполук із спільною формулою RT_4Al_8

($T=Fe, Cr, Mn$) з тривалентними немагнітними аналогами РЗМ (Y, La, Lu), обмінно-посиленого парамагнетика YCo_2 , новітніх надпровідників на основі заліза $FeSe_{1-x}Te_x$.

Для експериментального вивчення магнітопружних властивостей, саме ефектів всебічного тиску на магнітну сприйнятливість використовувались левітаційний магнітометр та магнітометр маятникового типу, а температурні залежності магнітної сприйнятливості досліджувалися за допомогою магнітометра Фарадея та СКВІД-магнітометра.

При аналізі експериментальних даних були використані результати існуючих розрахунків електронної структури і магнітних властивостей досліджених систем в рамках теорії функціоналу густини.

Ключові слова: магнітна сприйнятливість, обмінно-посилений парамагнетизм, магнітна анізотропія, магнітопружні властивості, рідкісноземельні вузькозонні системи, електронна структура.

АННОТАЦІЯ

Кобзарь И. П. Магнитоупругие свойства узкозонных систем на основе 4f- и 3d- металлов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена исследованию особенностей магнитной восприимчивости узкозонных систем на основе 4f- и 3d- металлов при приложении гидростатического всестороннего давления. Изучены зависимости магнитных свойств от температуры, всестороннего давления, а также поведение магнитных свойств при изменении состава систем. Магнитные и магнитоупругие свойства и их связь с электронной структурой, были экспериментально исследованы для гадолиния, тетраборидов редкоземельных металлов, многокомпонентных соединений с общей формулой RT_4Al_8 с трехвалентными немагнитными аналогами РЗМ (Y, La, Lu), соединения YCo_2 , известного как обменно-усиленный парамагнетик, новейших сверхпроводников на основе железа, $FeSe_{1-x}Te_x$. С целью экспериментального изучения магнитных свойств исследуемых систем, а именно эффектов всестороннего сжатия, использовались левитационный магнітометр и магнітометр маятникового типа, а для изучения температурных зависимостей магнитной восприимчивости использовался магнітометр Фарадея и СКВІД-магнітометр.

В работе был продемонстрирован новый метод точного определения зависимости температур Кюри от объема, что было достигнуто путём экспериментального изучения влияния гидростатического давления на магнитную восприимчивость в парамагнитной фазе монокристаллического гадолиния. Полученные нами результаты хорошо согласуются с имеющимися литературными данными.

Для соединения SmB_4 установлена устойчивость валентного состояния иона Sm^{3+} под давлением и доказано, что в данном соединении не наблюдается явление переменной валентности. Обнаружен большой положительный эффект давления на магнитную восприимчивость соединения YbB_4 с промежуточной валентностью $\text{Yb}^{2.8+}$.

В ходе экспериментальных исследований получены большие значения эффекта давления (величина эффекта на порядок больше чем для других парамагнитных металлов) на магнитную восприимчивость в системах RMn_4Al_8 и RCr_4Al_8 , которые коррелируют с изменением их электронной структуры под давлением.

Для соединения YCo_2 проведены исследования магнитообъемного эффекта, которые существенно дополняют имеющиеся в литературе данные. Установлено аномально большое значение магнитообъемного эффекта, что обусловлено значительным обменным усилением спинового парамагнетизма с фактором Стонера $S \approx 20$.

Установлено, что изменение знака анизотропии магнитной восприимчивости в монокристаллах Fe_{1+y}Te соответствует повороту АФМ структуры при изменении концентрации избыточного железа y в образцах.

Экспериментально обнаружен большой положительный эффект давления на магнитную восприимчивость соединений FeTe и FeSe в области низких температур, что обусловлено изменением внутреннего параметра Z под давлением.

Анализ полученных в работе экспериментальных данных был проведен с использованием имеющихся результатов самосогласованных расчетов электронной структуры исследуемых систем в рамках теории функционала плотности.

Ключевые слова: магнитная восприимчивость, обменно-усиленный парамагнетизм, магнитная анизотропия, магнитоупругие свойства, редкоземельные узкозонные системы, электронная структура.

ABSTRACT

Kobzar I.P. Magnetoelastic properties of narrow-band systems based on 4f and 3d metals. - Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.04.07 - solid state physics. - B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkov, 2018.

The thesis is devoted to the investigation under hydrostatic pressure of the peculiarities of the magnetic susceptibility of narrow-band metallic systems based on 4f- and 3d- metals. Dependences of magnetic properties on temperature, hydrostatic pressure, and also changing composition of the system are studied. Magnetic and magnetoelastic properties and their relation with the electronic structure have been experimentally investigated for gadolinium, tetraborates of rare earth metals SmB_4 and YbB_4 , RT_4Al_8 multicomponent compounds with trivalent nonmagnetic REM analogs (Y, La, Lu), the

exchange-enhanced paramagnetic YCo_2 compound, and the recently discovered iron-based superconductors $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$.

For the experimental study of the magnetoelastic properties, namely the effects of the total pressure on the magnetic susceptibility, a levitation magnetometer and a magnetometer of a pendulum type were used, and temperature dependences of the magnetic susceptibility were investigated using the Faraday magnetometer and the SQUID magnetometer.

In the analysis of our experimental data, we used the results of existing calculations of the electronic structure and magnetic properties of the investigated systems in the framework of the density functional theory.

Key words: magnetic susceptibility, exchange-enhanced paramagnetism, magnetic anisotropy, magnetoelastic properties, rare-earth narrow-band system, electronic structure.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 110-18.
Підписано до друку 14.02.18. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ ®
ИЗДАТ 
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com