

## СИЛАБУС

### навчальної дисципліни

### «Сучасні проблеми фізики елементарних частинок та взаємодії опромінення з речовиною та полями / Modern problems of elementary particle physics and the interaction of radiation with matter and fields»

|  |  |
|--|--|
| Галузь знань   | 10 Природничі науки  |
| Шифр та назва спеціальності  | 104 Фізика та астрономія   |
| Рівень вищої освіти  | Третій (освітньо-науковий)   |
| Статус дисципліни  | обов'язкова  |
| <b>Викладач</b>  |  |
|  | <b>Ворошило Олексій Іванович</b><br>учений секретар, пров.н.с. відділу № 40 (0.5 ставки)<br>Інститут прикладної фізики НАН України,<br>вул. Петропавлівська, 58, м. Суми   |
| <b>Загальна інформація про дисципліну</b>  |  |
| <b>Анотація</b>  | Призначенням навчальної дисципліни є засвоєння аспірантами фізичної суті процесів, які відбуваються з участю атомних ядер та елементарних частинок та їх взаємодією з речовиною, біооб'єктами та полями. Передбачається вивчення фізичних величин, що описують елементарні частинки та процеси за їх участі, відповідні їм математичні оператори; математичні рівняння та їх розв'язки, що застосовуються для опису елементарних частинок; методи розрахунку значень фізичних величин, що вимірюються експериментально. Також вивчення механізмів та результатів взаємодії різних видів заряджених частинок з речовиною та полями. |
| <b>Мета</b>  | Метою та навчального курсу є вивчення основних понять фізики елементарних частинок, квантових теорій полів, а також формування у аспірантів наукового світогляду в області фізики, засвоєння аспірантами теорії й сучасних методів теоретичного опису процесів взаємодії частинок високих енергій з речовиною й зовнішніми полями та отримання практичних навичок з постановки й рішення задач у цій галузі.   |
| <b>Результати навчання</b>   | Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі<br><b>Компетентності:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики, її</li> </ul>  |

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
|                                    | <p>прикладного застосування, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• СК07. Здатність проводити аналіз речовини за допомогою сучасних методів ядерно-фізичного аналізу.</li> <li>• СК09. Здатність проводити дослідження процесів взаємодії іонів, електронів і фотонів з речовиною, в тому числі з біооб'єктами та полями.</li> </ul> <p><b>Результати навчання:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.</li> <li>• РН09. Глибоко розуміти загальні принципи та методи природничих наук, а також методологію наукових досліджень, місце фізики в системі наукових знань як методологічної основи природничих, інженерних наук та технологій; застосувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики та у викладацькій діяльності.</li> <li>• РН14. Застосовувати сучасні методи фізики для дослідження процесів взаємодії іонів, електронів і фотонів з речовиною, в тому числі з біооб'єктами та полями.</li> </ul> |
| <b>Обсяг дисципліни</b>            | <p>Кількість кредитів – 3<br/>Загальна кількість годин — 90 год.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Лекції — 30 год;</li> <li>○ Практичні — 14 год;</li> <li>○ Самостійна робота — 44 год.</li> <li>○ Іспит — 2 год.</li> </ul>   |
| <b>Методи навчання</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• МН1. Лекційне навчання.</li> <li>• МН2. Практикоорієнтоване навчання.</li> <li>• МН3. Навчання через дослідження.</li> <li>• МН4. Самостійне навчання.</li> </ul>   |
| <b>Форма підсумкового контролю</b> | Екзамен  |

### Опис навчальної дисципліни

#### Лекційні заняття

| № з/п | Назви тем  | К-сть Годин |
|-------|--|-------------|
| 1.    | Елементарні частинки та їх характеристики. Перші елементарні частинки. Електрон. Фотон. Протон. Нейтрон. Позитрон. Нейтрино. Спеціальна теорія відносності. Тензорне обчислення.   | 2           |
| 2.    | Квантова механіка. Хвильова функція. Оператори. Рівняння Шрьодінгера. Квазістаціонарні стани. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга. Сучасні інтерпретації квантової механіки. Квантова заплутаність.                       | 2           |
| 3.    | Квантова електродинаміка. Алгебра матриць Дірака. Плоскі хвилі. Поляризація фотона. Поляризація електрона. Амплітуда розсіювання. Реакції з поляризованими частинками. Загальні правила діаграмної техніки. Віртуальні частинки. | 2           |
| 4.    | Кінематичні інваріанти. Розпади, розсіювання частинок. Принципи інваріантності і симетрії. Групи перетворень та закони збереження.   | 2           |

|     |   |   |
|-----|---|---|
|     | Матриця перетворень. Спеціальні унітарні групи SU(n). Парність. Просторова інверсія. Парність відносного руху. Парність двох частинок. Постулати парності. Зарядове спряження. C-парність фотона. Спряження рівняння Дірака. Приклади розпаду $\pi$ мезона на фотони. Обернення часу. Принцип детальної рівноваги. Визначення спина $\pi$ мезонів. CPT теорема.   |   |
| 5.  | Зарядова незалежність. Ізоспін. Зарядова симетрія. Дзеркальні ядра. Ізотопічні перетворення. Ізоспінор протон-нуклон. $\pi$ мезонний ізотриплет. Лагранжіан взаємодії $\pi$ - n. Ізоспін системи двох нуклонів. Хвильова функція двох нуклонів. Ізоспін дейтрона. Приклади реакцій а) $p + p \rightarrow d + \pi^+$ , б) $p + n \rightarrow d + \pi^0$ . Формула зв'язку проекції ізоспіна та електричного і баріонного зарядів. G-парність.                  | 2 |
| 6.  | Взаємодія частинок з речовиною. Переріз розсіяння. Зіткнення електронів з атомами. Формула Резерфорда. Розсіяння Мотта. Пружне зіткнення важких заряджених частинок з атомами. Зіткнення нейтральних частинок з атомами: швидкі нейтрони, гамма кванти. Пробіг (лінійний, векторний, повздовжній, поперечний). Втрати енергії. Гальмівна здатність. Переріз гальмування. Механізми сповільнювання частинок.   | 2 |
| 7.  | Гальмування іонів електронами. Етапи і особливості гальмування. Гальмівна здатність. Коефіцієнт гальмування. Теорія Бете. Теорія Блоха. Узагальнення на релятивістський випадок. Правило адитивності Брега. Гальмування іонів ядрами. Характерні особливості. Поверхневі ефекти. Коефіцієнт відбиття. Гальмування швидких іонів. Іонізаційні та радіаційні втрати. Інші процеси втрат енергії. Лінійний пробіг. Утворення $e^+e^-$ пар фотонами та протонами. | 2 |
| 8.  | Фундаментальні взаємодії. Співвідношення фундаментальних сил. Електромагнітна взаємодія. Фейнманівські діаграми. Розсіяння Мотта. Комптонівське розсіяння. Віртуальні частинки. Характеристики взаємодії.   | 2 |
| 9.  | Сильна взаємодія. Теорія Юкава. Характеристики взаємодії. Розмірність константи взаємодії. Слабка взаємодія. Класи процесів. Характеристики взаємодії. Розмірність константи взаємодії. Маса переносників взаємодії. Фейнманівські діаграми взаємодії нуклонів (p-n, p-p, n-n). Лагранжіан взаємодії.   | 2 |
| 10. | Мюон. Відкриття. Оцінка часу життя. Виявлення $+$ , $-$ . Вимірювання часу життя. Мезоатоми. Процеси втрати енергії. Переріз взаємодії з ядром. $\mu$ -e універсальність. Мезон. Час життя. Розпад. Спін. Парність. Маса мезона. Розпад частинки на льоту. Час життя мезона. Вимірювання часу життя мезона.   | 2 |
| 11. | Квантова хромодинаміка. Дивність. Відкриття дивних частинок. K-мезони. Лямбда гіперон. Ізоспін. Формула Нішиджими - Гел-Мана. Приклади реакцій з дивними частинками. Нейтральні K мезони. CP парність. Змішанні стани K1, K2. Розпад нейтральних K мезонів на $\pi$ мезони. Час життя K мезонів. Взаємне перетворення нейтральних K мезонів. Регенерація. Осциляція дивності. Порушення CP інваріантності.  | 2 |
| 12. | Кваркова модель адронів. Типи кварків. Покоління та аромати. Колір. Формула Нішиджими - Гел-Мана. Найлегші частинки з $L=0$ (мезонні та баріонні стани). Декуплет баріонів. Схема розпаду $\Omega^-$ . Симетризація   | 2 |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
|   | хвильової функції. Октет баріонів. Симетризація хвильової функції. Формула Гел-Мана – Окубо та приклади її використання для октету та декуплету баріонів. Псевдоскалярні мезони. Симетризація хвильової функції. Угода Кондора-Шортлі. Оператор зсуву ізоспіна та його дія на кварки. Стандартна модель.   |           |
| 13.   | Масова формула Гел-Мана – Окубо для мезонів. Векторні мезони. Кут змішування, його теоретична оцінка. Хвильові функції $\varphi, \omega$ мезонів. Кваркові діаграми розпаду частинок. Правило Цвейга. Ядерно стабільні частинки. Кваркові діаграми розсіяння частинок. Лептонні розпади векторних мезонів. Народження лептонних пар при зіткненні $\pi$ мезона на протоні. Механізм Дрелла – Янга. Екзотичні стани.  | 2         |
| 14.   | Резонанси. Потенційна яма. Класифікація станів за енергіями. Спостереження резонансів. Перерізи пружного та непружного розсіянь. Повний переріз. Оптична теорема. Переріз резонансного розсіяння. Формула Брейта-Вігнера. Приклад: баріонний резонанс $++$ .   | 2         |
| 15.   | Searches for new physics. Conclusions of experiments on the large andron collider. Modern ideas about the nature of gravitational interaction. Results of modern observational astronomy, in particular the James Webb Telescope and modern ideas about the structure of the universe. Dark matter and dark energy. / Пошуки нової фізики. Висновки експериментів на великому андронному колайдері. Сучасні уявлення про природу гравітаційна взаємодії. Результати сучасної спостережувальної астрономії і сучасні уявлення про будову Всесвіту. Темна матерія і темна енергія. | 2         |
| <b>Разом (год.)</b>   |  | <b>30</b> |
| <b>Теми практичних занять</b>                                     |  |           |
| 1   | Кінематика ч.1. Лабораторна система відліку і систем центру мас.   | 2         |
| 2   | Кінематика ч.2. Народження $e^+e^-$ пари   | 2         |
| 3   | Кінематика ч.3. Релятивістські інваріанти, ефективна маса $\sqrt{s}$   | 2         |
| 4   | Принципи інваріантності і симетрії ч1. Розпад $\rho$ мезона. C, P, G парність  | 2         |
| 5   | Принципи інваріантності і симетрії ч2. CP парність, K мезони   | 2         |
| 6   | Принципи інваріантності і симетрії ч3. Законом збереження лептонного заряду. Закон збереження ізотопичного спіну:  | 2         |
| 7   | Діаграмна техніка в КЕД та стандартній моделі.   | 2         |
| <b>Разом (год.)</b>   |  | <b>14</b> |
| <b>Самостійна робота</b>  |  |           |
| <b>Опрацювання тем, які не входять до плану аудиторних занять</b> |  |           |
| 1.  | Система одиниць. Релятивістська система одиниць. Планківська природна система одиниць. Атомна природна система одиниць.  | 2         |
| 2.  | Взаємодія частинок з речовиною. Переріз розсіяння. Зіткнення електронів з атомами. Формула Резерфорда. Розсіяння Мотта. Пружне зіткнення важких заряджених частинок з атомами.   | 2         |
| 3.  | Зіткнення нейтральних частинок з атомами: швидкі нейтрони, гама кванти. Пробіг (лінійний, векторний, повздовжній, поперечний).   | 2         |
| 4.  | Втрати енергії. Гальмівна здатність. Переріз гальмування. Механізми сповільнювання частинок.   | 2         |
| 5.  | Гальмування іонів електронами. Етапи і особливості гальмування. Гальмівна здатність. Коефіцієнт гальмування.   | 2         |
| 6.  | Теорія Бете. Теорія Блоха. Узагальнення на релятивістський випадок.  | 2         |

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 7.  | Правило адитивності Брега. Гальмування іонів ядрами. Характерні особливості. Поверхневі ефекти. Коефіцієнт відбиття.  | 2 |
| 8.  | Гальмування швидких іонів. Іонізаційні та радіаційні втрати. Інші процеси втрат енергії. Лінійний пробіг. Утворення $e^+e^-$ пар фотонами та протонами.   | 2 |
| 9.  | Фундаментальні взаємодії. Співвідношення фундаментальних сил. Електромагнітна взаємодія. Фейнманівські діаграми.  | 2 |
| 10. | Розсіяння Мотта. Комптонівське розсіяння. Віртуальні частинки. Характеристики взаємодії.  | 2 |
| 11. | Сильна взаємодія. Теорія Юкава. Характеристики взаємодії. Розмірність константи взаємодії. Слабка взаємодія. Класи процесів. Характеристики взаємодії. Розмірність константи взаємодії. Маса переносників взаємодії. Гравітаційна взаємодія   | 2 |
| 12. | Принципи інваріантності і симетрії. Групи перетворень та закони збереження. Матриця перетворень. Спеціальні унітарні групи SU(n). Парність. Просторова інверсія. Парність відносного руху. Парність двох частинок. Постулати парності.  | 2 |
| 13. | Зарядове спряження. С-парність фотона. Спряження рівняння Дірака. Приклади розпаду $\pi^0$ мезона на фотони. Обернення часу. Принцип детальної рівноваги. Визначення спіна $\pi^+$ , $\pi^-$ мезонів. СРТ теорема.  | 2 |
| 14. | Зарядова незалежність. Ізоспін. Зарядова симетрія. Дзеркальні ядра ( а) ${}^7\text{Li}$ - ${}^7\text{Be}$ , б) ${}^{14}\text{C}$ - ${}^{14}\text{N}$ - ${}^{14}\text{O}$ , с) ${}^3\text{H}$ - ${}^3\text{He}$ ). Ізотопічні перетворення. Ізоспінор протон-нуклон. $\pi$ мезоний ізотриплет. Лагранжіан взаємодії $\pi$ - н. Ізоспін системи двох нуклонів. Хвильова функція двох нуклонів. Ізоспін дейтрона. Приклади реакцій а) $p + p \rightarrow d + \pi^+$ , б) $p + n \rightarrow d + \pi^0$ . Формула зв'язку проекції ізоспіна та електричного і баріонного зарядів. G-парність. | 2 |
| 15. | Мюон. Відкриття. Оцінка часу життя. Виявлення $\mu^+$ , $\mu^-$ . Вимірювання часу життя. Мезоатоми. Процеси втрати енергії $\mu^-$ . Переріз взаємодії $\mu^-$ з ядром. $\mu^-$ е універсальність.   | 2 |
| 16. | $\pi$ мезон. Відкриття. Час життя. Розпад. Спін. Парність. Фейнманівські діаграми взаємодії нуклонів (p-n, p-p, n-p). Лагранжіан взаємодії. Маса $\pi^0$ мезона. Розпад частинки на лету. Час життя $\pi^0$ мезона. Вимірювання часу життя $\pi^0$ мезона.  | 2 |
| 17. | Кваркова модель адронів. Типи кварків. Покоління та аромати. Колір. Формула Нішиджими-Гел-Мана. Найлегші частинки з $L = 0$ (мезонні та баріонні стани). Декуплет баріонів. Схема розпаду $\Omega^-$ . Симетризація хвильової функції. Октет баріонів. Симетризація хвильової функції. Формула Гел-Мана – Окубо та приклади її використання для октету та декуплету баріонів.   | 2 |
| 18. | Псевдоскалярні мезони. Симетризація хвильової функції. Згода Кондора-Шортлі. Оператор зсуву ізоспіна та його дія на кварки. Масова формула Гел-Мана – Окубо для мезонів. Векторні мезони. Кут змішування, його теоретична оцінка. Хвильові функції $\varphi, \omega$ мезонів.   | 2 |
| 19. | Кваркові діаграми розпаду частинок. Правило Цвейга. Ядерно стабільні частинки. Кваркові діаграми розсіяння частинок. Лептонні розпади векторних мезонів. Народження лептонних пар при зіткненні $\pi$ мезона на протоні. Механізм Дрелла – Янга. Екзотичні стани.   | 2 |
| 20. | Дивність. Відкриття дивних частинок. К мезони. Лямбда гіперон. Ізоспін. Формула Нішиджими-Гел-Мана. Приклади реакцій з дивними частинками. Осциляція дивності. Порушення CP інваріантності.   | 2 |
| 21. | Нейтральні К мезони. CP парність. Змішанні стани $K_1, K_2$ . Розпад нейтральних  | 2 |

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
|                     | К мезонів на $\pi$ мезони. Час життя К мезонів. Взаємне перетворення нейтральних К мезонів. Регенерація.   |           |
| 22.                 | Резонанси. Потенційна яма. Класифікація станів за енергіями. Спостереження резонансів. Оптико-хвильова теорія розсіяння. Формула Факсена-Хольтсмарка. Перерізи пружного та непружного розсіянь. Повний переріз. Оптична теорема. Переріз резонансного розсіяння. Формула Брейта-Вігнера. Приклад: баріонний резонанс $\Delta^{++}$ . | 2         |
| <b>Разом (год.)</b> |  | <b>44</b> |

## ОЦІНЮВАННЯ ЗА ОСВІТНІМ КОМПОНЕНТОМ

### Сумативне оцінювання

1.1. Для оцінювання очікуваних результатів навчання передбачено

| № | Методи сумативного оцінювання               | Бали / Вага у загальній оцінці | Дата складання                     |
|---|---|--------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Практичні заняття                           | 50 балів / 50%                 | Згідно графіка навчального процесу |
| 2 | Проміжна атестація (тест множинного вибору) | 20 балів / 20%                 |                                    |
| 3 | Іспит (комплексне завдання)                 | 30 балів / 30%                 |                                    |

### 1.2. Критерії оцінювання

| № з/п | Вид діяльності                     | Оцінювання  |
|-------|------------------------------------|---|
| 1     | Практичні заняття                  | Нарахування балів відбувається по шкалі: (Відповідно до кількості практичних занять)<br>- відмінні відповіді 10-15 балів;<br>- добрі відповіді 5-10 балів;<br>- задовільні, достатні відповіді 1-5 балів.   |
| 2     | Атестація (тест множинного вибору) | Залежить від кількості вірних відповідей на тест  |
| 3     | Іспит                              | 0-5 балів - здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі не розв'язані;<br>5-15 балів - здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв'язані не повністю;<br>15-27 балів - здобувач достатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв'язані з невеликими помилками;<br>27-30 балів - здобувач гарно орієнтується в теоретичному матеріалі, задачі розв'язані вірно. |

### Методичне забезпечення

1. Тексти та конспекти лекцій
2. Методичні розробки для аспірантів з практичних занять
3. Доступ та опрацювання он-лайн ресурсів

### Політика оскарження результатів оцінювання

Здобувач має право оскаржити результати оцінювання, звернувшись до викладача протягом 3-х робочих днів після оголошення балів.

У разі незгоди з рішенням викладача, апеляція розглядається комісією згідно з [“Положення про апеляцію результатів підсумкового контролю знань здобувачів вищої освіти в ІПФ НАН України”](#).

## Рекомендована література

### Базова

1. Вакарчук І.О. Квантова механіка: Підручник.- Львів, Видавництво Львівського університету, 1998.
2. Ребенко О.Л. Основи сучасної теорії взаємодіючих квантованих полів. – К.: Наукова думка, 2007. – 539 с
3. Білий М.У. Атомна фізика [Текст] : підручник / М.У. Білий, Б.А. Охріменко; заг. ред. Л.А. Булавін. – К. : Знання, 2009. – 559 с.: рис., табл.
4. Булавін Л.А. Ядерна фізика [Текст] : підручник / Л.А. Булавін, В.К. Тартаковський. – 2. вид., перероб. і доп. – К. : Знання, 2005. – 439 с.
5. І. М. Каденко, В. А. Плюйко. Фізика атомного ядра та частинок / Київ: Київський університет, 2008.
6. Каденко І.М.. Фізика атомного ядра та частинок: підруч. для студ. фіз. ф-тів ун-тів / І.М. Каденко, В.А. Плюйко; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. – К. : Київський ун-т, 2008. – 414 с. Ситенко О.Г. Теорія ядра : навч. посібник для студ. фіз. спец. вищих закл. освіти / О.Г. Ситенко, В.К. Тартаковський. – 2. вид. – К. : Либідь, 2001. – 607 с.
7. Birrell N.D., Davis P.C.W. Quantum fields in curved space. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
8. Cheng T.-H., Li L.-F. Gauge theory of elementary particle physics. Oxford: Oxford University Press, 2000.
9. D. Ashok, T. Ferbel. Introduction to nuclear and particle physics, New York: J. Wiley, 1994.
10. D. Griffiths, Introduction to elementary particles, John Wiley & Sons, 1987.
11. F. Boehm, P. Vogel, Physics of Massive Neutrinos, Cambridge Univ. Press, 1992, 259 p.
12. F. Halzen, A.D. Martin. Quarks and leptons: an introductory course in modern particle physics, John Wiley & Sons, 1984.
13. Greiner W., Muller B., Rafelski J. Quantum electrodynamics of strong fields. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
14. K. Zuber, Neutrino Physics, CRC Press, 2020, 466 p.

### Допоміжна

1. Грибань, В.М. Фізика елементарних частинок [Текст]: навч. посібник / В.М. Грибань; Ніжинський держ. педагогічний ін-т ім. М.В. Гоголя. – Ніжин: [б.в.], 1997. – 29 с.
2. Л. А. Булавін, В. К. Тартаковський. Ядерна фізика / К: Київський університет, 2002.
3. Мельничук О.В. Фізика атома і атомного ядра. Лабораторний практикум [Текст]: навч. посіб. / О. В. Мельничук, О. Г. Шевчук; Ніжинський держ. педагогічний ун-т ім. Миколи Гоголя. – Ніжин : Видавництво НДПУ ім. М.Гоголя, 2004. – 72 с.: іл.
4. Тартаковський В.К. Фізика ядра та елементарних частинок [Текст] : конспект лекцій для студ. фіз. факультету / В. К. Тартаковський. – К., 1997. – 97 с.
5. Фізика ядра і елементарних частинок [Текст] : задачі та методика їх розв'язування / уклад. А. Й. Савчук, І. М. Юрійчук ; Чернівецький національний ун-т ім. Юрія Федьковича. – Чернівці : Рута, 2007. – 88 с.
6. G. Heusser, Low-radioactivity background techniques, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 45 (1995) 543, 49 p.
7. G. Kane Supersymmetry : Unveiling The Ultimate Laws Of Nature
8. J. Suhonen, From Nucleons to Nucleus, Springer, 2007, 655 p.
9. J.A. Formaggio, C.J. Martoff, Backgrounds to sensitive experiments underground, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 54 (2004) 361, 54 p.
10. M. Fukugita, T. Yanagida, Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics, Springer,

2003, 599 p.

11. P. Belli et al., Experimental searches for rare alpha and beta decays, Eur. Phys. J. A 55 (2019) 140, 44 p.
12. Particle Data Group, Review of Particle Physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics 08 (2022) 3C01, 2270 p.
13. Perkins D. Particle astrophysics. Oxford: Oxford University Press, 2003.
14. Rajaraman R. Solitons and instantons. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1982.
15. Sessler A., Wilson E. Engines of discovery: A century of particle accelerators. New Jersey: WORLD SCIENTIFIC, 2006.
16. С.П. Рощупкін, О.І. Ворошило. Резонансні і когерентні ефекти квантової електродинаміки в сильному полі. – Київ, Наукова думка, 2008. – 398 с.
17. С.П. Рощупкін, А.А. Лебедь. Ефекти квантової електродинаміки в сильних імпульсних лазерних полях. Київ, Наукова думка, 2013. – 191 с.
18. Kholodov R.I., Novak O.P., Diachenko M.M. Resonant and polarization effects in the processes of quantum electrodynamics in a strong magnetic field. — Kyiv: Akadempriodyka, 2022. — 295 p

### Інтернет ресурси

1. James D. Bjorken, Sidney David Drell. Relativistic Quantum Mechanics McGraw-Hill, 1964: <https://emineter.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/james-d-bjorken-sidney-d-drell-relativistic-quantum-mechanics-1964.pdf>
2. Maxima by Example, Ch. 12: Dirac Algebra and Quantum Electrodynamics, Version 3: <https://home.csulb.edu/~woollett/mbe12.html>
3. <https://typeset.io/pdf/a-relativistic-cut-off-for-classical-electrodynamics-5ak1bvcy7h.pdf>
4. <https://web.archive.org/web/20200806190045/https://authors.library.caltech.edu/3528/1/FEYpr50.pdf>
5. [https://play.google.com/books/reader?id=F\\_9AAQAIAAJ&pg=GBS.PA10&hl=uk](https://play.google.com/books/reader?id=F_9AAQAIAAJ&pg=GBS.PA10&hl=uk)
6. [https://books.google.com.ua/books?id=TEe\\_4YwntGQC&printsec=frontcover&hl=uk&source=gsbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=TEe_4YwntGQC&printsec=frontcover&hl=uk&source=gsbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
7. <https://power1.pc.uec.ac.jp/~toru/notes/LandauLifshitz-QuantumMechanics.pdf>
8. <https://books.google.com.ua/books?id=YlwKR5JNWDgC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
9. CERN [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://home.cern/>. – Назва з екрана.
10. Institut national de physique nucléaire et de physique des particules. - <https://in2p3.cnrs.fr/>
11. Науковий журнал «Український фізичний журнал», який входить до наукометричної бази Scopus: <https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp>
12. Науковий журнал «Журнал фізичних досліджень», який входить до наукометричної бази Scopus: [https://physics.lnu.edu.ua/jps/index\\_ua.html](https://physics.lnu.edu.ua/jps/index_ua.html)
13. Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського: <http://www.nbuv.gov.ua/>

### Академічна доброчесність

Здобувач вищої освіти повинен дотримуватись Етичного кодексу ученого України. Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає: самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей); посилення на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей; дотримання норм законодавства про авторське право і сум права; надання достовірної інформації про

результати власної навчальної (наукової, творчої) діяльності, використані методики досліджень і джерела інформації.

У випадку порушення академічної доброчесності – реагування відповідно до «Положення про академічну доброчесність в ІПФ НАН України».

### **Політика використання ШІ**

Використання ШІ регулюється «Положенням про академічну доброчесність наукових працівників та здобувачів вищої освіти в ІПФ НАН України». Зокрема, дозволяється використання ШІ для пошуку ідей або редагування тексту, проте фінальний результат має бути оригінальним. Пряме копіювання згенерованого тексту без посилань вважатиметься порушенням академічної доброчесності

### **Зворотній зв'язок**

Наприкінці курсу проводиться анонімне анкетування здобувачів щодо якості викладання та відповідності змісту дисципліни їхнім очікуванням.