

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор  
з науково-педагогічної роботи

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

Робоча програма навчальної дисципліни

**Піннінг та динаміка вихорів у надпровідниках**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ бакалавр \_\_\_\_\_

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

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

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

спеціалізація \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

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

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

20 20 / 20 21 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету .

“28” серпня 2020 року, протокол № 5

**РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:**

**Шкловський Валерій Олександрович, д. фіз.-мат. наук, професор**

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

Протокол від “ 24 ” 06 2020 року № 10

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

\_\_\_\_\_ Рашба Г.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

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

Протокол від “ 25 ” 06 2020 року № 10

Голова методичної комісії фізичного факультету

\_\_\_\_\_ Макаровський М.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Піннінг та динаміка вихорів у надпровідниках» складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки першого рівню вищої освіти – бакалавр спеціальності (напряму) 104 – фізика та астрономія спеціалізації

### 1. Опис навчальної дисципліни

#### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Піннінг та динаміка вихорів у надпровідниках» надання студентам теоретичних знань як про традиційні, так і нові аспекти фізики піннінга та динаміки вихорів у надпровідниках другого роду.

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями вивчення дисципліни «Піннінг і динаміка вихорів у надпровідниках II роду» є сформувані у студентів 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 у цій галузі фізики надпровідності. Ознайомити студентів з практичним використанням вказаних ефектів у мікро- і наноелектроніці.

#### 1.3. Кількість кредитів – 5.

#### 1.4. Загальна кількість годин – 150.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
4-й	-й
Семестр	
8-й	-й
Лекції	
52 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
26 год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
72 год. (у тому числі 10 год. на підготовку до двох контрольних робіт та 20 год. на підготовку на написання курсової роботи)	год.
Індивідуальні завдання	
Контрольна робота (2 конт.роботи) – по 5 год. на підготовку під час самостійної роботи. Курсова робота – 20 год. на підготовку під час самостійної роботи	

#### 1.6. Заплановані результати навчання

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

**знати:** статистичні особливості, термодинамічні і кінетичні властивості металів при низьких температурах обумовлені вільними електронами, та основні факти електродинаміки.

**вміти:** вести та самостійно доповнювати конспекти лекцій, опрацьовувати як навчальну так і спеціальну фахову у тому рахунку і періодичну наукову літературу, здійснювати самоконтроль якості засвоєння теоретичних знань з використанням тестів.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### 1. Основи теорії надпровідності

1. Загальна характеристика предмета курсу.
2. Основні експериментальні факти з надпровідності.
3. Дворідинна модель надпровідника і довжина когерентності.
4. Рівняння Лондонів і глибина проникнення магнітного поля.
5. Поверхнева енергія N-S межі. Надпровідники першого та другого роду.
6. Вихор та його властивості: статичні властивості вихорів – енергія і магнітний момент вихору, магнітне поле вихору. Взаємодія вихорів поміж собою, взаємодія вихору з поверхнею надпровідника.
7. Динамічні властивості вихорів, дисипація енергії для вихору що рухається, сила Лоренця і в'язка сила.
8. Ефект Холла. Розв'язання рівняння для швидкості вихору з урахуванням ефекту Холла. Поздовжня і холлівська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.
9. Тензор електропровідності у магнітному полі. Обчислення тензора електропровідності за моделлю Друде. Отримання мікроскопічних формул для холлівської і поздовжньої в'язкості вихора та їх аналіз для «чистої» і «брудної» межі.

### Розділ 2. Теорія пінінга

10. Пінінг вихорів у надпровідниках. Уявлення про пінінг вихорів і критичний струм у надпровідниках другого роду. Фізична природа пінінга. Вплив пінінга на ВАХ надпровідника.
11. Обчислення вольт-амперної характеристики (ВАХ) для найпростішої моделі пінінга у надпровідникові при нульовій температурі. Вплив температури на ВАХ. Крип вихорів.
12. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках (1). Загальні твердження про вплив односпрямованих плоских дефектів на резистивні властивості ВТНП. Обчислення ВАХ двовимірної динаміки вихорів.
13. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках (1). Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків і взаємовплив спрямованого руху вихорів і ефекту Холла.
14. 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 вихору. Многозначні режими та стрибки координат і енергії вихору. Обчислення критичного струму з використанням теорії фазових перетворень Ландау.
15. Колективний спінінг (1). Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі. Крип окремого вихору для струму значно меншого критичного і скінченній температурі.
16. Колективний спінінг (2). Пружні модулі вихрової решітки. Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для трихвимерного випадку (теорія Ларкіна–Овчиннікова).

Колективний пінінг у двохвимірному випадку. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінга.

17. Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання (1). Експерименти Аргонської групи по пінінгу вихорів на двійниках. Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках
18. Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання (1). 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		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>1. Основи теорії надпровідності</b>												
Тема 1.	8	3	1			4						
Тема 2.	8	3	1			4						
Тема 3.	8	3	1			4						
Тема 4.	9	3	2			4						
Тема 5.	9	3	2			4						
Тема 6.	9	3	2			4						
Тема 7.	8	2	2			4						
Тема 8.	8	3	1			4						
Тема 9.	8	3	1			4						
Разом за розділом 1	75	26	13			36						
<b>Розділ 2. Теорія пінінга</b>												
Тема 10.	8	3	1			4						
Тема 11	8	3	1			4						
Тема 12.	8	3	1			4						
Тема 13	9	3	2			4						
Тема 14.	9	3	2			4						
Тема 15	9	3	2			4						
Тема 16.	9	3	2			4						
Тема 17	8	3	1			4						
Тема 18.	7	2	1			4						
Разом за розділом 2	75	26	13			36						
<b>Усього годин</b>	<b>150</b>	<b>52</b>	<b>26</b>			<b>72</b>						

### 4. Темі семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Рівняння Лондонів. Розрахунки глибини проникнення	2
2	Надпровідники першого та другого роду. Критичні поля.	2
3	Статичні властивості вихорів. Знаходження енергії й магнітного моменту вихору, магнітного поле вихору. Вивчення взаємодії вихорів поміж собою, взаємодія вихору з поверхнею надпровідника.	2

4	Динаміка вихорів	2
5	Розв'язання рівняння для швидкості вихору з урахуванням ефекту Холла. Поздовжня і холлівська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.	2
6	Розрахунки тензора електропровідності за моделлю Друде. Отримання мікроскопічних формул для холлівської і поздовжньої в'язкості вихору та їх аналіз для різних граничних випадків.	2
7.	Обчислення вольт-амперної характеристики (ВАХ) для найпростішої моделі пінінга у надпровідникові при нульовій температурі.	2
8.	Обчислення вольт-амперної характеристики двовимірної динаміки вихорів.	2
9.	Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків і взаємовплив спрямованого руху вихорів і ефекту Холла.	2
10.	Аналіз залежності середньої сили пінінга від координати вихору.	2
11.	Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для т рихвимірного випадку (теорія Ларкіна–Овчиннікова). Колективний пінінг у двохвимірному випадку. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінга.	2
12.	Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках	2
13	Кутова залежність критичного струму при пінінгу вихорів на двійниках Крип вихорів при пінінгу вихорів на двійниках.	2
	<b>Разом</b>	<b>26</b>

### 5. Завдання для самостійної роботи

Пояснення щодо того, що повинен зробити студент під час самостійної роботи.

1. По всім нижче вказаним темам опрацювати конспекти лекцій, прочитати відповідні параграфи в підручниках [1–4].

2. Самостійно підготуватися до участі у семінарських заняттях.

Самостійно підготуватися до контрольної роботи.

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
Тема 1.	Загальна характеристика предмета курсу.	4
Тема 2.	Основні експериментальні факти з надпровідності.	4
Тема 3.	Дворідинна модель надпровідника і довжина когерентності.	4
Тема 4.	Рівняння Лондонів і глибина проникнення магнітного поля.	4
Тема 5.	Поверхнева енергія N-S межі. Надпровідники першого та другого роду.	4
Тема 6.	Вихор та його властивості: статичні властивості вихорів – енергія і магнітний момент вихору, магнітне поле вихору. Взаємодія вихорів поміж собою, взаємодія вихору з поверхнею надпровідника.	4
Тема 7.	Динамічні властивості вихорів, дисипація енергії для вихору що рухається, сила Лоренця і в'язка сила.	4
Тема 8.	Ефект Холла. Розв'язання рівняння для швидкості вихору з урахуванням ефекту Холла. Поздовжня і холлівська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.	4

Тема 9.	Тензор електропровідності у магнітному полі. Обчислення тензора електропровідності за моделлю Друде. Отримання мікроскопічних формул для холлівської і поздовжньої в'язкості вихора та їх аналіз для «чистої» і «брудної» межі.	4
Тема 10.	Пінінг вихорів у надпровідниках. Уявлення про пінінг вихорів і критичний струм у надпровідниках другого роду. Фізична природа пінінга. Вплив пінінга на ВАХ надпровідника.	4
Тема 11.	Обчислення вольт-амперної характеристики (ВАХ) для найпростішої моделі пінінга у надпровідникові при нульовій температурі. Вплив температури на ВАХ. Крип вихорів.	4
Тема 12.	Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках (1). Загальні твердження про вплив односпрямованих плоских дефектів на резистивні властивості ВТНП. Обчислення ВАХ двовимірної динаміки вихорів.	4
Тема 13	Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках (1). Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків і взаємовплив спрямованого руху вихорів і ефекту Холла.	4
Тема 14.	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 вихору. Многозначні режими та стрибки координат і енергії вихору. Обчислення критичного струму з використанням теорії фазових перетворень Ландау.	4
Тема 15	Коллективний спінінг (1). Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі. Крип окремого вихору для струму значно меншого критичного і скінченній температурі.	4
Тема 16	Коллективний спінінг (2). Пружні модулі вихрової решітки. Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для трихвимерного випадку (теорія Ларкіна–Овчиннікова). Коллективний пінінг у двохвимерному випадку. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінга.	4
Тема 17	Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання (1). Експерименти Аргонської групи по пінінгу вихорів на двійниках. Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках	4
Тема 18.	Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у YBCO та її резистивні вимірювання (1). Кутова залежність критичного струму при пінінгу вихорів на двійниках. Крип вихорів при пінінгу вихорів на двійниках.	4
	Разом	<b>72</b>

## 6. Індивідуальні завдання

### 7. Методи контролю

Поточне опитування, участь у семінарських заняттях, контрольна робота, письмовий екзамен.

### 8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання				Екзамен	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Курсова робота Разом		
T1-T9	T10-T18				
20	20	20	60	40	100

Для зарахування розділу 1 та розділу 2 треба набрати у підсумку не менше 10 балів за результатами поточного опитування та участі у семінарських заняттях за кожний з розділів. Для зарахування контрольної роботи треба набрати у підсумку не менше 10 балів. Для допуску до письмового екзамену треба набрати у підсумку не менше 30 балів.

#### Примітка.

- Оцінка, яку отримує студент за кожну тему відповідає відсоткові правильного виконання поставленого завдання. Завдання вважається виконаним правильно, коли студент самостійно дав повну, вірну та вичерпну відповідь, не користуючись жодними зовнішніми джерелами інформації або підказками інших осіб, а також може (в разі необхідності) дати *прилюдне вірне, повне та вичерпне пояснення* щодо змісту цієї відповіді.
- У разі виявлення факту **академічної недоброчесності** із боку студента підчас перевірки курсової роботи оцінка за неї **повинна бути зменшена до 0** (пункт 7.12.5 «Положення про організацію освітнього процесу в ХНУ імені В. Н. Каразіна», наказ ректора № 0202-1/155 від 21.04.2017 р.).
- До підсумкового семестрового контролю (екзамену) допускається студент денної форми навчання, який створив повний **рукописний** конспект лекцій, виконав і захистив курсову роботу та набрав не менш, ніж **30 балів**.
- У разі виявлення факту **академічної недоброчесності** із боку студента підчас іспиту його екзаменаційна оцінка **повинна бути зменшена до 0**, а сам студент **має бути видалений з аудиторії**, до проводиться іспит (пункт 7.12.5 «Положення про організацію освітнього процесу в ХНУ імені В. Н. Каразіна», наказ ректора № 0202-1/155 від 21.04.2017 р.).

Екзаменаційний білет складається з двох теоретичних питань. Масимальна оцінка за кожне з питань 20 балів. Масимальна оцінка за екзамен – 40 балів.

#### **Критерії оцінювання письмової екзаменаційної роботи**

Екзаменаційний білет складається з трьох теоретичних питань. Кожне питання оцінюється в 20 балів. У відповіді на теоретичні питання студент повинен продемонструвати знання теорії навчальної дисципліни «Фізична кінетика» та її понятійно-категоріального апарату, термінології, понять і принципів предметної області дисципліни.

Максимальні бали виставляються в разі чіткої, логічної, послідовної відповіді на поставлене питання, з виводами основних формул, формулюванням фізичних законів

У процесі оцінювання теоретичних завдань екзаменаційного білету враховуються:

- повнота розкриття питання (4 бали);
- уміння чітко формулювати визначення фізичних понять, термінів та пояснювати їх (4 бали);
- здатність аргументувати отриману відповідь (4 бали);
- здатність робити аналітичні міркування, порівняння, формулювання висновків (4 бали);
- логічна послідовність викладення матеріалу у відповіді на завдання (4 бали).

Відповідь має бути обґрунтованою, з посиланням на відповідні фізичні закони та рівняння, з послідовними розрахунками всіх основних формул, доведеними до кінцевого результату з чіткою відповіддю на поставлене питання. За рішення задачі (практичного завдання) нараховуються такі бали:

1. Повна та послідовно обґрунтована відповідь отримує оцінку 20 балів у випадку, коли студент отримав правильну відповідь і продемонстрував метод і спосіб її отримання.
2. Оцінка 12-19 балів виставляється за відповідь, в якій є несуттєві похибки в логіці викладу,
3. Відповідь на питання отримує оцінку 7-11 балів, коли студент не отримав правильну відповідь або написав тільки кінцеву формулу без пояснень та виводу.
4. Відповідь на питання отримує оцінку 0-10 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, причому метод і спосіб розв'язання завдання були не вірними.

**Екзамен зданий, якщо сумарна оцінка за письмову екзаменаційну роботу не менше 30 балів, а сумарний підсумковий бал не менше 50 балів.**

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	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

1. В. В. Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. — М.: Наука, 1982г.
2. А. А. Абрикосов. Основы теории металлов.— М.: Наука, 1987 г.
3. M. Tinkham. Introduction to superconductivity, second edition, 1996.
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. А. И. Ларкин. Влияние неоднородностей на структуру смешанного состояния сверхпроводников. Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, 58(1970), с. 1467.
6. А. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. Introduction in Nonequilibrium Superconductivity, edited by D. N. Langenberg and A. I. Larkin (Elsevier,

Amsterdam, 1986), p. 493.

7. A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. *Journal of Low Temperature Physics*, 34(1979), p. 409.

8. G. Blatter, V. B. Geshkenbein, J. A. G. Koopmann. *Weak to Strong Pinning Crossover*, *Physical Review Letters*, 92(2004), p. 67009.

9. W. K. Kwok, U. Welp, G. W. Crabtree et al. *Direct observation of dissipative flux motion and pinning by twin boundaries in Y Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> single crystals*, *Physical Review Letters*, 64(1990), pp. 996-999.

10. G. Blatter, J. Rhyner, V. M. Vinokur. *Vortex pinning by twin boundaries in copper oxide superconductors*. *Physical Review B*, 43(1991), pp. 7826-7830.

11. M. A. Obolenskij, A. V. Bondarenko, M. G. Revyakina, V. A. Shklovskij. *Critical current anisotropy at the vortices pinning on twins in Y Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> single crystals*. *Superconductivity, Physics, Chemistry and Technology*, 7(1994), pp. 43-47.

12. 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. В.О.Шкловский, О.В.Добровольський. «Пінінг і динаміка вихорів у надпровідниках». Харків .: ХНУ імені В. Н. Каразіна. – 2015 - 120с.

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

1. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Надпровідники\\_II\\_роду](https://uk.wikipedia.org/wiki/Надпровідники_II_роду)  
*Надпровідники II роду* — тип надп іпровідників, в які магнітне поле може частково ... в надпровідник локально у вигляді вихорів Абрикосова, в серцевині яких ..

2. [sec.bitp.kiev.ua/.../geshkenbein-vortices-in-supercond...](http://sec.bitp.kiev.ua/.../geshkenbein-vortices-in-supercond...)  
 Jun 18, 2012 - «Вихори у надпровідниках». Дмитро Гешкенбейн. 11–23 березня. Теорія Гінзбурга-Ландау, надпровідники I і II типу. Вихори Абрикосова ...

3. <https://docs.google.com/document/d/...9UVdjeczszBdCeYHg/edit?hl=en...>  
 Фізичний факультет. Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Науково-освітній центр. Інституту теоретичної фізики імені М.М.Боголюбова.