

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Кафедра експериментальної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Декан фізичного факультету
Вовк Руслан Володимирович

“ 02 ” 09 2025 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур та фізики надпровідності.
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти третій (освітньо-науковий)
галузь знань 10 природничі науки
(шифр, назва галузі)

спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр, назва спеціальності)

освітня програма «Фізика та астрономія»
спеціалізація _____
(шифр, назва)

Вид дисципліни вибіркова
факультет фізичний

2025 / 2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

«29» 08 2025 року, протокол № 10.

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Шкловський Валерій Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор, професор закладу вищої освіти кафедри фізики низьких температур.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики низьких температур

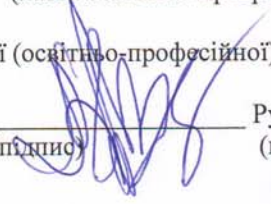
Протокол від «27» 08 2025 року № 15.

В. о. завідувача кафедри фізики низьких температур

 Валерій ШКЛОВСЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ім'я)

Програму погоджено з гарантом освітньої (освітньо-професійної) програми (керівником проєктної групи) «Фізика та астрономія».
(назва освітньої програми)

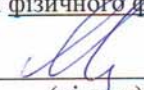
Гарант освітньої (освітньо-професійної) програми (керівник проєктної групи)

 Руслан БОБК
(підпис) (прізвище та ім'я)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «28» 08 2025 року № 5.

Голова методичної комісії фізичного факультету

 Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ім'я)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур та надпровідності» укладена відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика та астрономія» підготовки фахівців третього освітньо-наукового рівня вищої освіти (назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня) спеціальності 104 Фізика та астрономія.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є отримання теоретичних знань у галузі експериментального вивчення резистивних властивостей надпровідних металів при низьких температурах.

1.2. Програмні компетентності, що забезпечуються дисципліною у відповідності до ОНП «Фізика та астрономія»:

Інтегральна компетентність: Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та/або розробницької, та/або інноваційної діяльності у сфері фізики та/або астрономії, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

Загальні компетентності:

ЗК1. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК3. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

Фахові компетентності:

СК1. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК2. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

Основними завданнями вивчення дисципліни є сформувати у аспірантів фізичні уявлення щодо основних теоретичних положень, які обумовлюють резистивні властивості надпровідників другого роду при низьких температурах, а також розглянути основні експериментальні факти, які підтвердили теоретичні ідеї в цій галузі фізики надпровідності. Ознайомити аспірантів із практичним використанням вказаних ефектів у мікро- і нанoeлектроніці.

1.3. Кількість кредитів – 6.

1.4. Загальна кількість годин: 180.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
2-й	-й

Семестр	
4-й	-й
Лекції	
48 год.	год.
Практичні заняття	
0 год.	год.
Лабораторні заняття	
0 год.	год.
Самостійна робота	
132 год.	год.
Індивідуальні завдання	
Не передбачені	

1.6. Програмні результати навчання, що забезпечуються навчальною дисципліною у відповідності до ОНП «Фізика та астрономія»:

ПРН1. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

ПРН2. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

ПРН9. Глибоко розуміти загальні принципи та методи природничих наук, а також методологію наукових досліджень, місце фізики в системі наукових знань як методологічної основи природничих, інженерних наук та технологій; застосувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики та/або астрономії та у викладацькій діяльності.

Аспіранти повинні досягти таких результатів навчання:

знати: квантові властивості електронів і вихорів у надпровідних металах та їх роль в формуванні критичних параметрів цих металевих систем, різноманітні приклади прояву пінінгу вихорів у фізичних явищах, що спостерігаються експериментально.

вміти: вести та самостійно доповнювати конспекти лекцій, опрацьовувати як навчальну так і спеціальну фахову і періодичну наукову літературу, здійснювати самоконтроль якості засвоєння теоретичних знань.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Основні уявлення про вихорі у надпровідниках та їх динаміку.

Тема 1. Загальна характеристика навчальної дисципліни.

Поява нових аспектів фізики вихорів після відкриття в 1987 році нових високотемпературних надпровідників (ВТНП) та їх специфічних особливостей. Подвійна (та суперечна по результатам) роль значного підвищення критичної температури ВТНП у практичних аспектах їх використання. Нові наноструктурні методи обробки поверхні надпровідників

Тема 2. Основні експериментальні факти щодо надпровідності.

Поведінка електропровідності металів при низьких температурах. Температурна залежність критичного поля надпровідника та ефект Мейснера. Температурна поведінка теплоємності та теплопровідності надпровідників. Величина енергії конденсації та рід фазового переходу до нормального стану.

Тема 3. Двохрідинна модель надпровідника, її відношення до теорії БКШ і довжина когерентності.

Розподіл електронів надпровідника на сконденсовані і нормальні. Зв'язок щільності надпровідника із критичною температурою по БКШ. Енергетичний спектр збуджень у БКШ і просте обчислення довжини когерентності та її залежності від концентрації домішок. Критична швидкість надпровідного конденсату.

Тема 4. Рівняння Лондонів і глибина проникнення магнітного поля.

Запис свободної енергії надпровідника як функції надпровідного струму та магнітного поля з урахуванням рівнянь Максвелла та її мінімізація. Дві форми рівнянь Лондонів. Виведення формули для глибини проникнення магнітного поля у напівпространство. Термодинаміка надпровідника у магнітному полі. Поверхнева енергія N-S межі. Надпровідники першого та другого роду. Фаза Шубнікова- перше і друге критичні поля.

Тема 5 Вихор та його статичні властивості

Структура вихоря. Квант магнітного потоку. Статичні властивості вихорів – енергія і магнітний момент вихоря, магнітне поле вихоря у циліндричних координатах. Взаємодія вихорів між собою, взаємодія вихоря з поверхнею надпровідника без та у присутності зовнішнього магнітного поля. Енергетичний бар'єр Біна-Левінгстона.

Тема 6. Динамічні властивості вихорів.

Сила Лоренца і в'язка сила які діють на вихор. Дисипація енергії для рухаючогося вихоря, Зв'язок напруги електричного поля та швидкості вихоря. Питома електропровідність надпровідника у резистивному стані. Формула Бардіна – Стефена . Ефект Холла. Розв'язання рівняння для швидкості вихоря з урахуванням ефекту Холла. Подовжна і холловська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.

Тема 7. Тензор електропровідності у магнітному полі.

Мікроскопічне обчислення коефіцієнтів в'язкості та холлівської в'язкості за допомогою тензора електропровідності в моделі Друде. Отримання мікроскопічних формул для холловської і подовжної в'язкості вихоря та їх аналіз для «чистої» і «брудної» межі.

Тема 8. Реагування надпровідника на змінне електромагнітне поле високої частоти.

Комплексна провідність надпровідника у двохрідинній моделі надпровідника. Нормальний скін ефект у надпровіднику. Поверхневий імпеданс металу. Відбиття електромагнітних хвиль від поверхні металу Поверхневий імпеданс надпровідника.

Розділ 2. Пінінг вихорів у надпровідниках

Тема 9. Поняття пінінгу вихорів і критичного струму у надпровідниках другого роду.

Фізична природа пінінга при взаємодії вихора із циліндричним треком малого радіусу. Обчислення енергії та сили пінінгу у цьому випадку. Вплив пінінга на ВАХ надпровідника. Графіки повздовжних ВАХ зразків надпровідників без пінінгу та із пінінгом. Нелінійність ВАХ як наслідок пінінгу.

Тема 10. Обчислення вольт-амперової характеристики (ВАХ)

Обчислення ВАХ для найпростішої моделі пінінга із пілкоподібним потенціалом пінінгу у надпровіднику при нульовій температурі. Струмові залежності рухомості вихорів та повздовжностних ВАХ. Вплив температури на швидкість вихорів і ВАХ. Термоактивована течія потоку вихорів у слабкому струмі. Обчислення двох крайніх випадків у кріпії вихорів.

Тема 11. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках.

Загальні твердження про вплив односпрямованих плоских дефектів на резистивні властивості ВТНП. Обчислення ВАХ двовимірної динаміки вихорів. Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків і взаємовплив спрямованого руху вихорів та ефекта Холла.

Тема 12. Сильний пінінг на хаотично розташованих дефектах.

Вступні міркування про два сценарія реалізації пінінга вихорів на хаотично розташованих дефектах. Аналіз залежності середньої сили пінінга від координати вихорю. Многочисні режими та стрибки координат і енергії вихорю. Обчислення критичного струму з використанням теорії фазових перетворень Ландау.

Тема 13. Колективний пінінг.

Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі. Кріп окремого вихорю для струму значно менше критичного і скінченної температури. Пружні модулі вихорової ґратки. Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для трьохвимірного випадку (теорія Ларкіна-Овчиннікова). Колективний пінінг для двохвимірного випадку. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінгу

Тема 14. Рівноважна анізотропія пінінгу вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання.

Експерименти Аргонської групи по пінінгу вихорів на двійниках. Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках. Кутова залежність критичного струму при пінінгу вихорів на двійниках. Крип вихорів при пінінгу вихорів на двійниках.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
л		практ	лаб.	інд.	с. р.	л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Основні уявлення про вихорі у надпровідниках та їх динаміку.												
Тема 1.		3										
Тема 2		3										
Тема 3		3										
Тема 4		3										
Тема 5		3										
Тема 6		3										
Тема 7		3										
Тема 8		3										
Разом за розділом 1	90	24				66						
Розділ 2. Пінінг вихорів у надпровідниках												
Тема 9		4										
Тема 10		4										
Тема 11		4										
Тема 12		4										
Тема 13		4										
Тема 14		4										
Разом за розділом 2	90	24				66						

Усього годин	180	48				132						
-------------------------	-----	----	--	--	--	-----	--	--	--	--	--	--

4. Завдання для самостійної роботи

1	Опанувати тему: Термодинаміка надпровідника у магнітному полі	6
2	Дослідити поверхневу енергію N-S межі.	10
3	Опанувати тему: Надпровідники першого та другого роду.	6
4	Фаза Шубнікова- перше і друге критичні поля.	8
5	Опанувати вплив постійного струму на характеристики ефективного потенціалу пінінга вихоря та частоту депінінга.	4
6	Вивчити засоби відновлення координатної залежності потенціалу пінінгу за допомогою залежності частоти депінінгу від величини постійного струму.	6
7	Опанувати тему «Особливості і аналітичний опис ВАХ.	12
8	Навчитися здійснювати експериментальну обробку ВАХ.	12
9	Дослідити вплив температури на швидкість вихорів.	12
10	Дослідити вплив температури на ВАХ	8
11	Вивчити поняття і характеристики течії потоку вихорів.	6
12	Детально проаналізувати термоактивовану течію потоку вихорів у слабкому струмі.	8
13	Навчитися обчислювати два крайні випадки у кріпі вихорів.	6
14	Навчитися робити обчислення кореляційного об'єму і критичного струму для трьохвимірного випадку (теорія Ларкіна-Овчиннікова).	8
15	Опанувати поняттям колективного пінінгу для двохвимірного випадку. Порівняти результати теорії індивідуального та колективного пінінгу.	8
16	Підготуватися до виконання екзаменаційної роботи	12
	Разом	132

5. Індивідуальні завдання

Не передбачені.

6. Методи контролю

Поточний контроль – опитування під час лекцій, практичні заняття, консультації протягом семестру;
підсумковий контроль – екзамен

7. Схема нарахування балів

для підсумкового семестрового контролю в формі екзамену.

Поточний контроль, самостійна робота				Екзаменаційна робота	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Разом за темами	Разом		
T1-T8	T9-T15				
20	20	40	40	60	100

T1, T2 ... – теми розділів.

Критерії оцінювання

90-100: під час опитувань продемонстровано ґрунтовні знання з предмету і вміння самостійно мислити та опрацьовувати інформацію; ґрунтовні відповіді на усі завдання екзаменаційної роботи.

70-89: під час опитувань продемонстровано добрі знання з предмету і вміння опрацьовувати інформацію; під час опитування і в заліковій роботі відповіді містять незначні помилки екзаменаційної роботи..

50-69: під час опитувань продемонстровано задовільний рівень володіння матеріалом курсу і вміння опрацьовувати інформацію; під час опитування і в екзаменаційній роботі відповіді містять суттєві помилки у висвітленні частини або всіх питань залікової роботи..

1-49: низький рівень підготовки під час опитувань, екзаменаційна робота не містить правильних та ґрунтовних розв'язків; відсутність зрозумілої відповіді на усі завдання екзаменаційної роботи.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

8. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

1. Локтев В. М. Лекції з теорії надпровідності. – К. : ІТФ НАН України, 2011. – 276 с.
2. В.О.Шкловский, О.В.Добровольський. Пінінг і динаміка вихорів у надпровідниках – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2015. – 120 с.
3. Tinkham Michael. Introduction to Superconductivity (2nd ed.). New York: Dover Books, 2004.
4. G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur. Vortices in high-temperature superconductors. Review of Modern Physics, 66(1994), pp. 1125-1388.
5. A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. Introduction in Nonequilibrium Superconductivity, edited by D. N. Langenberg and A. I. Larkin (Elsevier, Amsterdam, 1986), p. 493.
6. A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. Journal of Low Temperature Physics, 34(1979), p. 409.
7. G. Blatter, V. B. Geshkenbein, J. A. G. Koopmann. Weak to Strong Pinning Crossover, Physical Review Letters, 92(2004), p. 67009.

8. W. K. Kwok, U. Welp, G. W. Crabtree et al. Direct observation of dissipative flux motion and pinning by twin boundaries in Y Ba₂Cu₃O_{7-δ} single crystals, Physical Review Letters, 64(1990), pp. 996-999.
9. G. Blatter, J. Rhyner, V. M. Vinokur. Vortex pinning by twin boundaries in copper oxide superconductors. Physical Review B, 43(1991), pp. 7826-7830.
10. M. A. Obolenskij, A. V. Bondarenko, M. G. Revyakina, V. A. Shklovskij. Critical current anisotropy at the vortices pinning on twins in Y Ba₂Cu₃O_{7-δ} single crystals. Superconductivity, Physics, Chemistry and Technology, 7(1994), pp. 43-47.
11. V. A. Shklovskij. Nonlinear flux creep resistivity and anisotropy of transport critical current in Y BaCuO single crystals with unidirected twins. Physica C, 235-240(1994), pp. 3051-3052.

Допоміжна література

1. Я. Довгий. Чарівне явище надпровідності. Київ: "Свросвіт", 2000.
2. Orlando Terry, Delin Kevin. Foundations of Applied Superconductivity. Prentice Hall, 1991.
3. David S. Schmool. Solid State Physics. From the Material Properties of Solids to Nanotechnologies. ISBN: 978-1-942270-77-5

Інформаційні ресурси (вихори в надпровідниках-google)

https://uk.wikipedia.org/wiki/Надпровідники_II_роду [Translate this page](#)

Надпровідники II роду – тип надпровідників, в які магнітне поле може частково ... в надпровідник локально у вигляді вихорів Абрикосова, в серцевині яких ..
sec.bitp.kiev.ua/.../geshkenbein-vortices-in-supercond... [Translate this page](#)

Jun 18, 2012 – «Вихори у надпровідниках». Дмитро Гешкенбейн. 11–23 березня. Теорія Гінзбурга-Ландау, надпровідники I і II типу. Вихори Абрикосова ...

<https://docs.google.com/document/d/...9UVdjeczszBdCeYHg/edit?hl=en...>