

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор навчально-наукового інституту

«Фізико-технічний факультет»
(вказати назву структурного підрозділу)

Кузнєцов Н.Е. 
(вказати П.І.Б. керівника)



2023р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ **Квантова теорія поля та фізика раннього Всесвіту**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	другий (магістерський)
галузь знань	10 «Природничі науки»
спеціальність	105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
світня програма	«Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми»
спеціалізація	
код дисципліни	за вибором
факультет	ННІ «Фізико-технічний факультет»

2023/2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою Навчально наукового інституту «Фізико-технічний факультет»

“25” серпня 2023 року, протокол № 8

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)
Олексій НУРМАГАМБЕТОВ доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера
Протокол від “16” червня 2023 року № 10

Завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера



_____ (підпис)

Микола ШУЛЬГА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми Прикладна фізика
(назва освітньої програми)

Гарант освітньої (професійної) програми



_____ (підпис)

Ігор ГІРКА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»
(назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна)

Протокол від “14” серпня 2023 року № 11

Голова науково-методичної комісії ННІ «Фізико-технічний факультет»



_____ (підпис)

Микола ЮНАКОВ
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програму навчальної дисципліни “Квантова теорія поля та фізика раннього Всесвіту” складено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки другого рівня вищої освіти (магістр). Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”. Освітня програма: «Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми». При розробці Програми враховані вимоги Стандарту вищої освіти другого (магістерського) рівня, галузі знань 10 – «Природничі науки», спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», затвердженого наказом МОН України № 804 від 16.06.2020 р.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Квантова теорія поля (КТП) є природним релятивістським узагальненням квантової механіки і є основою і фундаментальною складовою сучасної квантової фізики. Вивчення КТП є базисом для розуміння основних процесів фізики елементарних частинок, ядерної фізики, квантової оптики, фізики твердого тіла і конденсованого стану, фізики плазми, гравітації та космології. Без знань квантової теорії поля неможливо сформувати науковий світогляд фахівця в фізиці в цілому, і теоретичної фізики зокрема.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

полягають у тому, щоб сформувати у студентів знання фізичних і математичних основ КТП, допомогти отриманню навичок застосування її математичного апарату до вирішення конкретних фізичних задач, підготувати фахівців з сучасної фізики, які спроможні розв’язувати різноманітні задачі релятивістської квантової механіки, фізики твердого тіла, фізики елементарних частинок, теорії тяжіння та інших розділів сучасної фізики.

Загальні компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни:

- знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності; (ЗК-2)
- навички використання інформаційних і комунікаційних технологій; (ЗК-5)
- здатність до проведення досліджень на відповідному рівні; (ЗК-6)
- здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел; (ЗК-7)
- здатність працювати автономно. (ЗК-9)

Фахові компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни:

- здатність брати участь у плануванні та виконанні наукових та науково-технічних проєктів; (СК-1)
- здатність брати участь у впровадженні результатів досліджень та розробок; (СК-4)
- здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп’ютерних технологій; (СК-5)
- здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем; (СК-6)
- здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності; (СК-7)
- здатність працювати в колективах виконавців, у тому числі в міждисциплінарних проєктах; (СК-8)
- здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв’язування фізичних задач і моделювання фізичних систем; (СК-10)

- розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних досліджень. (СК-11)

Отже, вивчення дисципліни має на меті допомогти студентам глибоко засвоїти окреслені методи сучасної теоретичної фізики, сформулювати загальне цілісне бачення предмету та підготувати студентів до самостійного вивчення оригінальних наукових статей та монографій з фізики високих енергій та фізики елементарних частинок.

1.3. Кількість кредитів

11

1.4 Загальна кількість годин

330

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
1-й	
Семестр	
1-й	2-й
Лекції	
64 год.	96 год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
56 год.	114 год.
Індивідуальні завдання	
2 год.	1 год.

1.6. Заплановані результати навчання

полягають у тому, що внаслідок опанування курсу “Квантова теорія поля та фізика раннього Всесвіту” студенти мають засвоїти загальні положення фізичних і математичних основ сучасної квантової фізики, релятивістську квантову механіку частинок із спином 0, 1/2, та 1, симетричні властивості відповідальних лагранжіанів вільних квантових полів та їх взаємодій, діаграмну техніку (правила Фейнмана), теорію перенормування та механізми спонтанного порушення симетрії, а також використовувати отримані теоретичні основи для розрахунків перерізів та аналізу поляризаційних явищ.

Згідно з освітньо-професійною програмою «Прикладна фізика» спеціальність 105 – «прикладна фізика та наноматеріали» студенти мають досягти таких результатів навчання:

- знати та розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв’язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики; (Зн-1)
- знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, механіки суцільних середовищ,

молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та геометричної 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 теоретичної та прикладної фізики; (Зн-4)

- знати та розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій; (Зн-5)
- застосовувати сучасні математичні методи для побудови та аналізу математичних моделей фізичних процесів; (Ум-1)
- застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій; (Ум-3)
- вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики; (Ум-4)
- відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність і релевантність інформації; (Ум-5)
- класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики; (Ум-6)
- Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів; (Ум-7)
- мати базові навички проведення теоретичних та/або експериментальних наукових досліджень з окремих спеціальних розділів фізики, що виконуються індивідуально (автономно) та/або у складі наукової групи. (АіВ-1)

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Вступ. Коротка історія становлення квантової теорії поля (КТП). Коло задач, якими опікується КТП, місце дисципліни в сучасному фізичному світогляді. Математичний апарат та наукові абстракції, які використовуються в даному курсі. Структура курсу КТП та огляд основних складових курсу.

Розділ 1. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином 0 та $\frac{1}{2}$. Метод функцій Гріна.

Тема 1. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином 0

Поняття про вимірність та локалізацію у релятивістській квантовій теорії. Рівняння Клейна-Гордона (РКГ) та його нерелятивістська границя. Розв'язки РКГ для вільної частинки. Лагранжіан і тензор енергії-імпульсу зарядженого скалярного поля. РКГ у формі рівняння Шредингера. Взаємодія зарядженої скалярної частинки із електромагнітним полем. Калібрувальна інваріантність. Ефект Ааронова-Бома. Спонтанне порушення симетрії і ефект Хігсу.

Тема 2. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином $\frac{1}{2}$

Рівняння Дірака (РД). Матриці Дірака та їх властивості. Рівняння неперервності. Нерелятивістська границя РД для електрону у слабкому електромагнітному полі. Коваріантна форма РД. Операція просторової інверсії. Властивості добутків гама-матриць. Побудова біспінорів для частинки із довільними значеннями 3-імпульсу та поляризації. Співвідношення повноти та ортогональності для біспінорів. Проекційні оператори для діраківських полів. Хвильові пакети. Поняття про діраківський вакуум. Позитрони. Операції зарядового спряження та часової інверсії. Комбінована інверсія.

Тема 3. Метод функції Гріна

Поняття про функцію Гріна (ФГ) диференційного рівняння. Рівняння для ФГ. Побудова ФГ для рівняння Шредінгера в рамках теорії збурень. Матриця розсіяння. Інтегральне подавання ступеневої тета-функції. Побудова ФГ для рівняння Дірака. Принцип причинності Штюкельбергера-Фейнмана. ФГ електронно-позитронного поля в імпульсному подаванні. Матриця розсіяння у КТП.

Розділ 2. Основні процеси КТП

Тема 4. Процеси КТП у деревному наближенні

Формалізм спіральних амплітуд. Процеси розсіяння та анігіляції електронів і мюонів. Інваріантні змінні. Електронний та мюонний тензори. Метод інваріантного інтегрування. Процеси електрон-електронного та електрон-позитронного розсіяння. Комптонівське розсіяння та процеси, пов'язані з ним крос-симетрією. Випромінювання м'яких фотонів. Інфрачервона розбіжність.

Тема 5. Радіаційні поправки

Особливості діаграм Фейнмана із замкнутими петлями. Розрахунок інтегралів по 4-вимірному об'єму. Поляризація вакууму. Ультрафіолетова розбіжність. Загальна теорія перенормування. Біжна константа зв'язку. Власна енергія, масовий оператор. Вершинна функція. Тотожність Уорда. Перенормування маси частинок. Скорочення інфрачервоної розбіжності. Скорочення ультра-фіолетових розбіжностей у загальній КТП зі спонтанним порушенням симетрії.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів 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 частинок зі спином 0 та $\frac{1}{2}$. Метод функцій Гріна.						
Тема 1. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином 0.	22	14				8
Тема 2. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином $\frac{1}{2}$.	92	56				36
Тема 3. Метод функції Гріна.	66	42				24
Разом за розділом 1	180	112				68
Розділ 2. Основні процеси квантової теорії поля						
Тема 4. Процеси КТП у деревному наближенні.	75	28				47
Тема 5. Радіаційні поправки.	75	28				47
Разом за розділом 2	150	56				94
Усього годин	330	168				162

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
2		
...		

Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
2		
...		

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	Форма контролю
Розділ 1. Релятивістська квантова механіка частинок зі спином 0 та $\frac{1}{2}$. Метод функцій Гріна.			
1	Релятивістська квантова механіка частинок зі спином 0.	8	Перевірка домашнього завдання, опитування
2	Релятивістська квантова механіка частинок зі спином $\frac{1}{2}$.	26	
3	Метод функції Гріна.	22	
	Разом за Розділом 1	56	
Розділ 2. Основні процеси квантової електродинаміки.			
4	Процеси КТП у деревному наближенні.	57	Перевірка домашнього завдання, опитування
5	Радіаційні поправки.	57	
	Разом за Розділом 2	114	
	Разом	170	

6. Індивідуальні завдання

Не передбачені.

7. Методи навчання

При викладанні КТП використовують словесні, наочні, практичні та дискусійні методи навчання. На лекціях використовують найчастіше словесний, наочний та дискусійний методи.

8. Методи контролю

Поточний контроль складається з:

- 1) активної участі в аудиторних заняттях – до 1 балу за заняття (ваговий бал – 10);
- 2) виконання домашніх завдань із розв'язування задач (ваговий бал – 15);
- 3) контрольні роботи (ваговий бал – 30);
- 4) Експрес-контроль на практичних заняттях (ваговий бал – 5)

Підсумковий контроль проводиться в формі екзамену (ваговий бал – 40). До складання іспиту допускають студентів, які набрали протягом семестру не менше 10 балів.

Екзаменаційне завдання: білет містить одне теоретичне (ваговий бал – 10) питання та дві задачі (ваговий бал – 20).

Число балів, які студент отримав на екзамені, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з екзаменаційного білету плюс бали за додаткові запитання (ваговий бал – 10).

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою що наведена нижче.

Для допуску до складання підсумкового контролю (екзамену) здобувач вищої освіти повинен набрати не менше 15 балів з навчальної дисципліни під час поточного контролю, самостійної роботи, індивідуального завдання.

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. Запитання до екзамену

1. Рівняння Клейна-Гордона. Розв'язки РКГ для вільної частинки. Лагранжіан і тензор енергії-імпульсу зарядженого скалярного поля. РКГ у формі рівняння Шредингера.
2. Взаємодія зарядженої скалярної частинки із електромагнітним полем. Калібрувальна інваріантність. Ефект Ааронова-Бома.
3. Спонтанне порушення симетрії і ефект Хігсу.
4. Рівняння Дірака (РД). Матриці Дірака та їх властивості. Рівняння неперервності. Нерелятивістська границя РД для електрону у слабкому електромагнітному полі.
5. Коваріантна форма РД. Операція просторової інверсії. Властивості добутоків гамма-матриць.
6. Хвильові пакети. Поняття про діраківський вакуум. Позитрони.
7. Операції зарядового спряження та часової інверсії. Комбінована інверсія.
8. Матриця розсіяння. Інтегральне подавання ступеневої тета-функції. Побудова функції Гріна (ФГ) для рівняння Дірака.
9. Принцип причинності Штюкельбергера-Фейнмана. ФГ електронно-позитронного поля в імпульсному подаванні.
10. Матриця розсіяння у КТП.
11. Формалізм спіральних амплітуд.
12. Процеси розсіяння та анігіляції електронів і мюонів. Інваріантні змінні. Електронний та мюонний тензори.
13. Випромінювання м'яких фотонів. Інфрачервона розбіжність.
14. Особливості діаграм Фейнмана із замкнутими петлями.
15. Розрахунок інтегралів по 4-вимірному об'єму. Поляризація вакууму.
16. Ультрафіолетова розбіжність. Загальна теорія перенормування. Біжна константа зв'язку.
17. Власна енергія, масовий оператор. Вершинна функція.
18. Тотожність Уорда. Перенормування маси частинок.
19. Скорочення інфрачервоної розбіжності.
20. Скорочення ультра-фіолетових розбіжностей у загальній КТП зі спонтанним порушенням симетрії.

10. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

- 1 Ryder L.H. Quantum Field Theory – Cambridge Uni Press, 1996. – 508 p.
- 2 Greiner W., Reinhardt J. Quantum Electrodynamics. – Berlin: Springer-Verlag, 2009
- 3 Greiner W. Relativistic Quantum Mechanics: Wave Equations. – Berlin: Springer-Verlag, 2000.

Допоміжна література

- 1 Kumericki K. Feynman Diagrams for Beginners, arXiv:1602.04182:
<https://arxiv.org/abs/1602.04182>
- 2 Tong D. Lectures on Quantum Field Theory: <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>

Інформаційні ресурси

1. Веб-ресурси кафедри, мережа інтернет.
2. Бібліотека ХНУ імені В.Н. Каразіна.