

СИЛАБУС

навчальної дисципліни

“КВАНТОВА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА В СИЛЬНИХ СВІТЛОВИХ ПОЛЯХ”

Галузь знань	10 Природничі науки
Шифр та назва спеціальності	104 Фізика та астрономія
Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Статус дисципліни (обов’язкова, вибіркова)	вибіркова
Затверджено	Протокол № 4 від 26.09.2025 засідання науково-методичної ради.

Викладач (розробник)



Ворошило Олексій Іванович,
кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.
alwar1972@gmail.com, voroshilo@nas.gov.ua
ІПФ НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, м. Суми
Тел. +38 054 222 4608

Загальна інформація про дисципліну

Анотація

Курс покликаний дати можливість здобувачам вищої освіти рівня доктора філософії ознайомитися із математичним апаратом та діаграмною технікою квантової електродинаміки в світловому полі. Квантова електродинаміка є найточніше експериментально перевіреною фізичною теорією та такою, що описує 99% спостережуваних нами явищ. Зі стрімким розвитком лазерної техніки з’явилась можливість перевірки КЕД в зовнішніх полях, напруженість яких порівняна з критичною.

Мета

Метою дисципліни є формування у здобувачів розуміння методів квантової електродинаміки та навичок використання апарату квантової електродинаміки для вивчення фізичних явищ в світлових полях.

Результати навчання

Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі:

Компетентності:

Здатність виявляти, ставити та вирішувати фізичні задачі, що відносяться до області застосування квантової електродинаміки в зовнішніх світлових полях.

Результати навчання:

Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з квантової електродинаміки, а також необхідні навички, достатні для проведення

розрахунків КЕД процесів, що відбуваються в сильних світлових полях. Уміти порівнювати отримані дані з експериментальними та передбачати результати експериментів із перевірки КЕД в сильних лазерних полях.

Обсяг дисципліни	Кількість кредитів	— 3
	Загальна кількість годин	— 90 год:
Методи навчання	• Лекції	— 30 год;
	• Практичні	— 14 год;
	• Самостійна робота	— 44 год;
	• Залік	— 2 год.
	• МН1. Лекційне навчання.	
	• МН2. Практикоорієнтоване навчання.	
Форма підсумкового контролю	Залік	

Опис навчальної дисципліни

Лекційні заняття

№ з/п	Назви тем	К-сть годин
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕОРІЇ КЕД ПРОЦЕСІВ У СВІТЛОВОМУ ПОЛІ		
1.	Лекція 1. Біспінори. Білінійні форми. Матриці Дірака. Біспінори. Білінійні ермітові форми із біспінорів. Матриці Дірака. Алгебра матриць Дірака. Знаходження шпурів від добутку матриць Дірака.	2
2.	Лекція 2. Рівняння Дірака у зовнішньому електромагнітному полі. Рівняння Дірака. Нерелятивістське наближення. Перше наближення за v/c . Друге наближення за v/c .	2
3.	Лекція 3. Хвильова функція електрона в полі плоскої електромагнітної хвилі. Розв'язок рівняння Дірака для електрона в полі плоскої електромагнітної хвилі. Ортонормованість. Властивості розв'язків.	2
4.	Лекція 4. Матриця розсіювання. S-матриці і її властивості. Представлення диференціальних перерізів/ймовірностей процесів через елементи S-матриці. Пропагатори (функції Гріна) фотона і електрона в плоскохвильовому полі.	2
5.	Лекція 5. Теорія збурень . Діаграми Фейнмана. Картина Фаррі. Діаграмна техніка в теорії КЕД процесів в зовнішньому полі. Віртуальні стани.	2
ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ 1-ГО ПОРЯДКУ В ПОЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ		
6.	Лекція 6. Характеристики лазерного випромінювання. Характеристики лазерного випромінювання. Моделі лазерного випромінювання. Експерименти із перевірки КЕД в лазерному полі.	2
7.	Лекція 7. Ймовірність процесу розсіювання фотона електроном в полі електромагнітної хвилі. Амплітуди розсіювання. Ймовірності процесів. Спін-поляризаційні характеристики процесу.	3
8.	Лекція 8. Ймовірності процесів однофотонної анігіляція електрон-позитронних пар; утворення електрон позитронної пари в полі електромагнітної хвилі. Амплітуди і ймовірності процесів.	2
ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ 2-ГО ПОРЯДКУ В ПОЛІ МОНОХРОМАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ		
9.	Лекція 9. Загальний підхід до дослідження процесів 2-го порядку за сталою тонкої структури в полі електромагнітної хвилі.	2

Амплітуди розсіювання. Ймовірності процесів. Резонансний перебіг процесів 2-го порядку.

- 10 **Лекція 10. Процес розсіювання фотона на електроні (Комптон-ефект), двохфотонна аннігіляція, двофотонне випромінювання, утворення електрон-позитронної пари при розсіювання електрона на електромагнітній хвилі.** 4

Амплітуди розсіювання. Ймовірності процесів. Резонансний перебіг процесів 2-го порядку.

ТЕОРІЯ КЕД ПРОЦЕСІВ В КВАЗІМОНОХРОМАТИЧНИХ ПОЛЯХ, БІХРОМАТИЧНИХ, ПОЛІ ЯДРА І ПЛОСКОЇ МОНОХРОМАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

11. **Лекція 11. КЕД процеси в полі ядра і електромагнітної хвилі.** 2

Перше борнівське наближення. Розрахунок ймовірності процесу розсіювання електрона на ядрі в полі електромагнітної хвилі.

12. **Лекція 12. КЕД процеси в квазімонохроматичному полі.** 2

Ймовірність процесів 1-го порядку в полі електромагнітної хвилі з обмежуючою.

13. **Лекція 13. КЕД процеси в біхроматичному та багаточастному у електромагнітному полі.** 2

Амплітуди процесів. Ймовірності процесів.

14. **Лекція 14. Числові методи до розрахунку КЕД процесів в зовнішніх електромагнітних полях.** 1

Застосування числових методів до теорії КЕД процесів в зовнішніх полях. Наближення світлового фронту (LFC – Light front quantization). Локально монохроматичне наближення (LMA – Locally monochromatic approximation). Метод наближення сильного поля (SFA – Strong-Field Approximation).

Разом (год.) 28

Теми практичних занять

1. Поляризаційна матриця густини фотонного стану 2
2. Поляризаційна матриця густини електронного стану 2
3. Доведення ортонормованності функцій Волкова. 2
4. Техніка розрахунку процесів 1-го порядку в полі монохроматичної електромагнітної хвилі. 4
5. Техніка розрахунку процесів 2-го порядку в полі монохроматичної електромагнітної хвилі. 4

Разом (год.) 14

Самостійна робота

Опрацювання тем, які не входять до плану аудиторних занять

1. Квантування на світловому фронті (Light Front Quantization). 4
2. Метод віртуальних фотонів для розрахунку процесів 2-го порядку. 2
3. Використання методу стаціонарної фази для КЕД процесів в квазімонохроматичному електромагнітному полі. 4
4. Розрахунок шпурів, що виникають при розрахунку ймовірностей КЕД процесів в полі електромагнітної хвилі, для неполяризованих станів електрона. 8
5. Розрахунок шпурів, що виникають при розрахунку ймовірностей КЕД процесів в полі електромагнітної хвилі, для поляризованих станів електронів. 10
6. Віртуальні стани. 8
7. Каскадні КЕД процеси в лазерному полі. 8

Разом (год.) 44

ОЦІНЮВАННЯ ЗА ОСВІТНІМ КОМПОНЕНТОМ

Сумативне оцінювання

1.1. Для оцінювання очікуваних результатів навчання передбачено

№	Методи сумативного оцінювання	Бали / Вага у	Дата складання
---	-------------------------------	---------------	----------------

		загальній оцінці	
1	Практичні заняття	21 бали / 21%	Згідно графіка навчального процесу
2	Індивідуальні завдання	48 балів / 48%	
3	Залік (комплексне завдання)	31 балів / 31%	

1.2. Критерії оцінювання

№ з/п	Вид діяльності	Оцінювання
1	Практичні заняття	Нарахування балів відбувається за кожне заняття по шкалі: • відмінні відповіді: 3 бали; • добрі відповіді: 2 бали; • задовільні, достатні відповіді: 1 бал. Максимум 21 бали.
2	Індивідуальні завдання	• 37-48 балів – аспірант гарно орієнтується в матеріалі, задачі розв’язані вірно. • 25-36 балів – аспірант достатньо орієнтується в матеріалі, задачі розв’язані з невеликими помилками. • 13-24 балів – аспірант недостатньо орієнтується в матеріалі, задачі розв’язані не повністю. • 0-12 балів – аспірант не орієнтується в матеріалі, задачі не розв’язані. Максимум 48 балів
3	Залік	• здобувач гарно орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв’язані вірно: 21-31 балів. • здобувач достатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв’язані з невеликими помилками: 11-20 балів; • здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв’язані не повністю: 6-10 балів; • здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі не розв’язані: 0-5 балів; Максимум 31 балів

Методичне забезпечення

1. Тексти та конспекти лекцій
2. Методичні розробки для аспірантів з практичних занять
3. Доступ та опрацювання он-лайн ресурсів

Рекомендована література

Базова

1. С.П. Рошупкін, О.І. Ворошило. Резонансні і когерентні ефекти квантової електродинаміки в сильному полі. – Київ, Наукова думка, 2008. – 398 с.
2. С.П. Рошупкін, А.А. Лебедь. Ефекти квантової електродинаміки в сильних імпульсних лазерних полях. Київ, Наукова думка, 2013. – 191 с.
3. Kholodov R.I., Novak O.P., Diachenko M.M. Resonant and polarization effects in the processes of quantum electrodynamics in a strong magnetic field. — Kyiv: Akadempriodyka, 2022. — 295 p.

Допоміжна

1. Вакарчук І.О. Квантова механіка: Підручник.- Львів, Видавництво Львівського університету, 1998.
2. Ребенко О.Л. Основи сучасної теорії взаємодіючих квантованих полів. – К.: Наукова думка, 2007. – 539 с

3. Пескін М.Е., Шродер Д.В. Вступний курс квантової теорії поля. Том I. Фейнманові діаграми і квантова електродинаміка. – Видавництво TAXION, 2012. – 326 с.
4. James D. Bjorken, Sidney David Drell. Relativistic Quantum Mechanics McGraw-Hill, 1964 - 300 p.
5. Давидова О.С. Квантова механіка – К., 2012. — 706 с

Інформаційні ресурси

1. James D. Bjorken, Sidney David Drell. Relativistic Quantum Mechanics McGraw-Hill, 1964:
<https://emineter.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/james-d-bjorken-sidney-d-drell-relativistic-quantum-mechanics-1964.pdf>
2. [Maxima by Example, Ch. 12: Dirac Algebra and Quantum Electrodynamics, Version 3:](https://home.csulb.edu/~woollett/mbe12.html)
<https://home.csulb.edu/~woollett/mbe12.html>

Академічна доброчесність

Здобувач вищої освіти повинен дотримуватись Етичного кодексу ученого України. Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає: самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей); посилення на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей; дотримання норм законодавства про авторське право і сум права; надання достовірної інформації про результати власної навчальної (наукової, творчої) діяльності, використанні методики досліджень і джерела інформації.

У випадку порушення академічної доброчесності – реагування відповідно до «Положення про академічну доброчесність в ІПФ НАН України».