

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи

 **В.В. Давидовський**

« 09 » жовтня 2024 р.



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ

ФІЗИКА І ТЕХНІКА ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

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 2024

Фізика і техніка високих енергій: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ , 2024. - 27 с.

Укладач: Пугач В.М., член-кореспондент НАН України, професор, доктор фізико-математичних наук, зав. відділу фізики високих енергій

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України

протокол № 10 від “ 8 ” жовтня 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Навчальна програма дисципліни

ФІЗИКА І ТЕХНІКА ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

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 (обов'язковий)*

Київ 2024

І. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

«Фізика і техніка високих енергій»

Дисципліна «Фізика і техніка високих енергій» є частиною обов'язкової складової професійної підготовки аспірантів за напрямом 10 – природничі науки, спеціальністю 104 – фізика і астрономія, спеціалізацією «фізика високих енергій», що викладається протягом другого року навчання.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є **фізика і техніка високих енергій**.

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	
<i>Галузь знань</i>	10. Природничі науки
<i>Напрямок підготовки</i>	104 Фізика і астрономія00.01 фізика високих енергій
<i>Освітньо-кваліфікаційний рівень</i>	доктор філософії
Характеристика навчальної дисципліни	
<i>Вид</i>	Обов'язкова
<i>Загальна кількість годин</i>	120
<i>Кількість кредитів ECTS</i>	4
<i>Кількість змістових модулів</i>	1
<i>Форма контролю</i>	Іспит
Показники навчальної дисципліни для денної форми навчання	
<i>Рік підготовки</i>	II,
<i>Лекційні заняття</i>	32

<i>Практичні, семінарські заняття</i>	16
<i>Лабораторні заняття</i>	0
<i>Самостійна робота</i>	70
<i>Консультації</i>	2

1. Мета та завдання навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни “ **Фізика і техніка високих енергій** ” є надання аспірантам теоретичних та експериментальних відомостей з фізики високих енергій, які необхідні для участі в сучасних експериментах та створенні експериментального обладнання, зокрема на Великому Адронному Колайдері (ЦЕРН), а також в проектах FAIR (GSI, Darmstadt), CLIC (CERN) та інших, спрямованих на пошук та дослідження фізичних явищ, таких як порушення CP-парності в проблемі асиметрії матерія-антиматерія, рідкісні моди розпаду важких адронів та сигнали Нової фізики, стиснена ядерна матерія в зіткненнях релятивістських ядер та кварк-глюонна плазма, властивості бозонів Хігса, суперсиметричні частинки, проблема темної матерії, тощо.

1.2. Основним завданням вивчення дисципліни “ **Фізика і техніка високих енергій** ” є

формування у аспірантів базису знань про результати сучасних досліджень з фізики високих енергій та на їх основі вміння:

- відобразити фізичні процеси діаграмною технікою;
- реконструювати фізичні події з експериментальних даних;
- вимірювати поперечні перерізи процесів за участю кварків;
- визначати основні характеристики експерименту;
- оцінити точність вимірюваних фізичних величин;
- моделювати фізичні події з урахуванням характеристик експериментальної методики, тощо.

1.3. Згідно з вимогами освітньо-професійної програми аспіранти повинні:

знати :

- Теоретичні основи фізики високих енергій.
- Стан результатів основних експериментів ФВЕ
- Характеристики сучасних прискорювально- накопичувальних комплексів.
- Детекторні системи експериментів ФВЕ.
- Мікроелектронна техніка для мільйон-канальних детекторних систем.
- Системи накопичення та обробки експериментальних даних.
- Застосування методів та приладів ФВЕ в інших галузях науки і техніки.

вміти :

- Визначити основні положення теоретичної моделі та межі її застосовності;
- Оцінити досягнуті результати основних експериментів;
- Аналізувати роботу основних підсистем експерименту;
- Визначити роздільні здатності по часу, простору, сорту частинок, інваріантній масі, імпульсу тощо;
- Формулювати завдання по модернізації експериментальної методики;
- Досліджувати характеристики детекторних елементів та систем зчитування з них даних;
- Налаштовувати експериментальні методики.
- Моделювати фізичні процеси та їх реєстрацію в умовах експерименту.
- Обробляти експериментальні дані, використовуючи сучасну техніку аналізу даних ФВЕ.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Змістовий модуль 1 включає теми 1-4, змістовий модуль 2 – теми 5-9

Зміст навчальної дисципліни

«Фізика і техніка високих енергій»

Тема 1. Кварк-глюонні ступені свободи в структурі матерії та взаємодіях (6л+6+2ср год.)

Стандартна модель. Фундаментальні частинки (кварки, лептони). Кванти чотирьох полів взаємодії. Структурні функції (експерименти ZEUS, H1, HERMES ...). Глюонна компонента структурної функції. Партонні густини. Скейлінг Бьоркена. Спінова компонента структурних функцій в рамках КХД. Бозони Хіггса. Мезони. Баріони. Нейтрино. Кварк-глюонна плазма. Фізика за межами Стандартної моделі. Анти-матерія. Темна матерія та енергія. Суперсиметричні партнери. Слабко взаємодіючі масивні частинки.

Тема 2. Адронна спектроскопія. (6л+6+2ср год.)

Розподіли продуктів взаємодій по швидкості, поперечному імпульсу, інваріантній масі (мезони, баріони, бозони). Збуджені стани кварконію. Діаграми Далітца. Орбітальний момент, спин та парність із кутових розподілів продуктів розпаду резонансних станів. Нова фізика. Прецизійні тести Стандартної Моделі. Пошук тетра-, пента-кваркових систем, глюоболів.

Тема 3. Час життя важких адронів. (6л+6+2ср год.)

Теоретична мотивація досліджень часу життя (Стандартна модель, КХД, CP-симетрія, осциляції). Вершинні детектори в системах виміру часу життя bottom-адронів. Нові результати виміру часу життя важких адронів (експерименти D0, CMS, LHCb та інші.). Порушення комбінованої парності в розпаді B-мезонів. Трикутник унітарності. Дані експериментів BELLE, BABAR, D0, CDF, LHCb. Періоди осциляцій B-мезонів з різною кварковою структурою. Асиметрична розбудова Всесвіту. Рідкісні моди розпаду. Співвідношення гілок розпаду. Нова фізика.

Тема 4. CP – симетрія розпадів важких адронів. (6л+4+2ср год.)

Порушення комбінованої парності в розпаді B-мезонів. Дані експериментів BELLE, BABAR, D0, CDF, LHCb. Періоди осциляцій B-мезонів з різною кварковою структурою. Асиметрична розбудова Всесвіту.

Тема 5. Рідкісні розпади та явища. Нова фізика. (5л+4+2ср год.)

Стандартна модель розпаду В-мезонів по мюонному каналу. Нова фізика за межами Стандартної Моделі. Пінгвінні діаграми розпаду за участю нових частинок. Темна речовина. Слабо-взаємодіючі масивні частинки. Чорні діри. Спостереження розпаду В-мезонів на мюонні пари в експериментах LHCb, CMS, D0, CDF – обмеження вікна для Нової фізики.

Тема 6. Кваркові процеси в ядерному середовищі. (8л+4+8ср год.)

Експерименти з релятивістськими важкими іонами. Рівняння стану. Фазова діаграма. Фактор ядерної модифікації поперечних перерізів кваркових процесів. Підсилення та пригнічення виходів дивних та чарівних кварків. Експерименти RHIC (Brookhaven), HERA-B (DESY), ALICE (CERN), CBM (FAIR) NICA (Dubna). Пошук кварк-глюонної плазми.

Тема 7. Фізика космічних променів високих енергій. (4л+2+4ср год.)

Гама-променева астрономія. Потенціал гама-променевих детекторів наземного базування. Експерименти HESS, HEGRA, AUGER. Джерела галактичних космічних променів. Космологія.

Тема 8. Стан та перспективи основних сучасних та майбутніх експериментів ФВЕ. (4л+2+4ср год.)

Великий Адронний Колайдер (CERN, Geneva). В-мезонна фабрика KEK-B (KEK, Japan). Колайдер релятивістських важких іонів, RHIC (Brookhaven, USA). Проекти нових прискорювальних комплексів та експериментальних установок. Бозони Хігса, суперсиметричні партнери, лепто-кварки, темна речовина та темна енергія, чорні дірки, осциляції частинка-античастинка, кварк-глюонна плазма, тощо. Космічні джерела високо-енергетичних частинок. Дослідження нейтрино. Гама-променева астрономія. Наземні та орбітальні системи. Космологія та астрофізика.

Тема 9 . Застосування методів та обладнання ФВЕ в різних галузях науки та техніки. (5+2+4ср год.)

Internet. GRID. Моніторинг та удосконалення технологічних процесів із використанням пучків частинок та синхротронного випромінювання. Модифікація властивостей матеріалів під впливом радіації. Адронна терапія. Зображення об'єктів за допомогою мікро-пучків частинок та рентгенівських квантів. Сучасні дослідження на синхротронах третього покоління. Принципи міжнародних наукових колаборацій.

Структура навчальної дисципліни

Назва лекції			
	лекції	Практичні/ семінари	Самостійна робота
<i>Змістовний модуль 1. Основні фізичні визначення ФВЕ.</i>			
Тема 1. Кварк-глюонні ступені свободи в структурі матерії та взаємодіях (4л+6ср год.)	4	2	8
Тема 2. Адронна спектроскопія. (4л+6ср год.)	4	2	8
Тема 3. Час життя важких адронів. (4л+6ср год.)	4	2	8
Тема 4. CP – симетрія розпадів важких адронів. (4л+6ср год.)	4	2	8
<i>Разом за змістовний модуль 1</i>	16	8	32
<i>Змістовний модуль 2. Фізико-технічні принципи досліджень в ФВЕ</i>			
Тема 5. Рідкісні розпади та	3	2	10

явища. Нова фізика. (4л+6ср год.)			
Тема 6. Кваркові процеси в ядерному середовищі. (8л+12ср год.)	4	2	10
Тема 7. Фізика космічних променів високих енергій. (4л+6ср год.)	3	2	6
Тема 8. Стан та перспективи основних сучасних та майбутніх експериментів ФВЕ. (4л+6ср год.)	3	1	6
Тема 9 . Застосування методів та обладнання ФВЕ в різних галузях науки та техніки. (4+6ср год.)	3	1	6
<i>Разом за змістовний модуль 2</i>	16	8	38
<i>Всього</i>	32	16	70

Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; пр/сем -18, самостійна робота – 70 год. Консультації – 2 год.

Тематичний план практичних та семінарських занять (16 год)

№	Назва теми	К-ть годин
1.	СМ –кваркові структури, Адрони. Закони збереження.	2
2.	Розподіли по інв. Масі. Поперечному імпульсу. Збуджені	2

	стани адронів. Гілки розпаду.	
3.	Час життя – еволюція розпаду частинок та анти частинок. Осциляції. Час життя складних систем.	2
4.	Симетрії і закони збереження. СРТ інваріантність. Баріогенезис і СР порушення. Методи досліджень СР симетрії.	2
5.	Визначення граничних поперечних перерізів. Сигнали Нової фізики. Монте карло оцінки.	2

Самостійна робота

№	Назва	К-ть годин
1.	Виконання модульних контрольних робіт	18
2.	Підготовка до навчальних занять та контрольних робіт	52

Запитання до іспиту

1. Фізичні цілі сучасних експериментів Фізики Високих Енергій.
2. Електромагнітні та адронні калориметри. Точність визначення інваріантної маси зареєстрованих частинок. Діаграми Даліца.
3. Фундаментальні частинки Стандартної моделі. Суперсиметричні партнери, темна речовина.
4. Тригерні системи попереднього відбору даних в експериментах ФВЕ . З якою частотою циркулюють згустки протонів на Великому Адронному Колайдері ? Що визначає множинність подій ?

5. Глюони – кванти сильного поля. Як було доведено існування глюонів ?
6. Проаналізуйте шлях сигналу від сенсора до систем накопичення даних. Потоки аналогової та цифрової інформації в експериментах ATLAS та CMS (CERN).
7. Явище конфайнменту кварків.
8. Методи ідентифікації типу частинок. Чому в одному експерименті застосовують, як правило, декілька методів ідентифікації частинок ?
9. Стандартна модель. Елементи СКМ – матриці.
10. Просторова роздільна здатність трекових детекторних модулів. Порівняйте мікростріпові та мікропиксельні структури в трекових системах.
11. Властивості частинок та анти-частинок. Дослідження порушення комбінованої парності в розпаді В-мезонів.
12. Вершинний детектор. Селекція фізичних подій за просторовим полюсом (вершиною) їх виникнення. Просторова роздільна здатність вершинного детектора VELO (LHCb, CERN).
13. Кваркова структура адронів.
14. Як забезпечується охолодження елементів детекторних систем? При яких температурах функціонують надпровідні магнітні системи
15. Кварк-глюонна плазма.
16. Порівняльна характеристика експериментів з фіксованою мішенню та на зустрічних пучках. Контроль положення точки взаємодії та її світимості.
17. Фундаментальні взаємодії. Електромагнітні, сильні, слабкі та гравітаційні поля та відповідні їм носії взаємодії.
18. Структурний склад експериментальної методики ФВЕ. Чим визначається ефективність реконструкції подій в симульованих даних та даних експерименту?
19. Основні кінематичні змінні ФВЕ для диференційних перерізів.
20. Блок-схема 128-канального мікрочіпа BEETLE-128 (підсилювач-формувавч-буфер-змішувач). Поясніть вибір основних його параметрів.
21. Діаграми Фейнмана. Генерація адронів з важким ароматом.
1. Блок-схема типового експерименту з ФВЕ. Обґрунтуйте вибір детекторних модулів.

22. Дослідження космічних променів високої енергії. Експерименти HESS, AUGER.
23. Радіаційне навантаження на елементи детекторної системи. Який порядок флюенсів мінімум іонізуючих частинок мають витримувати сенсори та мікроелектроніка ?
24. Дослідження космічних променів високої енергії.
25. Порівняльна характеристика роздільної здатності (просторова, часова, амплітудна) сенсорів детекторних модулів, застосовуваних для реконструкції треків та вершин.
26. Спостереження бозонів Хіггса в експериментах на Великому Адронному Колайдері.
27. Порівняльна характеристика роздільної здатності (просторова, часова, амплітудна) сенсорів детекторних модулів, застосовуваних для реконструкції треків та вершин.
28. Період очікуваних осциляцій В-анти-В мезонів становить 100 фемто-секунд. Якою має бути просторова роздільна здатність вершинного детектора, спроможного досліджувати це явище ?
29. Мюонні детектори експерименту CMS (CERN). Які технічні вимоги визначають вибір матеріалу детекторної системи?
30. Фізичні цілі експериментів ALICE (CERN) та CBM (FAIR).
31. Магнітна система детектора ATLAS (CERN).
32. Фізичні цілі експерименту ALICE (CERN).
33. Кремнієва Трекова Система експерименту CBM (FAIR).
34. Фізичні цілі експериментів LHCb (CERN) та SuperBELLE (Японія).
35. Поперечні диференційні перерізи процесів в ФВЕ. Розподіл подій по імпульсу, інваріантній масі, рапідіті, змінній Фейнмана, сорту частинок, часу, вершинам тощо.
36. Кваркова структура λ -гіперонів, ρ -, π -, та ϕ -мезонів.
37. Детектори черенковського випромінювання в експериментах з ФВЕ. Конструкція порогових черенковських детекторів.
38. Квантові характеристики кварків, лептонів. Взаємодії за їх участю.
39. Блок-схема та основні характеристики мікропиксельного детектора TimePix.

Форма контролю знань аспіранта

Основною формою поточного контролю знань є проведення модульних контрольних робіт. За результатами 2-х модульних контрольних робіт виводиться основна оцінка, яка переводиться у рейтингові бали (0-30 балів за модульну контрольну роботу). До них додаються бали за результатами складання іспиту (0-40 балів).

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою для заліку
90–100	A	зараховано
82–89	B	
74–81	C	
64–73	D	
60–63	E	
35–59	FX	не зараховано з можливістю повторного складання
0–34	F	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

Рекомендована література

Основна.

1. Д. Перкінс, Введение в физику высоких энергий. Энергоатомиздат, 1994.
2. В.К. Тартаковський. Субатомна фізика. ВПЦ «Київський Університет», 2005.
3. Л.А. Булавін, В.К. Тартаковський. Ядерна фізика. ВПЦ «Київський Університет», 2002 (с.22-506, 106-110, 116-120).

4. Л.И. Сарычева. Физика фундаментальных взаимодействий. Спецкурс НИИЯФ МГУ. 2009. <http://lib.qserty.ru/tutorials.cgi>
5. Ф. Хелзен, А. Мартин. Кварки и лептоны. Москва. Изд-во МИР. 1987
6. M. Schmelling et al., *Quantum Chromodynamics*. (Oxford Univeristy Press, 2003)
7. Anisovich, A. V., Mesons and baryons: Systematization and methods of analysis. Hackensack World Scientific 2008, 580 p.

Дремин И.М. Физика на Большом адронном коллайдере/УФН.-т.179,N6 (2009)

Н.В.Красников, В.А.Матвеев. Новая физика на Большом адронном коллайдере, М.:КРАСАНД, 2011

10. http://www1.jinr.ru/Pepan/2013-v44/v-44-2/10_ermol.pdf

Додаткова

11. Particle Data Group, Review of Particle Physics, 2008, Physics Letters B, 667(2008) 1-1340
12. Guy D. Coughlan , The ideas of particle physics: An introduction for scientists. Cambridge Cambridge Univ. Pr. 2006, 254 p.
13. http://www1.jinr.ru/Pepan/Pepan_rus.html
14. WWW – сторінки провідних лабораторій та експериментів ФБЕ.

SLAC, Stanford, USA<http://www.slac.stanford.edu/>
<http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/>

HERA-B (DESY,Hamburg)
<http://www.desy.de/welcome.html>

ATLAS, CMS, ALICE, LHCb (CERN, Geneva)<http://www.cern.ch/>
<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>

FNAL, Fermi National Laboratory, USA
<http://www.fnal.gov/pub/education/index.html>

KEK, High Energy Accelerator Research Organization
<http://www.kek.jp/intra-e>
<http://belle.kek.jp/>

[REDACTED]

<http://www.nsl.msui.edu/scientists/research>

RIKEN Nishina Center

<http://www.nishina.riken.jp/RIBF/>

http://www.nishina.riken.jp/index_e.html

Oak Ridge National Laboratory
<http://neutrons.ornl.gov/>