

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО”**

**КАФЕДРА ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ**

**ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ ТА КРИТИЧНІ ЯВИЩА**

**РОБОЧА НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)**

**Реквізити навчальної дисципліни**

Рівень вищої освіти	третій
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітня програма	Фізика
Статус дисципліни	нормативна
Форма навчання	очна/денна
Рік підготовки, семестр	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	5 кредитів
Семестровий контроль/ Контрольні заходи	Екзамен/МКР
Розклад занять	час і місце проведення аудиторних викладені на сайті <a href="http://rozklad.kpi.ua/">http://rozklad.kpi.ua/</a>
Мова викладання	українська
Інформація про керівника курсу	д.ф.-м.н., проф. Калита Віктор Михайлович, <a href="mailto:vmkalita@ukr.net">vmkalita@ukr.net</a>
Розміщення курсу	CAMPUS

**Програма навчальної дисципліни**

**1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання**

Програму навчальної дисципліни «Фазові переходи та критичні явища» складено відповідно до освітньої програми «Фізика» підготовки доктора філософії спеціальності 104 – Фізика та астрономія.

*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:*

ЗК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру, проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових та складних ідей, розуміти їхнє місце як в своїй професійній області, так і серед інших галузей науки та в культурному просторі; а також оцінювати та забезпечувати якість виконуваних науково-дослідних робіт.

ЗК07. Здатність працювати автономно.

ФК01. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання в фізиці конденсованого стану та дотичних до неї міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з фізики конденсованого стану та суміжних галузей.

ФК05. Здатність створювати теоретичні моделі фізичних процесів у відповідності до вимог поставленої задачі.

#### *Результати навчання:*

ПРН01. Розуміти філософські концепції наукового світогляду, роль науки, пояснювати її вплив на суспільні процеси. Мати передові концептуальні та методологічні знання з фізики і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень з відповідного напрямку, отримання нових знань та/або здійснення інновацій.

ПРН03. Уміти формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.

ПРН04. Вміти застосовувати знання основ аналізу та синтезу в різних предметних областях, критичного осмислення й розв'язання науково-дослідних проблем, розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у фізиці та дотичних міждисциплінарних напрямках.

ПРН05. планувати і виконувати дослідження з фізики фазових переходів та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних інструментів,

критично аналізувати результати у контексті усього комплексу сучасних знань з фізики фазових переходів та критичних явищ.

ПРН10. Уміти працювати автономно.

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.

*Допоміжна література:*

1. Snarskii, A. A., Kalita, V. M., Shamonin, M. (2018). Renormalization of the critical exponent for the shear modulus of magnetoactive elastomers. Scientific reports, 8(1), 1-8.
2. Kalita, V. M., Lozenko, A. F., Ryabchenko, and all, (2009). Critical behavior of a La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> crystal in the vicinity of its transition to ferromagnetic state. Ukr. J. Phys., 54, 157-164.
3. Lavanov, G. Y., Kalita, V. M., Loktev, V. M. (2014). Isostructural magnetic phase transitions and the magnetocaloric effect in Ising ferromagnets. Low Temperature Physics, 40(9), 823-829.
4. Kalita, V. M., Levchenko, G. G. (2020). The average value of the spin squared operator as an order parameter for spin phase transitions without spontaneous lowering of symmetry. Journal of Physics Communications, 4(9), 095024.
5. Lavanov, G. Y., Kalita, V. M., Loktev, V. M. (2018). Change in the entropy during a first-order phase transition induced by a magnetic field in an isotropic non-Heisenberg ferromagnet. Low Temperature Physics, 44(4), 322-327.
6. Lavanov, G. Y., Kalita, V. M., Ivanova, I. M., Loktev, V. M. (2016). Magnetic quantum phase transitions and entropy in Van Vleck magnet. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 416, 466-474.
7. Kalita, V. M., Loktev, V. M. (2011). Toward the theory of quantum phase transitions in DTN-type van Vleck antiferromagnets. JETP letters, 93(9), 534-538.
8. Kalita, V. M., Ivanova, I. M., Loktev, V. M. (2012). Quantum effects of magnetization of an easy-axis ferromagnet with S= 1. Theoretical and Mathematical Physics, 173(2), 1620-1635.
9. Kalita, V. M., Dzhezherya, Y. I., Cherepov, and all, (2021). Critical bending and shape memory effect in magnetoactive elastomers. Smart Materials and Structures, 30(2), 025020.
10. Kalita, V. M., Dzhezherya, Y. I., Levchenko, G. G. (2019). The loss of mechanical stability and the critical magnetization of a ferromagnetic particle in an elastomer. Soft matter, 15(29), 5987-5994.

11. Kalita, V. M., Kulyk, M. M., Ryabchenko, S. M. (2017). Monte-Carlo calculation of the coercive force and phase transitions in ensembles of Stoner-Wohlfarth particles with exchange interactions. *Low Temperature Physics*, 43(3), 359-366.
12. Kalita, V. M., Lozenko, A. F., Ryabchenko, and all, (2013). The magnetization processes and critical transition in a nanogranular magnetic film with perpendicular anisotropy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25(6), 066009.
13. Bodnaruk, A. V., Kalita, V. M., Kulyk, and all, (2019). Critical behavior of ensembles of superparamagnetic nanoparticles with dispersions of magnetic parameters. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31(37), 375801.
14. Liedienov, N. A., Kalita, V. M., Pashchenko, and all, (2020). Critical phenomena of magnetization, magnetocaloric effect, and superparamagnetism in nanoparticles of non-stoichiometric manganite. *Journal of Alloys and Compounds*, 836, 155440.

### *Інформаційні ресурси*

1. Науковий журнал «Український фізичний журнал», який входить до наукометричної бази Scopus: <https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp>
2. Науковий журнал «Журнал фізичних досліджень», який входить до наукометричної бази Scopus: [https://physics.lnu.edu.ua/jps/index\\_ua.html](https://physics.lnu.edu.ua/jps/index_ua.html)
3. Науковий журнал «Condensed Matter Physics», який входить до наукометричної бази Scopus: <http://www.icmp.lviv.ua/journal/>
4. Національна бібліотека України імені В.І.Вернадського: <http://www.nbuv.gov.ua/>

## **Навчальний контент**

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

Загальний методичний підхід до викладання навчальної дисципліни визначається як комунікативно-когнітивний та професійно орієнтований, згідно з яким у центрі освітнього процесу знаходиться аспірант – суб’єкт навчання і майбутній науковець. Лекційна частина забезпечується інформаційно-рецептивним методом, надаючи базу для використання репродуктивного методу та методу проблемного викладу на практичних заняттях.

### *Лекційні заняття*

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	<b>Розділ 1.</b> Термодинамічна теорія фазових переходів. Означення фази. Поняття фазовий перехід. Фазові діаграми, критичні точки. Приклади фазових переходів та фазових діаграм: структурні,

	магнітні, тиск – температура, намагніченість – температури, поляризація – температура. Формула Клайперона – Клаузіуса.
2	Параметр порядку. Теорія Ландау фазових переходів 2-го роду. Термодинамічна теорія фазових переходів 1-го роду. Орієнтаційні фазові переходи 1-го та 2-го роду. Астроїда Стонера-Вольфарта.
3	Флуктуації параметру порядку. Ефективний гамільтоніан. Кореляційна функція. Співвідношення Леванюка-Гінзбурга. Критичні індекси. Метод Паде.
4	<b>Розділ 2. Моделі фазових переходів.</b> Рівняння Ван-дер-Ваальса. Модель Ізінга. Модель ізоструктурного фазового переходу для спінових переходів.
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.
6	<b>Розділ 3. Метод середнього поля.</b> 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.
7	<b>Розділ 4. Квантові фазові переходи.</b> Визначення квантового фазового переходу. Енергія та рівняння стану. Опис фазового переходу у випадку феромагнетика з одноіонною магнітною анізотропією.
8	Індуковані магнітним полем квантові фазові переходи у димеризованому антиферомагнетичу. Квантові фазові переходи у ван-флеківському антиферомагнетичу типу DTN.
9	<b>Розділ 5. Фазові переходи з векторним і тензорними параметрами порядку.</b> Магнітопружні фазові переходи. Фазові переходи в магнетичу з біквдратичним обміном та прояви магнітопружності в ньому.
10	Критична втрата стійкості магнітної частинки в еластомері. Пружна енергія деформованого еластомеру при повороті частинки. Повна енергія частинки в еластомері. Лагранжиан. Рівняння стану.
11	Магніто-реологічний ефект при зсуві та згині магніто-активних еластомерів. Ефект пам'яті форми та критичний згин магніто-активних еластомерів в магнітному полі.
12	<b>Розділ 6. Критична поведінка ансамблів магнітних наночастинок.</b> Експериментальні дані намагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною магнітною анізотропією. Модель перемагнічування наногранулярні плівки з перпендикулярною анізотропією. Супердомени, їх спостереження та опис.
13	Експериментальні дані намагнічування ансамблів наночастинок манганітів. Критична температура та критичні індекси. Побудови

	Аррота. Магнітокалоричний ефект. Вклад суперпарамагнетизму в магнітокалоричний ефект ансамблю наночастинок манганіту.
--	---

### Практичні заняття

№ з/п	Назва теми заняття 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-, 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

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	75
2	Підготовка до МКР	6
3	Підготовка до екзамену	30

### Політика та контроль

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

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять: відповідно до Наказу 1-273 від 14.09.2020 р. заборонено оцінювати присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті, в тому числі нараховувати заохочувальні або штрафні бали. Відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях.

- правила поведінки на заняттях: студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску

викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Сікорський здійснюється за умови вказівки викладача;

- політика дедлайнів та перескладань: якщо аспірант не проходив або не з'явився на МКР (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання результатів МКР не передбачено;

- політика щодо академічної доброчесності: Кодекс честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» <https://kpi.ua/files/honorcode.pdf> встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в університеті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни «Фазові переходи та критичні явища»;

- при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

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

Поточний контроль: опитування за темою заняття, МКР.

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

Семестровий контроль: екзамен.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

На першому занятті аспіранти ознайомлюються із рейтинговою системою оцінювання (PCO) дисципліни, яка побудована на основі «Положення про систему оцінювання результатів навчання», [https://document.kpi.ua/files/2020\\_1-273.pdf](https://document.kpi.ua/files/2020_1-273.pdf)

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

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

Система рейтингових балів



1) Практичні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 7. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на практичних заняттях становить  $6 \times 7 = 42$  бали. Нарахування балів на одному практичному занятті:

- відмінні відповіді 7 балів;
- дуже добрі, добрі відповіді 5,6 балів;
- задовільні, достатні відповіді 3,4 бали.

2) Модульна контрольна робота (МКР). Ваговий коефіцієнт дорівнює 18. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить  $1 \times 18 = 18$  балів. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 16-18 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) 13-15 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) 10-12 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 екзаменаційну відповідь:

- 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.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

- Означення фази. Поняття фазовий перехід. Фазові діаграми, критичні точки. Приклади фазових переходів та фазових діаграм: структурні, магнітні, тиск – температура, намагніченість – температури, поляризація – температура. Формула Клайперона – Клаузіуса.
- Параметр порядку. Теорія Ландау фазових переходів 2-го роду.
- Термодинамічна теорія фазових переходів 1-го роду. Орієнтаційні фазові переходи 1-го та 2-го роду. Астроїда Стонера-Вольфарта.
- Флуктуації параметру порядку. Ефективний гамільтоніан. Кореляційна функція. Співвідношення Леванюка-Гінзбурга.
- Критичні індекси. Метод Паде.
- Рівняння Ван-дер-Ваальса. Модель Ізінга. Модель ізоструктурного фазового переходу для спінових переходів.
- Модель негейзенбергівського феромагнетика одноіонною анізотропією, з обміном 4-го порядку по спіну.
- Модель двопідграткового антиферомагнетика: спін-флоп, спін-фліп переходи.
- Метод середнього поля. Метод Брега-Вільямса. Метод максимуму ентропії.
- Рівняння стану в методі середнього поля. Критичні точки. Розрахунок температурної залежності для параметра порядку, впливу зовнішнього поля та зміни ентропії.
- Визначення квантового фазового переходу. Енергія та рівняння стану. Опис фазового переходу у випадку феромагнетика з одноіонною магнітною анізотропією.
- Індуковані магнітним полем квантові фазові переходи у димеризованого антиферомагнетика.
- Квантові фазові переходи та фазова діаграма ван-флеківського антиферомагнетика типу DTN.
- Магнітопружні фазові переходи. Фазові переходи в магнетику з біквдратичним обміном.
- Критична втрата стійкості магнітної частинки в еластомері. Енергія, рівняння стану, лагранжіан.
- Ефект пам'яті форми та критичний згин магнітоактивних еластомерів в зовнішньому магнітному полі.
- Експериментальні дані намагнічування наногранулярної плівки з перпендикулярною магнітною анізотропією. Модель перемагнічування

наногранулярні плівки з перпендикулярною анізотропією. Супердомени, їх спостереження та опис.

- Експериментальні дані намагнічування ансамблів наночастинок манганітів. Критична температура та критичні індекси. Побудови Аррота. Магнітокалоричний ефект. Вклад суперпарамагнетизму в магнітокалоричний ефект ансамблю наночастинок манганітів.

Сертифікати проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою можуть бути зараховані за умови виконання вимог, наведених у НАКАЗІ № 7-177 ВІД 01.10.2020 Р. «Про затвердження положення про визнання в КПІ ім. Ігоря Сікорського результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті».

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

**Склав** професор кафедри загальної та теоретичної фізики, д.ф.-м.н., проф. Калита В.М.

**Ухвалено** кафедрою загальної фізики (протокол № 6 від 06.06.2023).

**Погоджено** методичною комісією фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2023 р.)