

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Фізичний факультет**

**Кафедра ядерної фізики**

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**  
Заст. декана  
фізичного факультету  
Момот О.В.

  
«22» серпня 2021 року

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ФІЗИКА ВАЖКИХ КВАРКІВ І ЛЕПТОНІВ**

**для студентів**

галузь знань  
спеціальність  
освітній рівень  
освітня програма  
вид дисципліни

**10 - Природничі науки  
104 «Фізика та астрономія»  
магістр  
Фізика високих енергій  
обов'язкова**

Форма навчання	<b>денна</b>
Навчальний рік	<b>2021 -2022</b>
Семестр	<b>1</b>
Кількість кредитів ECTS	<b>6</b>
Мова викладання	<b>українська</b>
Форма заключного контролю	<b>іспит</b>

Викладачі: Аушев Володимир Єгорович, д.ф.-м.н., професор кафедри ядерної фізики;  
Оніщук Юрій Миколайович, к.ф.-м.н., доцент кафедри ядерної фізики

Пролонговано: на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)  
на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.


**КИЇВ - 2021**

Розробники: Аушев В.Є., докт. фіз.-мат. наук, професор;  
Оніщук Ю.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент


ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри ядерної фізики

  
(підпис)

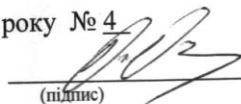
Каденко І.М. )  
(прізвище та ініціали)

Протокол № 11 від «10» червня 2021 р.

Схвалено науково - методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «22» червня 2021 року № 4

Голова науково-методичної комісії

  
(підпис)

(Оліх О.Я.)  
(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 року

## **ВСТУП**

**1. Мета дисципліни** – отримання студентами глибоких знань з курсу фізики частинок, які містять важкі кварки і лептони. Це включає засвоєння основних методів і засобів дослідження важких кварків і лептонів, основні результати та їх теоретична інтерпретація.

### **2. Вимоги до вибору навчальної дисципліни:**

1. Успішне опанування всіх попередніх курсів фізики високих енергій.
2. Вміти вести розрахунки і розв'язувати задачі з фізики елементарних частинок.
3. Володіти навичками написання комп'ютерних програм для аналізу даних.

### **Анотація навчальної дисципліни:**

Навчальна дисципліна «Фізика важких кварків і лептонів» є одним з базових розділів курсу фізики для підготовки фахівців в галузі фізики високих енергій, і є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня "магістр".

Ці дослідження безпосередньо стосуються спектроскопії частинок, властивостей кварків і міжкваркових сил, фізики важких заряджених лептонів. Розглядаються теоретичні основи фізики ароматів, зокрема проблема порушення CP-парності, ефективна теорія важких кварків, передбачення явищ поза Стандартною моделлю. Розглянуто комбінування важких і легких кварків при утворенні частинок. Висвітлено досягнення і внесок в фізику ароматів основних центрів досліджень Fermilab (протон-антипротонний колайдер Tevatron), DESY (електрон-протонний колайдер HERA) та CERN (електрон-позитронний колайдер LEP, а також адронний колайдер LHC). Курс «Фізика важких кварків і лептонів» дозволить значно покращити професійну підготовку студентів кафедри ядерної фізики, що пов'язано з тим, що студенти будуть розумітися в сучасних напрямках досліджень процесів із народженням  $c$  та  $b$  кварків і  $\tau$ -лептонів на колайдерах, зокрема в експериментах на Великому Адронному Колайдері в ЦЕРН і експерименті Belle II в науковому центрі KEK (Японія), та інших експериментах на прискорювачах.

**4. Завдання (навчальні цілі)** – надати студентам цілісну систему знань щодо актуальних проблем і стану досліджень фізики  $c$ ,  $b$  та  $t$  кварків і  $\tau$ -лептонів, навчити студентів вільно орієнтуватися на якісному та кількісному рівні в основних процесах в реакціях на пучках прискорювачів, що супроводжуються народженням важких ароматів. В результаті навчання студенти мають не лише продемонструвати масив теоретичних знань, але й засвоїти та використовувати ці знання у вирішенні фізичних проблем і задач, обробці експериментальних даних та прийнятті нестандартного рішення у професійних ситуаціях. Згідно вимог Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика високих енергій» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних компетентностей:

#### Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

#### Загальних:

ЗК02.Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

Фахових:

**СК03.** Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції фізики та астрономії фахівцям і нефахівцям.

**СК08.** Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси.

**СК12.** Здатність застосовувати знання теорій опису фізичних властивостей елементарних частинок та процесів взаємодії.

**5. Результати навчання:**

*В результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен*

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація 4. автономність та відповідальність)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
	<b>Знати:</b>			
1.1	Основні властивості кварків та лептонів і сил взаємодії між ними; поняття ароматів;	Лекція, самостійна робота	Тести, опитування	5
1.2	принципи роботи колайдерів із адронними і лептонними пучками і методи досліджень на них;	Лекція, самостійна робота	тести	5
1.3	основні колаборації, які досліджують важкі кварки та лептони та роботу відповідних детекторів ;	Лекція, самостійна робота	Тести, опитування	7
1.4	володіти методами досліджень та аналізу реальних даних і методів Монте-Карло симуляцій; обчислення систематичних похибок;	Лекція, самостійна робота	тести	6
1.5	ідентифікація процесів за участю важких ароматів, часо-залежний аналіз,	Лекції, самостійна робота	Тести, опитування	9
1.6	основні результати дослідження частинок із різним кварковим складом; визначення елементів СКМ матриць;	Лекції, самостійна робота	тести	5
	<b>Вміти:</b>			
2.1	логічно і послідовно формулювати основні поняття фізики важких ароматів;	Лекція, самостійна робота	Тести, опитування,	3
2.2	Реконструювати події за участю tau-частинок	Самостійна робота	Тести, опитування	5
2.3	основні напрямки досліджень із с та b -кварками в рамках спектроскопії частинок;	Самостійна робота, лекції	презентація самостійного дослідження,	5
2.4	аналізувати експериментальні дані по дослідженню порушень CP-симетрії; оцінювати точність отриманих результатів;	Самостійна робота, лекції	опитування	10
2.5	самостійно опановувати та використовувати літературу з фізики важких ароматів.	Самостійна робота	презентація самостійного дослідження	17

	<b>комунікація:</b>			
3.1	Вести дискусії по актуальним напрямкам досліджень важких кварків і лептонів, включно по темам самостійних досліджень	самостійна робота і практичне заняття	Самостійна робота	4
3.2	презентувати результати проведених досліджень та самостійної роботи у вигляді доповідей і презентацій;	самостійна робота, практичне заняття	Самостійна робота	5
3.3	вести комунікації з колегами з використанням сучасних технологій	Самостійна робота, лекції	Самостійна робота	5
	<b>автономність та відповідальність:</b>			
4.1	аналізувати і кваліфіковано виявляти та вирішувати задачі і проблеми в конкретних ситуаціях практичної діяльності	самостійна робота	презентація самостійного дослідження	7
4.2	нести відповідальність за достовірність проведених досліджень, та приймати нестандартні рішення	самостійна робота	дискусії, самостійна робота	7

#### 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2
Програмні результати навчання																
<b>PH05.</b> Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та астрономічних явищ, об'єктів та процесів.								+	+	+					+	+
<b>PH06.</b> Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та астрономії.	+	+	+				+		+		+	+	+			
<b>PH07.</b> Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та астрономії, оприлюднених у формі публікацій чи усної доповіді.	+									+	+					+

<b>РН10.</b> Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та астрономії, використовуючи різні джерела, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.		+			+				+	+			+		+	+
<b>РН18.</b> Застосовувати сучасні методи програмування на мові C, C++ та Python з пакетом ROOT для розв'язування конкретних задач у фізиці високих енергій.							+	+	+		+					
<b>РН08.</b> Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.													+			

## 7. 7. Схема формування оцінки:

### 7.1. Форми оцінювання

Контроль знань здійснюється за системою ECTS, яка передбачає дворівневе оцінювання засвоєного матеріалу, зокрема оцінювання теоретичної підготовки – результати навчання (знання 1.1 – 1.6), що складає 40% від загальної оцінки та оцінювання практичної підготовки – результати навчання (вміння 2.1-2.5); (комунікація 3.1-3.3); (автономність та відповідальність 4.1-4.2), що складає 60% загальної оцінки.

### Оцінювання семестрової роботи:

Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі засвоєння матеріалу з усього навчального курсу. Всі види робіт за семестр мають у підсумку:

- в максимальному вимірі 60 балів
- в мінімальному вимірі 36 балів

У разі відсутності на занятті студент має відпрацювати завдання і пройти тест.

Підсумкова контрольна робота в письмовій формі - РН 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 2.2 – 12 / 20 балів

### Підсумкове оцінювання у формі іспиту:

Підсумкова кількість балів з дисципліни визначається як сума балів за систематичну роботу студента впродовж семестру (з урахуванням модульних контрольних робіт) і оцінки за відповіді на іспиті. Для студентів, які набрали сумарно меншу кількість балів, ніж критичний мінімум – 36 балів, для допуску до іспиту необхідно обов'язково

відпрацювати пропущені теми в письмовій формі та повторно здати тести, що проводились на протязі семестру.

Таким чином, підсумкова оцінка з дисципліни (мінімум 60, максимум 100 балів) складається із суми кількості балів за семестрову роботу (мінімум 36, максимум 60 балів) та оцінки відповіді на іспиті (мінімум 24, максимум 40 балів).

**При простому розрахунку отримуємо:**

	<b>Семестрова кількість балів</b>	<b>Підсумкова оцінка за відповіді на іспиті</b>	<b>Підсумкова оцінка з дисципліни</b>
<i>Мінімум</i>	36	24	60
<b>Максимум</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>100</b>

## **7.2 Організація оцінювання:**

Під час семестру проводяться тести по засвоєнню матеріалу, оцінювання виконання практичних завдань і модульні контрольні роботи. Тестові завдання виконуються по закінченні кожної теми. Наприкінці кожного змістового модулю (відповідає частинам "Тематичного плану") проводиться контроль теоретичних і практичних знань у вигляді модульної письмової контрольної роботи (за розрахунок 1 год. самостійної роботи). Максимальна кількість балів, яка може бути отримана за підсумком кожного змістовного модуля – 30. Загальна максимальна кількість балів, яка може бути отримана студентом за два змістовні модулі — 60. Таким чином, з урахуванням усіх тестів і модульних контрольних максимальна кількість балів до проведення підсумкового іспиту — 60 балів.

Підсумковий контроль знань з навчальної дисципліни "Фізика важких кварків і лептонів" студента проводиться у формі іспиту, під час якого може бути отримана максимальна кількість балів – 40. Підсумкова семестрова рейтингова оцінка на заліку складається з семестрової модульної та залікових оцінок і дорівнює 100 балам.

При відсутності студента на модульній контрольній роботі з поважних причин, які підтверджені документально, студент повинен пройти модульний контроль у інші терміни в установленому деканатом порядку.

*Критерії оцінювання модульної контрольної:*

10-8 балів студент у повному обсязі володіє навчальним матеріалом, вільно та аргументовано його викладає, глибоко та всебічно розкриває зміст поставленого завдання, правильно інтерпретує отримані результати, використовує обов'язкову та додаткову літературу, демонструє самостійність, достовірність, незаангажованість проведеного дослідження / письмової роботи

7-6 балів - студент у достатньому обсязі володіє навчальним матеріалом, вільно його викладає, але може не вистачати аргументації в поясненнях, в основному розкриває зміст поставленого завдання, використовує обов'язкову літературу, демонструє самостійність та достовірність проведеного дослідження / письмової роботи. Допускаються несуттєві неточності

5-3 балів - в цілому володіє навчальним матеріалом, але не демонструє глибини знань, самостійності у вирішенні поставлених завдань, не спирається на необхідну навчальну літературу, робота містить суттєві неточності

2-0 балів - не в повному обсязі володіє матеріалом, фрагментарно та поверхово його викладає, недостатньо розкриває зміст поставлених питань. Має суттєві

помилки в роботі. Не демонструє самостійність у виконанні завдань.

**Шкала відповідності:**

Здано іспит / Passed		<b>60-100</b>
90-100	відмінно	
75-89	добре	
60-74	задовільно	
<b>Не здано / Fail (не задовільно)</b>		<b>0-59</b>



# СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

## ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва лекції			
		Лекції	Практична робота	Самостійна робота
Частина 1. СКМ-матриці і порушення CP-парності				
1	Тема 1. Означення фізики ароматів (Flavour physics) та тематика досліджень в ній.	2	2	8
2	Тема 2. Визначення елементів СКМ-матриці. Підходи і особливості експериментальних методик для визначення усіх 9 елементів. Глобальна підгонка елементів СКМ-матриці.	2		8
3	Тема 3. Матриця змішування для випадку N пар верхній-нижній лівих кварків. СКМ-матриця. Інваріант Ярлского. Стандартна параметризація СКМ-матриці.	2		8
4	Тема 4. Відкриття порушення CP-парності у розпадах каонів. Експеримент Крістенсена, Кроніна, Фітча і Турле (1964 р.). Введення K-short і K-long мезонів.	2		8
5	Тема 5. Особливості вимірів параметрів CP-порушень у розпадах B0d. Реконструкція кандидатів на розпади. Часо-залежна асиметрія у розпадах B0d-Bbar0d мезонів.	2		8
6	Тема 6. Загальна теорія осциляції мезонів. Амплітуди розпаду. Змішування станів нейтральних мезонів. Величини, що спостерігаються при порушенні CP-парності. Класифікація ефектів, що спричиняють порушення CP-парності.	2		8
7	Тема 7. Теорія Кабібо. Пари-дублети ферміонних станів. Заборона лептонної моди розпаду зардженого каону. Кут Кабібо. Матриця Кабібо. Переходи “сприйнятливі” і “несприйнятливі” за Кабібо.	2		8
8	Тема 8. Осциляція нейтральних каонів. Хвильові функції і амплітуди. Осциляції інтенсивностей K0 і K0bar-мезонів для початково чистого K0-пучка. Сучасна оцінка для частоти осциляцій.	2		8
9	Тема 9. Каонні експерименти. Експерименти NA48 і KTeV. Формування пучків K0L і K0S мезонів. Загальні вигляди детекторів. Виміри прямого CP-порушення. Re(eps'/eps).	2		8
10	Тема 10. Параметризація Вольфенштайна. Умови спостереження порушення CP-парності в рамках SM.	2		8
	Підсумкова модульна контрольна робота			
Частина 2. Експериментальні дослідження з важкими ароматами				
11	Тема 11. В-фабрики. Експерименти Belle і BaBar. Загальний вигляд детекторів. Особливості конструкцій.	2	2	8
12	Тема 12. Колайдер Tevatron. Експерименти CDF і D0. Загальні вигляди детекторів і вигляди внутрішніх частин. Особливості вимірів параметрів CP-порушень в експериментах на Tevatron.	2		8
13	Тема 13. DESY - історія створення і одержані фізичні результати. Колайдер HERA.	2		8
14	Тема 14. LEP — історія створення і одержані фізичні результати. Відкриття і дослідження W і Z-бозонів	2		8
15	Тема 15. Проекти мюнного і електрон-іонного колайдерів Electron-Ion-Collider (EIC)	2		8

	<i><b>Підсумкова контрольна робота</b></i>		2	
	<b>ВСЬОГО</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	120

Загальний обсяг **180 год.**, в тому числі:

Лекцій - **30 год.**

Практична робота - **30 год.**

Самостійна робота - **120 год.**

Консультацій - **0 год.**

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

### Основна: (Базова)

- Donald H. Perkins: INTRODUCTION TO HIGH ENERGY PHYSICS, 4th edition (Cambridge University Press 2000) (є переклад на російську 1-го видання)
- F. Halzen & A. Martin: Quarks and Leptons, (John Wiley 1984), (є переклад на російську 1-го видання)
- B.R. Martin & G. Shaw: Particle Physics, 3rd edition (Wiley 2008) (є переклад на російську 1-го видання)
- D. Griffiths: Introduction to Elementary Particles, 2nd edition
- Ernest M. Henley & Alejandro Garcia: SUBATOMIC PHYSICS, 3rd Edition (World Scientific Publishing 2007). (є переклад на російську 1-го видання)
- The Physics of the B Factories. / Ed. A.J. Bevan, B. Golob, Th. Mannel, S. Prell, and B.D. Yabsley // Eur. Phys. J. C74 (2014) 3026, SLAC-PUB-15968, KEK Preprint 2014-3. – 928 p.
- The BABAR Physics Book: Physics at an Asymmetric B Factory. – SLAC-R-504, 1998. – 1088 p.

### Додаткова:

- Бельков А.А. Прямое CP -нарушение в распадах каонов:  $\epsilon\pi/\epsilon\pi'$  пять лет спустя // ЭЧАЯ, 2005, 36, В.3. – с.509-581.
- Бондарь А.Е., Пахлов П.Н., Полуэктов А.О. Наблюдение CP-нарушения в распадах B-мезонов // УФН, 2007, 177, В.7. – с.697-720.
- Голутвин А.И., Данилов М.В., Зайцев Ю.М. Осцилляции B-мезонов // УФН, 1989, 157, В.3. – с.369-388.
- Кекелидзе В.Д. Физика каонов в эксперименте NA48 // ЭЧАЯ, 2002, 33, В.3. – с.626-640.
- Кекелидзе В.Д., Мадигожин Д.Т. О наблюдении прямого нарушения CP-симметрии в распадах нейтральных каонов // ЭЧАЯ, 2007, 38, В.5. – с.1163-1211.
- Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Кн.2. Глава XX. Странные частицы / 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 408 с.
- Окунь Л.Б. Лептоны и кварки / 2-е изд. – М.: Наука, 1990. – 346 с.
- Abulencia A. et al. CDF Coll. Observation of  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$  Oscillations // arXiv:hep-ex/0609040v1 22 sep 2006.
- Aaij R. et al. LHCb Coll. Observation of  $D^0 - \bar{D}^0$  oscillations // arXiv:1211.1230v2 [hep-ex] 6 Mar 2013.
- Abazov V.M. et al. DØ Coll. Measurement of the CP -violating phase  $J/\psi\phi$   $\phi$ s using the flavor-tagged decay  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$  8 fb<sup>-1</sup> of pp collisions // PRD, 2012, 85, p.032006; arXiv:1109.3166.
- Bilenky S.M. CP violation and unitary triangle test of the Standard Model // ЭЧАЯ, 2008, 39, В.5. – с.1245-1307.
- E. D. Bloom et al., Phys. Rev. Lett. 23 (1969) 930 M. Breidenbach et al., Phys. Rev. Lett. 23 (1969) 935
- A.C. Benvenuti et al., BCDMS Collaboration, Phys. Lett. B 223 (1989) 485
- J. J. Aubert et al., EMC Collaboration, Phys. Lett. B 123 (1983) 275

- and Nucl. Phys. B 259 (1985) 189
- B.Wiik and C. Llewellyn Smith, “Physics With Large Electron-Proton Colliding Rings,” preprint DESY 77/38 (1977)
- H. Abramowicz and A. Caldwell, Rev. Mod. Phys. 71 (1999) 1275
- R. Devenish and A. Cooper-Sarkar, “Deep Inelastic Scattering”, Oxford Univ. Press (2004)
- M. Klein and R. Yoshida, “Collider Physics at HERA” Prog.Part.Nucl.Phys. 61 (2008) 343–393, arXiv:0805.3334 [hep-ex].
- S. Alekhin and S. Moch, “Heavy-quark deep-inelastic scattering with a running mass,” Phys.Lett. B699 (2011) 345–353, arXiv:1011.5790 [hep-ph].
- H. Abramowicz et al., “Measurement of beauty and charm production in deep inelastic scattering at HERA and measurement of the beauty-quark mass,” JHEP 1409 (2014) 127, arXiv:1405.6915 [hep-ex].
- I. Abt et al., “Measurement of  $D^+$  production in deep inelastic ep scattering with the ZEUS detector at HERA,” JHEP 1305 (2013) 023, arXiv:1302.5058 [hep-ex].
- A. Aktas et al., “Inclusive production of  $D^+$ ,  $D^0$ ,  $D^+s$  and  $D^{*+}$  mesons in deep inelastic scattering at HERA,” Eur. Phys. J. C38 (2005) 447–459, arXiv:hep-ex/0408149 [hep-ex].