

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Заступник директора з наукової роботи  
  
В. В. Давидовський  
« 5 » 2023 р.



**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ**  
***ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ФІЗИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК***

**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** доктор філософії

**Галузь знань:** 10 - Природничі науки

**Спеціальність :** 104 – Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

**Статус курсу:** фаховий (вибірковий)

**Київ 2023**

**Теоретичні методи фізики елементарних частинок: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2023. - 26 с.**

**Укладач:** Улещенко В.В., кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Відділу фізики важких іонів

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень  
НАН України

протокол № 6 від “ 5 ” липня 2023 р.

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ**  
***ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ФІЗИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК***

**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** *доктор філософії*

**Галузь знань:** *10 - Природничі науки*

**Спеціальність :** *104 – Фізика та астрономія*

**Освітня програма:** *Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу*

**Статус курсу:** *основний фаховий (вибірковий)*

**Київ 2023**

## I. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Програма з курсу «Теоретичні методи фізики елементарних частинок» відповідає навчальному плану підготовки аспірантів за спеціальністю *104 – Фізика та астрономія* (галузь знань: *10 - Природничі науки*), що здобувають освітньо-кваліфікаційний рівень доктора філософії на відповідній освітній програмі ІЯД НАН України.

Курс «Теоретичні методи фізики елементарних частинок» є необхідною складовою складовою вибіркових навчальних дисциплін циклу професійної та практичної підготовки докторів філософії за спеціальністю *104 – Фізика та астрономія*, напрям підготовки: Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу. Він дає можливість ознайомити аспірантів з понятійним апаратом фізики елементарних частинок, закономірностями процесів, що мають місце за участі елементарних частинок, теоретичними методами опису таких явищ та розрахунку вимірюваних величин.

Курс «Теоретичні методи фізики елементарних частинок» викладається на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі та розрахований на 12 навчальних тижнів (по 4 ауд. год. щотижня; перший тиждень занять – лекційний). Вивчення курсу передбачає аудиторну (лекції – 32 год.; практичні заняття – 16 год.; консультація – 2 год.) і самостійну роботу (70 год.). Загальна кількість годин, відведених на опанування дисципліни – 120 (4 кредити ЄКТС).

**Мета дисципліни** – ознайомлення аспірантів з основними положеннями Стандартної Моделі, методами теоретичного опису явищ мікросвіту, та засвоєння методів розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують елементарні частинки і процеси за їх участі.

**Завдання** – сформувані у аспірантів базові знання про властивості елементарних частинок, про фундаментальні взаємодії, про процеси, що мають місце за участі елементарних частинок, сформувані вміння теоретичного опису систем елементарних частинок та їх взаємодії, розрахунку вимірюваних величин, що їх характеризують.

### **Структура курсу**

У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:

**Знати:** Основні поняття фізики елементарних частинок, типи фундаментальних взаємодій, типи елементарних частинок, їх характеристики. Методи теоретичного опису властивостей елементарних частинок та процесів їх взаємодії. Методи розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують квантові стани та процеси фізики високих енергій, в тому числі з використанням діаграмної техніки Фейнмана. Квантово-польові основи калібровочних теорій фундаментальних взаємодій Стандартної Моделі.

**Вміти:** Описувати можливі процеси за участі елементарних частинок в різних умовах. Визначати можливі і заборонені процеси. Розраховувати

основні характеристики квантовомеханічних станів фізичних систем мікросвіту. Розраховувати характеристики процесів взаємодії елементарних частинок. Використовувати в розрахунках закони збереження та діаграмну техніку Фейнмана. Орієнтуватися у доборі спеціальної сучасної наукової літератури та самостійно працювати з нею.

**Місце дисципліни** (в структурно-логічній схемі підготовки фахівців відповідного напрямку). Вибіркова навчальна дисципліна «**Теоретичні методи фізики елементарних частинок**» є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «доктор філософії». Система знань, отримана при вивченні даного курсу, є необхідною для вільного ознайомлення з науковою літературою та при виконанні відповідних кваліфікаційних робіт.

**Зв'язок з іншими дисциплінами.** При вивченні дисципліни «**Теоретичні методи фізики елементарних частинок**» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсу “Сучасні проблеми фізики атомного ядра і ядерних реакцій”, “Експериментальні методи ядерної фізики”, а також готується теоретична база для подальшого вивчення дисциплін “Фізика і техніка високих енергій”, “Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів”, “Фізика елементарних частинок без прискорювачів”, “Квантова хромодинаміка та її застосування”.

## II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		всього	лекцій	Семінарських занять	Самостійна та індивідуальна робота	Консультації
<b>Змістовний модуль 1. Вільні елементарні частинки та їх характеристики</b>						
1	<b>Тема 1.</b> Вступ	6	2	-	4	-
2	<b>Тема 2.</b> Базові поняття і методи.	28	6	6	16	-
3	<b>Тема 3.</b> Спектроскопія адронів. Кварки	24	8	2	14	-
4	<b>Всього по розділу 1</b>	58	16	8	34	-
<b>Змістовний модуль 2. Взаємодія елементарних частинок. Діаграми Фейнмана</b>						
5	<b>Тема 4.</b> Техніка діаграм Фейнмана.	20	6	4	10	-
6	<b>Тема 5.</b> Основи формальної квантової теорії поля	6	2	-	4	-
7	<b>Тема 6.</b> Кварк-партонна модель адронів.	18	4	4	10	-
8	<b>Тема 7.</b> Єдина електрослабка взаємодія. Бозон Хігса.	10	2	-	8	-
9	<b>Тема 8.</b> Сучасна проблематика і напрямки розвитку фізики частинок. Підходи до розширення Стандартної Моделі.	6	2	-	4	-
	<b>Всього по розділу 2</b>	60	16	8	36	-
	<b>Іспит</b>					2
10	<b>Всього</b>	120	32	16	70	2

# ЗМІСТ КУРСУ

## Змістовний модуль 1.

### “Вільні елементарні частинки та їх характеристики”

#### **ТЕМА 1. Вступ до предмету.**

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу.

Квантовість та релятивізм як визначальні характеристики дисципліни.

Фундаментальні взаємодії та закони збереження.

Поняття про Стандартну модель елементарних частинок, її сучасний стан.

Взаємопов'язаність, нерозривність розвитку теорії та експерименту.

#### **ТЕМА 2. Базові поняття і методи.**

Характерний масштаб величин, що вимірюються у фізиці частинок.

Поняття елементарної частинки. Характеристики частинок. Адитивні та мультиплікативні квантові числа. Схеми розпаду. Античастинки. Анігіляція.

Істинно нейтральні частинки. Класифікація частинок.

Спеціальна теорія відносності. Простір-час. Вектори і скаляри в просторі Мінковського. Змінні Мандельштама. Кросинг.

Релятивістські рівняння руху вільної частинки. Проблеми розв'язків негативної енергії. Передбачення та відкриття позитрона.

Коваріантна форма рівнянь.

Просторова парність хвильової функції та квантового стану. Вектори і псевдовектори. Скаляри і псевдоскаляри. Парність хвильової функції системи двох і більше частинок. Зарядова парність.

Спіновий стан частинки. Кутовий момент та правила його складання. Звідні та незвідні представлення в теорія груп. Матриці Паулі.

#### **ТЕМА 3. Спектроскопія адронів. Кварки.**

Ізоспін. Ізоспінові мультиплети.

Дивність.  $V^0$ - частинки. К-мезони. Гіперони і гіперядра. Універсальність слабкої взаємодії і  $\beta$ -розпад. Незбереження просторової парності у процесах слабкої взаємодії. CP-парність.

Осциляції каонів. CPT-теорема.

Різні підходи до класифікації адронів. Ідея аналітичної теорії матриці розсіяння. «Ядерна демократія». Бутстрап. SU(3)-класифікація. Кварки.

Розширення моделі з додаванням нових кварків.

Кварконії. Прихований аромат.  $J/\psi$ ,  $\Upsilon$ -частинки.

$\Delta^{++}$ -проблема і колір. Конфайнмент.

Колір – істинний заряд сильної взаємодії. Кольорова SU(3)-група. Кольорові SU(3)-множники.

## Змістовний модуль 2. “Взаємодія елементарних частинок. Діаграми Фейнмана”

### **ТЕМА 4. Техніка діаграм Фейнмана.**

Процес розсіяння на нерелятивістському потенціалі у наближенні теорії збурень. Зміни для релятивістського квантово-польового підходу з народженням і знищенням частинок. Взаємодія як обмін частинками.

Поняття віртуальних частинок. Оцінки ефекту за допомогою принципу невизначеності.

Розсіяння двох точкових заряджених безспінових частинок у діаграмному підході у найнижчому порядку теорії збурень.

Поперечний переріз та фазовий простір. Розрахунок періоду напіврозпаду частинки.

Кросинг амплітуди. Взаємодія ідентичних частинок. Взаємодія частинок з напівцілим спіном.

Вищі порядки теорії збурень. Розбіжності та поняття про перенормування.

Загальні правила діаграмної техніки Фейнмана.

### **ТЕМА 5. Основи формальної квантової теорії поля.**

Вторинне квантування. Принцип найменшої дії. Калібровочна інваріантність квантової електродинаміки. Загальна схема побудови квантової теорії поля.

Квантова хромодинаміка (КХД) як квантова теорія поля з калібровочною групою  $SU(3)$ . Змінна константа зв'язку і застосовність теорії збурень в КХД. Асимптотична свобода.

### **ТЕМА 6. Кварк-партонна модель адронів.**

Дослідження розміру і структури протона за допомогою розсіяння електронів. Електромагнітні форм-фактори. Структурні функції.

Глибоконепружне лептон-нуклонне розсіяння. Повний переріз ГНР як переріз взаємодії віртуального фотона з нуклоном. Партони і скейлінг Б'юркена. Функції розподілу партонів.

Струмені адронів. Функції фрагментації кварків та глюонів.

Лептон-кваркові перетворення. Народження адронів при анігіляції лептонів.

Процеси Дрелла-Яна.

Порушення скейлінгу як наслідок сильної взаємодії кварків у адроні.

Рівняння Альтареллі-Парізі. Кварки моря.

Межі застосування пертурбативної КХД. Модель векторної домінантності.

Фотонародження. Дифракція і померон.

### **ТЕМА 7. Єдина електрослабка взаємодія. Бозон Хігса.**

Теорія Фермі для слабкої взаємодії.  $\beta$ -розпад. V-A структура слабких сил. Векторні бозони.

Змішування станів у слабкій взаємодії. Кут Кабібо та матриця СКМ.

CP-інваріантність та її порушення. Баріонна асиметрія Всесвіту. Унітарний трикутник та B-фізика.



Логіка єдиної теорії електрослабкої взаємодії Вайнберга-Салама. Електрослабка інтерференція. Проблема мас калібровочних бозонів. Спонтанне порушення симетрії та механізм Хігса. Ідея великого об'єднання і його наслідки. Розпад протона.

## **ТЕМА 9. Сучасна проблематика і напрямки розвитку фізики частинок. Підходи до розширення Стандартної Моделі.**

Основна проблематика нейтринної фізики. Осциляції нейтрино. Маса нейтрино та способи її визначення. Частинки Дірака і Майорано.

Екзотичні стани речовини. Глюбол. Пентакварки. Кварк-глюонна плазма. Речовина нейтронних зірок. Зв'язок фізики частинок з астрофізикою і космологією. Великий вибух і стадія гарячого Всесвіту. Баріонна асиметрія Всесвіту. Унітарний трикутник. В-фізика.

Проблеми темної маси і темної енергії. WIMP.

Ідеї розширення СМ. Пошуки нової фізики.

Нові експериментальні установки. Підвищення енергії взаємодії. Взаємодія важких іонів. Чистий лептонний початковий стан.

## **ЛІТЕРАТУРА**

### **Основна:**

1. F. Halzen, A.D. Martin "Quarks and leptons: an introductory course in modern particle physics", John Wiley & Sons, 1984.
2. Л. Валатэн "Субатомная фізика: ядра и частицы", Пер. с фр. Н.Н. Колесникова, Москва : Мир, 1986.
3. К.Н.Мухин "Экспериментальная ядерная физика. Том II. Физика элементарных частиц", Москва : Атомиздат, 1974.
4. D. Griffiths, "Introduction to elementary particles", John Wiley & Sons, 1987.
5. Окунь Л.Б., "Лептоны и кварки", Москва : Наука, 1990.
6. Р. Фейнман, "Квантовая электродинамика"; пер. с англ. А. А. Рухадзе. Москва : Мир, 1964.
7. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц "Квантовая механика ", Москва : Наука, 1989.
8. Е.Бюклинг, К. Каянти "Кинематика элементарных частиц", пер. с англ. под ред. Г.И. Копылова. Москва : Мир, 1975.
9. D. Ashok, T. Ferbel "Introduction to nuclear and particle physics", New York : J. Wiley, 1994.

### **Додаткова:**

10. Feynman, R.Ph "QED: the strange theory of light and matter", Princeton University Press, 1985.
11. Т. Эрикссон, В. Вайзе "Пионы и ядра", Москва : Наука, 1991.

# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

## ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

#### *Теоретичні методи фізики елементарних частинок*

Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітньо- кваліфікаційний рівень	<i>Організаційно-методична характеристика навчальної дисципліни</i>	
	Академічна характеристика	Структура
10 – Природничі науки  104 – Фізика та астрономія  Освітня програма – <i>Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу</i>  Доктор філософії	Рік навчання: 2 або 3 Семестр: 1 або 2 * Кількість годин на тиждень: 4 Статус курсу: <i>фаховий (вибірковий)</i> Кількість ECTS кредитів: 4  * дисципліна може викладатися на 2 або 3 році навчання в осінньо-зимовому або весняно- літньому семестрі	Кількість годин: Загальна: 120 Лекції: 32 Практичні заняття: 16 Консультація 2 Самостійна робота: 60  Вид підсумкового контролю: іспит

Робоча програма складена для докторів філософії – Освітня програма: *Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.*

**Укладач:** Улещенко В.В., кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Відділу фізики важких іонів

### III. ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

#### МЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛЕКЦІЙ

Проведення лекційних занять націлено на донесення загальних знань та побудову теоретичних методів по дисципліні, на сприяння розвитку у аспірантів розумової діяльності і розширення світогляду.

#### Змістовний модуль 1.

#### *ВІЛЬНІ ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ*

##### ТЕМА 1. Вступ до предмету.

##### Заняття 1.

План.

1. Мета курсу.
2. Опис дисципліни. Квантовість та релятивізм як визначальні характеристики дисципліни. Фундаментальні взаємодії, закони збереження та зв'язок з симетріями.
2. Поняття про Стандартну модель елементарних частинок
3. Взаємопов'язаність, нерозривність розвитку теорії та експерименту.

##### *Література*

[1, 2, 10, 3, 4, 11]

##### ТЕМА 2. Базові поняття і методи

##### Заняття 2.

План.

1. Поняття елементарної частинки. Характеристики частинок.
2. Античастинки. Анігіляція. Істинно нейтральні частинки.
3. Резонанси.
4. Спеціальна теорія відносності. Вектори і скаляри в просторі Мінковського.
5. Змінні Мандельштама.

##### *Література*

[2, 3, 4, 11]

##### Заняття 3.

План.

1. Релятивістські рівняння руху вільної частинки. Рівняння Кляна-Гордона, Дірака.
2. Проблеми розв'язків негативної енергії. Передбачення та відкриття позитрона.
3. Коваріантна форма рівнянь.

##### *Література*

[1, 2, 4, 8]

2. [4, с. 73-86]

#### **Заняття 4.**

План.

1. Просторова парність квантового стану і хвильової функції.
2. Вектори і псевдовектори. Скаляри і псевдоскаляри.
3. Парність хвильової функції системи двох і більше частинок.
4. Статистика Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака.
5. Поняття зарядової парності.

*Література*

[2, 3, 5, 7]

### **ТЕМА 3. Спектроскопія адронів. Кварки**

#### **Заняття 5.**

План.

1. Ізоспін.
2. Дивність.
3.  $V^0$ - частинки.  $K$ -мезони та гіперони.
4. Універсальність слабкої взаємодії і  $\beta$ -розпад. Незбереження просторової парності у процесах слабкої взаємодії.
5. CP-парність.

*Література*

[2, 3, 11]

#### **Заняття 6.**

План.

1.  $\Theta^0$ - $\tau^0$  – проблема.  $K_1$  та  $K_2$  мезони.  $K^0$  та анти  $K^0$ .
2. Осциляції каонів.
3. CP-парність.  $K_L$  та  $K_S$  мезони. CPT-теорема.

*Література*

[2, 3]

#### **Заняття 7.**

План.

1. Різні підходи до класифікації адронів.
2. Перші групові моделі. Мультиплети..
3. SU(3)-класифікація. Кварки.
4. Розширення моделі з додаванням нових кварків.  
Чарм, Beauty. D-мезони. B-мезони. Кварконії.

*Література*

[1,2, 3, 5]

## **Заняття 8.**

План.

1.  $\Delta^{++}$ -проблема і колір. Конфайнмент.
2. Колір – істинний заряд сильної взаємодії.
3. Кольорова SU(3)-група.

*Література*

[1, 4, 5, 9]

## **Змістовний модуль 2.**

### ***ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК. ДІАГРАМИ ФЕЙНМАНА***

#### **ТЕМА 4. Техніка діаграм Фейнмана**

## **Заняття 9.**

План.

1. Процес розсіяння на нерелятивістському потенціалі у наближенні теорія збурень.
2. Зміни для релятивістського квантово-польового підходу з народженням і знищенням частинок. Взаємодія як обмін частинками. Віртуальні частинки та частинки на масовій поверхні.

*Література*

[1, 7, 10]

## **Заняття 10.**

План.

1. Амплітуда розсіяння двох точкових заряджених безспінових частинок у діаграмному підході у найнижчому порядку теорії збурень.
2. Складові частини амплітуди: пропагатори, струми, вершини.

*Література:*

[1, 10]

## **Заняття 11.**

План.

1. Вищі порядки теорії збурень. Розбіжності та поняття про перенормування.
2. Зміни в амплітуді розсіяння з врахуванням напівцілого спіну частинок.  
Загальні правила діаграмної техніки Фейнмана.

*Література*

[1, 6, 10]

#### **ТЕМА 5. Основи формальної квантової теорії поля.**

## **Заняття 12.**

План.

1. Принцип найменшої дії. Калібровочна інваріантність КЕД.

2. Загальна схема побудови релятивістської квантової теорії поля.
3. Квантова хромодинаміка (КХД) як квантова теорія поля з калібровочною групою  $SU(3)$ .
4. Змінна константа зв'язку і застосовність теорії збурень в КХД.  
Асимптотична свобода.

### *Література*

[1, 4, 6, 10]

## **ТЕМА 6. Кварк-партонна модель адронів**

### **Заняття 13.**

План.

1. Дослідження розміру і структури протона за допомогою розсіяння електронів. Електромагнітні форм-фактори.
2. Глибоконепружне лептон-нуклонне розсіяння. Структурні функції.
3. Партони і скейлінг Б'йоркена. Функції розподілу партонів.
4. Повний переріз ГНР як переріз взаємодії віртуального фотона з нуклоном.

### *Література*

[1, 4, 9]

### **Заняття 14.**

План.

1. Порушення скейлінгу як наслідок сильної взаємодії кварків у адроні.
2. Рівняння Альтареллі-Парізі.
3. Кварки моря.

### *Література*

[1, 4, 9]

## **ТЕМА 7. Єдина електрослабка взаємодія. Бозон Хіггса.**

### **Заняття 15.**

План.

1. Теорія Фермі для слабкої взаємодії. В-розпад. V-A структура слабких сил. Векторні бозони.
2. Логіка єдиної теорії електрослабкої взаємодії Вайнберга-Салама.
3. Проблема мас калібровочних бозонів. Спонтанне порушення симетрії та механізм Хіггса.

### *Література*

[1, 4, 5, 9]

## ТЕМА 9. Сучасна проблематика і напрямки розвитку Стандартної Моделі

### Заняття 16.

План.

1. Основна проблематика нейтринної фізики.
2. Екзотичні стани речовини.
3. Зв'язок фізики частинок з астрофізикою і космологією.
4. Суперсиметрії та інші ідеї розширення СМ.
5. Нові експериментальні установки, що будуються.

*Література*

[4, 9]

## IV. ПЛАН ТА МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

### МЕТА ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практичні заняття є сполучною ланкою між лекційними заняттями та самостійною роботою і мають на меті поглиблене засвоєння теоретичних понять, термінів і моделей з дисципліни та набуття практичних навичок розв'язання задач.

В процесі практичних занять з'ясовується ступінь засвоєння понятійно-термінологічного апарату та основних положень предмету, вміння розкривати конкретну тему, аналізувати і узагальнювати ключові питання курсу, робити числові оцінки, розв'язувати задачі.

Одним з важливих завдань проведення занять є отримання аспірантами навичок публічних виступів і дискусій.

### ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

*Передбачаються такі види аудиторної роботи:*

- розгляд і обговорення теоретичного матеріалу за переліком контрольних питань по відповідних темах лекційних занять та питань для самостійного опрацювання;
- проведення семінарів з публічними виступами та доповідями по рефератах, підготовлених аспірантами самостійно за рекомендованою тематикою;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру.

**Змістовний модуль 1.**  
**ВІЛЬНІ ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**ТЕМА 2. Базові поняття і методи.**

**Практичне заняття 1.**

Контрольні питання:

1. Перетворення Лоренца.
2. Час життя частинки у «власній» системі координат і в лабораторній. Наслідки для експериментального спостереження розпадів.
3. Простір-час спеціальної теорії відносності.
4. Змінні Мандельштама. Фізичні області їх зміни.
5. Кросинг.

*Література:*

[4, 8]

**Практичне заняття 2.**

Контрольні питання:

1. Рівняння неперервності для рівняння Шрödінгера.
2. Густина ймовірності та густина потоку ймовірності для релятивістських рівнянь. Проблеми та їх подолання. Струм різних частинок з різними квантовими числами.
3. Рух назад у часі.

*Література:*

[1, 4, 10]

**Практичне заняття 3.**

Контрольні питання:

1. Кутовий момент в квантовій теорії. Складання кутового моменту.
2. Спін частинки. Матриці Паулі.
3. Проекційний оператор.
4. Повний спін системи.
5. Звідні і незвідні представлення в теорія груп.
6. Симетризація хвильової функції складної системи відповідно до її парності.

*Література:*

[1, 2, 7]

**ТЕМА 3. Спектроскопія адронів. Кварки**

**Практичне заняття 4.**

Контрольні питання:

1. Математичний апарат опису ізоспіну.



2. Приклади проявів закону збереження ізспіну в ядерній фізиці та фізиці частинок.
3. Ізспінові мультиплети в ядерній фізиці та фізиці частинок.

**Література:**

[1, 2, 5]

**Змістовний модуль 2.**

**ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК. ДІАГРАМИ ФЕЙНМАНА**

**ТЕМА 4. Техніка діаграм Фейнмана.**

**Практичне заняття 5.**

Контрольні питання:

1. Вимірювана величина – поперечний переріз.
2. Розрахунок поперечного перерізу розсіяння двох точкових заряджених безспінових частинок у найнижчому порядку теорії збурень.
3. Поняття фазового простору.
4. Розрахунок періоду напіврозпаду частинки.

**Література:**

[1, 4, 10]

**Практичне заняття 6.**

Контрольні питання:

1. Кросинг амплітуди безспінового електромагнітного розсіяння.
2. Врахування тотожності частинок.
3. Розсіяння частинок з напівцілим спіном.

**Література:**

[1, 8, 6]

**ТЕМА 6. Кварк-партонна модель адронів.**

**Практичне заняття 7.**

Контрольні питання:

4. Струмені адронів. Функції фрагментації кварків та глюонів.
5. Лептон-кваркові перетворення. Народження адронів при анігіляції лептонів. Процеси Дрелла-Яна.

**Література:**

[1, 4, 9]

## Практичне заняття 8.

Контрольні питання:

1. Межі застосовності пертурбативної КХД. Змінна константа зв'язку і застосовність теорії збурень в КХД.
2. Модель векторної домінантності. Вищі твісти.

*Література:*

[1, 9, 10]

## V. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

### МЕТА І ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Головна мета проведення самостійної роботи полягає у необхідності більш широкого огляду тематики курсу з використанням матеріалів підручників, періодичних видань, наукових праць, монографій з окремих питань дисципліни.

Важливою складовою самостійної роботи студентів є виконання індивідуальних робіт.

Виконання індивідуальних робіт має на меті:

- закріплення знань теоретичного курсу;
- набуття навичок опрацювання наукової літератури (монографій, наукових статей);
- напрацювання вмінь та навичок розв'язування фізичних задач;
- навчання ефективному використанню фізико-математичних довідників, енциклопедій (включно з on-line інформацією) і т. ін.

### ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

№ теми	Завдання	Література	Форма контролю
1	Взаємопов'язаність, нерозривність розвитку теорії та експерименту. Історія відкриття позитрона, нейтрона, мюона, піона, нейтрино та ін. Теоретичні передбачення та експериментальні спостереження. Нові експериментальні техніки пов'язані з певними відкриттями.	2, 3, 10	Опитування, виступи в аудиторії.

2	<p>Характерний масштаб величин, що вимірюються у фізиці частинок.</p> <p>Натуральна система одиниць у фізиці частинок.</p> <p>Історія появи поділу на лептони, адрони, баріони, мезони.</p> <p>Адитивні та мультиплікативні квантові числа.</p> <p>Звідні і незвідні представлення в квантовій теорії кутового моменту.</p> <p>Вектори і псевдовектори. Скаляри і псевдоскаляри.</p> <p>Статистика Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака.</p>		Опитування, виступи в аудиторії.
3	<p>Історія відкриття дивних частинок та відповідний прогрес техніки детектування. <math>V^0</math>- частинки.</p> <p>Експериментальне підтвердження незбереження просторової парності у процесах слабкої взаємодії.</p> <p>Гіперони, гіперядра.</p> <p>Аналітичність амплітуди розсіяння як фундаментальний постулат.</p> <p>Модель Венеціано. «Ядерна демократія». Бутстрап.</p> <p>Перші групові моделі. Необхідність дробового заряду в SU(3)-моделі найнижчої складності.</p> <p>J/ψ - частинка. Прихований чарм. Кварконії. Υ-частинка.</p> <p>Кольорові SU(3)-множники.</p>	1, 2, 3, 9	Опитування, виступи в аудиторії.

4	<p>Ідея античастинки з рівняння Дірака. Передбачення та відкриття позитрона.</p> <p>Теорія Юкави. Оцінка маси обмінної частинки з радіусу дії ядерних сил.</p> <p>Рівняння для релятивістського ферміона з нульовою масою.</p> <p>Діаграми вищих порядків теорії збурень. Ідея перенормування.</p>	1, 2, 10, 9	Опитування, виступи в аудиторії.
5	<p>Ефекти фізичного вакууму. Аномальний магнітний момент електрона. Лембівський зсув. Ефект Казиміра.</p> <p>Асимптотична свобода. Антикранування. Конфайнмент.</p> <p>Кварк-глюонна плазма (КГП).</p>	1, 6	Опитування, виступи в аудиторії.

6	<p>Повний переріз глибоконепружного лептон-нуклонного розсіяння як повний переріз взаємодії віртуального фотона з нуклоном.</p> <p>Модель векторної домінантності. Фотонародження. Вищі твісти.</p> <p>Дифракція і померон.</p> <p>Межі застосування пертурбативної КХД.</p> <p>Глюони як нейтральні партони. Проблеми повного імпульсу і повного спіну протона у партонній моделі.</p> <p>Лептон-кваркові перетворення. Народження адронів при анігіляції лептонів. Процеси Дрелла-Яна.</p> <p>Приклади обробки даних в сучасному експерименті з фізики високих енергій.</p>	1, 9, 10	Опитування, виступи в аудиторії.
7	<p>Змішування станів у слабкій взаємодії. Кут Кабібо та матриця СКМ.</p> <p>CP-інваріантність та її порушення. Проблема баріонної асиметрії Всесвіту. CPT-теорема та (не)обернення часу.</p> <p>Унітарний трикутник. «Пінгвінні» діаграми. В-фізика.</p> <p>Основна проблематика нейтринної фізики. Осциляції нейтрино. Частинки Дірака і Майорано.</p> <p>Електрослабка інтерференція і її прояви.</p> <p>Ідея великого об'єднання і його наслідки. Пошуки розпаду протона.</p>	1, 4, 5, 9	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії.

8	<p>Екзотичні стани речовини. Глюбол. Пентакварки. Кварк-глюонна плазма. Речовина нейтронних зірок.</p> <p>Зв'язок фізики частинок з астрофізикою і космологією. Великий вибух і стадія гарячого Всесвіту. Баріонна асиметрія Всесвіту.</p> <p>Проблеми темної маси і темної енергії. WIMP.</p> <p>Нові експериментальні установки. Підвищення енергії взаємодії. Взаємодія важких іонів. Чистий лептонний початковий стан.</p>	1, 4, 9	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії.
---	--	---------	---

## ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Тип самостійної роботи	Кількість годин
1.	Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури.	54
2.	Виконання поточних практичних завдань	16
	<b>ВСЬОГО</b>	<b>70</b>

## VI. ФОРМИ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

### МЕТА І ФОРМИ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ

Мета поточного контролю – оцінити ступінь засвоєння теоретичного і практичного матеріалу та рівень знань студентів з відповідних розділів дисципліни.

*Рівень поточних знань оцінюється в балах по кожному із передбачених видів практичних завдань окремо:*

- володіння теоретичним матеріалом;
- розуміння сутності фізичних явищ;
- вміння робити оцінки за порядком величин;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру.

Згідно до методики рейтингової оцінки поточний рейтинг аспіранта розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань, колоквиуму та контрольної роботи (плюс показники відвідування лекційних та практичних занять) і нараховується протягом семестру.

Аспіранти, поточні знання яких оцінені на “незадовільно” (0-29 балів), вважаються не атестованими і до іспиту з дисципліни не допускаються. Аспіранти, які за роботу в семестрі та на іспиті набрали 30-59 балів мають право на перескладання.

### **МЕТА І ФОРМИ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ**

Підсумковий контроль знань здійснюється наприкінці семестру шляхом складання іспиту.

До іспиту допускаються аспіранти, які мають необхідний рівень поточних знань.

Іспит проводиться в змішаній формі, по завданнях які складені на основі програми курсу та мають однаковий рівень складності. На підготовку відводиться 2 академічні години. Під час проведення іспиту дозволяється користуватися конспектом.

### **ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ**

1. Елементарні частинки. Характеристики частинок. Істинно нейтральні частинки. Класифікація елементарних частинок.
2. Перетворення Лоренца і пов'язані ефекти. Змінні Мандельштама.
3. Рівняння Кляйна-Гордона та рівняння Дірака. Проблеми з ров'язками негативної енергії та їх розв'язання. Рівняння неперервності.
4. Просторова парність квантового стану і хвильової функції. Вектори і псевдовектори. Скаляри і псевдоскаляри. Внутрішня парність частинки. Парність хвильової функції системи двох і більше частинок. Зарядова парність.
5. Спіновий стан частинки. Матриці Паулі. Кутовий момент та правила його складання. Звідні та незвідні представлення в теорія груп.
6. Ізоспін. Прояви закону збереження ізоспіну в процесах за участі елементарних частинок. Ізоспінові мультиплети.
7. Дивні частинки. Гіперони і гіперядра. Універсальність слабкої взаємодії.  $\beta$ -розпад.
8. Незбереження просторової парності у процесах слабкої взаємодії. Припущення та експериментальна перевірка. CP-парність. CPT-теорема.
9. Осциляції каонів.
10. SU(3)-класифікація адронів. Її розширення. Кварконії.
11.  $\Delta^{++}$ -проблема і колір. Конфайнмент. Колір як нове квантове число. Кольорова SU(3)-група.

12. Теорія збурень у нерелятивістському та релятивістському квантовопольовому підході. Взаємодія як обмін частинками. Рух назад у часі.
13. Побудова амплітуди розсіяння двох точкових заряджених безспінових неідентичних частинок у діаграмному підході у найнижчому порядку теорії збурень. Кросинг амплітуди.
14. Розрахунок поперечного перерізу розсіяння з амплітуди для двох точкових заряджених безспінових неідентичних частинок. Вираз для періоду напіврозпаду частинки.
15. Правила діаграмної техніки Фейнмана.
16. Калібровочна інваріантність квантової електродинаміки. Загальна схема побудови релятивістської квантової теорії поля.
17. Квантова хромодинаміка (КХД) як квантова теорія поля з калібровочною групою  $SU(3)$ . Умови застосування пертурбативної КХД. Асимптотична свобода.
18. Пружне і непружне лептон-нуклонне розсіяння Електромагнітні форм-фактори і розміри адронів. Структурні функції. Скейлінг Б'йоркена.
19. Порухення Б'йоркенівського скейлінгу. Кварки моря. Рівняння Альтареллі-Парізі.
20. Функції розподілу партонів та їх  $Q^2$ -еволюція. Функції фрагментації кварків та глюонів.
21. Лептон-кваркові перетворення та їх експериментальна реєстрація.
22. Межі застосування пертурбативної КХД. Модель векторної домінантності. Вищі твісти. Фотонародження. Дифракція і померон.
23. Основні риси теорії Фермі для слабкої взаємодії.
24. Змішування станів у слабкій взаємодії. Кут Кабібо та матриця СКМ.
25. CP-інваріантність та її порушення. Баріонна асиметрія Всесвіту. Унітарний трикутник та  $B$ -фізика.
26. Ідея єдиної теорії електрослабкої взаємодії Вайнберга-Салама. Проблема мас калібровочних бозонів. Спонтанне порушення симетрії та механізм Хіггса.



## VII. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ І ВМІНЬ СТУДЕНТІВ, УМОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО РЕЙТИНГУ

Рівень поточних знань студентів оцінюється відповідно до методики рейтингової оцінки. Сутність методики полягає у визначенні поточного рейтингу студента, що розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань та результатами самостійної роботи і наращується протягом семестру.

<i>Вид роботи</i>	<i>Обсяг за семестр</i>	<i>Максимальна кількість балів за виконану роботу</i>
<i>Теоретичне питання (просте)</i>	<i>10</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 1 бал. Всього за семестр – 10 балів.</i>
<i>Теоретичне питання (ускладнене)</i>	<i>8</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 2 бали. Всього за семестр – 16 балів</i>
<i>Розв'язування задач</i>	<i>2</i>	<i>Кожне правильне розв'язання – 5 балів. Всього за семестр – 10 балів</i>
<i>Відвідування лекцій</i>	<i>16</i>	<i>Кожна відвідана лекція – 1 бал. Всього за семестр – 16 балів</i>
<i>Відвідування семінарів</i>	<i>8</i>	<i>Кожний відвіданий семінар – 1 бал. Всього за семестр – 8 балів</i>
<i>Сукупний рейтинг</i>	<i>-</i>	<i>60 балів</i>

### КРИТЕРІЇ СКЛАДАННЯ ІСПИТУ (ЗАЛІКУ)

Кожне завдання для проведення іспиту (заліку) має бути однакової складності. Зміст питань та завдань має бути розрахований на письмову підготовку аспіранта протягом двох академічних годин.

*Максимальна кількість балів на проведення підсумкового контролю – 40.*  
Критерії оцінки підсумкових знань при складанні іспиту наведені в таблиці .

Критерії складання іспиту (заліку)

<i>Характеристика відповіді по варіанту</i>	<i>Максимальна кількість балів</i>
<i>Зміст 2-х теоретичних питань розкрито повністю і в розгорнутому вигляді</i>	<i>30</i>
<i>Вірні відповіді на тести /додаткові питання чи розв'язок задачі</i>	<i>10</i>
<i>ВСЬОГО</i>	<i>40 балів</i>

За результатами складання іспиту (заліку) якість підсумкових знань аспіранта оцінюється за рейтинговою системою та трансформується в національну шкалу та шкалу ECTS

Таблиця

Порядок перерахунку рейтингових показників нормованої 100-бальної університетської шкали оцінювання в національну 4-бальну шкалу та шкалу ECTS.

За шкалою університету	За національною шкалою		За шкалою ECTS
	Іспит	Залік	
91 – 100	5 (відмінно)	Зараховано	A (відмінно)
81 – 90	4 (добре)		B (дуже добре)
71 – 80			C (добре)
66 – 70	3 (задовільно)		D (задовільно)
60 – 65			E (достатньо)
30 – 59	2 (незадовільно)	Не зараховано	FX (незадовільно – з можливістю повторного складання)
1 – 29			F (незадовільно – з обов'язковим повторним курсом)