

Міністерство освіти і науки України

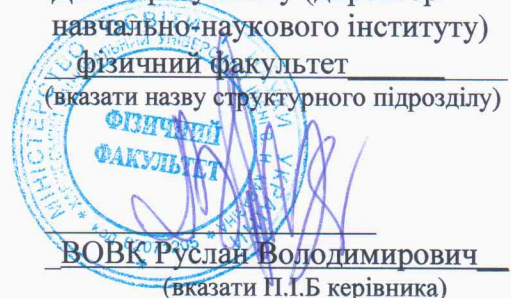
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

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 ” 08 2025р.

Робоча програма навчальної дисципліни

**Квантова електродинаміка. Функції Гріна у  
квантовій статистиці та кінетиці**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

галузь знань 10 Природничі науки  
(шифр і назва)

спеціальність 104 Фізика та астрономія  
(шифр і назва)

освітня програма

освітньо-наукова програма «Фізика»

спеціалізація

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

факультет фізичний

2025 / 2026 навчальний рік



Програма навчальної дисципліни «**Квантова електродинаміка. Функції Гріна у квантовій статистиці та кінетиці**» складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки другого рівню вищої освіти – магістр спеціальності (напрямку) – 104 – «фізика та астрономія» освітньо-наукова програма - фізика

## 1. Опис навчальної дисципліни

### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «**Квантова електродинаміка. Функції Гріна у квантовій статистиці та кінетиці**» є:

1. Формування уявлення студентів про квантову електродинаміку, тобто про релятивістську квантову теорію електромагнітної взаємодії, побудова послідовної релятивістської квантової теорії електромагнітної взаємодії, подальша розробка релятивістської теорії взаємодії квантованих електромагнітного та електронно-позитронного полів та розробка адекватних методів вирішення практичних квантово-електродинамічних задач.
2. Демонстрація студентам використання методів квантової теорії поля у квантовій статистиці і кінетиці з метою розрахунків термодинамічних величин та кінетичних коефіцієнтів конденсованих систем, побудова на заняттях зі студентами теорфізичного формалізму, який використовується зараз теоретиками з метою розрахунків електронної рідини у провідниках.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни «**Квантова електродинаміка. Функції Гріна у квантовій статистиці та кінетиці**» є навчити студентів:

- основам релятивістської квантової механіки;
- основам математичної теорії скінченно вимірних представлень групи Лоренца;
- основам релятивістської теорії квантованих електромагнітного та електронно-позитронного полів;
- користуючись навчальною та довідковою літературою, обрати адекватні методи вирішення практичних квантово-електродинамічних задач;
- використовувати формалізм квантових функцій Гріна та функціональні методи у квантовій статистиці;
- розрахунку термодинамічних величин електронної рідини у провідниках;
- використанню метода функцій Гріна для розрахунку кінетичних коефіцієнтів електронних провідників у магнітному полі та без нього;
- приділяти у процесі розрахунків належну увагу електрон-домішковому розсіянню, яке є суттєвим при низьких температурах;
- поряд з потенціальним розсіянням електронів ізольованими домішковими атомами враховувати резонансне розсіяння.

1.3. Кількість кредитів – 6.

1.4. Загальна кількість годин – 180.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
Нормативна
Денна форма навчання
Рік підготовки
2-й
Семестр
1-й

Лекції
36 год.
Практичні, семінарські заняття
Не передбачені навчальним планом
Лабораторні заняття
72 год.
Самостійна робота
72 год. (в тому числі 10 год. на виконання курсової роботи)
Курсова робота
10 год. (в рамках самостійної роботи)

Форма контролю – екзамен

#### 1.6. Заплановані результати навчання

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

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

Знати якісні, наближені та точні методи дослідження різноманітних проблем квантової електродинаміки.

Бути здатним за допомогою методів квантової електродинаміки досліджувати та вирішувати конкретні задачі, виникаючі у практичній діяльності, з метою розв'язування типових фізичних задач, володіти понятійним апаратом квантової електродинаміки.

Знати методи сучасної квантової статистики і кінетики і вміти застосовувати належним чином функції Гріна і функціональні методи.

Бути здатним вільно володіти методами теорії нерівноважних систем та користуватись ними при розрахунках кінетичних коефіцієнтів електронів у провідниках.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### Розділ 1. Основи квантової електродинаміки

#### Тема 1. Вступ до квантової електродинаміки

КЕД – найбільш успішна теорія, коли-небудь створена людством. Вимірювання аномального магнітного моменту електрона ( $g - 2$  експерименти, узгодження теорії з експериментом з точністю  $10^{-12}$ , вимірювання  $g - 2$  для мюона – нові частинки?)

Перший етап побудови КЕД: Дірак (1927). Фок, Йордан  $\Rightarrow$  поява розбіжностей у розрахунках радпоправок. Другий етап: теорія перенормувань, інтеграли за траєкторіями, фейнманівські діаграми – Фейнман, Швінгер, Томонага. Проблема «нуль-заряду». Калібрувальна інваріантність. Поля Янга—Міллса і асимптотична свобода. Стандартна модель електрослабких взаємодій. Теорії великого об'єднання і розпад протона.

#### Тема 2. Квантування скалярного поля

Рівняння Клейна—Гордона—Фока. Релятивістський спектр. Проблема розв'язків з від'ємними енергіями. Вторинне квантування. Античастинки. Оператори народження і знищення. Оператор енергії (гамільтоніан) і оператор заряду.

#### Тема 3. Енергія вакуума

$\Lambda$ -член у рівнянні Ейнштейна для гравітаційного поля. Розбіжність енергії вакуума скалярного поля (енергії нульових коливань). Точна суперсиметрія  $\Leftrightarrow \Lambda = 0$ . Ефект Казимира. Розрахунок енергії і сили Казимира для скалярного поля в  $D=1$ . Формула підсумовування рядів Абеля—Плана. Метод узагальненої  $\zeta$ -функції (Гокінг).]

**Тема 4. Істинно нейтральні частинки. Топологічний заряд**

Ефект Казимира для скалярних полів зі скрученими (twisted) граничними умовами. Ефект Ааронова–Бома для діелектриків і ефект Казимира. Розрахунок струму Джозефсона довгого SNS контакту методом узагальненої  $\zeta$ -функції. Перехід від відштовхування до притягання в силі Казимира за топологічною фазою.

**Розділ 2. Релятивістське рівняння Дірака****Тема 5. Рівняння Дірака**

«Виведення» рівняння Дірака в представленні Дірака для  $\gamma$ -матриць. Коваріантна форма рівняння Дірака. Алгебра  $\gamma$ -матриць. Матриця  $\gamma_5$ . Розв'язок вільного рівняння Дірака. Античастинки. Відкриття позитрона Андерсоном у 1932 р. Спіральність. Рівняння Дірака в  $D=1$  і  $D=2$ .

**Тема 6. Перетворення Foldy—Wouthuysen**

Оператор координати в релятивістській механіці. Оператор координати в представленні Дірака і в представленні FW. Оператор спіна і орбітального моменту в представленні FW. «Дрижання» електрона (Zitterbevegung).

**Тема 7. Рівняння Дірака в зовнішньому електромагнітному полі**

Квадрат гамільтоніана Дірака в зовнішньому полі. Нерелятивістська границя: діамагнітні і парамагнітні (паулівські) внески.  $1/C$ -розклад. Спін-орбітальна взаємодія. «Дрижання» електрона  $\Rightarrow$  дарвінівські доданки.

**Тема 8. Парадокс Клейна**

Тунелювання в нерелятивістській і релятивістській квантовій механіці. Збереження спіральності і відсутність відбиття релятивістського електрона від потенціального бар'єра в  $D=1$ . Релятивістський спектр електронів у графені і одностінних вуглецевих нанотрубках. Хіральне тунелювання в металічних вуглецевих нанотрубках.

**Розділ 3. Квантування та взаємодія полів****Тема 9. Квантування поля Дірака**

Густина лагранжіану ферміонного поля зі спіном  $1/2$ , тензор енергії-імпульса, оператори народження і знищення, фермі-статистика, рівняння Вейля, маса нейтрино і нейтринні осциляції. Ефект Казимира для ферміонів.

**Тема 10. Вільне електромагнітне поле. Фотон**

Вторинне квантування електромагнітного поля. Оператори координати і імпульсу електромагнітного поля. Фотони. Простір Фока. Момент і парність фотона. Електродинаміка в  $D=2$ , черн-саймонівський лагранжіан і масивні «двовимірні» фотони.

**Тема 11. Поля, що взаємодіють. Квантова електродинаміка в  $D=1$ .**

Нелінійне скалярне поле. Спонтанне порушення симетрії. Солітони і топологічний заряд. Модель sine-Gordon. Модель Хіггса і поява маси у калібрувального поля. Голдстоунівські моди і хіггсовські бозони. Модель Швінгера, конфайнмент заряду (кулонівська блокада). Деконфайнмент у зовнішньому електричному полі. Хвиля зарядової щільності і хіральна аномалія.

**Тема 12. Інтеграл за траєкторіями і фейнманівські діаграми**

Функціональний інтеграл у квантовій механіці і квантовій теорії поля. Точний розв'язок для вільного поля. Теорія збурень за константою взаємодії і фейнманівські діаграми.

## Лабораторні заняття

### Цикл робіт 1. Метод функцій Гріна в квантовій статистиці.

- Тема 1. Хронологічний і нормальний добуток операторів. Згортка.
- Тема 2. Функції Гріна при нульовій температурі.
- Тема 3. Часова, загайна і випереджувальна функції Гріна при кінцевих температурах.
- Тема 4. Температурні функції Гріна.
- Тема 5. Спектральні представлення функцій Гріна.
- Тема 6. Співвідношення між функціями Гріна.
- Тема 7. Функції Гріна вільних частинок.
- Тема 8. Термодинамічні функції і функції Гріна.
- Тема 9. Температурний оператор розсіяння.
- Тема 10. Функції Гріна в представленні взаємодії.
- Тема 11. Ряд теорії збурень для функції Гріна.
- Тема 12. Теорема Віка.
- Тема 13. Діаграми Фейнмана (координатне представлення).
- Тема 14. Діаграмна техніка в імпульсному представленні.
- Тема 15. Симетризована діаграмна техніка.
- Тема 16. Власно-енергетична функція.
- Тема 17. Наближення Хартрі-Фока.
- Тема 18. Ефективна взаємодія.
- Тема 19. Поляризаційний оператор.
- Тема 20. Наближення випадкових фаз.
- Тема 21. Плазмони.
- Тема 22. Екранування в електронному газі.
- Тема 23. Рівняння руху для функцій Гріна.
- Тема 24. Двочастинкова функція Гріна.
- Тема 25. Вершинна функція.
- Тема 26. Зв'язок власно-енергетичної функції з вершинною функцією.
- Тема 27. Теорія фермі-рідини.

### Цикл робіт 2. Метод функцій Гріна в квантовій кінетиці.

- Тема 28. Оператор густини струму в представленні вторинного квантування.
- Тема 29. Оператор спінової намагніченості електронів.
- Тема 30. Густина струму і функція Гріна.
- Тема 31. Теорія лінійної реакції. Формула Кубо.
- Тема 32. Зв'язок тензора провідності і спінової сприйнятливості з двочастинковою функцією Гріна електронів.
- Тема 33. Тензор високочастотної провідності електронного газу.
- Тема 34. Високочастотна провідність у магнітному полі.
- Тема 35. Тензор діелектричної проникливості.
- Тема 36. Зв'язок тензора діелектричної проникливості з тензором провідності. Повздовжня і поперечна провідність.
- Тема 37. Узагальнена сприйнятливість.
- Тема 38. Принцип причинності і дисперсійні співвідношення Крамерса-Кроніга.
- Тема 39. Флуктуаційно-дисипативна теорема.
- Тема 40. Мацубарівська сприйнятливість.
- Тема 41. Електронно-домішкова система в магнітному полі.

### Цикл робіт 3. Метод Келдиша в квантовій кінетиці.

- Тема 42. Нерівноважні часові функції Гріна.  
 Тема 43. Контур Келдиша-Швінгера.  
 Тема 44. Рівняння Дайсона.  
 Тема 45. Діаграмна техніка для нерівноважних систем.  
 Тема 46. Власно-енергетичні функції нерівноважних систем.  
 Тема 47. Рівняння Каданова-Бейма. Кінетичне рівняння. Квантова кінетика з початковими кореляціями.  
 Тема 48. Метод Келдиша і змінні Грассмана.

### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п (сем.)	лаб	Інд	ср
1	2	3	4	5	6	7
<b>3 семестр</b>						
<b>Розділ 1. Основи квантової електродинаміки</b>						
Тема 1		3		6		6
Тема 2		3		6		6
Тема 3		3		6		6
Тема 4		3		6		6
Разом за розділом 1		12		24		24
<b>Розділ 2. Релятивістське рівняння Дірака</b>						
Тема 5		3		6		6
Тема 6		3		6		6
Тема 7		3		6		6
Тема 8		3		6		6
Разом за розділом 1		12		24		24
<b>Розділ 3. Квантування та взаємодія полів</b>						
Тема 9		3		6		6
Тема 10		3		6		6
Тема 11		3		6		6
Тема 12		3		6		6
Разом за розділом 3		12		24		24
<b>Усього годин</b>	<b>180</b>	<b>36</b>		<b>72</b>		<b>72</b>
<b>Екзамен</b>						

### 5. Завдання для самостійної роботи

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

1. По всім нижче вказаним темам 1-12 опрацювати конспекти лекцій.
2. Прочитати відповідні параграфи в підручниках [1–6].

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	2	3
1	Самостійне розв'язання задач № 1-34, які запропоновані у авторському навчальному посібнику [4]. У тому числі 10 годин на виконання курсової роботи.	24
2	Самостійне розв'язання задач № 1-35, які запропоновані у авторському навчальному посібнику [5].	24
3	Самостійне розв'язання задач № 1-15, які запропоновані у авторському навчальному посібнику [6].	24
	<b>Разом</b>	<b>72</b>

### 6. Індивідуальні завдання

Курсова робота, яка виконується під час самостійної роботи.

Запропоновані теми курсових робіт

1. Рівняння Дірака у зовнішньому полі у нерелятивістському випадку.
2. Ефект Казіміра.
3. Модель Хіггса.

### 7. Методи контролю

Поточне опитування, захист курсової роботи, письмовий екзамен.

### 8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання						Екзамен	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділи 3	Контрольна робота, передбачена навчальним планом (дві контрольні роботи)	Курсова робота	Разом		
T1-T4	T5-T8	T9-T12					
10	10	10	10	20	60	40	100

Для зарахування розділів 1-3 треба набрати у підсумку максимум 30 балів (10 балів за кожен розділ) за результатами поточного опитування. Для допуску до письмового екзамену треба набрати у підсумку не менше 20 балів. За екзаменаційну письмову роботу студент повинен набрати не менше 20 балів та загалом не менше 50 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 «Квантова електродинаміка. Функції Гріна у квантовій статистиці та кінетиці» 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 вважається успішно зданий, якщо сумарна оцінка за письмову екзаменаційну роботу не менше 30 балів, а сумарний підсумковий бал не менше 50 балів.**

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. Ryder L.H. Quantum Field Theory Cambridge, University Press, 1996. - 508 pp.
2. Berestetsky V.B., Lifshitz E.M., Pitaevsky L.P. Course of Theoretical Physics: Quantum Electrodynamics [Volume 4], Butterworth-Heinemann, 1982. - 651 pp.
3. Lifshitz E.M., L.P.Pitaevskii L.P. Course of Theoretical Physics: Physical Kinetics [Volume 10], Butterworth-Heinemann, 1981. - 625 pp.
4. Abrikosov A.A., Gor'kov L.P., Dzyaloshinskii I.E. 1963. *Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics*. New York: Prentice Hall - Englewood Cliffs.

5. Negele J.W. and Orland H. Quantum Many-Particle Systems. - California: Addison-Wesley Publ. Co., 1988. - 456 p.
6. Coleman, Piers. 2015. Introduction to Many-Body Physics. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Economu Eleftherios N. 2006. Green's Functions in Quantum Physics. Berlin - Heidelberg: Springer - Verlag.
8. Єрмолаєв О.М., Рашба Г.І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки: Навчальний посібник. - Харків: Видавництво ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2004. -516 с. (з грифом МОН України).

#### **Допоміжна література**

1. Ermolaev A.M., Rashba G.I. The method of local perturbations in the theory of nanosystems // Cambridge Scholars Publishing (United Kingdom), 2022. - 236 pp. ISBN (10): 1-5275-8556-5 ISBN (13): 978-1-5275-8556-0.
2. Ermolaev A.M., Rashba G.I. Electron Gas: An Overview. 1. Electron Gas on the Surface of a Nanotube: Thermodynamics, Dynamic Conductivity, and Collective Phenomena. - New York (USA): Nova Science Publishers, Inc., 2019. - 122 p.: fig. - ISBN 978-1-53616-442-8.

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

1. Учбові матеріали на сайті 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)