

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти  
і науки України**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор

ІМаг НАН України та МОН України

д.ф.-м.н., професор

 **Олександр ТОВСТОЛИТКІН**  
«06» вересня 2022 р.



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)**

**В 5 ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ ТА КРИТИЧНІ ЯВИЩА**

(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

третього освітнього (освітньо-наукового) рівня  
вищої освіти – доктора філософії

Київ – 2022

**Розробник:**

Доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник \_\_\_\_\_ Косогор Анна Олексіївна  
(підпис)

**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол від 30.08.2022р. № 1

Голова науково-методичної ради \_\_\_\_\_ Ольга САЛЮК  
(підпис)

Робочу програму затверджено Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України

Протокол від 06 вересня 2022 № 5-22

Голова Вченої ради \_\_\_\_\_ Олександр ТОВСТОЛИТКІН  
(підпис)

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником**

**освітньої програми):** Прикладна фізика та наноматеріали 06 вересня 2022 р.

(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ Олександр ТОВСТОЛИТКІН  
(підпис)

Пролонговано Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України:



навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІМаг НАН України та МОН України	підпис	№ протоколу, дата протоколу
2023 / 2024	Товстолиткін О.І.		№ 7-23, 27.07.2023
20___ / 20___			
20___ / 20___			
20___ / 20___			



# ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ ТА КРИТИЧНІ ЯВИЩА

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика та наноматеріали
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити: 120 годин (денна: 36 годин – лекції, 18 годин – практичні заняття, 66 годин – СРС)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua">http://ukr.imag.kiev.ua</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д.ф.-м. наук, старший дослідник, Косогор Анна Олексіївна, <a href="mailto:annakosogor@gmail.com">annakosogor@gmail.com</a> , +38098555-47-57 Практичні: : д.ф.-м. наук, старший дослідник, Косогор Анна Олексіївна, <a href="mailto:annakosogor@gmail.com">annakosogor@gmail.com</a> , +38098555-47-57
Розміщення курсу	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua">http://ukr.imag.kiev.ua</a>

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчання та результати навчання

Програму навчальної дисципліни «Фазові переходи та критичні явища» складено відповідно до освітньої програми «Фізика» підготовки доктора філософії спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

**Мета навчальної дисципліни** – формування у аспірантів компетентностей в області фізики конденсованого стану, фазових перетворень, явищ та нелінійних процесів, що супроводжують фазові перетворення, критичну поведінку речовин при фазових перетвореннях.

**Предмет навчальної дисципліни** – явища фазових переходів, критичні явища, що їх супроводжують.

#### Програмні результати навчання:

Компетентності:

**ЗК 1.** Здатність проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових і складних ідей, переосмислювати наявне та створювати нове цілісне знання та/або професійну практику, розв'язувати значущі наукові та інші проблеми.

**ЗК 2.** Здатність використовувати у професійній діяльності сучасні знання з різних наук, у тому

числі міждисциплінарного характеру.

**ФК 01.** Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, комбінувати та зв'язувати їх методи, інтерпретувати одержані результати з метою виявлення властивостей та характеристик досліджуваних об'єктів в галузі прикладної фізики та нанотехнологій

**ФК 03.** Здатність осмислювати та аналізувати результати експериментальних досліджень, встановлювати зв'язок з теоретичними моделями, вирізняти із накопичених спостережень відтворювані експериментальні факти. Здатність адаптувати і узагальнювати результати сучасних досліджень в галузі прикладної фізики для вирішення наукових і практичних проблем.

### **Результати навчання:**

**ПРН 1.** Системні знання у галузі фізики та інших природничих наук, включаючи оволодіння методами наукового дослідження при здійсненні професійної діяльності.

**ПРН 3.** Знання методики проведення теоретичних та експериментальних досліджень, основних принципів системного та синергетичного аналізу, розуміння методів моделювання та фізичних моделей в прикладній фізиці.

**ПРН 6.** Вміння орієнтуватися в наукових проблемах у професійній сфері, знаходити оптимальні шляхи їх розв'язання.

**ПРН 8.** Вміння обирати теоретичні й експериментальні методи дослідження, відповідні методи системного і синергетичного аналізу, застосовувати моделі та методи моделювання та інноваційні підходи для розв'язання складних завдань і проблем в науково-дослідній та/або інноваційних сферах.

Після засвоєння матеріалу дисципліни аспіранти отримають знання з фізики фазових переходів та критичних явищ, принципів та методів фізики конденсованого стану, теорії опису фазових перетворень та критичної поведінки фізичних величин; набудуть уміння застосовувати здобуті фундаментальні знання теорії фазових переходів при розробці нових наукових методик та в новітніх промислових технологіях, в зразках нових матеріалів, для пояснення отриманих даних і передбачення нових наукових результатів, класифікувати та описувати фазові переходи, знаходити критичні точки та критичні індекси, складати математичні моделі опису фазового переходу; отримають досвід практичного застосування методів опису фазових переходів та критичних явищ, проведення досліджень і узагальнення їх результатів в області явищ і процесів, що відбуваються та супроводжують фазові переходи, самостійної роботи з навчальною, науковою та довідковою літературою у області фазових перетворень українською та іноземними мовами.

### **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Для успішного засвоєння дисципліни студент повинен оволодіти дисципліною «Вибрані розділи теоретичної фізики». Компетентності, знання, уміння та досвід, одержані в процесі вивчення кредитного модуля «Фазові переходи та критичні явища», є необхідними для якісного виконання наукових досліджень за темою дисертації.

### **3. Зміст навчальної дисципліни**

Дисципліну структурно розділено на 6 розділів:

Розділ 1. Термодинамічна теорія фазових переходів.

Розділ 2. Моделі фазових переходів.

Розділ 3. Метод середнього поля.

Розділ 4. Квантові фазові переходи.

Розділ 5. Фазові переходи з векторним і тензорними параметрами порядку.

Розділ 6. Критична поведінка ансамблів магнітних наночастинок.

#### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

##### **Базова література:**

1. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, (1970). Statistical Physics. Vol. 5 (2nd ed.). Pergamon Press. ISBN 0-08-009103-2.
2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, (1984). Electrodynamics of Continuous Media. Vol. 8 (2nd ed.). Pergamon Press. ISBN 0-08-030276-9.
3. H. Eugene Stanley, (1971). Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena. Clarendon Press. Oxford, ISBN-10: 0195053168.
4. Толедано, Ж. К., & Толедано, П. (1994). Теория Ландау фазовых переходов. ЖК Толедано, П. Толедано.–М.: Мир.–1994.–463 с.
5. Landau theory of ferroelastic phase transitions: Application to martensitic phase transformations / Barabanov, O.V., Kosogor, A. // Low Temperature Physics, 2022, 48(3), pp. 206–211.
6. Determination of magnetic, electronic and lattice contributions to low-temperature specific heat: Procedure and its application to metamagnetic alloys // Kosogor, A., L'vov, V.A., Umetsu, R.Y., Xu, X., Kainuma, R. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 541, 168549

##### **Допоміжна література:**

- [1] B. Jiménez, A. Castro, and L. Pardo, Appl. Phys. Lett. 82, 3940 (2003).
- [2] A. Sieradzki, Phase Trans. 81, 413 (2008).
- [3] V. I. Levitas, D. L. Preston, and D. W. Lee, Phys. Rev. B 68, 134201 (2003).
- [4] E. V. Gomonaj, and V. A. L'vov, Phase Trans. A 47, 9 (1994).
- [5] G. Azzolina, R. Bertoni, C. Ecolivet, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and E. Collet, Phys. Rev. B 102, 134104 (2020).
- [6] M. V. Talanov, and V. M. Talanov, Ferroelectrics 543, 1 (2019).
- [7] G.R. Barsch, J.A. Krumhansl, Phys. Rev. Lett. 53, 1069 (1984).
- [8] A. Kosogor, N. J. Matsishin, and V. A. L'vov, Phase Trans. 86, 796 (2013).
- [9] A. Kosogor, J. Appl. Phys. 119, 224903 (2016).
- [10] V. A. L'vov, A. Kosogor, O. Söderberg, S-P. Hannula, Trans Tech Publications Ltd. 635, 13 (2010).

#### **Навчальний контент**

##### **5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)**

###### **Лекційні заняття.**

Лекція 1. Розділ 1. Термодинамічна теорія фазових переходів.

Означення фази. Поняття фазовий перехід. Фазові діаграми, критичні точки. Приклади фазових переходів та фазових діаграм: структурні, магнітні, тиск – температура, намагніченість – температурі, поляризація – температура. Формула Клайперона – Клаузіуса.

Лекція 2. Параметр порядку. Теорія Ландау фазових переходів 2-го роду. Термодинамічна теорія фазових переходів 1-го роду. Фазові переходи 1-го та 2-го роду.

Лекція 3. Флуктуації параметру порядку. Ефективний гамільтоніан. Кореляційна функція. Співвідношення Леванюка-Гінзбурга. Критичні індекси. Метод Паде.

Лекція 4. Розділ 2. Моделі фазових переходів.

Рівняння Ван-дер-Ваальса. Модель Ізінга. Модель ізоструктурного фазового переходу для спінових переходів.

Лекція 5. Опис негейзенбергівського феромагнетика з одноіонною анізотропією. Ізотропний негейзенбергівський феромагнетик з обміном 4-го порядку по спіну. Модель двохпідграткового антиферомагнетика: спін-флоп, спін-фліп переходи.

Лекція 6. Розділ 3. Метод середнього поля.

Метод середнього поля. Метод Брега-Вільямса. Метод максимуму ентропії. Рівняння стану. Критичні точки. Розрахунок температурної залежності для параметра порядку. Польові залежності для параметру порядку. Зміна ентропії в наближенні середнього поля.

Лекція 7. Розділ 4. Квантові фазові переходи.

Визначення квантового фазового переходу. Енергія та рівняння стану. Опис фазового переходу у випадку феромагнетика з одноіонною магнітною анізотропією.

Лекція 8. Індуковані магнітним полем квантові фазові переходи у димеризованому антиферомагнетичу. Квантові фазові переходи у ван-флеківському антиферомагнетичу типу DTN.

Лекція 9. Розділ 5. Фазові переходи з векторним і тензорними параметрами порядку. Магнітопружні фазові переходи. Фазові переходи в магнетичу з біквадратичним обміном та прояви магнітопружності в ньому.

Лекція 10. Критична втрата стійкості магнітної частинки в еластомері. Пружна енергія деформованого еластомеру при повороті частинки. Повна енергія частинки в еластомері. Лагранжиан. Рівняння стану.

Лекція 11. Магніто-реологічний ефект при зсуві та згині магніто-активних еластомерів. Ефект пам'яті форми та критичний згин магніто-активних еластомерів в магнітному полі.

Лекція 12. Розділ 6. Критична поведінка ансамблів магнітних наночастинок. Експериментальні дані намагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною магнітною анізотропією. Модель перемагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною анізотропією. Супердомени, їх спостереження та опис.

Лекція 13. Експериментальні дані намагнічування ансамблів наночастинок манганітів. Критична температура та критичні індекси. Магнітокалоричний ефект. Вклад суперпарамагнетизму в магнітокалоричний ефект ансамблю наночастинок манганіту.

## **Практичні заняття**

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Теорія Ландау фазових переходів
2	Гамільтоніан, вільна енергія, рівняння стану для спінового фазового переходу.
3	Гамільтоніан середнього поля, рівняння стану, вільна енергія для двох- та трьох- рівневих систем
4	Модульна контрольна робота
5	Хвильова функція, енергія основного стану, рівняння стану для квантових фазових переходів
6	Поля деформацій, кути повороту магніто-анізотропної частинки в еластомері
7	Ланжевенівське намагнічування, магнітна ентропія, зв'язок між критичними індексами для наночастинок

## 6. Самостійна робота аспіранта

З метою чіткої організації самостійної роботи студентів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки конспектів та рефератів із вибраних тем. Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	30
2	Підготовка до МКР	16
3	Підготовка до екзамену	20

## Політика та контроль

### 1. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-інститутського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 8 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-інститутського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-інститутського розпорядку);

### 2. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль: опитування за темою заняття, МКР.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестрова атестація проводиться у вигляді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і інститутська шкала.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на аудиторних заняттях;
- 2) за модульну контрольну роботу (МКР);
- 3) за відповідь на заліку.

Система рейтингових балів

1) Аудиторні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 4. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на лабораторних заняттях становить  $12 \times 4 = 48$  бали. Нарахування балів на одному практичному занятті:

- відмінні відповіді 4 балів;
- дуже добрі, добрі відповіді 3,2 балів;
- задовільні, достатні відповіді 1 бал.

2) Модульна контрольна робота (МКР). Ваговий коефіцієнт дорівнює 12. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить  $1 \times 12 = 12$  балів. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 11-12 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) 8-10 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) 6-7 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

3). Екзамен. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюється у 20 балів. Всього  $2 \times 20 = 40$  балів.

Нарахування балів за відповідь на заліку:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 36-40 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 30-35 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 24-29 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів, він може отримати залік автоматом. Для виставлення фінальних оцінок рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за інститутською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
90-100	Відмінно
75-89	Добре
60-74	Задовільно
Менше 60	Незадовільно
Не виконано інші умови допуску до заліку	Не допущено

### **3. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Означення фази. Поняття фазовий перехід.
2. Фазові діаграми, критичні точки. Приклади фазових переходів та фазових діаграм: структурні, магнітні, тиск – температура, намагніченість – температурі, поляризація – температура. Формула Клайперона – Клаузіуса.
3. Параметр порядку. Теорія Ландау фазових переходів 2-го роду.
4. Термодинамічна теорія фазових переходів 1-го роду. Фазові переходи 1-го та 2-го роду.
5. Флуктуації параметру порядку. Ефективний гамільтоніан. Кореляційна функція. Співвідношення Леванюка-Гінзбурга.
6. Критичні індекси. Метод Паде.



7. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Модель Ізінга.
8. Модель ізоструктурного фазового переходу для спінових переходів.
9. Модель негейзенбергівського феромагнетика одноіонною анізотропією, з обміном 4-го порядку по спіну.
10. Модель двопідграткового антиферомагнетика: спін-флоп, спін-фліп переходи.
11. Метод середнього поля. Метод Брега-Вільямса. Метод максимуму ентропії.
12. Рівняння стану в методі середнього поля. Критичні точки. Розрахунок температурної залежності для параметра порядку, впливу зовнішнього поля та зміни ентропії.
13. Визначення квантового фазового переходу. Енергія та рівняння стану. Опис фазового переходу у випадку феромагнетика з одноіонною магнітною анізотропією.
14. Індуковані магнітним полем квантові фазові переходи у димеризованого антиферомагнетика.
15. Квантові фазові переходи та фазова діаграма ван-флеківського антиферомагнетика типу DTN.
16. Магнітопружні фазові переходи. Фазові переходи в магнетикі з біквдратичним обміном.
17. Критична втрата стійкості магнітної частинки в еластомері. Енергія, рівняння стану, лагранжіан.
18. Ефект пам'яті форми та критичний згин магнітоактивних еластомерів в зовнішньому магнітному полі.
19. Експериментальні дані намагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною магнітною анізотропією. Модель перемагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною анізотропією. Супердомени, їх спостереження та опис.
20. Експериментальні дані намагнічування ансамблів наночастинок манганітів. Критична температура та критичні індекси. Побудови Аррота.
21. Магнітокалоричний ефект. Вклад суперпарамагнетизму в магнітокалоричний ефект ансамблю наночастинок манганітів.