



ФОНОНИ ТА ЕЛЕКТРОНИ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>104 Фізика та астрономія</i>
Освітня програма	<i>Комп'ютерне моделювання фізичних процесів</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>4 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік / МКР</i>
Розклад занять	<i>Час і місце проведення аудиторних занять викладені на сайті http://rozklad.kpi.ua/</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.ф.-м.н., проф. Решетняк Сергій Олександрович, r.sa@ukr.net Лабораторні заняття: д.ф.-м.н., проф. Решетняк Сергій Олександрович, r.sa@ukr.net</i>
Розміщення курсу	<i>Електронний кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського, платформа Сікорський</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Мета навчальної дисципліни – формування та закріплення у здобувачів компетентностей, навичок та вмінь щодо використання в фізичних дослідженнях твердих тіл формалізму квазічастинок.

Предмет навчальної дисципліни – закони, методи та засоби фізики квазічастинок як складові процеси фізичних досліджень твердих тіл.

Дисципліна «Фонони та електрони» належить до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки і вивчається студентами в 7-му семестрі навчання за спеціальністю 104 Фізика та астрономія. Ця дисципліна є неодмінною частиною класичної програми підготовки спеціалістів в області фізики і спрямована на формування у студентів базових понять, вмінь та навичок стосовно процесів, явищ та законів фізики квазічастинок при дослідженні властивостей твердих тіл. Зокрема,

ЗДАТНІСТЬ:

- опановувати основні положення формалізму квазічастинок в твердих тілах;*
- використовувати основи кристалографії для описання кристалічної структури твердих тіл;*
- застосовувати апарат фізики квазічастинок для дослідження пружних та термодинамічних характеристик твердих тіл;*
- обчислювати характеристики хвильових процесів в твердих тілах;*

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

ЗНАННЯ:

- концептуальних підходів фізики квазічастинок до вивчення фізичних явищ в твердих тілах;*
- експериментальних методів досліджень твердих тіл;*
- основ кристалічної будови твердих тіл;*
- основ термодинаміки твердих тіл;*
- методів дослідження коливальних та хвильових процесів в твердих тілах.*

УМІННЯ:

- аналізувати навчальну та навчально-методичну літературу, використовувати її в навчальному процесі;*
- складати математичні моделі фізичних задач з використанням формалізму квазічастинок;*
- виконувати теоретичні розрахунки при вивченні модельних процесів фізики квазічастинок в твердих тілах;*
- викладати матеріал логічно та послідовно.*

Програмні результати навчання.

Компетентності:

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК5. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів.

ФК3. Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів.

ФК4. Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень

ФК6. Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси.

ФК7. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.

ФК8. Здатність виконувати теоретичні та експериментальні дослідження автономно та у складі наукової групи

ФК9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.

ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук

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.

ПРН7. Знати базові навички проведення теоретичних та/або експериментальних наукових досліджень з окремих спеціальних розділів фізики або астрономії, що виконуються індивідуально (автономно) та/або у складі наукової групи.

ПРН9. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.

ПРН10. Вміти планувати дослідження, обирати оптимальні методи та засоби досягнення мети дослідження, знаходити шляхи розв'язання наукових завдань та вдосконалення застосованих методів

ПРН11. Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки.

ПРН16. Вміти самостійно навчатися та підвищувати рівень своєї кваліфікації

ПРН25. Вміти проводити теоретичні або експериментальні наукові дослідження що виконуються індивідуально або у складі наукової групи.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Вивчення даного кредитного модуля базується на дисциплінах «Загальна фізика. Механіка», «Загальна фізика. Молекулярна фізика», «Загальна фізика. Електрика та магнетизм», «Загальна фізика. Оптика», «Загальна фізика. Фізика атома», «Теоретична фізика. Класична механіка», «Теоретична фізика. Квантова механіка», «Математичний аналіз», «Основи векторного та тензорного аналізу», «Аналітична геометрія та лінійна алгебра», «Диференціальні та інтегральні рівняння».

3. Зміст навчальної дисципліни

Дисципліна структурно розділена на 6 розділів:

Розділ 1. Кристалічна будова твердих тіл.

Тема 1.1. Кристал. Кристалічна ґратка, базис, елементарна комірка, примітивна комірка, комірка Вігнера-Зейтца. Операції симетрії кристалічних структур. Трансляція, точкові операції симетрії, точкова група симетрії.

Тема 1.2. Сингонії. Типи кристалічних структур. Індекси Міллера. Положення та позначення площин, напрямків та вузлів елементарної ґратки в кристалі.

Розділ 2. Хвильові процеси в кристалах.

Тема 2.1. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Довжина хвилі де-Бройля. Закон Брегга. Експериментальні методи дослідження кристалічних структур.

Тема 2.2. Теоретичні методи дослідження кристалічних структур. Закони дифракції. Математичний апарат дифракційного аналізу.

Тема 2.3. Методи візуалізації дифракційних картин.

Тема 2.4. Вплив структури елементарної комірки та електронних оболонок атомів на процеси розсіювання в кристалах.

Тема 2.5. Вплив температури на характер розсіювання фотонів на кристалі.

Тема 2.6. Електрони в напівпровідниках. Чорне випромінювання.

Розділ 3. Фонони та коливання ґратки.

Тема 3.1. Малі коливання атомів. Потенціальна енергія осцилятора. Гармонічне та ангармонічне наближення.

Тема 3.2. Квантовий характер коливань ґратки. Фонон як квазічастинка. Квазіімпульс фонона. Правила відбору при непружному розсіюванні. Непружне розсіювання фотонів на фононах.

Тема 3.3. Наближення найближчих сусідів. Формалізм Лагранжа для описання колективних коливань атомів кристалу. Закон дисперсії фононів. Перша зона Бріллюена. Групова і фазова швидкість. Оптичні та акустичні фонони.

Тема 3.4. Метод вторинного квантування. Нульові коливання.

Розділ 4. Фонони як носії енергії в кристалі.

Тема 4.1. Термодинамічні потенціали. Енергія і теплоємність кристалів. Формула Планка. Моделі теплоємності Ейнштейна та Дебая.

Тема 4.2. Ангармонічні коливальні ефекти. Теплове розширення кристалу. Теплопровідність і тепловий опір кристалів. U-процеси.

Розділ 5. Електрони в кристалічній ґратці.

Тема 5.1. Атомна будова провідників. Колективізовані електрони. Електрон в періодичному потенціалі кристалічної ґратки. Рівняння Шредінгера електронної підсистеми. Властивості хвильової функції. Обернена ґратка. Теорема Блоха. Квазіімпульс. Густина станів в р-просторі. Власні функції оператора Гамільтона та їх властивості.

Тема 5.2. Моделі електронної взаємодії. Квантова теорія збурень.

Тема 5.3. Модель сильнозв'язаних електронів.

Тема 5.4. Модель вільних електронів.

Тема 5.5. Тотожні стани. Принцип Паулі. Антисиметризація хвильової функції. Матричні елементи операторів відносно хвильових функцій. Енергія Фермі.

Тема 5.6. Модель слабозв'язаних електронів.

Тема 5.7. Характер провідності і зонна структура кристалів.

Тема 5.8. Універсальний формалізм квазічастинок Ландау. Моделі Фермі-газу і Фермі-рідини.

Тема 5.9. Теплоємність електронної підсистеми. Внесок фононної та електронної теплоємностей в загальну теплоємність кристалу.

Розділ 6. Магнітні властивості кристалів.

Тема 6.1. Енергія магнітної підсистеми. Доменна структура.

Тема 6.2. Ефект магнітострикції. Гігантська магнітострикція.

Тема 6.3. Ефект магнітоопору. Гігантський магнітоопір.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. – John Willy & Sons inc., 2005. – 680 p.
2. A. Abrikosov. *Fundamentals of the Theory of Metals*. – Elsevier Sci. Publ., 1988. – 630 p.
3. *Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах.* / Ю. М. Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.
4. *Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах.* / Ю. М. Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. – 379 с.
5. *Фізика твердого тіла. Лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб.* / С. О. Решетняк, Р. В. Захарченко, В. Н. Захарченко, Ю. Б. Скирта – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 191 с.

Додаткова література:

6. J.M. Ziman. *Electrons and Phonons*. – Oxford Univ. Press, 1960. – 554 p.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика. Ч. 1.* М.: Наука, 1976.
8. Ашкрофт Н., Мерин Н. *Физика твердого тела. Т. 1-2.* М.: Наука, 1983.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория упругости.* М.: Наука, 1977.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Квантовая механика.* М.: Наука, 1991.

Всі наведені джерела можна завантажити з Електронного кампусу КПІ ім. Ігоря Сікорського або з папки курсу на платформі Сікорський.

Інформаційні ресурси:

1. Електронний кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського, методичне забезпечення до кредитного модуля «Фонони та електрони».
2. Платформа «Сікорський», дистанційний курс «Фонони та електрони».

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни

Навчальна частина дисципліни складена з лекційного матеріалу, лабораторних занять та контрольних заходів у вигляді МКР і ДКР. При викладанні дисципліни рекомендується побудувати ознайомлення студентів з предметом таким чином, щоб вони не тільки отримували ту чи іншу інформацію стосовно курсу, який вивчається, але й відчували зв'язок між різними темами кредитного модуля, а також місце модуля серед інших фізичних дисциплін. Загальний методичний підхід до викладання навчальної дисципліни визначається як комунікативно-когнітивний та професійно-орієнтований, згідно з яким у центрі освітнього процесу знаходиться студент – суб'єкт навчання і майбутній фахівець.

Лекційні заняття:

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
---	--

	(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1.	Розділ 1, тема 1.1. Лекція 1. Кристал. Кристалічна ґратка, базис, елементарна комірка, примітивна комірка, комірка Вігнера-Зейтца. Операції симетрії кристалічних структур. Трансляція, точкові операції симетрії, точкова група симетрії. [1], глава 1.
2.	Розділ 1, тема 1.2. Лекція 2. Сингонії. Типи кристалічних структур. Індеси Міллера. Положення та позначення площин, напрямків та вузлів елементарної ґратки в кристалі. [1], глава 1.
3.	Розділ 2, тема 2.1. Лекція 3. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Довжина хвилі де-Бройля. Закон Брегга. Експериментальні методи дослідження кристалічних структур. [1], глави 1,2.
4.	Розділ 2, тема 2.2. Лекція 4. Теоретичні методи дослідження кристалічних структур. Закони дифракції. Математичний апарат дифракційного аналізу. [1], глава 2.
5.	Розділ 2, теми 2.3-2.5. Лекція 5. Методи візуалізації дифракційних картин. Вплив структури елементарної комірки та електронних оболонок атомів на процеси розсіювання в кристалах. Вплив температури на характер розсіювання фотонів на кристалі. [1], глава 2.
6.	Розділ 3, теми 3.1-3.2. Лекція 6. Малі коливання атомів. Потенціальна енергія осцилятора. Гармонічне та ангармонічне наближення. Квантовий характер коливань ґратки. Фонон як квазічастинка. Квазіімпульс фонона. Правила відбору при непружному розсіянні. Непружне розсіювання фотонів на фононах. [1], глава 5.
7.	Розділ 3, тема 3.3. Лекція 7. Наближення найближчих сусідів. Формалізм Лагранжа для описання колективних коливань атомів кристалу. Закон дисперсії фононів. Перша зона Бріллюена. Групова і фазова швидкість. Оптичні та акустичні фонони. [1], глава 5.
8.	Розділ 3, тема 3.4. Лекція 8. Метод вторинного квантування. Нульові коливання. [1], глава 5.
9.	Розділ 4, тема 4.1. Лекція 9. Термодинамічні потенціали. Енергія і теплоємність кристалів. Формула Планка. Моделі теплоємності Ейнштейна та Дебая. [1], глава 6.
10.	Розділ 4, тема 4.2.

	<i>Лекція 10. Ангармонічні коливальні ефекти. Теплове розширення кристалу. Теплопровідність і тепловий опір кристалів. U-процеси. [1], глава 6.</i>
11.	<i>Розділ 5, тема 5.1. Лекція 11. Атомна будова провідників. Колективізовані електрони. Електрон в періодичному потенціалі кристалічної ґратки. Рівняння Шредінгера електронної підсистеми. Властивості хвильової функції. Обернена ґратка. Теорема Блоха. Квазіімпульс. Густина станів в р-просторі. Власні функції оператора Гамільтона та їх властивості. [2], § 1.1.</i>
12.	<i>Розділ 5, теми 5.2-5.3. Лекція 12. Моделі електронної взаємодії. Квантова теорія збурень. Модель сильнозв'язаних електронів. [2], § 1.2.</i>
13.	<i>Розділ 5, теми 5.4-5.5. Лекція 13. Модель вільних електронів. Тотожні стани. Принцип Паулі. Антисиметризація хвильової функції. Матричні елементи операторів відносно хвильових функцій. Енергія Фермі. [3], § 18.</i>
14.	<i>Розділ 5, тема 5.6. Лекція 14. Модель слабозв'язаних електронів. [2], § 1.3.</i>
15.	<i>Розділ 5, тема 5.7. Лекція 15. Характер провідності і зонна структура кристалів. [6], § 20.</i>
16.	<i>Розділ 5, тема 5.8. Лекція 16. Універсальний формалізм квазічастинок Ландау. Моделі Фермі-газу і Фермі-рідини. [6], § 20.</i>
17.	<i>Розділ 5, тема 5.9. Лекція 17. Теплоємність електронної підсистеми. Внесок фононної та електронної теплоємностей в загальну теплоємність кристалу. [6], глава 2.</i>

Лабораторні заняття:

№	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1.	<i>Вивчення техніки безпеки та правил користування лабораторним обладнанням з фізики кристалічних структур (2 години) [5,7,8]</i>
2.	<i>Вивчення властивостей р-п переходу (6 годин) [5,7,8]</i>
3.	<i>Вивчення характеристик чорного випромінювання (6 годин)</i>

	[5,7,8]
4.	Вивчення температурної залежності електропровідності металів і напівпровідників (6 годин) [5,7,8]
5.	Вивчення ефекту Холла (4 години) [5,7,8]
6.	Вивчення впливу магнітного поля на доменну структуру (6 годин) [5,7,8]
7.	Вивчення ефекту магнітоопору (6 годин) [5,7,8]

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студента є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	34
2	Підготовка до МКР	6
3	Підготовка до заліку	8

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- **правила відвідування занять:** відповідно до Наказу 1-273 від 14.09.2020 р. заборонено оцінювати присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті, в тому числі нараховувати заохочувальні або штрафні бали. Відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують за відповідні види навчальної активності на практичних заняттях.

- **правила поведінки на заняттях:** студент має слушно виконувати вказівки викладача щодо роботи на занятті, поводитися стримано й чемно та не заважати іншим студентам і викладачу. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Сікорський здійснюється за умови вказівки викладача;

- **політика дедлайнів та перескладань:** якщо студент не проходив або не з'явився на контрольну роботу (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Успішним вважається виконання контрольної роботи, якщо студент отримав за неї не менш, ніж 50% від максимальної кількості балів. У випадку пропуску контрольної роботи без поважної причини або неуспішної здачі контрольної роботи перескладання контрольної роботи здійснюється за узгодженням з викладачем, при цьому максимальна оцінка, яку студент може отримати за контрольну роботу, зменшується на 2 бали по відношенню до вчасної здачі контрольної роботи;

- **політика щодо академічної доброчесності:** Кодекс честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://kpi.ua/files/honorcode.pdf> встановлює загальні моральні принципи, правила етичної

поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в університеті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни «Фонони та електрони»;

- **при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем** (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Види контролю:

Поточний контроль: МКР.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: залік.

Умови допуску до семестрового контролю: успішне виконання всіх контрольних та лабораторних робіт, семестровий рейтинг не менше 60 балів.

На першому занятті студенти ознайомлюються з рейтинговою системою оцінювання (PCO) дисципліни, яка побудована на основі «Положення про систему оцінювання результатів навчання», https://document.kpi.ua/files/2020_1-273.pdf.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання

1. Рейтинг студента з кредитного модуля розраховується зі 100 балів, які студент отримує за:

- 1) три контрольні роботи (МКР поділяється на 3 контрольні роботи тривалістю по 0,6 акад. годин);
- 2) виконання лабораторних робіт (7 робіт);

2. Критерії нарахування балів.

2.1. Виконання контрольних робіт:

Ваговий бал – 10 балів. Максимальна кількість балів за всі контрольні роботи дорівнює 10 балів x 3 = 30 балів. Критерії оцінювання:

творча робота	- 9 –10 балів,
роботу виконано з незначними недоліками	- 7 –8 балів,
роботу виконано з певними помилками	- 5 – 6 балів,
роботу не зараховано (завдання не виконане або є грубі помилки)	- 0 балів.

2.2. Виконання лабораторних робіт:

бездоганна робота	- 9 –10 балів,
роботу виконано з незначними недоліками	- 7 –8 балів,
роботу виконано з певними помилками	- 5 – 6 балів,
роботу не зараховано (завдання не виконане або є грубі помилки)	- 0 балів.

3. Умовою першої атестації є отримання не менше 15 балів та успішне виконання всіх лабораторних робіт на час атестації. Умовою другої атестації – отримання не менше 30 балів, виконання всіх лабораторних робіт на час атестації.

4. Умовою допуску до заліку є успішне виконання всіх контрольних та лабораторних робіт. Якщо семестровий рейтинг складає не менше 60 балів, студент отримує залік автоматом.

5. Виконання всіх контрольних та лабораторних робіт є також умовою допуску до перескладання заліку, якщо рейтинг протягом семестру склав менше 60 балів. В такому разі

рейтингова оцінка встановлюється в результаті співбесіди з викладачем з урахуванням вже набраних балів.

6. Сума отриманих балів переводиться до залікову оцінку згідно з таблицею:

Кількість балів	Оцінка
100...95	Відмінно
94...85	Дуже добре
84...75	Добре
74...65	Задовільно
64...60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Є незараховані контрольні чи лабораторні роботи	Не допущено

Якщо студент набрав протягом семестру 60 балів і більше, але хоче підвищити свою рейтингову оцінку, він може це зробити у співбесіді з викладачем.

9. Додаткова інформація з дисципліни

- Перелік запитань наведено в Електронному кампусі КПІ ім. Ігоря Сікорського та в папці курсу на платформі «Сікорський».
- Сертифікати проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою можуть бути зараховані за умови виконання вимог, наведених у НАКАЗІ № 7-177 ВІД 01.10.2020 р. «Про затвердження положення про визнання в КПІ ім. Ігоря Сікорського результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті».

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Склав завідувач кафедри загальної фізики, д.ф.-м.н., проф. Решетняк С.О.

Ухвалено кафедрою загальної фізики (протокол № 6 від 26.06.2025 р.).

Погоджено Методичною комісією ФМФ (протокол № 10 від 27.06.2025 р.)