

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)

2024р.



Робоча програма навчальної дисципліни

Теорія кристалічної решітки

(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 \_\_\_\_\_

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 30 ” 08 2024 року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

**Богдан Михайло Михайлович, доктор фіз.-мат. наук**

**Аксьонова Наталія Анатоліївна, канд. фіз.-мат. наук, доцент**

Програму схвалено на засіданні кафедри

теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця

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

Протокол від “ 27 ” 08 2024 року № 12

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.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/наукової) програми

(керівник проектної групи) Лазоренко О.В.

(підпис)

Лазоренко О.В.  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 28 ” 08 2024 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету

(підпис)

Макаровський М.О.  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «**Теорія кристалічної решітки**» 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 та завдання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Теорія кристалічної решітки» є формування уявлень студентів про коливальні явища у кристалічній ґратці та їх динамічні характеристики, зокрема закон дисперсії, ізочастотні поверхні, густину коливань тощо.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни «Теорія кристалічної решітки» є навчити студентів

- основам класичної динаміки кристалічної решітки,
- основним теоретичним методам розрахунків коливальних спектрів та густин коливань кристалів,
- основним методам знаходження розв'язків нелінійних рівнянь, що описують нелінійні збудження в кристалах,
- користуючись навчальною та довідковою літературою, обирати адекватні методи розв'язку задач теорії кристалічної решітки.

*Компетентності, що забезпечуються дисципліною:*

- Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов (ІК).

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК-1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК-2).
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК-3).
- Здатність бути критичним і самокритичним (ЗК-4).
- Здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК-5).
- Навички міжособистісної взаємодії (ЗК-6).
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт (ЗК-8).
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків (ЗК-9).
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово (ЗК-12).
- Здатність спілкуватися іноземною мовою (ЗК-13).
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК-1).

- Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень (ФК-4).

- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем (ФК-5).

- Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси (ФК-6).

- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту (ФК-7).

- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації (ФК-9).

- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК-10).

- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень (ФК-12).
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти - обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. (ФК-13).
- Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК-14).

1.3. Кількість кредитів 3.

1.4. Загальна кількість годин 90.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
За вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
4-й
Семестр
7-й
Лекції
32
Практичні, семінарські заняття
Не передбачені навчальним планом
Лабораторні заняття
Не передбачені навчальним планом
Самостійна робота
58 год. (в тому числі 20 год. на курсову роботу)
Індивідуальні завдання
Курсова робота
Під час самостійної роботи 20 год. (з 68 год.)
<b>Залік</b>

1.6. Заплановані результати навчання

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

Набути базові уявлення про точні методи дослідження і основні прийоми якісного аналізу динаміки кристалічних систем (є геометрія кристалічних ґраток, динаміка атомів у них, термодинаміка кристалів, їх теплопровідність, дефекти ґраток, нелінійні збудження в кристалах).

Бути здатними досліджувати гармонічні і нелінійні коливання в пружних дискретних середовищах.

*Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:*

- 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-1).

- 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-2).

- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій (ПРН-3).

- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії (ПРН-5).

- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії (ПРН-6).

- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації (ПРН-7).

- Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань (ПРН-8).

- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки (ПРН-11).

- Розуміти зв'язок фізики та/або астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень (ПРН-13).

- Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду (ПРН-17).

- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства (ПРН- 22).

- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії (ПРН-23).

- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій (ПРН-24).

- Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку (ПРН-25).

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### Розділ 1. Динаміка кристалів

Тема 1. Трансляційна симетрія.

Тема 2. Прості і складні кристалічні решітки. Решітка Браве. Сингонії.

Тема 3. Типи зв'язків в кристалах.

Тема 4. Обернена решітка. Зони Бріллюена.

Тема 5. Обчислення деяких кристалічних сум.

Тема 6. Використання проникаючого випромінювання для визначення структури кристала.

Тема 7. Елементи фізики твердого тіла для структурного аналізу.

Тема 8. Експериментальні дифракційні методи та теоретичні моделі розрахунків структури твердого тіла.

Тема 9. Коливання простої решітки. Рівняння малих коливань.

Тема 10. Закон дисперсії стаціонарних коливань. Аналіз закону дисперсії.

Тема 11. Власні коливання кристала. Спектр значень квазіхвильового вектора. Нормальні координати коливань кристала.

Тема 12. Ізочастотні поверхні і спектр частот. Густина коливань. Аналіз густини коливань. Особливості ван Хова.

- Тема 13. Квантування коливань кристалу. Фонони. Ангармонізм коливань.  
 Тема 14. Спектр частот та зв'язок з функцією Гріна.  
 Тема 15. Коливання одновимірного кристала. Малі коливання лінійного ланцюжка.  
 Тема 16. Коливання складної решітки. Оптичні коливання. Загальний аналіз закону дисперсії.  
 Тема 17. Довгохвильві коливання кристалу. Рівняння теорії пружності.  
 Тема 18. Молекулярні кристали.  
 Тема 19. Термодинаміка та кінетика фононного газу.  
 Тема 20. Теплопровідність кристалічної решітки при низьких температурах.  
 Тема 21. Коливання кристалу з точковим дефектом. Квазілокальні коливання.  
 Тема 22. Довгохвильві коливання кристалу поблизу лінійного та плоского дефекту.  
 Тема 23. Дефекти кристалічної решітки. Дислокація в кристалі.  
 Тема 24. Механіка одновимірного кристалу. Особливості густини коливань.  
 Тема 25. Одновимірна модель дислокації (модель Френкеля – Конторової).

## Розділ 2. Дефекти кристалічної решітки

- Тема 26. Макромодель та опис ізольованих дефектів.  
 Тема 27. Дислокація в кристалі. Ковзання та переповзання дислокацій.  
 Тема 28. Пружне поле дислокацій. Модель Пайєрлса.  
 Тема 29. Взаємодія дефектів. Дія поля напружень на дислокацію.  
 Тема 30. Динаміка дислокацій та пластичність кристала.  
 Тема 31. Ефективна маса та рівняння руху дислокацій.  
 Тема 32. Дифузійна кінетика механічних процесів в твердому тілі.  
 Тема 33. Теорія кінків і бризерів. Нелінійні збудження в кристалах.  
 Тема 34. Рівняння Бусінеска для ангармонічного кристалу.  
 Тема 35. Рівняння Кортевега-де Фріза. Цунамі в кристалі.  
 Тема 36. Рівняння синус-Гордон. Модель Френкеля-Конторова для краудіона.

## 4. Структура навчальної дисципліни

Назви модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
л		п	лаб	інд	с.р	
1	2	3	4	5	6	7
<b>7 семестр</b>						
<b>Розділ 1. Динаміка кристалів</b>						
Тема 1	3.5	1.5				2
Тема 2	3.5	1.5				2
Тема 3	3.5	1.5				2
Тема 4	3.5	1.5				2
Тема 5	4	1.5				2.5
Тема 6	4	1.5				2.5
Тема 7	1	1				
Тема 8	1	1				
Тема 9	1	1				
Тема 10	4	1.5				2.5
Тема 11	4	1.5				2.5
Тема 12	4	1.5				2.5
Тема 13	4	1.5				2.5
Тема 14	4	0.5				3.5

Тема 15	4	0.5				3.5
Тема 16	4	0.5				3.5
Тема 17	1	1				
Тема 18	1	1				
Тема 19	1	1				
Тема 20	1	1				
Тема 21	0.5	0.5				
Тема 22	0.5	0.5				
Тема 23	4	0.5				3.5
Тема 24	4	0.5				3.5
Тема 25	4	0.5				3.5
Разом за розділом 1	70	26				44
<b>Розділ 2. Дефекти кристалічної решітки</b>						
Тема 26	3.5	0.5				3
Тема 27	0.5	0.5				
Тема 28	1.5	0.5				
Тема 29	0.5	0.5				
Тема 30	5.5	1				4.5
Тема 31	2.5	0.5				2
Тема 32	0.5	0.5				
Тема 33	0.5	0.5				
Тема 34	0.5	0.5				
Тема 35	0.5	0.5				
Тема 36	5	0.5				4.5
Разом за розділом 2	20	6				14
<b>Усього годин</b>	<b>90</b>	<b>32</b>				<b>58</b>
<b>Залік</b>						

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

Практичні заняття учбовим планом не передбачені.

#### 5. Завдання для самостійної роботи

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

По всіх нижче вказаним темам опрацювати конспекти лекцій, прочитати відповідні параграфи в підручниках та монографіях. Самостійно підготуватися до контрольної роботи.

Назва теми	Кількість годин
1	2
Тема 1. Вступ. Класична динаміка кристалічних ґраток.	2
Тема 2. Коливання простих ґраток.	2
Тема 3. Закон дисперсії коливань.	3
Тема 4. Власні коливання ґраток.	3
Тема 5. Нормальні коливання.	3
Тема 6. Довгохвильове наближення.	3
Тема 7. Моделі кристалів різної розмірності.	3
Тема 8. Коливання складної (багатоатомної) ґратки.	3
Тема 9. Оптичні коливання.	3
Тема 10. Молекулярні кристали.	3

Тема 11. Оптичні коливання іонного кристала.	3
Тема 12. Спектр частот і його зв'язок з функцією Гріна.	3
Тема 13. Ізочастотні поверхні.	3
Тема 14. Розподіл коливань по частотах.	3
Тема 15. Особливості густини коливань.	3
Тема 16. Зв'язок густини коливань з функцією Гріна.	3
Тема 17. Модель Френкеля–Конторової для краудіона.	4
Тема 18. Гармонійні коливання в 1D кристалі, що містить краудіон (Кінки).	2
Тема 19. Дискретні бризери.	4
<b>Усього</b>	<b>58</b>

## 6. Індивідуальні завдання

Курсова робота

## 7. Методи контролю

Поточне опитування, участь у семінарських заняттях, контрольна робота, залік.

## 8. Розподіл балів, які отримують студенти

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання				Залік	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Курсова робота	Разом		
T1-T25	T26-T36				
10	10	20	40	60	100

Для зарахування розділу 1 та розділу 2 треба набрати у підсумку не менше 5 балів за результатами поточного опитування. Для зарахування курсової роботи за матеріалами розділів 1 та 2 треба набрати у підсумку не менше 10 балів. Для допуску до письмового заліку треба набрати у підсумку не менше 20 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 під час 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 (заліку) допускається студент денної форми навчання, який створив повний **рукописний** конспект лекцій, пройшов поточне опитування й написав контрольну роботу та набрав не менш, ніж **20 балів**.
- У разі виявлення факту **академічної недоброчесності** із боку студента під час 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.).

Білет письмового заліку складається з двох теоретичних питань. Максимальна оцінка за кожне з питань 30 балів. Максимальна оцінка за залік – 60 балів.

### Критерії оцінювання письмової залікової роботи

Білет складається з двох теоретичних питань. Кожне питання оцінюється в 30 балів. У відповіді на теоретичні питання студент повинен продемонструвати знання теорії навчальної дисципліни «Теорія кристалічної решітки» та її понятійно-категоріального



апарату, термінології, понять і принципів предметної області дисципліни.

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

У процесі оцінювання теоретичних завдань залікового білету враховуються:

- повнота розкриття питання (6 бали);
- уміння чітко формулювати визначення фізичних понять, термінів та пояснювати їх (6 бали);
- здатність аргументувати отриману відповідь (6 бали);
- здатність робити аналітичні міркування, порівняння, формулювання висновків (6 бали);
- логічна послідовність викладення матеріалу у відповіді на завдання (6 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 30 балів у випадку, коли студент отримав правильну відповідь і продемонстрував метод і спосіб її отримання.
2. Оцінка 20-29 балів виставляється за відповідь, в якій є несуттєві похибки в логіці викладу.
3. Відповідь на питання отримує оцінку 16-19 балів, коли студент не отримав правильну відповідь або написав тільки кінцеву формулу без пояснень та виводу.
4. Відповідь на питання отримує оцінку 0-15 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, причому метод і спосіб розв'язання завдання були не вірними.

**Залік зданий, якщо сумарна оцінка за письмову залікову 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. Косевич А.М. Механіка кристалічної ґратки Харьков: "Акта", ISBN 966-7021-97-1, 305 с., 2006.
2. Kosevich A.M. The Crystal Lattice. Phonons, Solitons, Dislocations, Superlattices Wiley, New York, ISBN: 978-3-527-40508-4, 356 p., 2005.

3. Ziman J. Principles of the theory of solids. Cambridge University Press, 1972.
4. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. John Wiley & Sons, Inc, 2004
5. Kittel C. Quantum theory of solids. New York-London: John Wiley & Sons, Inc., 1991

#### **Допоміжна література**

1. Reissland J.A. The Physics of Phonons. John Wiley and Sons LTD, 1973.
2. Pines D. Elementary Excitations in Solids. W.A. Benjamin Inc., New York-Amsterdam, 1963.
3. Maradudin A.A., Montroll E.W., Weiss G.H. Theory of Lattice Dynamics In the Harmonic Approximation. Academic Press, New York-London, 1963.

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

##### **Сайт кафедри теоретичної фізики:**

[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_study\\_ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_study_ukr.html)

[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_ref\\_ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_ref_ukr.html)