

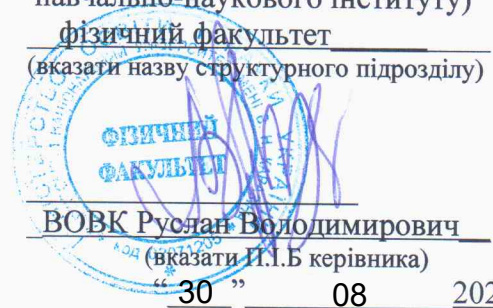
Міністерство освіти і науки України

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 І.І.Б керівника)

“ 30 ” 08 2025р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Квантова теорія поля

(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

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 29 ” 08 2025 року, протокол № 10

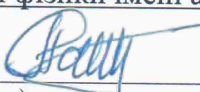
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Рашба Георгій Ілліч, кандидат фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця

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

Протокол від “ 27 ” 08 2025 року № 18

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця


(підпис)

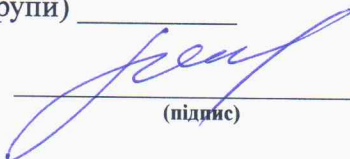
Рашба Г.І.
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми

фізика (спеціальність 104 – фізика та астрономія)

назва освітньої програми

Гарант освітньо-наукової програми
(керівник проектної групи) _____


(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

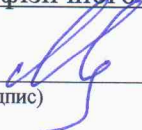
Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 28 ” 08 2025 року № 5

Голова методичної комісії фізичного факультету


(підпис)

Макаровський М.О.
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Квантова теорія поля**” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки другого рівню вищої освіти – магістр

спеціальності (напряму) – 104 – «фізика та астрономія»
освітньо-наукова програма – фізика

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Квантова теорія поля» сформуванню уявлення студентів про квантову теорію поля, зокрема про квантову електродинаміку, квантову хромодинаміку та теорію електрослабких взаємодій.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни «Квантова теорія поля» є навчити студентів

- основам релятивістської квантової механіки
- основам математичної теорії скінченно вимірних зображень групи Лоренца,
- основам релятивістської теорії квантованих полів
- користуючись навчальною та довідковою літературою, обирати адекватні методи вирішення задач теорії квантованих полів.

1.3. Кількість кредитів 3

1.4. Загальна кількість годин 90.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
За вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
2-й
Семестр
4-й
Лекції
22 год.
Практичні, семінарські заняття
Не передбачені навчальним планом
Лабораторні заняття
Не передбачені навчальним планом
Самостійна робота
68 год.
Індивідуальні завдання
(у тому числі 10 год. на підготовку до двох контрольних робіт та 20 год. на підготовку на написання курсової роботи)
Екзамен

1.6. Заплановані результати 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 теорії поля.

вміти: за допомогою методів квантової теорії поля досліджувати та вирішувати конкретні задачі, виникаючі у практичній діяльності.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Релятивістська квантова механіка

Тема 1. Предмет курсу і коротка історія розвитку квантової теорії поля.

Експерименти, які підтверджують справедливість квантової теорії поля. Розвиток уявлень про фотони, глюони, електрони, нейтрино та кварки, частинки та античастинки. Когерентні стани фотонів і граничний перехід від квантової електродинаміки до класичної.

Тема 2. Рівняння Клейна - Гордона.

Введення електромагнітної взаємодії в рівняння Клейна-Гордона. Негативні енергії. Античастинки. Зарядове спряження. Звертання часу. Вираження для 4-вектора струму. Скалярний добуток.

Тема 3. Групи Лі та їх зображення. Групи Лоренца і Пуанкаре. Спінорні зображення групи Лоренца. Зображення групи Лоренца у загальному випадку.

Тема 4. Хвильові рівняння безмасових полів.

Рівняння Максвелла у формі Майорани. Рівняння слабких гравітаційних хвиль. Рівняння Вейля для нейтрино. Мала група Лоренца та хвильові рівняння безмасових полів.

Тема 5. Рівняння Дірака.

Властивості матриць Дірака. Релятивістська інваріантність рівняння Дірака. Введення електромагнітної взаємодії в рівняння Дірака. 4-вектор струму. Скалярний добуток.

Тема 6. Нерелятивістська границя рівняння Дірака.

Нерелятивістське наближення Паулі. Магнітний момент електрона. Тонка взаємодія електрона з електричним полем. „Розмір” електрона.

Тема 7. Античастинки.

Рішення з негативною енергією. Зарядове спряження. Позитрони як електрони з негативною енергією, що рухаються назад у часі.

Тема 8. Спін у теорії Дірака.

Рішення рівняння Дірака для вільних частинок з визначеними енергією і імпульсом. Спін електрона. Релятивістський опис спіну електрона.

Розділ 2. Релятивістська теорія квантованих полів

Тема 9. Калібрувальні поля.

Електромагнітне поле як калібрувальне. Гравітаційне поле як калібрувальне. Індуктована гравітація. Глюонні поля.

Тема 10. Електрослабка теорія та квантова хромодинаміка.

Векторні бозони в електрослабкій теорії та глюони у квантовій хромодинаміці як кванти калібрувальних полів. Бозон Хігса.

Тема 11. Квантування вільних полів.

Квантування скалярного поля. Розклад операторів поля по плоским хвилям. Вакуумні середні для добутків операторів поля. Хронологічний і нормальний добутки операторів.

Тема 12. Квантування електромагнітного поля.

Подолання труднощів, що виникають при квантуванні електромагнітного поля. Перестановочні співвідношення для операторів 4-потенціалів електромагнітного поля. Ін-дефінітна метрика.

Тема 13. Квантування електронно-позитронного поля.

Антикомутатори операторів поля. Хронологічний і нормальний добуток операторів поля.

Тема 14. Взаємодія квантованого електромагнітного поля з квантованим електронно-позитронним полем.

Система рівнянь квантової електродинаміки в гейзенберговському представленні. Представлення взаємодії. Інваріантна теорія збурень. Матриця розсіювання.

Тема 15. Деякі квантово-електродинамічні явища.

Графічне представлення нормальних добутків. Найпростіші діаграми. Імпульсне представлення. Правила Фейнмана для обчислення матричних елементів матриці

розсіювання. Розсіювання фотона електроном: матричний елемент розсіювання; диференціальний перетин розсіювання у випадку неполяризованих частинок.

Тема 16. Усунення розбіжностей з матриці розсіювання і перенормуємість квантової електродинаміки.

Вищі порядки теорії збурень і розбіжності в квантовій електродинаміці. Власна енергія фотона. Власна енергія електрона. Вершинна функція. Перенорміровка маси і заряду.

Тема 17. Радіаційні поправки.

Поляризація вакууму і модифікація закону Кулона. Аномальний магнітний момент електрона. Радіаційне зміщення рівнів атома водню.

Тема 18. Випаровування чорних дірок.

Когерентні та «стиснені» стани у квантовій електродинаміці. Чорні дірки, їх випаровування та інформаційний парадокс у теорії випаровування чорних дірок.

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
Розділ 1. Релятивістська квантова механіка						
Тема 1	5	1				4
Тема 2	5	1				4
Тема 3	5	1				4
Тема 4	5	1				4
Тема 5	6	2			2	2
Тема 6	6	2			2	2
Тема 7	5	1			2	2
Тема 8	5	1			2	2
Разом за розділом 1	42	10			8	24
Розділ 2. Релятивістська теорія квантованих полів						
Тема 9	5	1			2	2
Тема 10	5	1			2	2
Тема 11	5	1			2	2
Тема 12	4	1			2	1
Тема 13	4	1			2	1
Тема 14	4	1				3
Тема 15	4	1				3
Тема 16	5	1			2	2
Тема 17	6	2			2	2
Тема 18	6	2			2	2
Разом за розділом 2	48	12			16	20
Усього годин	90	22			20	48

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.

1. По всім нижче вказаним темам опрацювати конспекти лекцій, прочитати відповідні параграфи в підручниках [1–4].
2. Виконати самостійно домашні завдання.
3. Самостійно написати та захистити курсову роботу.

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	2	3
1.	Рівняння Шредінгера як нерелятивістська границя рівняння Клейна-Гордона.	4
2.	Частинка зі спином нуль у кулоновському полі.	4
3.	Функції Гріна рівняння Клейна-Гордона.	4
4.	Теорема Майорани-Пенроуза про властивості спіntenзорів та її застосування.	4
5.	Парадокс Клейна.	4
6.	Функції Гріна рівняння Дірака.	4
7.	Розсіювання релятивістського електрона у зовнішньому полі по теорії збурень.	4
8.	Релятивістський атом водню.	4
9.	Прецесія Томаса та рівняння Баргмана-Мішеля-Телегді.	4
10.	Функції Гріна квантованого скалярного поля.	4
11.	Функції Гріна квантованого електромагнітного поля.	4
12.	Функції Гріна квантованого електронно-позитронного поля.	3
13.	Неспроможність локалізувати фотон у скінченній області. Теорема Вайнберга-Віттена.	3
14.	Рівняння Максвелла у загально-коваріантному вигляді та грассманові змінні. Поняття про суперсиметрію.	3
15.	Розсіювання електрона на електроні: матричний елемент розсіювання; перетин розсіювання.	3
16.	Анігіляція електронно-позитронної пари: матричний елемент двухфотонної анігіляції; розпад позитронія.	4
17.	Випромінювання довгохвильових фотонів. Інфрачервона катастрофа.	4
18.	Поле випромінювання класичного струму; когерентні стани квантованого електромагнітного поля.	4
	Разом	68

6. Індивідуальні завдання

Курсова робота.

Запропоновані теми курсових робіт:

1. Вимірюванні аномального магнітного моменту мюону ($g-2$ експеримент)
2. Парадокс Клейна для електронів у графені
3. Спін-орбітальна взаємодія для двовимірних електронів (ефект Рашби)
4. $1/c$ розклад рівняння Дірака в електромагнітному полі у зображенні Холда-Вотхойзена
5. Оператор координати релятивістського ферміона (оператор Ньютона-Вігнера)

7. Методи контролю

Поточне опитування, дві контрольні роботи протягом семестру, захист курсової роботи.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання					
Розділ 1	Розділ 2	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Курсова робота	Екзамен	Сума
T1-T8	T9-T18	2 контрольні роботи		40	100
10	10	10+10	20		

Для зарахування розділів 1-2 треба набрати у підсумку не менше 5 балів за результатами поточного опитування, написати контрольну роботу по кожному з розділів та отримати за неї не менше 5 балів, а в підсумку – не менше 10 балів для зарахування усього розділу. Написати та захистити курсову роботу та отримати на неї не менше 10 балів. Для допуску до письмового екзамену треба набрати у підсумку не менше 30 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 двох 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 висновками 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 20 балів, а сумарний підсумковий бал не менше 50 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для екзамену	для заліку
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. 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.
4. Negele J.W. and Orland H. Quantum Many-Particle Systems. – California: Addison-Wesley Publ. Co., 1988. – 456 p.
5. Efetov K. 1995. Supersymmetry in disordered and chaos. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Tsel'vik A.M. 1995. Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics. Cambridge – London: Cambridge University Press.
7. Rammer J. 2007. Quantum Field Theory of Non-equilibrium States. Cambridge: Cambridge University Press.
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.