

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан факультету (директор
навчально-наукового інституту)

фізичний факультет

(вказати назву структурного підрозділу)

ВОВК Руслан Володимирович

(вказати П.І.Б керівника)

“ 02 ” 09 2025р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Вибрані розділи сучасної теоретичної фізики

(шифр і назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти третій (освітньо-науковий)

галузь знань 10 – Природничі науки

(шифр і назва)

спеціальність 104 – Фізика та астрономія

(шифр і назва)

освітня програма освітньо-наукова програма

ФІЗИКА ТА АСТРОНОМІЯ

спеціалізація _____

(шифр і назва)

вид дисципліни _____ за вибором

(обов’язкова / за вибором)

факультет _____ фізичний

2025/2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 29 ” 08 2025 року, протокол № 10

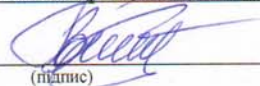
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

**Шкловський Валерій Олександрович, доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця.**

Програму схвалено на засіданні кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

Протокол від “ 27 ” 08 2025 року № 18

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця


(підпис)

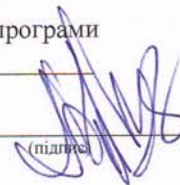
Георгій РАШБА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої (освітньо-професійної) програми

Фізика та астрономія

назва освітньої програми

Гарант освітньої-професійної програми
(керівник проектної групи)


(підпис)

Руслан БОБК
(прізвище та ініціали)

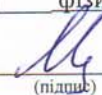
Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 28 ” 08 2025 року № 5

Голова методичної комісії фізичного факультету


(підпис)

Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Вибрані розділи сучасної теоретичної фізики. Динаміка вихорів і пінінг у надпровідниках II роду» укладена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки фахівців третього рівня вищої освіти

(назва рівня вищої освіти)

спеціальності 104 Фізика та астрономія

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни «Вибрані розділи сучасної теоретичної фізики. Динаміка вихорів і пінінг у надпровідниках II роду» полягає у тому, щоб підготувати фахівців, які здатні самостійно розв'язувати різноманітні комплексні завдання і проблеми, пов'язані з виконанням посадових обов'язків науково-педагогічних та наукових працівників у закладах вищої освіти (ЗВО), і, зокрема, вміти застосовувати теоретичні знання у галузі резистивних властивостей надпровідних металів при низьких температурах.

У результаті вивчення цієї навчальної дисципліни аспіранти можуть набути такі 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.

СК3. Здатність представляти та обговорювати результати своєї науково-дослідницької роботи державною мовою, а також англійською мовою чи одною з офіційних мов Європейсько Союзу, в усній та в письмовій формі, опрацьовувати наукову літературу з фізики та/або астрономії і ефективно використовувати нову інформацію з різних джерел.

СК4. Здатність організовувати та здійснювати науково-педагогічну діяльність у сфері фізики та/або астрономії.

СК6. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

СК7. Здатність застосовувати інформаційні технології, цифрові прилади та відповідне обладнання у науковій та у науково-педагогічній діяльності.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

1. Сформувати у аспірантів фізичні уявлення щодо основних теоретичних положень про резистивні властивості надпровідників другого роду при низьких температурах;
2. Розглянути основні експериментальні факти, які підтвердили теоретичні ідеї у цій галузі фізики надпровідності;
3. Ознайомити аспірантів з практичним використанням вищезгаданих ефектів у мікро- і наноелектроніці;

4. Ознайомити аспірантів з методикою теоретичного вивчення надпровідності стосовно її використання для вивчення вихорової матерії, її динаміки і пінінгу у надпровідниках другого роду;

5. Ознайомити аспірантів з методологією наукової роботи у галузі фізики надпровідності, яка пройшла шлях від методу проб та помилок до теорії цілеспрямованого розв'язування складних наукових задач і проблем.

ІК. Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науководослідницької 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.

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

ЗК1. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК2. Здатність працювати в міжнародному контексті.

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

1.3. Кількість кредитів 5.

1.4. Загальна кількість годин 150.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Вид кінцевого контролю: екзамен	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
2-й	-й
Семестр	
2-й	-й
Лекції	
30 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
120 год.	год.
Індивідуальні завдання	
год.	

1.6. Заплановані результати навчання.

– здатність продемонструвати глибинні професійні знання, науковий і культурний кругозір рівня здобувача наукового ступеня доктора філософії, зокрема шляхом засвоєння узагальнення та систематизації знань та основних концепцій, теоретичних та практичних проблем фізики надпровідності стосовно динаміки вихорової матерії;

– здатність ефективно використовувати набуті у результаті вивчення навчальної дисципліни компетентності, знання, уміння та навички для того, щоб у процесі майбутньої роботи на посадах науково-педагогічних працівників – викладачів фізики та астрономії вміло та аргументовано доводити до студентів необхідну інформацію і уявлення про місце тих чи інших аспектів фізики надпровідності та формувати у них природничо-науковий світогляд і систематичні уявлення про загальну картину світу;

– здатність використовувати знання щодо основних принципів та положень теоретичної та практичної методології наукової творчості при розв’язуванні конкретних завдань при визначенні життєвої стратегії своєї творчої діяльності, спрямованої на проведення експериментальних та теоретичних наукових досліджень у галузі сучасної фізики і астрономії, зокрема у теорії надпровідності.

ПРН3. Вільно презентувати та обговорювати державною мовою, а також англійською мовою чи та одною з офіційних мов Європейського Союзу, результати наукових досліджень, фундаментальні та прикладні проблеми фізики та астрономії, публікувати результати наукових досліджень у наукових виданнях, що індексуються у базах Scopus та WoS Core Collection.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною у відповідності до ОНП «Фізика та астрономія в закладах освіти»:

ПРН4. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп’ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

ПРН5. Розробляти моделі процесів і систем у фізиці та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямках, використовувати їх у науково-дослідницькій діяльності для отримання нових знань та/або створення розробок та інноваційних продуктів.

ПРН6. Планувати і виконувати прикладні та/або фундаментальні дослідження з фізики та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних методів, методик, технологій, інструментів та обладнання, з дотриманням норм академічної етики, критично аналізувати результати наукових досліджень у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми; готувати проєктні пропозиції щодо фінансування наукових досліджень та/або розробницьких і інноваційних проєктів.

ПРН7. Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи.

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.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Вступ до курсу.

Тема 1. Загальна характеристика предмета курсу.

Тема 2. Основні експериментальні факти в надпровідності.

Тема 3. Дворідинна модель надпровідника і довжина когерентності.

Тема 4. Рівняння Лондонів і глибина проникнення магнітного поля.

Тема 5. Поверхнева енергія N-S межі. Надпровідники першого та другого роду.

Розділ 2. Вихор та його властивості.

Тема 1. Енергія і магнітний момент вихоря.

Тема 2. Магнітне поле вихоря.

Тема 3. Взаємодія вихорів між собою.

Тема 4. Взаємодія вихоря з поверхнею надпровідника.

Тема 5. Динамічні властивості вихорів.

Розділ 3. Ефект Холла.

Тема 1. Рівняння руху вихорів з урахуванням ефекту Холла.

Тема 2. Подовжня і холлівська напруга: їх парність стосовно відношення до інверсії магнітного поля. Кут Холла.

Тема 3. Тензор електропровідності у магнітному полі.

Тема 4. Обчислення тензора електропровідності в моделі Друде.

Тема 5. Отримання мікроскопічних формул для холлівської і повздовжньої в'язкості вихорів та їх аналіз у випадку «чистого» і «брудного» надпровідника.

Розділ 4. Пінінг вихорів у надпровідниках.

Тема 1. Поняття пінінгу вихорів і критичного струму в надпровідниках другого роду.

Тема 2. Фізична природа пінінга.

Тема 3. Вплив пінінга на ВАХ надпровідника.

Тема 4. Обчислення вольт-амперової характеристики (ВАХ) для найпростішої моделі пінінга в надпровіднику при нульовій температурі.

Тема 5. Вплив температури на ВАХ. Кріп вихорів.

Розділ 5. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках.

Тема 1. Загальні твердження про вплив односпрямованих плоских дефектів на резистивні властивості ВТНП.

Тема 2. Обчислення середньої швидкості вихорів в потенціалі пінінга.

Тема 3. Обчислення ВАХ двовимірної динаміки вихорів.

Тема 4. Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків.

Тема 5. Взаємовплив спрямованого руху вихорів та ефекта Холла.

Розділ 6. Сильний пінінг на хаотично розташованих дефектах.

Тема 1. Вступні міркування про два сценарії реалізації пінінга вихорів на хаотично розташованих дефектах.

Тема 2. Аналіз залежності середньої сили пінінгу від координати вихорів.

Тема 3. Многозначні режими та стрибки координат і енергії вихорів.

Тема 4. Обчислення критичного струму з використанням теорії фазових перетворень Ландау.

Розділ 7. Колективний пінінг.

Тема 1. Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі.

Тема 2. Кріп окремого вихорів для струму значно менше критичного і скінченної температури.

Тема 3. Пружні модулі вихорової ґратки.

Тема 4. Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для трьохвимірного випадку (теорія Ларкіна-Овчиннікова).

Тема 5. Колективний пінінг для двовимірного випадку.

Тема 6. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінга.

Розділ 8. Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання.

Тема 1. Експерименти Аргонської групи по пінінгу вихорів на двійниках.

Тема 2. Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках.

Тема 3. Кутова залежність критичного струму при пінінгу вихорів на двійниках.

Тема 4. Кріп вихорів при пінінгу вихорів на двійниках.

Розділ 9. Реакція надпровідника на змінне електромагнітне поле.

Тема 1. Комплексна провідність надпровідника.

Тема 2. Нормальний скін-ефект у надпровіднику.

Тема 3. Поверхневий імпеданс металу.

Тема 4. Поверхневий імпеданс надпровідника.

Розділ 10. Динаміка вихорів на змінному струмі.

Тема 1. Поглинання потужності при надвисоких частотах.

Тема 2. Вплив постійного струму на частоту депінінга.

Тема 3. Відновлення потенціалу пінінгу.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	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. Вступ до курсу.												
Разом за розділом 1.	15	3				12						
Розділ 2. Вихор та його властивості.												
Разом за розділом 2.	15	3				12						
Розділ 3. Ефект Холла.												
Разом за розділом 3.	15	3				12						
Розділ 4. Пінінг вихорів у надпровідниках.												
Разом за розділом 4.	15	3				12						
Розділ 5. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках.												
Разом за розділом 5.	15	3				12						
Розділ 6. Сильний пінінг на хаотично розташованих дефектах.												
Разом за розділом 6.	15	3				12						
Розділ 7. Колективний пінінг.												
Разом за розділом 7.	15	3				12						
Розділ 8. Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання.												
Разом за розділом 8.	15	3				12						
Розділ 9. Реакція надпровідника на змінне електромагнітне поле.												
Разом за розділом 9.	15	3				12						
Розділ 10. Динаміка вихорів на змінному струмі.												
Разом за розділом 10.	15	3				12						
Усього годин	150	30				120						
Разом												

4. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 1 розділу.	12
2.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 2 розділу.	12
3.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 3 розділу.	12
4.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 4 розділу.	12
5.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 5 розділу.	12
6.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 6 розділу.	12
7.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 7 розділу.	12
8.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 8 розділу.	12

9.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 9 розділу.	12
10.	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами 10 розділу.	12
	Разом	120

6. Методи контролю

Поточний та семестровий підсумковий контроль: іспит.

7. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання, екзаменаційна робота						Сума
Розділ 1.	Розділ 2.	Розділ 3.	Розділ 4.	Розділ 5.	Екзаменаційна робота	100
T1÷T5	T1÷T5	T1÷T5	T1÷T5	T1÷T5	40	
6	6	6	6	6		
Розділ 6.	Розділ 7.	Розділ 8.	Розділ 9.	Розділ 10.		
T1÷T4	T1÷T6	T1÷T4	T1÷T4	T1÷T3	60	
6	6	6	6	6		

T1, T2 ... – теми розділів.

8. Шкала оцінювання

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

9. Рекомендована література

1. M. Tinkham. *Introduction to Superconductivity*. Mineola, New York, 2004.
2. G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, and V. M. Vinokur. Vortices in high-temperature superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, **66** (1994) 1125.
3. A. I. Larkin. Effect of inhomogeneities on the structure of the mixed state of superconductors. *Sov. Phys. JETP*, **31** (1970) 784.
4. D. N. Langenberg and A. I. Larkin, eds. *Nonequilibrium Superconductivity*, ch. 11 "Vortex motion in superconductors" by A. I. Larkin and Y. N. Ovchinnikov, pages 493–542. Elsevier, 1986.
5. A. I. Larkin and Yu. N. Ovchinnikov. Pinning in type II superconductors. *J. Low Temp. Phys.*, **34** (1979) 409.

6. G. Blatter, V. B. Geshkenbein, and J. A. G. Koopmann. Weak to strong pinning crossover. *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 067009.
7. A. M. Campbell and J. E. Evetts. Flux vortices and transport currents in type I superconductors. *Adv. Phys.*, **21** (1972) 199.
8. E. H. Brandt. The flux-line lattice in superconductors. *Rep. Progr. Phys.*, **58** (1995) 1465.
9. V.V. Moshchalkov *Nanoscience and Engineering in Superconductivity*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. – 398 p.
10. V. V. Moshchalkov *Nanostructured Superconductors*. World Scientific, Singapore, 2011. – 299 p.
11. H. Rogalla and P. H. Kes, eds. *100 Years of Superconductivity*. Taylor & Francis, 2011.
12. Shklovskij V.A., Dobrovolskiy O. V. Microwave absorption by vortices in superconductors with a washboard pinning potential in book *Superconductors – Materials, Properties and Applications – R.*, 2012 . – P. 263-288.
13. V. A. Shklovskij and O. V. Dobrovolskiy. *Microwave Absorption by Vortices in Superconductors with a Washboard Pinning Potential*, ch. 11, pages 263–288.
14. W. K. Kwok, U. Welp, V. M. Vinokur, S. Fleshler, J. Downey, and G. W. Crabtree. Direct observation of intrinsic pinning by layered structure in single-crystal YBaCuO_{7-d}. *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 390.
15. G. Blatter, J. Rhyner, and V. M. Vinokur. Vortex pinning by twin boundaries in copper oxide superconductors. *Phys. Rev. B*, **43** (1991) 7826.
16. M. A. Obolenskii, A. V. Bondarenko, M. G. Revyakina, and V. A. Shklovskij. Critical current anisotropy at the vortices pinning on twins in YBa₂Cu₃O_{7-d} single crystals. *Supercond. Phys. Chem. Technol.*, **7** (1994) 43.
17. V. A. Shklovskij. Nonlinear flux creep resistivity and anisotropy of transport critical current in YBaCuO single crystals with unidirected twins. *Physica C*, **235–240** (1994) 3051.
18. J. I. Gittleman and B. Rosenblum. Radio-frequency resistance in the mixed state for subcritical currents. *Phys. Rev. Lett.*, **16** (1966) 734.
19. В.О. Шкловський, О.В. Добровольський. «Пінінг і динаміка вихорів у надпровідниках». Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. – 2015. – 124 с.