

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Заступник директора з наукової роботи  
  
В. В. Давидовський  
« 5 » 07 2023 р.



**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ**  
**СУПЕРСИМЕТРІЯ І СУПЕРГРАВІТАЦІЯ В ФІЗИЦІ 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**

**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці елементарних частинок:  
Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2023 .  
- 23 с.**

**Укладач:** Обіход Т.В., кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

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**

***СУПЕРСИМЕТРІЯ І СУПЕРГРАВІТАЦІЯ  
В ФІЗИЦІ 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)*

## I. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Програма з курсу «**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці 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 «**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці елементарних частинок**» є необхідною складовою є складовою вибіркових навчальних дисциплін циклу професійної та практичної підготовки докторів філософії за спеціальністю **104 – Фізика та астрономі**, 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 високих енергій, різновидом моделей за межами Стандартної моделі, закономірностями процесів, що мають місце при високих енергіях, теоретичними методами опису таких явищ та розрахунку вимірюваних величин.

Курс «**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці елементарних частинок**» викладається на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі та розрахований на 8 навчальних тижнів (по 4 ауд. год. щотижня). Вивчення курсу передбачає аудиторну (лекції – 16 год.; практичні заняття – 8 год.; консультація – 8 год.) і самостійну роботу (8 год.). Загальна кількість годин, відведених на опанування дисципліни – 40 (1,5 кредит ЄКТС).

**Мета дисципліни** – ознайомлення аспірантів з основними положеннями фізики за межами Стандартної моделі, методами теоретичного опису явищ зіткнення частинок при високих енергіях, та засвоєння методів розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують процеси з елементарними частинками.

**Завдання** – сформувати у аспірантів базові знання про сучасну фізику елементарних частинок і високих енергій, про взаємодії, про процеси, що мають місце за участі елементарних частинок, сформувати вміння теоретичного опису суперчастинок 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 суперчастинок та їх взаємодій, їх характеристики. Методи теоретичного опису властивостей суперчастинок та процесів їх взаємодії. Методи розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують процеси при високих енергіях, в тому числі з використанням сучасних комп'ютерних програм. Основи теорії суперсиметрії і супергравітації фізики елементарних частинок.

**Вміти:** Описувати можливі процеси за участю суперчастинок при протон-протонному зіткненні. Розраховувати основні теоретичні характеристики утворених екзотичних частинок типу Калуца-Клейн мод і суперпартнерів звичайних частинок. Розраховувати характеристики процесів взаємодії елементарних частинок типу ширин розпадів і перерізів утворення суперчастинок. Використовувати в розрахунках теорію перенормувань, суперструн і D-бран. 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 «**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці 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 «**Суперсиметрія і супергравітація в фізиці елементарних частинок**» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсів загальної фізики, електродинаміки, атомної фізики, ядерної фізики, фізики високих енергій, статистичної фізики, квантової механіки, основ фізики плазми.

## II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		Всього	Лекцій	Практичних занять	Самостійна та індивідуальна робота	Консультації
	<b>Розділ (змістовний модуль) 1.</b> Основні поняття теорій суперсиметрії і супергравітації і пошук суперчастинок на сучасних прискорювачах (Tevatron, LHC).	-	-	-	-	-
	<b>Тема 1.</b> Вступ. Стандартна Модель фундаментальних взаємодій	6	2	2	2	-
	<b>Тема 2.</b> $N = 1$ суперсиметрія	4	2	-	-	2
	<b>Тема 3.</b> $N = 1$ суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії	4	2	2	-	-
	<b>Тема 4.</b> Мінімальна суперсиметрична Стандартна Модель (MSSM)	6	2	2	-	2
	<b>Тема 5.</b> Суперпартнери - взаємодії і маси. Рівняння ренормгрупи для параметрів моделі	4	2	-	2	-
	<b>Тема 6.</b> Немінімальне розширення Стандартної Моделі. Моделі з розширеним хіггсовських сектором.	4	2	-	-	2
	<b>Тема 7.</b> Основи теорії струн і D-бран	6	2	-	2	2
	<b>Тема 8.</b> Моделі додаткових вимірів	6	2	2	2	-
	<b>Всього по розділу 1</b>	40	16	8	8	8

## ЗМІСТ КУРСУ

### **Розділ (змістовний модуль) 1. Класична неідеальна плазма**

#### **ТЕМА 1. Вступ. Стандартна Модель фундаментальних взаємодій.**

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу.

Стандартна модель. Проблеми Стандартної моделі. Шляхи вирішення проблем Стандартної Моделі за допомогою суперсиметрії. Мотивування суперсиметрії в фізиці високих енергій. Перетворення суперсиметрії. Алгебра суперсиметрії. Теорема про рівність числа бозонних і ферміонних ступенів свободи.

#### **ТЕМА 2. $N = 1$ суперсиметрія.**

Суперпростір і суперполя. Кіральні суперполя. Модель Весса-Зуміно. Векторні суперполя. Побудова суперсиметричних лагранжіанів.

#### **ТЕМА 3. $N = 1$ суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії.**

Теорія Янга-Міллса (загальні положення). Суперпотенціал. Скалярний потенціал в суперсиметричних моделях. Спонтанне порушення суперсиметрії. Механізм О'Райферті і механізм Файе-Іліопулоса.

.

#### **ТЕМА 4. Мінімальна суперсиметрична Стандартна Модель (МССМ).**

Суперпартнери. R-парність. Порушення суперсиметрії в МССМ. М'яке порушення суперсиметрії за рахунок ефектів гравітації. Параметри м'якого порушення суперсиметрії..

#### **ТЕМА 5. Суперпартнери - взаємодії і маси. Рівняння ренормгрупи для параметрів моделі.**

Хиггсовські бозони в суперсиметричних теоріях. Простір параметрів МССМ. Теоретичні та експериментальні обмеження на значення параметрів моделі.

#### **ТЕМА 6. Немінімальне розширення Стандартної Моделі. Моделі з розширеним хиггсовських сектором.**

Моделі з порушеною R-парністю. Пошук суперсиметрії в неприскорювальних експериментах. «Суперсиметрична» темна матерія. Пошук суперсиметрії в прискорювальних експериментах (Tevatron, LHC). Основні процеси народження і канали розпадів суперпартнерів.

#### **ТЕМА 7. Основи теорії струн і D-бран.**

Теорія суперструн і D-бран (загальні положення). Моделі з важкими векторними бозонами. Модель Рендала-Сандрума. Модель додаткових вимірів Аркані-Хамед-Дімопулос-Двалі.

## ТЕМА 8. Моделі додаткових вимірів.

Експериментальні дані з пошуку частинок моделі додаткових вимірів. Пошуки Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів. Дводжетові експериментальні виміри і їх теоретична трактовка. Мікроскопічні чорні діри. Пошуки екзотики на Великому адронному колайдері.

## Література

### Основна

1. Лидер Э., Предацци Э. Введение в калибровочные теории и «новая физика». - Киев: «Наукова думка», 1990. – 456 с.
2. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. – М.: Наука, 1988. – 272 с.
3. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. - М.: Наука, 1981. – 304 с.
4. Райдер Л. Квантовая теория поля. — М. : Мир, 1987. — 512 с.
5. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. — М. : Наука, 1973. — 416 с.
6. Ченг Т. П., Ли Л. Ф. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. — М.: Мир, 1987. — 624 с.
7. Весс Ю., Бергер Дж. Суперсимметрия и супергравитация.- Москва: Мир, 1986.- 181 с.
8. S. Martin (2011). "A Supersymmetry Primer". Perspectives on Supersymmetry. Advanced Series on Directions in High Energy Physics. 18. pp. 1–98. arXiv:hep-ph/9709356.
9. Введение в супергравитацию./ Дж. Стредтиг, Дж. Тейлор, М. Грисару и др.; Под ред. С. Феррары, Дж. Тейлора.: Пер. с англ. Д.В.Гальцова и А.А. Цейтлина; Под ред. Д.В.Гальцова и Р.Э.Каллош. - М.: Мир, 1985. - 298 с.
10. Уэст П. Введение в суперсимметрию и супергравитацию. - Москва: Мир, 1989.- 329 с.
11. Sohnius M. Introducing supersymmetry. Phys. Rept., v.128, p.39 (1985).
12. Haber H.E., Kane G.L. The Search for Supersymmetry: Probing Physics Beyond the Standard Model. Phys. Rept., v. 117, p.75 (1985).
13. CMS Collaboration. CMS Technical Design Report, volume II: Physics performance // J.Phys. – 2007. - G34. - P. 995.
14. Грин М., Шварц Дж., Виттен Э. Теория суперструн. Т. 1. – Москва: Мир, 1990. – 520 с.
15. Каку М. Введение в теорию суперструн. – Москва: Мир, 1999. – 624 с.



16. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории: Пер. с англ. / Под ред. В. О. Малышенко. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 288 с.
17. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. — М.: ЕДИТОРИАЛ УРСС, 2004, - 256 с.

#### Додаткова

1. Baer H. and Tata X. «Weak Scale Supersymmetry», Cambridge University Press, 2006.
2. Haber H. E. «Introductory Low-Energy Supersymmetry», Lectures given at TASI 1992, (SCIPP 92/33, 1993), hep-ph/9306207.
3. Kazakov D. I. «Beyond the Standard Model (In search of supersymmetry)», Lectures at the European school on high energy physics, CERN-2001-003, hep-ph/0012288.
4. Kazakov D. I. “Supersymmetry on the Run: LHC and Dark Matter” Proceedings of International school of physics “Masses and Constants”, Schladming, March 2010, Nucl.Phys.Proc. Suppl. 203-204 (2010) 118, arXiv:1010.5419 [hep-ph].
5. Вайнберг С. «Квантовая теория полей. т. 3, Суперсимметрия, М. ФАЗИС, 2002.
6. Adel Bilal (2001). "Introduction to Supersymmetry". arXiv:hep-th/0101055.
7. Cooper, F.; Khare, A.; Sukhatme, U. (1995). "Supersymmetry and quantum mechanics". Physics Reports. 251 (5–6): 267–385. arXiv:hep-th/9405029.
8. Junker, G. (1996). Supersymmetric Methods in Quantum and Statistical Physics.
9. Kane, Gordon L., Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature, Basic Books, New York (2001).
10. Drees, Manuel, Godbole, Rohini, and Roy, Probir, Theory & Phenomenology of Sparticles, World Scientific, Singapore (2005).
11. Duplij, Steven (2003). Duplij, Steven; Siegel, Warren; Bagger, Jonathan (eds.). Concise Encyclopedia of Supersymmetry.
12. Müller-Kirsten, Harald J. W., and Wiedemann, Armin, Introduction to Supersymmetry, 2nd ed., World Scientific, Singapore (2010).

# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

## ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

#### ***СУПЕРСИМЕТРІЯ І СУПЕРГРАВІТАЦІЯ В ФІЗИЦІ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК***

Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітньо- кваліфікаційний рівень	Організаційно-методична характеристика навчальної дисципліни	
	Академічна характеристика	Структура
10 – Природничі науки  104 – Фізика та астрономія  Освітня програма – Фізика (Теоретична фізика)  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: 1,5  * дисципліна може викладатися на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі	Кількість годин: Загальна: 40 Лекції: 16 Практичні заняття: 8 Консультація 8 Самостійна робота: 8  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: Обіход Т.В., кандидат фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник

### 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.

#### *Розділ (змістовний модуль) 1. Стандартна модель і її розширення*

##### **Заняття 1. Тема 1. Вступ. Стандартна Модель фундаментальних взаємодій.**

План.

1. Мета, завдання та структура курсу.
2. Склад частинок та групи симетрії.
3. Об'єднання калібрувальних констант.
4. Проблема ієрархії взаємодії
5. Мотивування введення суперсиметрії.
6. Алгебра суперсиметрії.

##### *Література*

1. [1, с. 108-115]
2. [2, с. 28-50, 91-125]
3. [3, с. 215-230]
4. [4, с. 9-36, 73-83]

##### **Заняття 2. Тема 2. $N = 1$ суперсиметрія**

План.

1. Суперпростір і суперполя
2. Кіральні і векторні суперполя.
3. Модель Весса-Зуміно.
4. Побудова суперсиметричних лагранжіанів.

##### *Література*

1. [7, с. 31-42]
2. [8, с. 17-30]
3. [9, 16-34]
4. [10, с. 17-37]
5. [11, с. 91-93]

### **Заняття 3. Тема 3. $N = 1$ суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії.**

План.

1. Теорія Янга-Міллса (загальні положення).
2. Суперпотенціал і скалярний потенціал в суперсиметричних моделях.
3. Спонтанне порушення суперсиметрії.
4. Механізм О'Райферті і механізм Файе-Гліопулоса.
5. Розщеплення мас в супермультиплетах.

#### ***Література***

1. [7, 58-66]
2. [8, с. 72-95, 74-78]
3. [10, с. 41-65]

### **Заняття 4. Тема 4. Мінімальна суперсиметрична Стандартна Модель (МССМ).**

План.

1. Механізми м'якого порушення суперсиметрії в МССМ.
2. Спектр мас МССМ.
3. R-парність і кандидати на темну матерію.
4. Скварки і слептони.
5. Калібріно.

#### ***Література***

1. [8, с. 54-72, 58-60, 95-114]
2. [11, с. 96-103]
2. [12, с. 91-139]

### **Заняття 5. Тема 5. Суперпартнери - взаємодії і маси. Рівняння ренормгрупи для параметрів моделі.**

План.

1. Хиггсовські бозони в суперсиметричних теоріях.
2. Простір параметрів МССМ моделі.
3. Народження і розпад суперпартнерів на сучасних прискорювачах.
4. Проявлення суперсиметрії на колайдерах і експериментальні обмеження на маси суперпартнерів.

#### ***Література***

1. [5, с. 332-353]
2. [8, с. 95-102, 119-125]
3. [12, 168-184]
4. [13, 1318-1369]

## **Заняття 6. Тема 6. Немінімальне розширення Стандартної Моделі.**

План.

1. Моделі з розширеним хиггсовських сектором.
2. Моделі з порушеною R-парністю.
3. Пошук суперсиметрії в неприскорювальних експериментах.
4. Основні процеси народження і канали розпадів суперпартнерів.
5. Правила Фенмана для процесів із суперчастинками.

### *Література*

- 1.[8, с. 133-143]
- 2.[9, 63-86]
3. [12, с. 160-167, с. 189-194]

## **Заняття 7. Тема 7. Основи теорії струн і D-бран.**

План.

1. Теорія суперструн і D-бран (загальні положення).
2. Моделі з важкими векторними бозонами.
3. Модель Рендала-Сандрума.
4. Модель додаткових вимірів Аркані-Хамед-Дімопулос-Двалі.

### *Література*

1. [9, 87-126]
- 2.[13,1436-1469]
3. [14, с. 10-71]
4. [15, с. 496-558, с. 118-161]

## **Заняття 8. Тема 8. Моделі додаткових вимірів.**

План.

1. Експериментальні дані по пошуку частинок моделі додаткових вимірів.
2. Пошуки Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів.
3. Двобжетові експериментальні виміри і їх теоретична трактовка.
4. Мікроскопічні чорні діри.
5. Пошуки екзотики на Великому адронному колайдері.

### *Література*

1. [13,1436-1469]
2. [16, с.209-221]
3. [17, с. 136-148]

## **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 навиків 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 навиків 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 студентами самостійно за рекомендованою тематикою;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру;
- проведення колоквиумів по засвоєнню теоретичного матеріалу;
- виконання контрольних робіт за індивідуальним завданням;
- перевірка практичних завдань, виконаних студентами під час самостійної роботи;
- проведення консультацій з дисципліни;

#### **Практичне заняття 1. Тема 1. Вступ. Стандартна Модель фундаментальних взаємодій.**

Контрольні питання:

1. Кваркова модель.
2. Групи симетрії Стандартної моделі.
3. Теорія перенормувань і зміна констант взаємодії із ростом енергії.
4. Група Лоренца.

5. Супергрупа Пуанкаре.
6. Алгебра суперсиметрії.
7. Генератори суперсиметрії.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Класифікація частинок і групи Лі.
2. Недоліки Стандартної моделі (проблема ієрархії взаємодії, параметри і відсутність гравітації).
3. Групи Лоренца і Пуанкаре.
4. Теорема про рівність числа бозонних і ферміонних ступенів свободи.

***Література:***

Основна: [4, 6,8,10 ]

Додаткова: [1,2,3,4]

**Практичне заняття 2. Тема 3.  $N = 1$  суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії.**

Контрольні питання:

1. Побудова суперсиметричних лагранжіанів.
2.  $N = 1$  суперсиметрична теорія Янга-Міллса.
3.  $N = 1$  суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії.
4. Суперпотенціал.
5. Скалярний потенціал в суперсиметричних моделях.
6. Спонтанне порушення суперсиметрії.
7. Механізм О'Райферті.
8. Механізм Файе-Іліопулоса.

***Література:***

Основна: [7,8,9,10]

**Практичне заняття 3. Тема 4. Мінімальна суперсиметрична Стандартна Модель (МССМ).**

Контрольні питання:

1. Базові поняття МССМ моделі.
2. М'яке порушення суперсиметрії.
3. Три моделі порушення суперсиметрії.
4. Параметри м'якого порушення суперсиметрії.
5. Спектр мас МССМ моделі отриманий із застосуванням реногрупових рівнянь.
6. R-парність.
7. Особливості процесів із збереженням R-парності і кандидати на темну матерію
8. Скварки і слептони.
9. Калібріно.

***Література:***

Основна: [8,11, 12, 13]

Додаткова: [2, 10, 11,12]

**Практичне заняття 4. Тема 8. Моделі додаткових вимірів.**

Контрольні питання:

1. Причини виникнення моделей додаткових вимірів.
2. Структурні суладові моделі додаткових вимірів.
3. Модель Рендала-Сандрума.
4. Модель додаткових вимірів Аркані-Хамед-Дімопулос-Двалі.
5. Експериментальні дані з пошуку частинок моделі додаткових вимірів.
6. Пошуки Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів.
7. Двобжетові експериментальні виміри.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Мікроскопічні чорні діри – причини їх формування і канали розпаду.
2. Пошуки екзотики на Великому адронному колайдері.

***Література:***

Основна: [9,13,16,17]

## **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.

### ЗМІСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ теми	Завдання	Література	Форма контролю
1	<p>Експеримент і теорія елементарних частинок Дія і лагранжіан. Ферміони і бозони.</p> <p>Аромати і покоління. Класифікація за допомогою груп Лі.</p> <p>Асимптотична свобода і конфайнмент.</p> <p>Теорія перенормувань.</p>	1-6	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
2	<p>Суперпартнери - взаємодії і маси. Рівняння ренормгрупи для параметрів моделі.</p> <p>Хиггсовські бозони в суперсиметричних теоріях.</p> <p>Простір параметрів МССМ.</p> <p>Теоретичні та експериментальні обмеження на значення параметрів моделі</p>	8-13	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

3	<p>Перспективи об'єднання всіх видів взаємодії.</p> <p>Причини і історія виникнення теорії струн.</p> <p>Основи теорії струн і D-бран (базові поняття).</p> <p>Теорія D-бран, її наслідки для експериментальних вимірювань.</p> <p>Моделі додаткових вимірів</p>	13-17	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
4	<p>Модель Рендала-Сандрума.</p> <p>Модель додаткових вимірів Аркані-Хамед-Дімопулос-Двалі.</p> <p>Експериментальні дані по пошуку частинок моделі додаткових вимірів.</p> <p>Пошуки Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів.</p> <p>Пошуки екзотики на Великому адронному колайдері.</p>	13-17	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

### ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Підготовка до поточних практичних занять	8
2.	Виконання поточних практичних завдань	8
3.	Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури	8
4.	Індивідуальні консультації з викладачем	8
	<b>ВСЬОГО</b>	<b>32</b>

### Завдання (задачі, вправи) для самостійної роботи

1. Вивести перетворення суперсиметрії. Навести алгебру суперсиметрії. Доказати теорему про рівність числа бозонних і ферміонних ступенів свободи.
2. Визначити модель Весс-Зуміно і її складові.
3. Виписати суперпотенціал. Розяснити виникнення скалярного потенціалу в суперсиметричних моделях.
4. Розяснити механізми спонтанного порушення суперсиметрії.
5. Розглянути механізм О'Райферті порушення суперсиметрії.
6. Розглянути механізм Файе-Іліопулоса порушення суперсиметрії.
7. Навести структуру простору моделей додаткових вимірів.
8. Вивести маси Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів.

### Теми для рефератів та доповідей

1. Стандартна модель.
2. Проблеми Стандартної моделі.
3. Перспективи об'єднання всіх видів взаємодії.
4. Сучасний експеримент на БАК і його структура.
5. Основні положення фізики процесів при високих енергіях.
6. Ренормалізаційна група.
7. Струмені в фізиці адронів.
8. Основні положення теорії суперсиметрії.
9. Мінімальна суперсиметрична стандартна модель (МССМ).
10. Суперсиметрія в експерименті БАК.
11. Бозони Хіггса МССМ моделі.
12. Основи теорії струн і D-бран.
13. Моделі додаткових вимірів.
14. Мікроскопічні чорні діри.
15. Пошуки екзотики на БАК.

## 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 наращується 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. Стандартна Модель фундаментальних взаємодій.
2. Шляхи вирішення проблем Стандартної Моделі за допомогою суперсиметрії. Мотивування суперсиметрії в фізиці високих енергій.
3. Перетворення суперсиметрії. Алгебра суперсиметрії.
4. Теорема про рівність числа бозонних і ферміонних ступенів свободи.  $N = 1$  суперсиметрія. Суперпростір і суперполя. Кіральні суперполя.

5. Модель Весса-Зуміно.
6. Векторні суперполя.
7. Побудова суперсиметричних лагранжіанів.  $N = 1$  суперсиметрична теорія Янга-Міллса.
8.  $N = 1$  суперсиметрична теорія Янга-Міллса з полями матерії.
9. Суперпотенціал.
10. Скалярний потенціал в суперсиметричних моделях.
11. Спонтанне порушення суперсиметрії.
12. Механізм О'Райферті і механізм Файе-Іліопулоса.
13. Мінімальна суперсиметрична Стандартна Модель (МССМ).
14. Суперпартнери.
15. R-парність.
16. Порушення суперсиметрії в МССМ.
17. М'яке порушення суперсиметрії за рахунок ефектів гравітації.
18. Параметри м'якого порушення суперсиметрії.
19. Суперпартнери - взаємодії і маси.
20. Рівняння ренормгрупи для параметрів моделі.
21. Хиггсовські бозони в суперсиметричних теоріях.
22. Простір параметрів МССМ.
23. Теоретичні та експериментальні обмеження на значення параметрів моделі.
24. Немінімальне розширення Стандартної Моделі.
25. Моделі з розширеним хиггсовських сектором.
26. Моделі з порушеною R-парністю.
27. Пошук суперсиметрії в неприскорювальних експериментах.
28. «Суперсиметрична» темна матерія.
29. Пошук суперсиметрії в прискорювальних експериментах (Tevatron, LHC).
30. Основні процеси народження і канали розпадів суперпартнерів.
31. Основи теорії струн і D-бран.
32. Моделі додаткових вимірів.
33. Модель Рендала-Сандрума.
34. Модель додаткових вимірів Аркані-Хамед-Дімопоулос-Двалі.
35. Експериментальні дані по пошуку частинок моделі додаткових вимірів.
36. Пошуки Калуца-Клейн партнерів гравітонів і калібрувальних бозонів.
37. Двуджетові експериментальні виміри і їх теоретична трактовка.
38. Мікроскопічні чорні діри.
39. Пошуки екзотики на Великому адронному колайдері.

## 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 р</i>	<i>Максимальна кількість балів за виконану роботу</i>
<i>Теоретичне питання (просте)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 1 бал. Всього за семестр – 4 бали.</i>
<i>Теоретичне питання (ускладнене)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 2 бали. Всього за семестр – 8 балів</i>
<i>Розв'язування задач</i>	<i>2</i>	<i>Кожне правильне розв'язання – 5 балів. Всього за семестр – 10 балів</i>
<i>Проведення колоквиуму та контрольної роботи</i>	<i>1</i>	<i>Кожне правильне розв'язання завдання – 5 балів. Всього за колоквиум та контрольну роботу – 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>14</i>	<i>Кожний відвіданий семінар – 1 бал. Всього за семестр – 14 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)