

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізичного факультету



Руслан БОВК

«29» серпня 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Люмінесценція і нерівноважні процеси у твердих тілах

Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	10 – природничі науки
Спеціальність	104 – фізика та астрономія
Освітня програма	фізика (освітньо-наукова програма)
Спеціалізація	
Вид дисципліни	за вибором
Факультет	фізичний

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою фізичного факультету.

Протокол від 29.08.2025 р. № 10.

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Мироненко Ірина Вікторівна, доктор філософії, доцент каф. фізичної оптики
Макаровський Микола Олександрович, канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент каф. фізичної оптики

Програму схвалено на засіданні кафедри фізичної оптики.

Протокол від 27.08.2024 р. № 1.

В. о. завідувача кафедри фізичної оптики

Сергій ТАРАПОВ

Програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми «Фізика».

Гарант освітньо-наукової програми

Дмитро РОХМІСТРОВ

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету.

Протокол від 28.08.2025 р. № 5.

Голова методичної комісії

Микола МАКАРОВСЬКИЙ

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Люмінесценція і нерівноважні процеси у твердих тілах» складена відповідно до освітньої програми підготовки «магістр» зі спеціальності «104 – фізика та астрономія», освітньо-наукова програма «Фізика».

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни – оволодіти основоположними уявленнями про люмінесценцію як нерівноважний процес, що відбувається лише у діелектриках та напівпровідниках, про сучасний стан експериментальних досліджень люмінесценції.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни – вивчити матеріал щодо нерівноважних процесів люмінесценції у рамках робочої програми даного курсу та додаткового матеріалу, який рекомендовано вивчити самостійно.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії (ІК 1).
- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК 1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК 2).
- Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології (ЗК 4).
- Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми (ЗК 5).
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК 6).
- Здатність працювати в міжнародному контексті (ЗК 8).
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК 9).
- Здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності (ЗК 11).
- Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (ФК 1).
- Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії (ФК 2).
- Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефаківцям (ФК 3).
- Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії (ФК 4).
- 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 5).
- 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 8).
- Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси (ФК 9).

- Здатність проводити аналіз наукових результатів, отриманих в області фізики та астрономії (ФК 13).
- Здатність ефективно використовувати людські та матеріальні ресурси для вирішення фундаментальних та прикладних наукових завдань (ФК 14).

1.3. Кількість кредитів – 3.

1.4. Загальна кількість годин – 90.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
2-й	
Семестр	
4-й	
Лекції	
44 год.	
Практичні, семінарські заняття	
не передбачено навчальним планом	
Лабораторні заняття	
не передбачено навчальним планом	
Самостійна робота	
46 год.	
в тому числі індивідуальні завдання	
курсова робота: 20 год.	

1.6. Заплановані результати навчання

У результаті вивчення даного курсу студент повинен
 знати: основні теоретичні положення для опису люмінесцентного процесу як нерівноважного; головні відомі експериментальні результати досліджень люмінесценції.
 вміти: застосовувати здобуті знання для одержання, аналізу та пояснення експериментальних даних при дослідженнях люмінесценції.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем (ПРН 1).
- Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень (ПРН 2).
- Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності (ПРН 4).
- Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів (ПРН 5).

- Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та/або астрономії (ПРН 6).
- Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді (ПРН 7).
- Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи зі колегами (ПРН 9).
- Відшуковувати 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 10).
- Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач (ПРН 11).

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Поняття про люмінесценцію

Тема 1. Люмінесценція та її використання. Визначення люмінесценції. Природа люмінесценції. Шкала електромагнітних хвиль (поділ інфрачервоної, видимої та ультрафіолетової областей на піддіпазони). Люмінесцентні об'єкти. Класифікація люмінесценції по типу збудження. Основні види люмінесценції. Спектри люмінесценції. Діаграми Яблонського.

Розділ 2. Основні закони люмінесценції

Тема 1. Основні закони люмінесценції (сталість спектра люмінесценції, правило Стокса–Ломмеля, принцип Франка–Кондона, правило дзеркальної симетрії Льовшина, принцип Паулі). Про теорему Паулі. Люмінесценція систем із різною силою зв'язку (відповідно до Фьорстера). Вихід люмінесценції (квантовий вихід, енергетичний вихід, закони Вавилова). Гасіння люмінесценції (внутрішнє гасіння, температурне гасіння, зовнішнє статичне гасіння, динамічне гасіння, концентраційне гасіння).

Тема 2. Інтенсивність люмінесценції. Зв'язок інтенсивності з вектором Пойнтинга. Поняття про адіабатичне наближення (метод Борна–Оппенгеймера, параметр неадіабатичності, принцип Франка–Кондона). Порівняння коливальних та обертальних спектрів молекул із їх електронними спектрами (електронне поглинання, коливальні рівні, обертальні рівні). Поняття про ефекти Яна–Теллера (статичний ефект Яна–Теллера, динамічний ефект Яна–Теллера).

Розділ 3. Спонтанне і вимушене випромінювання

Тема 1. Спонтанне і вимушене випромінювання. Зв'язок між коефіцієнтами Ейнштейна. Використання індукованого випромінювання. Потужність люмінесценції (дворівнева система, диференціальні коефіцієнти Ейнштейна, універсальне співвідношення між диференціальними коефіцієнтами Ейнштейна, інтегральні коефіцієнти Ейнштейна, потужність випромінювання при тепловій рівновазі, потужність випромінювання системи, яку виведено з теплової рівноваги).

Розділ 4. Збудження і гасіння люмінесценції

- Тема 1.* Особливості збудження і гасіння люмінесценції. Позитивна і від'ємна люмінесценція (відмінність їх потужності, люмінесценція і співвідношення населеності їх рівнів). Правило Стокса. Антистоксова люмінесценція.
- Тема 2.* Універсальне співвідношення Степанова. Енергетичний вихід люмінесценції Y (визначення, можливі значення, температурне гасіння при низьких і високих температурах). Квантовий вихід люмінесценції ϕ (зв'язок із енергетичним квантовим виходом люмінесценції). Поляризація люмінесценції.

Розділ 5. Коливальні і обертальні спектри

- Тема 1.* Коливальні та обертальні спектри в порівнянні з їх електронними спектрами (внутрішня і зовнішня конверсії, поняття про перенос енергії збудження донора акцептору, спінові стани, фосфоресценція і флуоресценція). Обертальні спектри (приведена маса двохатомної молекули і момент її обертального руху, кутовий момент кількості руху, обертальні квантові числа, спектральна стала, правила відбору для переходів між обертальними рівнями, обертальні спектри складних молекул). Коливально-обертальні спектри (частота коливань двохатомної молекули, коливальні квантові числа та енергетичний спектр коливань двохатомної молекули, ангармонізм коливань для великих значень коливальних квантових чисел, умови виконання принципу Франка-Кондона, правила відбору для коливально-обертальних переходів, поняття про R, P і Q гілки, про прогресії та серії). Поняття про комбінаційне розсіяння.

Розділ 6. Перенос енергії збудження

- Тема 1.* Поняття про перенос енергії збудження та його прояв у люмінесцентному процесі (особливості теорії Вавилова С.І., Перина Ж., Перина Ф., Галаніна М.Д. Фьорстера Т., Декстера Д.Л., індуктивно-резонансний і обмінно-резонансний перенос). Мультиполі (мультипольні наближення потенціалу системи статичних зарядів, дипольний момент, залежність напружки та потенціалу поля диполя від відстані до точки спостереження, квадрупольний момент системи статичних зарядів). Наближення дворівневої системи (перенос енергії між двома нерухомими молекулами, класична модель двох зв'язаних осциляторів і квантово-механічна модель дворівневої системи). Диполь-дипольна взаємодія (параметр розкладання в ряд на мультиполі, енергія диполь-дипольної взаємодії, вплив взаємної орієнтації взаємодіючих диполів на перенос енергії збудження, швидкість переносу та сила осцилятора, підсилення взаємодії зі зменшенням відстані).
- Тема 2.* Переходи у квазінеперервних спектрах. Теорія Фьорстера. (Вивчення широких спектрів як безперервних, роль швидкої релаксації в кінцевому стані, матричний момент диполь-дипольної взаємодії, вірогідність переносу та перекриття спектрів люмінесценції донора і поглинання акцептора, фьорстерівський радіус, критерій застосовності теорії Фьорстера). Урахування поляризованості середовища (ефективний дипольний момент, ефективне поле Лорентца, урахування впливу поляризованості середовища шляхом уточнення виду критичного (фьорстерівського) радіуса). Диполь-квадрупольні взаємодії (умови застосування теорії Декстера, електричний квадруполь і його компоненти, енергія диполь-квадрупольної взаємодії, орієнтаційний множник, вірогідність переносу, усереднення по орієнтаціям). Обмінні взаємодії (обмінно-резонансна взаємодія як функція відстані донор-акцептор, характерні відстані переносу).

Тема 3. Диполь-дипольний перенос енергії у жорстких розчинах. Кінетика згасання числа донорів (особливості процедури усереднення вірогідності переносу по сукупності молекул-донорів і молекул-акцепторів енергії, поняття “жорстких” розчинів, модель із одним донором і одним акцептором, усереднення вірогідності переносу по сукупності донорів, “ефект збіднення”, вплив орієнтаційного руху). Кінетика висвічування акцептора. Вихід люмінесценції і середній час життя донорів. Урахування ближнього порядку (“заборонений об’єм і ближній порядок, поява початкової експоненціальної ділянки загасання люмінесценції). Усереднення вірогідності переносу для великих концентрацій акцептора (зникнення “ефекту збіднення”, експоненціальний закон згасання числа донорів, застосовність теорії Фьорстера).

Тема 4. Диполь-дипольний перенос енергії у рідких розчинах. Модель суцільного поглинаючого середовища. Модель “повного перемішування”. Диполь-дипольний перенос із врахуванням дифузії молекул (особливості усереднення умов переносу, механізм “далекої” дії та механізм “зіткнень”, порівняння моделі суцільного поглинаючого середовища із моделлю “повного перемішування” для граничних випадків великого і малого коефіцієнтів дифузії).

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
Розділ 1. Поняття про люмінесценцію												
Тема 1	8	4				4						
Разом за розділом 1	8	4				4						
Розділ 2. Основні закони люмінесценції												
Тема 1	8	4				4						
Тема 2	8	4				4						
Разом за розділом 2	16	8				8						
Розділ 3. Спонтанне і вимушене випромінювання												
Тема 1	9	5				4						
Разом за розділом 3	9	5				4						
Розділ 4. Збудження і гасіння люмінесценції												
Тема 1	7	3				4						
Тема 2	9	4				5						
Разом за розділом 4	16	7				9						
Розділ 5. Коливальні і обертальні спектри												
Тема 1	9	4				5						
Разом за розділом 5	9	4				5						
Розділ 6. Перенос енергії збудження												
Тема 1	8	4				4						
Тема 2	8	4				4						
Тема 3	8	4				4						
Тема 4	8	4				4						
Разом за розділом 6	32	16				16						
Індивідуальні завдання												
Курсова робота	20					20						
Усього годин	90	44				46						

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

Семінарські (практичні, лабораторні) заняття навчальним планом не передбачені.

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Ознайомитись із природою люмінесценції	4
2	Ознайомитись із основними законами люмінесценції	4
3	Ознайомитись із специфікою люмінесценції в умовах адіабатичного наближення	4
4	Ознайомитись із відмінностями спонтанної та вимушеної люмінесценції	4
5	Ознайомитись із особливостями збудження і гасіння люмінесценції	4
6	Ознайомитись із фізичними засадами стоксової та антистоксової люмінесценції	5
7	Ознайомитись із відмінностями електронних, коливальних та обертальних спектрів	5
8	Ознайомитись із диполь-дипольним наближенням у задачах перенесення енергії електронного збудження	4
9	Ознайомитись з основами теорії Фьорстера–Галаніна	4
10	Ознайомитись із особливостями перенесення енергії електронного збудження у «жорстких» розчинах	4
11	Ознайомитись із особливостями перенесення енергії електронного збудження у «рідких» розчинах	4
12	Індивідуальне завдання (курсова робота)	20
	Разом	46

6. Індивідуальні завдання

№ з/п	Теми курсових робіт
1	Шкала електромагнітних випромінювань і діапазон люмінесценції діелектриків
2	Теорема Паулі і особливості люмінесценції з енергетичних рівнів із різною мультиплетністю
3	Інтегральні та диференційні коефіцієнти Ейнштейна
4	Зв'язок енергетичного та квантового виходу люмінесценції. Порушення закону Вавилова
5	Електронні, коливальні та обертальні спектри люмінесцентних речовин
6	Індуктивно-резонансне та обмінно-резонансне перенесення енергії електронного збудження
7	Теорія Фьорстера–Галаніна із урахуванням поляризованості середовища
8	Урахування ближнього порядку при перенесенні енергії електронного збудження у «жорстких» розчинах
9	Відмінність моделей суцільного середовища і «повного» перемішування

7. Методи навчання

1. Проведення лекційних занять
2. Самостійна робота студентів з вивчення додаткових матеріалів з курсу

8. Методи контролю

1. Дві контрольні роботи на протязі семестру
2. Індивідуальне завдання: курсова робота
3. Екзамен

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання				Екзамен	Сума
Контрольна робота 1	Контрольна робота 2	Індивідуальне завдання (курсowa робота)	Разом		
10	10	10	30	70	100

Досягнення студентів з навчальної дисципліни «Люмінесценція і нерівноважні процеси у твердих тілах» оцінюються в балах, загальна сума яких становить 100. Вона складається з 60 балів, які студент може отримати протягом семестру, та 40 балів, які може отримати при проходженні підсумкового контролю у вигляді екзамену.

60 балів протягом семестру – це 40 балів за контрольні роботи (по 20 за кожен) та 20 балів за виконання індивідуального завдання (курсowej роботи).

Курсова робота є індивідуальним завданням, яке студент виконує на протязі семестру і надає для оцінювання перед екзаменом. Курсові роботи оцінюються за шкалою 0–20 балів виходячи з їх відповідності завданням і повноти виконання.

Екзамен проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на запитання екзаменаційного білету. Максимальною оцінкою за екзаменаційну роботу є 40 балів.

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

10. Рекомендована література

Основна література

1. *Förster Th.* Transfer mechanism of electronic excitation // *Disc. Faraday Soc.* – 1959. – Vol. 2, No. 27. – P. 7 – 17.
2. *Агранович В.М., Галанин М.Д.* Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. – М.: Наука, 1978. – 384 с.
3. *Toyozawa Y.* Optical Processes in Solids. – Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo: University Press, 2003. – 422 p.
4. В.О. Чадок. Оптоелектроніка: від макро до нано.- К.: НТУУ «КПІ», 2012.- 406 с.
5. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб./ Ю.М. Поплавко, В.І. Ільченко, С.О. Воронов, Ю.І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч.4. Напівпровідники.

Допоміжна література

1. *Maxwell J. C.* On physical lines of force. Part III. The theory of molecular vortices applied to statical electricity // *Philosophical Magazine and Journal of Science* – 1862. – Ser. 4. – Vol. 23, No. 151. – P. 12–24
2. *Jablonski A.* Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes // *Nature* – 1933. – Vol. 131. – P. 839–840
3. *Onsager L.* Deviations from Ohm's law in weak electrolytes // *J. Chem. Phys.* – 1934. – Vol. 2, No. 9. – P. 599–615.
4. *Fano U.* A common mechanism of collective phenomena // *Rev. Mod. Phys.* – 1992. – Vol. 64, No. 1. – P. 313–319.
5. *Kasha M.* Characterization of electronic transitions in complex molecules. // *Disc Faraday Soc.* – 1950. – Vol. 9. – P. 14–19.