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 П.Е.
(вказати І.П.Б. керівника)
"28" серпня 2023 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
Фізика високих енергій та Стандартна Модель
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	другий (магістерський)
галузь знань	10 «Природничі науки»
спеціальність	105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
освітня програма	«Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми (освітньо-наукова програма)
спеціалізація	
вид 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)
Нурмагамбетов Олексій Юрійович 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

_____ Микола ШУЛЬГА
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Гарант освітньої (професійної) програми

_____ Ігор ГІРКА
(підпис) (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»

_____ Микола ЮНАКОВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програму навчальної дисципліни "Фізика високих енергій та Стандартна Модель" 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

Полягає у оволодінні базовими та розширеними поняттями з таких фізичних теорій та математичних концептів, як квантова теорія розсіяння, Дуальні Моделі у фізиці гадронів, принципи симетрії та їх застосування в фізиці високих енергій, моделі об'єднання фізичних взаємодій, модель Вайнберга-Салама, механізми спонтаного порушення симетрії та їх застосування в Стандартної Моделі. Сучасна фізична освіта є неповною без оволодіння цим набором знань.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями є глибоке вивчення студентами апарату сучасной квантової механіки, методів прямої та зворотної задач розсіяння, застосування методів функцій комплесної змінної у задачах фізики елементарних частинок, оволодіння апаратом функцій Гріна та діаграматикой Фейнмана, методами побудови лагранжіанів квантових полів, аналізу симетрийних властивостей моделей та застосуванням цього кола знаннь та вміннь для максимально повного аналізу реакцій за участю частинок Стандартної Моделі.

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 проектів; (**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 міждисциплинарних проектах; (**СК-8**)

- здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних задач і моделювання фізичних систем; (С**К-10**)
- розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних досліджень. (С**К-11)**

Отже, головні завдання курсу полягають у оволодінні студентами теоретичної бази знань для її практичного застосування у сучасній ядерній фізиці, фізиці елементарних частинок та квантової теорії поля. 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
7

1.4 Загальна кількість годин
210

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	
48 год.	48 год.
Практичні, семінарські заняття	
-	-
Лабораторні заняття	
-	-
Самостійна робота	
42 год.	72 год.
Індивідуальні завдання	
1 год.	2 год.

1.6. Заплановані результати навчання

полягають у тому, що внаслідок опанування курсу "Фізика високих енергій та Стандартна Модель" студенти мають засвоїти загальні положення фізичних і математичних основ сучасної квантової теорії розсіяння, релятивістську квантову механіку частинок із спином 0, 1/2, та 1, симетрийні властивості відповідальних лагранжіанів вільних квантових полів та їх взаємодій, метод функції Гріна для опису амплітуд процесів фізики високих енергій, діаграмну техніку (правила Фейнмана) написання матричних елементів реакцій за участю частинок Стандартної Моделі, правила розрахунку перерізів та поляризаційних спостережних, теорію перенормування, 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**)
- відшуковувати 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

Розділ 1. Одновимірна теорія розсіяння.

Тема 1. Загальна постановка задачи теорії розсіяння в 1D. Коефіцієнти проходження та відбиття. Метод матриці переходу. Граничні умови на хвильову функцію: стани розсіяння. Граничні умови на хвильову функцію: зв'язані стани. Матриця переходу для прямокутного бар'єра (прямокутної ями). Матриця переходу для δ-потенціалу. Загальні властивості матриці переходу та S-матриці.

Тема 2. Рівняння Ліппманна-Швінгера в 1D теорії розсіяння. Функції Гріна, випереджальна і запізнювальна. Інтегральне та операторне подання Рівняння Ліппманна-Швінгера. Функції Йоста. Функції Гріна, пов'язані з функціями Йоста. Аналітичні властивості функцій Йоста. Теорема Левінсона в 1D. Оптична теорема.

Розділ 2. Теорія розсіювання у сферично-симетричному потенціалі.

Тема 3. Загальна постановка задачи стаціонарної теорії розсіяння в 3D. Особливості розсіювання на сферично-симетричному потенціалі. Амплитуда розсіяння та переріз. Оптична теорема для стаціонарних станів. Рівняння Ліппманна-Швінгера, випереджальна і запізнювальна функції Гріна, функція Гріна зв'язаного стана. Борнове наближення, її основні і додаткові властивости.

Тема 4. Метод парціальних хвіль. Сферичні гармоніки та іх загальні властивости. Формула Релея. Сферичні функції Беселя та Неймана, їх асимптотика в нулі та на нескінченності. Розкладання хвільової функції по парціальним хвилям, амплітуда розсіяння. Фазовий зсув, резонансне розсіювання та оптична теорема у сферично-симетричному потенціалі. Парціальний переріз, унітарне коло та унітарна межа. Фазовий зсув для локалізованого потенціалу та логарифмічні похідни.

Тема 5. Приклади обчислень фазового зсуву, наближення низьких енергій. Фазовий зсув для потенціалу притягання. Ефект Рамзауера-Таунсенда. Фазовий зсув для потенціалу відштовхування. Розсіювання на непроникній кулі, внесок вищих парціальних хвіль. Тіньове розсіювання. Фазовий зсув у ВКБ наближенні, трюк Лангера. Довжина розсіювання.

Тема 6. Зв'язані стани як полюси амплитуд розсіяння. Квазідискретні рівні та резонансні стани. Формула Брейта-Вігнера, умови її застосування. Основні характеристики резонансів і фазовий аналіз. Діаграми Арганда. Теорема Крилова-Фока.

Розділ 3. Нестаціонарна теорія розсіювання.

Тема 7. Різні подання еволюції хвильової функції у квантовій механіці: картини Шредінгера, Гайзенберга, Дірака. Оператор еволюції. Т-добуток та Т-експонента. Адіабатичне включення взаємодії. Корелятори в картині Дірака. Формалізм Швінгера-Келдиша. Загальний вираз n-точкових кореляторів у поданні взаємодії.

Тема 8. Рівняння Ліппманна-Швінгера у нестаціонарній теорії розсіювання. Матриця переходу, S-матриця, загальна Оптична теорема. Загальні властивості S-матриці у динаміці розсіювання. Оператори Меллера.

Розділ 4. Розсіювання в квантовій теорії поля.

Тема 9. S-матриця в КТП, амплітуди розсіяння. Змінні Мандельстама, канали реакції. Аналітичні властивості амплітуд, кросінг. Теорія полюсів Реддже. Умови запровадження комплексного кутового моменту. Нерівність Фруассара, межа Фруассара. Комплексні кутові моменти, аналітичне продовження кутових моментів, теорема Карлссона, сігнатура. Полюси Реддже і амплітуди в t-каналі реакції. Перетворення Ватсона. Апмлітуда реакції в s-каналі. Обмін редджеоном.

Тема 10. Модель зашнуровки і дуальність у сильних взаємодіях. Глобальна дуальність. Локальна дуальність. Амплітуда Венеціано. Дуальні моделі сильних взаємодій, діаграми гумових стрічок, теорія струн.

Розділ 5. Зворотна теорія розсіяння.

Тема 11. Загальна постановка прямої стаціонарної задачи розсіювання в 1D, ліва та права задачи. Коефіцієнти проходження та відбиття у лівої задачи розсіювання, зв'язані стани. Трикутне подання функції Йоста, ядро (функція Гріна). Розв'язування рівняння Шредінгера у вигляді задачи Гурса. Характерістика. Рівняння Гельфанда-Левітана-Марченко (ГЛМ). Приклад розв'язку рівняння ГЛМ.

Розділ 6. Поля Стандартної Моделі.

Тема 12. Класифікація частинок/полів Стандартної Моделі (СМ). Загальна структура Лагранжиана СМ: кінетичні доданки, доданки з масою для масивних частинок, доданки з взаємодією частинок. Структура кожної з основних частин лагранжіану. Дія для скалярного поля. Рівняння Клейна-Гордона-Фока. Проблема негативних енергій, пропозиція Дірака до вирішення проблеми. Загальна структура рівняння Дірака, матриці Дірака, оператор спіна. Алгебра Кліффорда. Загальна структура дії частинки спіна 1/2, струми, що зберігаються. ЕМ поле, рівняння Максвела, дія класичної електродинаміки. Загальне формулювання калібрувальних теорій. Групи та алгебри Лі. Тензор напруженості калібрувального поля. Структура дії поля зі спіном 1. Масивне поле спіна 1, дія Штюкельберга.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів	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. Одновимірна теорія розсіяння												
Разом за розділом 1	24	6	6			14						
Розділ 2. Теорія розсіювання у сферично-симетричному потенціалі												
Разом за розділом 2	20	4	4		•	12						

Розділ 3. Нестаціонарна теорія розсіювання												
Разом за розділом 3	28	6	6			16						
Розділ 4. Розсіювання в квантовій теорії поля												
Разом за розділом 4	28	6	6		•	16						
Розділ 5. Зворотна теорія розсіяння												
Разом за розділом 5	28	6	6			16						
Розділ 6. Поля Стандартної Моделі												
Разом за розділом 6	20	4	4		•	12						
Усього годин	150	32	32			86						

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 робота

№ з/п	**Назва теми**	**Кількість годин**	**Форма контролю**
Розділ 1-5. Пряма та зворотна теорія розсіяння у фізиці високих енергій.			
1	Функції Гріна в 1D та 3D теорії розсіяння	2	Перевірка домашнього завдання, опитування
2	Розсіювання в квантовій теорії поля	36	
3	Нестаціонарна теорія розсіювання	4	
	Разом за Розділом 1-5	**42**	
Розділ 2. Поля Стандартної Моделі.			
4	Загальна структура рівняння Дірака	24	Перевірка домашнього завдання, опитування
5	Загальна структура повного Лагранжиана СМ	48	
	Разом за Розділом 6	**72**	
	Разом	**114**	

6. Індивідуальні завдання

Не передбачені.

7. Методи навчання

Лекційні заняття проводяться методом лекції та розповіді–бесіди. Задаються домашні завдання з розв'язування задач.

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. Метод матриці переходу в 1D теорії розсіяння.
2. Граничні умови на хвильову функцію: стани розсіяння.
3. Граничні умови на хвильову функцію: зв'язані стани.
4. Матриця переходу для прямокутного бар'єра (прямокутної ями).
5. Матриця переходу для δ-потенціалу.
6. Загальні властивості матриці переходу та S-матриці.

7. Рівняння Ліппманна-Швінгера в 1D теорії розсіяння. Інтегральне та операторне подання Рівняння Ліппманна-Швінгера.
8. Функції Гріна, випереджальна і запізнювальна.
9. Функції Йоста. Функції Гріна, пов'язані з функціями Йоста.
10. Аналітичні властивості функцій Йоста. Теорема Левінсона в 1D.
11. Оптична теорема.
12. Загальна постановка задачи стаціонарної теорії розсіяння в 3D. Особливості розсіювання на сферично-симетричному потенціалі. Амплитуда розсіяння та переріз.
13. Оптична теорема для стаціонарних станів.
14. Рівняння Ліппманна-Швінгера, випереджальна і запізнювальна функції Гріна, функція Гріна зв'язаного стана.
15. Метод парціальних хвіль. Парціальний переріз, унітарне коло та унітарна межа. Фазовий зсув для локалізованого потенціалу та логарифмічні похідни.
16. Приклади обчислень фазового зсуву, наближення низьких енергій. Фазовий зсув для потенціалу притягання. Ефект Рамзауера-Таунсенда.
17. Фазовий зсув для потенціалу відштовхування. Розсіювання на непроникній кулі, внесок вищих парціальних хвіль. Тіньове розсіювання.
18. Фазовий зсув у ВКБ наближенні, трюк Лангера. Довжина розсіювання.
19. Зв'язані стани як полюси амплитуд розсіяння. Квазідискретні рівні та резонансні стани. Формула Брейта-Вігнера, умови її застосування.
20. Основні характеристики резонансів і фазовий аналіз. Діаграми Арганда. Теорема Крилова-Фока.
21. Різні подання еволюції хвильової функції у квантовій механіці: картини Шредінгера, Гайзенберга, Дірака. Оператор еволюції. Т-добуток та Т-експонента.
22. Адіабатичне включення взаємодії. Корелятори в картині Дірака. Формалізм Швінгера-Келдиша. Загальний вираз n-точкових кореляторів у поданні взаємодії.
23. Рівняння Ліппманна-Швінгера у нестаціонарній теорії розсіювання. Матриця переходу, S-матриця, загальна Оптична теорема.
24. Загальні властивості S-матриці у динаміці розсіювання. Оператори Меллера.
25. S-матриця в КТП, амплітуди розсіяння. Змінні Мандельстама, канали реакції. Аналітичні властивості амплітуд, кросінг.
26. Теорія полюсів Реддже. Умови запровадження комплексного кутового моменту. Нерівність Фруассара, межа Фруассара.
27. Комплексні кутові моменти, аналітичне продовження кутових моментів, теорема Карлссона, сігнатура.

28. Полюси Реддже і амплітуди в t-каналі реакції. Перетворення Ватсона. Апмлітуда реакції в s-каналі. Обмін редджеоном.
29. Модель зашнуровки і дуальність у сильних взаємодіях. Глобальна дуальність. Локальна дуальність.
30. Амплітуда Венеціано. Дуальні моделі сильних взаємодій, діаграми гумових стрічок, теорія струн.

10. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

1. Ситенко О. Г. «Теорія розсіяння». К. : Либідь, 1993. – 333 с.
2. Бережной Ю.А. «Квантова теорія розсіяння". – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2012. – 205 с.
3. Taylor J.R. Scattering Theory: The Quantum Theory of Nonrelativistic Collisions. Dover Pub., 2006. – 512 p.
4. Peskin M.E. Concepts of elementary particle physics. Oxford Uni Press, 2019. – 400 p.

Інформаційні ресурси

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