

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут фізики НАН України



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директором Інституту фізики НАН
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.



М.В. Бондар

(підпис)

« 27 » жовтня 2023 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ВК.07

Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах
для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня
вищої освіти – доктор філософії

Київ - 2023

Розробник:

чл.-кор. НАН України, завідувач відділу фізики магнітних явищ Інституту фізики НАНУ доктор фізико-математичних наук, професор, С.М. Рябченко/С.М. Рябченко/

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол № 10-1 від 24 жовтня 2023 р.

Головою науково-методичної ради М.В. Бондар/М.В. Бондар/

Робочу програму затверджено Вченою радою Інституту фізики НАНУ

Протокол № 10 від 26 жовтня 2023 р.

Голова Вченої ради М.В. Бондар/М.В. Бондар/

Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 27 жовтня 2023р.

Гарант освітньої програми М.В. Бондар/М.В. Бондар/

Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІФ НАН України	підпис	№ протоколу	дата протоколу
20____/20____				
20____/20____				
20____/20____				
20____/20____				

1. Загальні відомості

Найменування показників	Характеристика дисципліни за денною формою навчання
Вид дисципліни	вибіркова
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Загальний обсяг кредитів / годин	4/120
Курс	2
Семестр	2
Кількість змістових модулів з розподілом	2
Обсяг кредитів	4
Обсяг годин, В тому числі:	120
Лекції	30
Практичні заняття	15
Самостійна робота	75
Форма підсумкового контролю	екзамен

2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № 10 від 26 жовтня 2023 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

Передумова вивчення. Навчальний курс ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Передумовою слухання курсу є засвоєння слухачем базових курсів: Загальна фізика, Квантова механіка, Основи фізики твердого тіла в об’ємі для фізичних/радіофізичних факультетів класичних університетів.

Мета навчальної дисципліни. ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»: сформувати загальне уявлення щодо природи магнітних і спін-залежних явищ у конденсованих середовищах та їх модифікації при переході до нанорозмірних об’єктів; ознайомити з сучасними методами досліджень та використань магнітних та спін-залежних явищ у конденсованих середовищах та наноб’єктах; пояснити специфіку змін властивостей різних класів матеріалів та структур при переході до нанорозмірів.

Зміст навчальної дисципліни. Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»: доповнити, а у певній частині сформувати базові уявлення щодо сучасного стану фізики магнітних явищ у конденсованих середовищах та у твердотільних нанорозмірних системах/структурах та їх застосуваннях, показати специфіку прояву магнітних та спін-залежних явищ у наноскопічному діапазоні ознайомити з сучасними методами дослідження магнітних властивостей наноб’єктів, сформувати підходи для застосування згаданих методів у практичній та науковій роботі.

Предметом навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах» є фізичні та хімічні явища, які обумовлюють існування магнітних явищ та магнітні властивості різних типів конденсованих середовищ у тому числі нано-матеріалів та структур, методи діагностики та використання магнітних систем і структур. Зокрема, курс складається з 2-х пов’язаних між собою частин: магнітні властивості систем з вільними носіями електричного заряду, і магнітні властивості систем з локалізованими носіями електричного заряду, а також і тіл, що водночас містять як локалізовані неспарені електрони, так і делокалізовані.

Основними завданнями навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах» є формування розуміння єдності фізики і її методів аналізу фізичних явищ, механізмів виникнення магнітних явищ та особливостей їх проявів у конденсованих середовищах

різних типів, зокрема у наносистемах ознайомлення з перспективами та сучасними напрямками їх практичного використання та спектром наукових задач у цьому напрямі досліджень.

2) Набути здатність застосовувати ці знання у практичних ситуаціях для розуміння властивостей рідкокристалічних систем.

3) Підвищити здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями в галузі рідкокристалічних матеріалів, здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел, в тому числі, електронних ресурсів, та здатність студентів до абстрактного мислення, аналізу та синтезу матеріалу з всіх фізичних дисциплін.

4) Формування фізичного мислення у аспірантів в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

Знати: природу виникнення магнітних явищ; основні типи систем з різними їх проявами; методи досліджень магнітних явищ і властивостей в конденсованих тіл та структур, зокрема нанорозмірних та наноматеріалів.

Вміти: прогнозувати фізичні, зокрема магнітні, властивості матеріалів різних класів в тому числі наноструктур та нанокомпозитів та застосувати набуті знання в наукових-дослідженнях та експертній діяльності.

Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»:

Загальні: ЗК1, ЗК2, ЗК3.

Спеціальні: СК1, СК2, СК5, СК6

Програмні результати навчання: РН1, РН4, РН5, РН6, РН7, РН8, РН9.

3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

(2 курс – 1 семестр)

№	Зміст	Лекції, год.	Практичні заняття, год.	Самостійна робота, год.	Разом, год.
1.	Загальні поняття щодо природи магнетизму; масштаби явищ, методи досліджень. Сили. Магнітні моменти вільних атомів, ядер. Спін і статистика	3	0	7	10
2.	Магнітні властивості вільного електронного газу у твердому тілі. Квантування Ландау; парамагнетизм Паулі; Магнітоопір. ефект Холла звичайний і квантовий; цілочисельний і дробний КЕХ, квант опору, функція Лафліна як приклад зв'язаного стану електронів; діамагнітні екситони	3	3	7	13
3.	Магнітні властивості надпровідників; ефект Мейснера, рівняння Лондонів; вихорі Абрикосова	6	3	15	24
4.	Контрольна робота 1	0	0	0	0
5.	Магнітні властивості багатоелектронного іона; електрон-електронна взаємодія, самоузгодж. поле Хартрі, наближення Хартрі-Фока, обмінна взаємодія; Спін-орбіта і правила складання моментів, L-S зв'язок, детермінанти Слетера. Елементи теорії внутрикрісталічного поля; 3d іони у кристал. полі, заморожування орбітального моменту, ефективний спін. Спін-гамільтоніан, мікроскопічний і симетрійний розгляди. Ефект Яна-Теллера	3	0	7	10
6.	Методи магнітного резонансу, ЕПР, ЯМР, ПЕЯР, ОДМР, спінова луна. ЯМР томографія. Рівняння Блоха, часи релаксації T_1 і T_2 . Спін-спінова взаємодія.	3	3	8	14
7.	Спінове впорядкування в твердих тілах. Основні уявлення теорії фазових переходів; різновиди спінового впорядкування в твердих тілах та їх основні характеристики. Магнітний резонанс у магнітовпорядкованих речовинах рівняння Ландау-Ліфшиця.	3	3	8	14
8.	Спін-фононна взаємодія в твердих тілах, природа і основні уявлення. Процеси спін-граткової релаксації,	3	0	8	11

	основні механізми; магнітострикція, акустичний парамагнітний резонанс				
9.	Системи з носій-іонною обмінною взаємодією, її основні відмінності від ОВ локалізованих ел-нів. Ефект Кондо; Взаємодія RKKY. Гігантське спінове розщеплення зон носіїв струму в магніторозчинених надпровідниках, магнітних металах. Спін-залежна провідність. Гігантський і “колосальний” магнітоопори. Напрямки зусиль для реалізації спінтроники.	3	3	8	14
10.	Особливості проявів носій-іонної взаємодії в системах з квантовими ямами, дротами, точками. Особливості магнітних властивостей магнітних наночастинок, наноструктур. Суперпарамагнетизм.	3	0	7	10
Всього		30	15	75	120

Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:

опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

4. Зміст навчальної дисципліни

ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

1. **Тема 1.** Загальні поняття щодо природи магнетизму; масштаби явищ, методи досліджень. Сили. Магнітні моменти вільних атомів, ядер. Спін і статистика.

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Прочитати і опрацювати файли [miles핀_timeline.pdf](#) і [miles핀_all.pdf](#) з представленої NaturePhysics підбірки “Milestones of spin”.

2. **Тема 2.** Магнітні властивості вільного електронного газу у твердому тілі. Квантування Ландау; парамагнетизм Паулі; Магнітоопір. ефект Холла звичайний і квантовий; цілочисельний і дробний КЕХ, квант опору, функція Лафліна як приклад зв’язаного стану електронів; діамагнітні екситони.

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** «Комп’ютерне моделювання мезогенів».

2. Опрацювання матеріалу, що винесений для самостійного розв’язку після практичного заняття:

Задачі з магнітних властивостей Фермі-рідини.

3. **Тема 3, 4.** Магнітні властивості надпровідників; ефект Мейснера, рівняння Лондонів; вихорі Абрікосова. Контрольна робота 1

Завдання для самостійної роботи (15 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** «Розрахунок складу і температур фазових переходів ідеальної евтектичної суміші рідких кристалів».

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

задачі з магнітн. властивостей надпровідн

5. **Тема 5.** Магнітні властивості багатоелектронного іона; електрон-електронна взаємодія, самоузгодж. поле Хартрі, наближення Хартрі-Фока, обмінна взаємодія; Спін-орбіта і правила складання моментів, L-S зв'язок, детермінанти Слетера. Елементи теорії внутрикрісталічного поля; 3d іони у кристал. полі, заморожування орбітального моменту, ефективний спін. Спін-гамільтоніан, мікроскопічний і симетрійний розгляди. Ефект Яна-Теллера

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

6. **Тема 6.** Методи магнітного резонансу, ЕПР, ЯМР, ПЕЯР, ОДМР, спінова луна. ЯМР томографія. Рівняння Блоха, часи релаксації T_1 і T_2 . Спін-спінова взаємодія.

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
Задачі з магнітного резонансу і магнітних властивостей парамагнетиків.

7. **Тема 7.** Спінове впорядкування в твердих тілах. Основні уявлення теорії фазових переходів; різновиди спінового впорядкування в твердих тілах та їх основні характеристики. Магнітний резонанс у магнітовпорядкованих речовинах рівняння Ландау-Ліфшиця

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття:
задачі з магнітного резонансу і магнітних властивостей феро і антиферомагнетиків.

8. **Тема 8.** Спін-фононна взаємодія в твердих тілах, природа і основні уявлення. Процеси спін-граткової релаксації, основні механізми; магнітострикція, акустичний парамагнітний резонанс

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

9. **Тема 9.** Системи з носій-іонною обмінною взаємодією, її основні відмінності від ОВ локалізованих ел-нів. Ефект Кондо; Взаємодія RKKY. Гігантське спінове розщеплення зон носіїв струму в магніторозчинених надпровідниках, магнітних металах. Спін-залежна провідність. Гігантський і "колосальний" магнітоопори. Напрямки зусиль для реалізації спінтроники.

Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після лекції та практичного заняття:

Прочитати і розібрати у головних рисах огляд з спінтроники Товстолиткіна, Рябченка, Погорілого та огляд з того ж питання Данілова, Демидова, Єжевського (Нижній Новгород).

10. **Тема 10.** Особливості проявів носій-іонної взаємодії в системах з квантовими ямами, дротами, точками. Особливості магнітних властивостей магнітних наночастинок, наноструктур. Суперпарамагнетизм

Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

5. Практичні заняття

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

6. Самостійна робота

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

№	Зміст самостійної роботи аспірантів	Обсяг, годин
1.	Вивчення матеріалу лекції	30
2.	Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення	45
Усього за навчальну дисципліну		75

7. Методи викладання

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.

Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою $0,1R$, де R – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

Шкала відповідності оцінок

Рейтингова оцінка	Значення оцінки	Рейтинг у відсотках, %
A	Відмінно – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з, можливими незначними недоліками.	90-100
B	Дуже добре – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.	82-89
C	Добре – добрий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.	75-81
D	Задовільно – посередній рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.	69-74
E	Достатньо - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу.	60-68
FX	Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання.	35-59
F	Незадовільно з з обов’язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.	1-34

9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

1. Яка причина відхилення точного значення g-фактору вільного електрона від 2-ки?
2. Що власне «квантується» при квантуванні магнітного потоку, як співвідноситься квант магнітного потоку у нормальному металі і у надпровіднику?
3. Фізичний зміст «мінімальної металевої провідності» і критерію локалізації Йоффе-Регеля?
4. У що переходять складові ρ_{xx} і ρ_{xy} квантового ефекту Холла при підвищенні температури, або зменшенні рухливості електронів?
5. Правила Хунда. В чому причина «обмінної взаємодії» у багатоелектронному атомі? Чи вона та ж сама для між іонної обмінної взаємодії?
6. Наслідком чого є виникнення «анізотропної обмінної взаємодії», векторної обмінної взаємодії Дзялошинського –Морія?
7. Що є фізичною причиною виникнення рівноважної доменної структури у феромагнетиків?
8. На намальованій фазовій діаграмі антиферомагнетика у магнітному полі вказати які лінії фазових переходів відносяться до I-го, а які до II-го родів.
9. Що таке ефект Яна-Теллера? Статичний? Динамічний?
10. Що таке магнітний полярон?
11. Написати еквівалентний оператор Стівенса через компоненти орбітального моменту для компоненти кристалічного поля, що описується виразом «ху».
12. Яка послідовність збуджуючих імпульсів для спінового відлуння Хана?
13. Написати операторний вираз для ізотропної надтонкої взаємодії.
14. Що таке «незвідні тензорні оператори»? Навести приклад.
15. В чому фізична причина «заморожування орбітального моменту» перехідних іонів у кристалічному полі?
16. Що таке «суперпарамагнетик? Що таке «температура блокування» у суперпарамагнетику?
17. Як сумістити магнітне впорядкування з вимогами інваріантності до інверсії знаку часу?

18. Що таке «гігантський» магнітоопір? Його застосування.
19. Що таке «колосальний» магнітоопір?
20. Що таке «гігантське спінове розщеплення станів носіїв струму і екситонів у магніто-змішаному напівпровіднику?
21. Що таке «об'ємно індукована асиметрія» «і «структурно індукована асиметрія»?
22. Магнітна фазова діаграма для феромагнетика, що намагнічується вдовж, або уперек осі магнітної анізотропії.
23. Що таке фактор розмагнічування?
24. Якими часами релаксації оперують рівняння Блоха? Якими оперують рівняння Ландау-Ліфшиця?
25. Що таке спінові хвилі?
26. Природа спін-спінової релаксації, спін-граткової релаксації?

10.Рекомендована література

з навчальної дисципліни ВК.07 «Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах»

Основна:

1. Ч. Киттель «Введение в физику твердого тела», Москва, Наука, 1978 (гл. 7,8,12,16,17).
2. Дж. Займан «Принципы теории твердого тела», Москва, Мир, 1966. (гл. 9-11)
3. В.Г. Бар'яхтар, Б.А. Иванов «Магнетизм. Что это?», Киев, Наукова думка, 1981. (Engl. Transl: V.G. Bar'yakhtar and B.A. Ivanov «Modern magnetism. A primer», Moscow, Mir, 1985)
4. Р. Уайт «Квантовая теория магнетизма», Москва, Мир, 1985.
5. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер «Лекции по магнетизму», Москва, Физматлит, 2005.
6. Ч. Сликтер «Основы теории магнитного резонанса», Москва, Мир, 1981.
7. О.І. Товстолиткін, С.М. Рябченко, А.М. Погорілий Основи спітроніки (стаття з «УФЖ – огляди», 2010).
8. Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, А.А. Ежевский «Основы спинтроники» (уч. пособ. Нижегородский университет, РФ, 2007).
9. Н.Г.Чеченин (МГУ, РФ) Лекции "Физика магнитных наноструктур",
<http://danp.sinp.msu.ru/MagNanoS/ngchposob2.htm>

Додаткова:

10. Г.С. Кринчик «Физика магнитных явлений», Москва, изд. МГУ, 1976.
11. Дж. Пейк «Парамагнитный резонанс», Москва, Мир, 1965.
12. А.Г. Гуревич «Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках», М., Наука, 1973.
або А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков «Магнитн. колебания и волны», М., Изд. "Физ.-мат. лит-ра" ВО Наука, 1994.
13. Ж. Винтер «Магнитный резонанс в металлах», Москва, Мир, 1976.
14. К.М. Херд «Многообразие видов магнитного упорядочения», УФН, т.142, с.331, 1984.
15. М.Г. Находкин, Д.І. Шека «Основы нанофізики та нанотехнологій», Київ (2006), главы, присвячені магнітним влаивостям фермі-газу і магнітним влаивостям надпровідників.
16. К.Х. Хауссер, Х.Р. Кальбитцер «ЯМР в медицине и биологии», (пер. з нім.), Київ, Наукова думка, 1993.
17. М. Фишер «Природа критического состояния», Москва, Мир, 1968.
18. С.В. Вонсовский «Магнетизм», Москва, Наука, 1971.
19. В.Л. Введенский, В.И. Ожогин «Сверхчувствительная магнитометрия биообъектов» (гл.1 описание работы и практического устройства СКВИДов) Москва, 1981
20. https://www.quantamagazine.org/the-hidden-magnetic-universe-begins-to-come-into-view-20200702/?utm_source=Nature+Briefing&utm_campaign=e9079e5ba2-briefing-dy-20200703&utm_medium=email&utm_term=0_c9dfd39373-e9079e5ba2-42772559 The Hidden Magnetic Universe Begins to Come Into View