

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)

“30” 09 2023р.

Робоча програма навчальної дисципліни

**Теорія надпровідності**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

галузь знань \_\_\_\_\_ 10 Природничі науки \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

спеціальність \_\_\_\_\_ 104 – Фізика та астрономія \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

освітня програма \_\_\_\_\_ освітньо-наукова програма “Фізика” \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

вид дисципліни \_\_\_\_\_ обов'язкова \_\_\_\_\_  
(обов'язкова / за вибором)

факультет \_\_\_\_\_ фізичний \_\_\_\_\_

2023 / 2024 навчальний рік



Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 30 ” 08 2023 року, протокол № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

**Гриб Олександр Миколайович, доктор фіз.-мат. наук**

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

Протокол від “28” 08 2023 року, № 9

Завідувач кафедри теоретичної фізики академіка. М. Ліфшиця

(підпис)

( Рашба Г.І.)  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми

фізика (спеціальність 104 – фізика та астрономія)  
назва освітньої програми

Гарант освітньої-професійної програми  
(керівник проектної групи) Бойко Ю.І.

(підпис)

Бойко Ю.І.  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету  
назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “29” 08 2023 року № 7

Голова методичної комісії фізичного факультету

(підпис)

Макаровський М.О.  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «**Теорія надпровідності**» складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки другого рівню вищої освіти

магістр  
(назва рівня вищої освіти)

спеціальності 104 – «фізика та астрономія»

освітня програма «Фізика»

### 1. Опис навчальної дисципліни

#### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Теорія надпровідності» є формування уявлень студентів про теорію надпровідності Бардіна, Купера, Шріфера (БКШ) та її розвиток у методах самоузгодженого поля, а також зв'язок теорії БКШ з лінійною електродинамікою надпровідників (теорією Лондонів) та феноменологічною теорією Гінзбурга-Ландау.

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями вивчення дисципліни є надання необхідної бази для подальшого більш глибокого вивчення фундаментальних та прикладних аспектів фізики надпровідності, а також навчання студентів проведенню самостійних досліджень в цій галузі науки.

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

#### **Інтегральна компетентність:**

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

#### **Загальні компетентності:**

- ЗК 1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК 4. Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.
- ЗК 5. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.
- ЗК 6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.
- ЗК 8. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт.
- ЗК 9. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
- ЗК 11. Здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності.

- ФК 1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.
- ФК 2. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії.
- ФК 3. Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям.
- ФК 4. Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії.
- ФК 5. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички,

необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

- ФК 8. Здатність встановлювати зв'язок між експериментальними і теоретичними результатами, здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних явищ, об'єктів і процесів, пов'язувати результати досліджень із сучасними фізичними та астрономічними теоріями і уявленнями.
- ФК 9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.
- ФК 13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.
- ФК 14. Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту.

1.3. Кількість кредитів: 4

1.4. Загальна кількість годин: 120

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
за вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
1-й
Семестр
2-й
Лекції
36 год.
Практичні, семінарські заняття
24 год.
Лабораторні заняття
Не передбачені навчальним планом
Самостійна робота
60 год.
у тому числі індивідуальні завдання
10 год. на підготовку до 2 контрольних робіт

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

**Знати:** основні властивості надпровідників та основні методи рішення задач теорії надпровідності.

**Вміти:** теоретично описувати явища, пов'язані з надпровідністю, самостійно опрацьовувати як навчальну, так і спеціальну фахову, у тому числі і періодичну наукову літературу, здійснювати самоконтроль якості засвоєння теоретичних знань з використанням тестів.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною ВК6 у відповідності до ОНП «Фізика»:

ПРН 1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової

механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.

- ПРН 2. Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них.
- ПРН 4. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.
- ПРН 5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.
- ПРН 6. Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії.
- ПРН 7. Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації.
- ПРН 9. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.
- ПРН 10. Відшукувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.
- ПРН 11. Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### Розділ 1. МАГНІТНІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРОВІДНИКІВ

Тема 1.1. Магнітні властивості надпровідників.

Тема 1.2. Ентропія, теплоємність та вільна енергія надпровідників.

### Розділ 2. ЛІНІЙНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА НАДПРОВІДНИКІВ

Тема 2.1. Рівняння Лондонів.

Тема 2.2. Лондонівська глибина проникнення магнітного поля.

Тема 2.3. Квантування магнітного потоку.

### Розділ 3. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА ТЕОРІЯ ГІНЗБУРГА-ЛАНДАУ

Тема 3.1. Рівняння теорії Гінзбурга-Ландау.

Тема 3.2. Масштаби довжини в надпровідниках.

Тема 3.3. Енергія границі розділу між нормальною та надпровідною фазами.

### Розділ 4. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРІЇ БКШ

Тема 4.1. Феномен Купера

Тема 4.2. Редукований гамільтоніан та пробна хвильова функція електронів

Тема 4.3. Обчислення енергетичної щільності при  $T=0$ .

Тема 4.4. Енергія основного стану.

Тема 4.5. Розподіл куперівських пар в основному стані.

Тема 4.6. Температурна залежність енергетичної щільності.

Тема 4.7. Квазічастинки у теорії БКШ

Тема 4.8. Густина станів квазічастинок.

Тема 4.9. Спектри квазічастинок для нормального металу та надпровідника

### Розділ 5. МЕТОД САМОУЗГОДЖЕНОГО ПОЛЯ

Тема 5.1. Рівняння Боголюбова.

Тема 5.2. Потенціал спарювання. Андреевські рівні енергії.

Тема 5.3. Край спектру збуджень в неоднорідній системі.

### Розділ 6. **НЕРІВНОВАЖНІ ЕФЕКТИ В НАДПРОВІДНИКАХ**

Тема 6.1. Заряд квазічастинок в теорії БКШ.

Тема 6.2. Асиметрія спектру квазічастинок і електричне поле у надпровіднику.

Тема 6.3. Процеси релаксації у надпровідниках.

Тема 6.4. Андреевське відбиття.

Тема 6.5. Нерівноважне підсилення надпровідності.

Тема 6.6. Надлишковий опір границі NS.

Тема 6.7. Поглинання звуку у надпровідниках.

### 3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	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
<b>Розділ 1. МАГНІТНІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРОВІДНИКІВ</b>												
Тема 1.1. Магнітні властивості надпровідників	4	1	1			2						
Тема 1.2. Ентропія, теплоємність та вільна енергія надпровідників	4	1	1			2						
Разом за розділом 1	8	2	2			4						
<b>Розділ 2 ЛІНІЙНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА НАДПРОВІДНИКІВ</b>												
Тема 2,1. Рівняння Лондонів.	4	1	1			2						
Тема 2.2. Лондонівська глибина проникнення магнітного поля.	4	1	1			2						
Тема 2.3. Квантування магнітного потоку.	4	1	1			2						
Разом за розділом 2	12	3	3			6						
<b>Розділ 3. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА ТЕОРІЯ ГІНЗБУРГА-ЛАНДАУ</b>												
Тема 3.1. Рівняння теорії Гінзбурга-Ландау.	5	2	1			2						

Тема 3.2. Масштаби довжини в надпровідниках	5	2	1			2						
Тема 3.3. Енергія границі розділу між нормальною та надпровідною фазами	5	2	1			2						
Разом за розділом <b>3</b>	15	6	3			6						
<b>Розділ 4. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРІЇ БКШ</b>												
Тема 4.1. Феномен Купера.	4	1	1			2						
Тема 4.2. Редукований гамільтоніан та пробна хвильова функція електронів.	4	1	1			2						
Тема 4.3. Обчислення енергетичної щілини при $T=0$ .	5	2	1			2						
Тема 4.4. Енергія основного стану.	5	2	1			2						
Тема 4.5. Розподіл куперівських пар в основному стані.	4	1	1			2						
Тема 4.6. Температурна залежність енергетичної щілини.	5	2	1			2						
Тема 4.7. Квазічастинки у теорії БКШ.	4	1	1			2						
Тема 4.8. Густина станів квазічастинок.	4	1	1			2						
Тема 4.9. Спектри квазічастинок для нормального метала та надпровідника.	4	1	1			2						
Разом за розділом <b>4</b>	39	12	9			18						
<b>Розділ 5. МЕТОД САМОУЗГОДЖЕНОГО ПОЛЯ</b>												
Тема 5.1.	6	2	1			3						

Рівняння Боголюбова.												
Тема 5.2. Потенціал спарювання. Андреевські рівні енергії.	6	2	1			3						
Тема 5.3. Край спектру збуджень в неоднорідній системі.	5	2	1			2						
Разом за розділом 5	17	6	3			8						
<b>Розділ 6. НЕРІВНОВАЖНІ ЕФЕКТИ В НАДПРОВІДНИКАХ</b>												
Тема 6.1. Заряд квазічастинок в теорії БКШ.	4	1	1			2						
Тема 6.2. Асиметрія спектру квазічастинок і електричне поле у надпровіднику.	2,5	1	0,5			1						
Тема 6.3. Процеси релаксації у надпровідниках.	2,5	1	0,5			1						
Тема 6.4. Андреевське відбиття.	2,5	1	0,5			1						
Тема 6.5. Нерівноважне підсилення надпровідності.	2,5	1	0,5			1						
Тема 6.6. Надлишковий опір границі NS.	2,5	1	0,5			1						
Тема 6.7. Поглинання звуку у надпровідниках.	2,5	1	0,5			1						
Разом за розділом 6	19	7	4			8						
						10	50					
<b>Усього годин</b>	<b>120</b>	<b>36</b>	<b>24</b>			<b>Разом з інд. 60 год</b>						

#### 4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Магнітні властивості надпровідників	1
2	Ентропія, теплоємність та вільна енергія надпровідників	1



3	Рівняння Лондонів.	1
4	Лондонівська глибина проникнення магнітного поля	1
5	Квантування магнітного потоку.	1
6	Рівняння теорії Гінзбурга-Ландау.	1
7	Масштаби довжини в надпровідниках.	1
8	Енергія границі розділу між нормальною та надпровідною фазами.	1
9	Феномен Купера	1
10	Редукований гамільтоніан та пробна хвильова функція електронів	1
11	Обчислення енергетичної щільності при $T=0$ .	1
12	Енергія основного стану.	1
13	Розподіл куперівських пар в основному стані.	1
14	Температурна залежність енергетичної щільності.	1
15	Квазічастинки у теорії БКШ	1
16	Густина станів квазічастинок.	1
17	Спектри квазічастинок для нормального металу та надпровідника	1
18	Рівняння Боголюбова.	1
19	Потенціал спарювання. Андреевські рівні енергії.	1
20	Край спектру збуджень в неоднорідній системі.	1
21	Заряд квазічастинок в теорії БКШ.	1
22	Асиметрія спектру квазічастинок і електричне поле у надпровіднику.	0,5
23	Процеси релаксації у надпровідниках.	0,5
24	Андреевське відбиття.	0,5
25	Нерівноважне підсилення надпровідності.	0,5
26	Надлишковий опір границі NS.	0,5
27	Поглинання звуку у надпровідниках.	0,5
	Разом	24

### 5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Застосувати вираз для температурної залежності магнітного поля для надпровідника до розрахунку струму, який тече по поверхні надпровідника в полосі заданої ширини.	2
2	Розрахувати ентропію, теплоємність та вільну енергію надпровідників у магнітному полі.	2
3	Опрацювати математичний розрахунок рівнянь Лондонів та зрозуміти їх фізичний сенс.	2
4	Розрахувати лондонівську глибину проникнення магнітного поля для тонкої плівки надпровідника. Знайти розподіл полів і струмів для пластини в поперечному магнітному полі.	2
5	Розрахувати значення кванту магнітного потоку для тонкостінного надпровідного циліндра з внутрішнім отвором.	2
6	Самостійно вивести рівняння Гінзбурга-Ландау. Зрозуміти фізичний сенс цих рівнянь.	2
7	Знайти критичний струм та критичне поле тонкої плівки.	2
8	Оцінити енергію NS-границі для надпровідників першого та другого роду.	2
9	Підготовка до контрольної роботи	5
10	Зробити оцінку розміру куперівської пари.	2

11	Вивчити оператори знищення та породження електронів, запис хвильової функції та гамільтоніану в формалізмі вторинного квантування.	2
12	Опрацювати розрахунок енергетичної щільності при $T=0$ .-Отримати співвідношення між критичною температурою і енергетичною щільністю при $T=0$ в теорії БКШ	2
13	Розрахувати значення критичного термодинамічного магнітного поля надпровідників.	2
14	Оцінити величину «розпливання» функції $v_k^2$ по енергії поблизу $k_F$ .	2
15	Знайти спосіб вирішення рівняння для залежності енергетичної щільності від температури. Знайти приблизний вираз для залежності енергетичної щільності від температури поблизу критичної температури. Знайти співвідношення між величиною енергетичної щільності при $T=0$ та критичною температурою надпровідника. Знайти співвідношення між критичною температурою надпровідника та масою ізотопу.	2
16	Вивчити оператори Боголюбова-Валатіна та їх застосування.	2
17	Отримати вираз для густини станів в енергетичному спектрі надпровідника.	2
18	Оцінити відношення густини станів у спектрі збуджень надпровідника до густини станів електронів у нормальному металі поблизу рівня Фермі.	2
19	Вивести самостійно рівняння Боголюбова.	3
20	Знайти андреєвські рівні енергії для заданого потенціалу спарювання.	3
21	Оцінити величину краю спектру збуджень для довільної залежності потенціалу спарювання від координати.	2
22	Підготовка до контрольної роботи	5
23	Засвоїти поняття про електрони та дірки в спектрі збуджень надпровідника.	2
24	Зробити чисельні оцінки електричного поля, яке виникає завдяки розбалансу заселеності гілок спектру елементарних збуджень у надпровіднику.	1
25	Вивчити процеси релаксації у надпровідниках.	1
26	Ознайомитися з процесом андреєвського відбиття квазічастинок в області SN-границі.	1
27	Знайти і вивчити результати експериментів, які підтверджують нерівноважне підсилення надпровідності. Пояснити ці результати.	1
28	Оцінити величину надлишкового опору границі NS.	1
29	Оцінити величину поглинання звуку у надпровідниках згідно теорії БКШ.	1
	Разом	60

## 6. Індивідуальні завдання

2 індивідуальні контрольні роботи.

## 7. Методи контролю

7.1. Поточний контроль – опитування, перевірка домашніх завдань, 2 контрольні роботи.

7.2. Семестровий підсумковий контроль – залік.

## 8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання								Екзамен (залікова робота)	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Розділ 4	Розділ 5	Розділ 6	Контрольна робота, передбачена навчальним планом (2)	Разом		
Т 1.1. - Т 1.2	Т 2.1 - Т 2.3	Т 3.1 - Т 3.3	Т 4.1 - Т 4.9	Т 5.1 - Т 5.3	Т 6.1 - Т 6.7	2 x 5 балів	40 балів	60 балів	100 балів
5 балів	5 балів	5 балів	5 балів	5 балів	5 балів				
30 балів						10 балів			

T1, T2 ... – теми розділів.

### Критерії оцінювання

- Оцінка рівня знань:
  - глибина і міцність знань про фізику надпровідності; знання основних теоретичних моделей надпровідників та їх основних властивостей;
  - рівень мислення та вміння синтезувати знання з окремих тем;
  - вміння складати розгорнутий план відповіді;
  - вміння давати точні формулювання та правильно користуватись понятійним апаратом фізики надпровідності;
  - культура відповіді (грамотність, логічність і послідовність викладу).
- Оцінка навичок самостійної роботи;
  - навички пошуку необхідної літератури теоретичного та експериментального характеру з галузі фізики надпровідності);
  - орієнтація в потоці інформації з обраної галузі та тематики;
  - навички ведення записів (складання простого і розгорнутого плану, конспекту, виступу);
  - навички науково-пошукової роботи.
- Оцінка вміння застосувати знання на практиці.
  - виконання індивідуальних завдань (контрольні роботи).

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

## 9. Рекомендована література

### Основна література

- Локтев В. Лекції з фізики надпровідності / В. М. Локтев // Київ : ІТФ НАН України, 2011. — 276 с.

2. Свідзинський А. Мікроскопічна теорія надпровідності. I / А. В. Свідзинський // Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2001. – Ч. 1. – 254 с.
3. Свідзинський А. Мікроскопічна теорія надпровідності. II / А. В. Свідзинський // Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2003. – Ч. 2. – 170 с.
4. Фізика низьких температур: навч. посібник / А. Франів, В. Стадник, В. Курляк. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 362 с.
5. Різак В.М., Різак І.М., Рудавський Е.Я. Кріогенна фізика і техніка.– К. Наукова думка, 2006.

#### Допоміжна література

1. De Gennes P. Superconductivity of metals and alloys / P. G. De Gennes//New York-Amsterdam: W. A. Benjamin Inc.- 1966.-292 P.
2. Tinkham M. Introduction to superconductivity / M. Tinkham // New York: McGraw Hill Inc.-1996.- 454 P.
3. Animalu A. Intermediate quantum theory of crystalline solids /Alexander O.E. Animalu // Englewood Cliff: Prentice Hall.- 1977.- 538 P.
4. Говорун Т.П. Фізика конденсованого стану матеріалів / Т.П. Говорун, В.О. Пчелінцев,
5. В.М. Радзієвський, Л.В. Носонова. навч. посіб. - Суми: СумДУ, 2015. - 236 с.
6. Мазуренко Д.М. Електронна теорія речовини / К.: Вища школа, 1969. – 174 с.

#### **10. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

1. [Квант магнітного потоку — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Квант_магнітного_потoku)
2. [Квантовий вихор — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Квантовий_вихор)
3. [Рівняння Гінзбурга — Ландау — Вікіпедія \(wikipedia.org\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Рівняння_Гінзбурга_—_Ландау)