



# ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівень вищої освіти                         | <i>Другий (магістерський)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Галузь знань                                | <i>Е Природничі науки, математика та статистика</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Спеціальність                               | <i>Е5 Фізика і астрономія</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Освітня програма                            | <i>Освітньо-професійна програма «Модельовання фізичних процесів»</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Статус дисципліни                           | <i>Вибіркова</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Форма навчання                              | <i>очна(денна)/дистанційна/змішана</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Рік підготовки, семестр                     | <i>2 курс, осінній семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Обсяг дисципліни                            | <i>5 кредитів (150 годин)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Семестровий контроль/ контрольні заходи     | <i>Екзамен усний</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Розклад занять                              | <i>Розклад занять викладено на сторінці <a href="http://schedule.kpi.ua/">http://schedule.kpi.ua/</a></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Мова викладання                             | <i>Українська</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Інформація про керівника курсу / викладачів | <i>Лектор: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни<br/>Практичні заняття: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни</i>                           |
| Розміщення курсу                            | <ul style="list-style-type: none"><li><i>На платформі дистанційного навчання Google Клас за посиланням <a href="https://classroom.google.com/c/NzEwMzl3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s">https://classroom.google.com/c/NzEwMzl3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s</a> , код класу ct65cvc, постійне посилання на Google Meet <a href="https://meet.google.com/rpk-kitv-orp">https://meet.google.com/rpk-kitv-orp</a></i></li></ul> |

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

*Метою навчальної дисципліни є формування у студентів наступних компетентностей.*

##### **Загальні компетентності:**

*ЗК1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.*

*ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.*

*ЗК3. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.*

*ЗК4. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.*

*ЗК6. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.*

*ЗК7. Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.*

##### **Фахові компетентності спеціальності:**

*ФК1. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.*

*ФК2. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії.*

ФК5. Здатність сприймати ново здобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними.

ФК9. Здатність самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

Основні завдання кредитного модуля:

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати наступні **результати навчання**:

ПРН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.

ПРН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.

ПРН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.

ПРН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.

ПРН10. Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела.

ПРН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.

ПРН13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.

ПРН15. Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки за результатами дослідження.

ПРН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень в області фізики та астрономії.

ПРН18. Вміти використовувати набуті знання для розв'язання різних задач з фізики та астрономії.

ПРН19. Вміти моделювати фізичні і не тільки процеси та явища, що виникають в навколишньому світі.

ПРН20. Вміти створювати та досліджувати різні фізичні теорії за допомогою моделювання фізичних та астрономічних процесів.

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Кредитний модуль «Основи квантової електродинаміки» відноситься до дисципліни «Основи квантової електродинаміки», яка належить до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки, і вивчається студентами в 11-му семестрі навчання за напрямом «фізика». Цей кредитний модуль спрямований на формування у студентів базових понять, вмінь та навичок стосовно курсу основ квантової електродинаміки. Вивчення даного кредитного модуля базується на курсах „Механіка“, „Молекулярна фізика“, „Електрика та магнетизм“, „Класична механіка“, „Математичний аналіз“ та ін. Знання, отримані студентами з курсу «Основи квантової електродинаміки», використовуються в курсі „Вступ до фізики твердого тіла“ та ін.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

Квантова електродинаміка є релятивістською квантовою теорією електромагнітного поля, вона описує електромагнітну взаємодію, і є теорією, у якій принципи квантової механіки узгоджуються зі спеціальною теорією відносності. Студенти в результаті вивчення основ квантової теорії поля зрозуміють, наприклад, як провести обчислення аномального магнітного моменту електрона з точністю  $10^{-10}$ . Досягнутий тут рівень відповідності ( $\sim 10^{-10}$ ) між розрахунковим і та експериментальним значеннями цієї фізичної величини є рекордним у фізиці. Для інших ефектів, які описуються в рамках квантової електродинаміки, зокрема, анігіляції електрон-позитронної пари, дельбрюківського розсіювання фотонів електромагнітним полем ядра, також характерно узгодження теорії з експериментом з високою точністю. Взагалі точний опис експериментальних даних квантовою електродинамікою характерний для тих випадків, коли в інші види взаємодій виявляються несуттєвими. Цей факт свідчить про те, що основні положення квантової електродинаміки виявляються справедливими у всій області, доступній сучасному експерименту в області дослідження електромагнітних взаємодій.

| Назви розділів, тем                                               | Розподіл за семестрами та видами занять |        |                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------|-------------------|-----|
|                                                                   | Всього                                  | Лекції | Практичні заняття | СРС |
| Семестр 3                                                         |                                         |        |                   |     |
| Розділ 1. Вступ до квантової електродинаміки.                     |                                         |        |                   |     |
| Тема 1.1. Предмет та об'єкт досліджень квантової електродинаміки. | 3,75                                    | 0,5    | 0,25              | 3   |
| Тема 1.2. Основні позначення.                                     | 3,75                                    | 0,5    | 0,25              | 3   |
| Тема 1.3. Принцип невизначеності в релятивістському випадку.      | 3,75                                    | 0,5    | 0,25              | 3   |
| Разом за розділом 1                                               | 11,25                                   | 1,5    | 0,75              | 9   |
| Розділ 2. Фотони.                                                 |                                         |        |                   |     |
| Тема 2.1. Квантування вільного електромагнітного поля. Фотони.    | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |
| Тема 2.2. Калібрувальна інваріантність.                           | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |
| Тема 2.3. Момент кількості руху та парність фотона.               | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |
| Тема 2.4. Сферичні хвилі фотонів. Поляризація фотона.             | 3,75                                    | 0,5    | 0,25              | 3   |
| Разом за розділом 2                                               | 12,0                                    | 2,0    | 1                 | 9   |
| Розділ 3. Бозони.                                                 |                                         |        |                   |     |
| Тема 3.1. Хвильове рівняння для частинок зі спіном нуль.          | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |
| Тема 3.2. Частинки та античастинки. Істинно нейтральні частинки.  | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |
| Тема 3.3. CPT-перетворення.                                       | 2,75                                    | 0,5    | 0,25              | 2   |

|                                                                                                  |       |     |      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|------|----|
| Тема 3.4. Хвильове рівняння для частинки зі спіном одиниця.                                      | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Контрольна робота з розділів 1 -3                                                                | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Разом за розділом 3                                                                              | 12,75 | 2,5 | 1,25 | 9  |
| Розділ 4. Ферміони.                                                                              |       |     |      |    |
| Тема 4.1. Чотиривимірні спінори.                                                                 | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 4.2. Рівняння Дірака в представленні спінорів. Алгебра матриць Дірака.                      | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 4.3. Зв'язок спіна зі статистикою. Зарядове спряження та обернення часу для спінорів.       | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 4.4. Матриця щільності поляризації. Нейтрино. Хвильове рівняння для частинок зі спіном 3/2. | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Разом за розділом 4                                                                              | 11    | 2   | 1    | 8  |
| Розділ 5. Частинки в зовнішньому полі. Випромінювання.                                           |       |     |      |    |
| Тема 5.1. Рівняння Дірака для електрона в зовнішньому полі.                                      | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 5.2. Розклад в ряд по $1/c$ .                                                               | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 5.3. Тонка структура рівнів атома водню.                                                    | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 5.4. Рух в центральній симетричному полі.                                                   | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.5. Рух в кулонівському полі.                                                              | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.6. Розсіювання в центральній симетричному полі.                                           | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.7. Розсіювання в ультрарелятивістському випадку.                                          | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.8. Хвильові функції при розсіюванні в кулонівському полі.                                 | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.9. Електрон в полі плоскої електромагнітної хвилі.                                        | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.10. Рух частинки зі спіном в зовнішньому полі.                                            | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.11. Розсіювання нейтронів в зовнішньому полі.                                             | 2,25  | 1   | 0,25 | 1  |
| Тема 5.12. Оператор електромагнітної взаємодії. Випромінювання та поглинання.                    | 2,25  | 1   | 0,25 | 1  |
| Тема 5.13. Дипольне випромінювання.                                                              | 2,25  | 1   | 0,25 | 1  |
| Тема 5.14. Випромінювання атомів: ефекти Зеемана та Штарка.                                      | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.15. Фотоелектричний ефект.                                                                | 2,25  | 1   | 0,25 | 1  |
| Тестування з розділів 4-5                                                                        | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |
| Разом за розділом 5                                                                              | 33    | 10  | 4    | 19 |
| Розділ 6. Матриця розсіювання. Теорія збурень.                                                   |       |     |      |    |
| Тема 6.1. Матриця розсіювання.                                                                   | 3,5   | 1   | 0,5  | 2  |
| Тема 6.2. Хронологічний добуток.                                                                 | 2,75  | 0,5 | 0,25 | 2  |
| Тема 6.3. Діаграми Фейнмана для розсіювання електронів.                                          | 1,75  | 0,5 | 0,25 | 1  |

|                                                                      |      |     |      |     |
|----------------------------------------------------------------------|------|-----|------|-----|
| Тема 6.4. Діаграми Фейнмана для розсіювання фотонів.                 | 1,75 | 0,5 | 0,25 | 1   |
| Тема 6.5. Пропагатор для електрона та для фотона.                    | 1,75 | 0,5 | 0,25 | 1   |
| Тема 6.6. Загальні правила складання діаграм Фейнмана.               | 1,75 | 0,5 | 0,25 | 1   |
| Тема 6.7. Віртуальні частинки.                                       | 1,75 | 0,5 | 0,25 | 1   |
| Разом за розділом 6                                                  | 15   | 4   | 2    | 9   |
| Розділ 7. Взаємодія електронів з електронами та фотонами.            |      |     |      |     |
| Тема 7.1. Розсіювання електрона в зовнішньому полі.                  | 3,5  | 1   | 0,5  | 2   |
| Тема 7.2. Розсіювання електрона та позитрона на електроні.           | 3,5  | 1   | 0,5  | 2   |
| Тема 7.3. Розсіювання фотона на електроні. Поляризаційні ефекти.     | 2,75 | 0,5 | 0,25 | 2   |
| Тема 7.4. Двохфотонна анігіляція електронної пари.                   | 2,75 | 0,5 | 0,25 | 2   |
| Тема 7.5. Анігіляція позитронія.                                     | 3,5  | 1   | 0,5  | 2   |
| ДКР з розділів 6-7                                                   |      |     |      |     |
| Разом за розділом 7                                                  | 16   | 4   | 2    | 10  |
| Розділ 8. Радіаційні поправки.                                       |      |     |      |     |
| Тема 8.1. Розрахунок поляризаційного оператора.                      | 6,5  | 1,0 | 0,5  | 5   |
| Тема 8.2. Електромагнітний форм-фактор електрона.                    | 6,5  | 1,0 | 0,5  | 5   |
| Разом за розділом 8                                                  | 13   | 2   | 1    | 10  |
| Розділ 9. Електродинаміка адронів.                                   |      |     |      |     |
| Тема 9.1. Електромагнітний форм-фактор адрона.                       | 2,75 | 0,5 | 0,25 | 2   |
| Тема 9.2. Електрон-адронне розсіювання.                              | 2,75 | 0,5 | 0,25 | 2   |
| Тема 9.3. Низькоенергетична теорема для фотон-адронного розсіювання. | 2,75 | 0,5 | 0,25 | 2   |
| Тема 9.4. Мультипольний момент адронів.                              | 4,75 | 0,5 | 0,25 | 4   |
| ДКР з розділів 8-9                                                   |      |     |      |     |
| Разом за розділом 9                                                  | 13   | 2   | 1    | 10  |
| Підготовка до екзамену                                               | 13   |     |      | 13  |
| Всього за семестр:                                                   | 150  | 30  | 14   | 106 |
| Всього                                                               | 150  | 30  | 14   | 106 |

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова: [1–5]

Додаткова: [6–12]

1. De Bernardis D, Mercurio A, De Liberato S (2024) Tutorial on nonperturbative cavity quantum electrodynamics: is the Jaynes–Cummings model still relevant? J Opt Soc Am B 41:C206 . <https://doi.org/10.1364/JOSAB.522786>

2. Bøttcher CGL, Poniatowski NR, Grankin A, Wesson ME, Yan Z, Vool U, Galitski VM, Yacoby A (2024) Circuit quantum electrodynamics detection of induced two-fold anisotropic pairing in a hybrid superconductor–ferromagnet bilayer. Nat Phys. <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02613-x>
3. Loetzsch R, Beyer HF, Duval L, Spillmann U, Banaś D, Dergham P, Kröger FM, Glorius J, Grisenti RE, Guerra M, Gumberidze A, Heß R, Hillenbrand P-M, Indelicato P, Jagodzinski P, Lamour E, Lorentz B, Litvinov S, Litvinov YA, Machado J, Paul N, Paulus GG, Petridis N, Santos JP, Scheidel M, Sidhu RS, Steck M, Steydli S, Szary K, Trotsenko S, Uschmann I, Weber G, Stöhlker T, Trassinelli M (2024) Testing quantum electrodynamics in extreme fields using helium-like uranium. Nature 625:673–678 . <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06910-y>
4. Schuster P, Toro N (2024) Quantum electrodynamics mediated by a photon with continuous spin. Phys Rev D 109:096008 . <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.096008>
5. Sharma S, Dulski K, Moskal P (2024) Test for Non-Relativistic QED in decays of positronium atoms. EPJ Web Conf 291:03012 . <https://doi.org/10.1051/epjconf/202429103012>
6. Passante R (2020) New Trends in Quantum Electrodynamics. MDPI, Basel, Beijing, Wuhan, Barcelona, Belgrade, Manchester, Tokyo, Cluj, Tianjin
7. Akhiezer AI, Berestetskii VB (1965) Quantum electrodynamics. University of Rotchester, New York
8. Berestetskii VB, Lifshitz E., Pitaevskii LP (1961) Quantum electrodynamics. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sidney, Paris, Braunschweig
9. Biylynicki-Birula I, Biylynicki-Birula S (1975) Quantum electrodynamics. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney
10. Feynman RP (1961) Quantum electrodynamics. W.A. Benjamin, Inc., New York
11. Greiner W, Reinhardt J (1994) Quantum electrodynamics. Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg
12. Belyanin A, Kocharovskiy V V., Capasso F, Fry E, Zubairy MS, Scully MO (2006) Quantum electrodynamics of accelerated atoms in free space and in cavities. Phys Rev A 74:023807 . <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.023807>

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

#### *Лекційні заняття*

| №  | Назва теми лекції та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Розділ 1, тема 1.1, тема 1.2, тема 1.3.<br>Розділ 2, тема 2.1.<br>Лекція 1. Предмет та об'єкт досліджень квантової електродинаміки. Основні позначення. Принцип невизначеності в релятивістському випадку. Квантування вільного електромагнітного поля. Фотони.<br>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]                                                                                                                                          |
| 2. | Розділ 2, тема 2.2, тема 2.3, тема 2.4.<br>Розділ 3, тема 3.1, тема 3.2, тема 3.3, тема 3.4..<br>Лекція 2. Калібрувальна інваріантність. Момент кількості руху та парність фотона. Сферичні хвилі фотонів. Поляризація фотона. Хвильове рівняння для частинок зі спіном нуль. Частинки та античастинки. Істинно нейтральні частинки. CPT-перетворення. Хвильове рівняння для частинки зі спіном одиниця.<br>Література: базова [1-5], додаткова [6-12] |
| 3. | Розділ 4, тема 4.1, тема 4.2, тема 4.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | <p><i>Лекція 3. Чотиривимірні спінори. Рівняння Дірака в представленні спінорів. Алгебра матриць Дірака. Зв'язок спіна зі статистикою. Зарядове спряження та обернення часу для спінорів.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                  |
| 4.  | <p><i>Розділ 4, тема 4.4.</i></p> <p><i>Розділ 5, тема 5.1, тема 5.2, тема 5.3.</i></p> <p><i>Лекція 4. Матриця щільності поляризації. Нейтрино. Хвильове рівняння для частинок зі спіном 3/2. Рівняння Дірака для електрона в зовнішньому полі. Розклад в ряд по 1/c. Тонка структура рівнів атома водню.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p> |
| 5.  | <p><i>Розділ 5, тема 5.4, тема 5.5.</i></p> <p><i>Лекція 5. Рух в центральньо симетричному полі. Рух в кулонівському полі.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                                                 |
| 6.  | <p><i>Розділ 5, тема 5.6, тема 5.7.</i></p> <p><i>Лекція 6. Розсіювання в центральньо симетричному полі. Розсіювання в ультрарелятивістському випадку.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                     |
| 7.  | <p><i>Розділ 5, тема 5.8, тема 5.9.</i></p> <p><i>Лекція 7. Хвильові функції при розсіюванні в кулонівському полі. Електрон в полі плоскої електромагнітної хвилі.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                         |
| 8.  | <p><i>Розділ 5, тема 5.10, 5.11.</i></p> <p><i>Лекція 8. Рух частинки зі спіном в зовнішньому полі. Розсіювання нейтронів в зовнішньому полі.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                              |
| 9.  | <p><i>Розділ 5, тема 5.12, 5.13, тема 5.14, тема 5.15.</i></p> <p><i>Лекція 9. Оператор електромагнітної взаємодії. Випромінювання та поглинання. Дипольне випромінювання. Випромінювання атомів: ефекти Зеемана та Штарка. Фотоелектричний ефект.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                         |
| 10. | <p><i>Розділ 6, тема 6.1, тема 6.2, тема 6.3.</i></p> <p><i>Лекція 10. Матриця розсіювання. Хронологічний добуток. Діаграми Фейнмана для розсіювання електронів.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                           |
| 11. | <p><i>Розділ 6, тема 6.4, тема 6.5, тема 6.6, тема 6.7.</i></p> <p><i>Лекція 11. Діаграми Фейнмана для розсіювання фотонів. Пропагатор для електрона та для фотона. Загальні правила складання діаграм Фейнмана. Віртуальні частинки..</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                     |
| 12. | <p><i>Розділ 7, тема 7.1, тема 7.2.</i></p> <p><i>Лекція 12. Розсіювання електрона в зовнішньому полі. Розсіювання електрона та позитрона на електроні.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                    |
| 13. | <p><i>Розділ 7, тема 7.3, тема 7.4, тема 7.5.</i></p> <p><i>Лекція 13. Розсіювання фотона на електроні. Поляризаційні ефекти. Двохфотонна анігіляція електронної пари. Анігіляція позитронія.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                              |
| 14. | <p><i>Розділ 8, тема 8.1, тема 8.2.</i></p> <p><i>Розділ 9, тема 9.1, тема 9.2.</i></p> <p><i>Лекція 14. Розрахунок поляризаційного оператора. Електромагнітний форм-фактор електрона. Електромагнітний форм-фактор адрона. Електрон-адронне розсіювання.</i></p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                  |

|     |                                                                                                                                                                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15. | <p>Розділ 9, тема 9.3, тема 9.4.</p> <p>Лекція 15. Низькоенергетична теорема для фотон-адронного розсіювання.</p> <p>Мультипольний момент адронів.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p> |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### **Практичні заняття**

| №  | Назва теми практичного заняття та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | <p>Розділ 1, тема 1.1, тема 1.2, тема 1.3.</p> <p>Розділ 2, тема 2.1, тема 2.2, тема 2.3, тема 2.4.</p> <p>Розділ 3, тема 3.1.</p> <p>Практичне заняття 1. Предмет та об'єкт досліджень квантової електродинаміки. Основні позначення. Принцип невизначеності в релятивістському випадку. Квантування вільного електромагнітного поля. Фотони. Калібрувальна інваріантність. Момент кількості руху та парність фотона. Сферичні хвилі фотонів. Поляризація фотона. Хвильове рівняння для частинок зі спіном нуль.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p> |
| 2. | <p>Розділ 3, тема 3.2, тема 3.3, тема 3.4.</p> <p>Розділ 4, тема 4.1, тема 4.2, тема 4.3</p> <p>Практичне заняття 2. Частинки та античастинки. Істинно нейтральні частинки. СРТ-перетворення. Хвильове рівняння для частинки зі спіном одиниця. Чотиривимірні спінори. Рівняння Дірака в представленні спінорів. Алгебра матриць Дірака. Зв'язок спіна зі статистикою. Зарядове спряження та обернення часу для спінорів.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                         |
| 3. | <p>Розділ 4, тема 4.4.</p> <p>Розділ 5, тема 5.1, тема 5.2, тема 5.3.</p> <p>Практичне заняття 3. Матриця щільності поляризації. Нейтрино. Хвильове рівняння для частинок зі спіном 3/2. Рівняння Дірака для електрона в зовнішньому полі. Розклад в ряд по <math>1/c</math>. Тонка структура рівнів атома водню.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                                                                 |
| 4. | <p>Розділ 5, тема 5.4, тема 5.5, тема 5.6, тема 5.7, тема 5.8, тема 5.9, тема 5.10, 5.11.</p> <p>Практичне заняття 4. Рух в центральній симетричному полі. Рух в кулонівському полі. Розсіювання в центральній симетричному полі. Розсіювання в ультрарелятивістському випадку. Хвильові функції при розсіюванні в кулонівському полі. Електрон в полі плоскої електромагнітної хвилі. Рух частинки зі спіном в зовнішньому полі. Розсіювання нейтронів в зовнішньому полі.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                       |
| 5. | <p>Розділ 5, тема 5.12, 5.13, тема 5.14, тема 5.15.</p> <p>Практичне заняття 5. Оператор електромагнітної взаємодії. Випромінювання та поглинання. Дипольне випромінювання. Випромінювання атомів: ефекти Зеемана та Штарка. Фотоелектричний ефект.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 6. | <p>Розділ 6, тема 6.1, тема 6.2, тема 6.3, тема 6.4, тема 6.5, тема 6.6, тема 6.7.</p> <p>Практичне заняття 6. Матриця розсіювання. Хронологічний добуток. Діаграми Фейнмана для розсіювання електронів. Діаграми Фейнмана для розсіювання фотонів. Пропагатор для електрона та для фотона. Загальні правила складання діаграм Фейнмана. Віртуальні частинки.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p>                                                                                                                                                     |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. | <p>Розділ 7, тема 7.1, тема 7.2, тема 7.3, тема 7.4, тема 7.5.</p> <p>Розділ 8, тема 8.1, тема 8.2.</p> <p>Розділ 9, тема 9.1, тема 9.2, тема 9.3, тема 9.4.</p> <p>Практичне заняття 7. Розсіювання електрона в зовнішньому полі. Розсіювання електрона та позитрона на електроні. Розсіювання фотона на електроні.</p> <p>Поляризаційні ефекти. Двохфотонна анігіляція електронної пари. Анігіляція позитронія. Розрахунок поляризаційного оператора. Електромагнітний форм-фактор електрона. Електромагнітний форм-фактор адрона. Електрон-адронне розсіювання. Низькоенергетична теорема для фотон-адронного розсіювання.</p> <p>Мультипольний момент адронів.</p> <p>Література: базова [1-5], додаткова [6-12]</p> |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 6. Самостійна робота студента

Ціллю реферату є закріплення у студентів здібностей щодо самостійної роботи. Всього на самостійну роботу студентів відведено 66 годин.

Тематика індивідуальних завдань:

1. Предмет та об'єкт досліджень квантової електродинаміки. Основні позначення.
2. Принцип невизначеності в релятивістському випадку.
3. Калібрувальна інваріантність.
4. Момент кількості руху та парність фотона.
5. Сферичні хвилі фотонів.
6. Поляризація фотона.
7. Хвильове рівняння для частинок зі спіном нуль.
8. Частинки та античастинки. Істинно нейтральні частинки.
9. СРТ-перетворення.
10. Хвильове рівняння для частинки зі спіном одиниця.
11. Чотиривимірні спінори. Рівняння Дірака в представленні спінорів. Алгебра матриць Дірака.
12. Зв'язок спіна зі статистикою.
13. Зарядове спряження та обернення часу для спінорів.
14. Матриця щільності поляризації.
15. Нейтрино.
16. Хвильове рівняння для частинок зі спіном  $3/2$ .
17. Рівняння Дірака для електрона в зовнішньому полі. Розклад в ряд по  $1/c$ .
18. Тонка структура рівнів атома водню.
19. Рух в центральній симетричному полі.
20. Рух в кулонівському полі.
21. Розсіювання в центральній симетричному полі.
22. Розсіювання в ультрарелятивістському випадку.
23. Хвильові функції при розсіюванні в кулонівському полі.
24. Електрон в полі плоскої електромагнітної хвилі.
25. Рух частинки зі спіном в зовнішньому полі.
26. Розсіювання нейтронів в зовнішньому полі.
27. Оператор електромагнітної взаємодії.
28. Випромінювання та поглинання.
29. Дипольне випромінювання.
30. Випромінювання атомів: ефекти Зеемана та Штарка.
31. Фотоелектричний ефект.
32. Діаграми Фейнмана для розсіювання фотонів.
33. Пропагатор для електрона та для фотона.

34. Загальні правила складання діаграм Фейнмана.
35. Віртуальні частинки.
36. Розсіювання електрона в зовнішньому полі.
37. Розсіювання електрона та позитрона на електроні.
38. Розсіювання фотона на електроні.
39. Поляризаційні ефекти.
40. Двохфотонна анігіляція електронної пари.
41. Анігіляція позитронія.
42. Розрахунок поляризаційного оператора.
43. Електромагнітний форм-фактор електрона.
44. Електромагнітний форм-фактор адрона.
45. Електрон-адронне розсіювання.
46. Низькоенергетична теорема для фотон-адронного розсіювання.
47. Мультипольний момент адронів.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-університетського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила захисту індивідуальних завдань (тестування <https://classroom.google.com/c/NzEwMzI3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s> );
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 8 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-університетського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-університетського розпорядку);
- Студент зобов'язаний зареєструватися на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals (в минулому G Suit For Education) на домені @LLL.kpi.ua та приєднатися до Google Класу «Основи квантової електродинаміки» за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMzI3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s>. Для цього студенту необхідно спочатку отримати акаунт в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua. Для отримання акаунта в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua необхідно заповнити Google Форму: [https://sikorsky-distance.kpi.ua/req\\_gsuite/](https://sikorsky-distance.kpi.ua/req_gsuite/) . Після реєстрації та модерації заявки студента, адміністратор надішле студенту на пошту пароль та логін до акаунту, з яким студент зможе використовувати всі доступні інструменти та сервіси Google Workspace for Education Fundamentals. Google Workspace for Education Fundamentals – це пакет спеціалізованого хмарного програмного забезпечення, інструментів для спільної роботи та дистанційного навчання від компанії Google. Основна складова пакету – система управління навчанням Google Клас, яка дозволяє викладачу створювати навчальні класи, оцінювати завдання, надавати учням зворотній зв'язок, публікувати оголошення і поширювати навчальні матеріали. Викладач може бачити, хто виконав завдання, а хто ще продовжує над ним працювати, а також читати питання і коментарі учнів. Для приєднання до навчального курсу «Основи квантової електродинаміки» студенту потрібно перейти у Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com>, натиснути зображення «+» у верхньому правому кутку браузера, вибрати «Приєднатися до класу» та ввести код курсу pol6k3s. Акаунти студентів, які приєдналися до Google Класу не з

акаунта на домені @LLL.kpi.ua, будуть вилучатися з навчального курсу «Основи квантової електродинаміки» Google Класу тому, що автоматичний імпорт оцінок за тестування можливий виключно з акаунта на домені @LLL.kpi.ua. Система Google Клас автоматично надсилає кожному студенту бали по кожному з видів контролю на електронну пошту. Тому для ознайомлення з балами за кожен окремий вид контролю студенту необхідно змінити налаштування електронної пошти так, щоб ці електронні листи не потрапляли у спам. Всі виконані завдання для перевірки викладачем студент повинен завантажувати через систему Google Клас (результати виконання завдань, надіслані через телеграм канал перевірятися не будуть);

- Листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни.

## **8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)**

**Поточний контроль:** *тести*

**Календарний контроль:** *контроль виконання самостійної роботи проводиться двічі на семестр у формі тестів як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.*

*Семестрова атестація проводиться у вигляді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і університетська шкала.*

*Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни згідно з робочим навчальним планом.*

| Семестр | Навчальний час |            | Розподіл навчальних годин |                   |     | Контрольні заходи |
|---------|----------------|------------|---------------------------|-------------------|-----|-------------------|
|         | Кредити        | Акад. год. | Лекції                    | Практичні заняття | CPC | Семестр атест.    |
| 2       | 5              | 150        | 30                        | 14                | 106 | Екзамен           |

*Рейтинг студентів 2 курсу магістратури ФМФ з «Основ квантової електродинаміки» складається з балів, які вони отримують за:*

- 1) *практичні заняття*
- 2) *МКР*
- 3) *ДКР*
- 4) *CPC*
- 5) *додаткові бали за активність на практичних заняттях (10 балів максимум)*
- 6) *екзамен.*

*Система рейтингових балів та критерії оцінювання.*

*Студентам, які успішно виконують CPC (самостійна робота студентів), можуть нараховуватися за семестр максимум 50 балів. CPC полягає у самостійній роботі із вивчення лекційного матеріалу. Перевірка виконання CPC та вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях, а також ДКР та МКР здійснюватиметься оцінюванням результатів тестування на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua в системі Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMzI3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s>. Кожен з тестів можливо пройти тільки один раз. Рейтингові (вагові) бали занять і рейтингові оцінки по всіх видах контролю в Google Класі дорівнюють відповідним балам в Силабусі з коефіцієнтом 10 для зручності розрахунку балів (щоб не використовувати дробові числа). Відповідно перед кожною атестацією, а також в кінці семестру всі набрані студентом бали в Google Класі будуть ділитися на 10 і вноситись до системи АІС «Електронний кампус» КПІ імені Ігоря Сікорського.*

*Необхідною умовою допуску до екзамену з «Основ квантової електродинаміки» є задовільне виконання CPC, МКР, ДКР (не менше 20 балів).*

*Екзаменаційна робота з «Основ квантової електродинаміки» складається з 2 питань (2 теоретичних питання), кожне теоретичне питання максимально оцінюється в 25 балів. Всього 50 балів.*

*Критерії оцінювання (до екзамену):*

- Студент демонструє фрагментарні знання навчального матеріалу, не достатньо розуміючи зв'язок між окремими розділами програми, робить не достатньо обґрунтовані висновки (0-23 балів).
- Студент правильно відтворює навчальний матеріал, знає основоположні теорії і факти, вміє наводити окремі власні приклади на підтвердження певних думок (24-40 балів)
- Студент добре володіє вивченим матеріалом, застосовує знання в стандартних ситуаціях, вміє аналізувати і систематизувати інформацію, використовує загальновідомі докази із самостійною і правильною аргументацією (41-45 балів)
- Студент має гнучкі знання в межах вимог навчальної програми, аргументовано використовує їх в різних ситуаціях, уміє знаходити інформацію та аналізувати її, ставити і розв'язувати проблеми (46-50 балів)

Сума вагових балів контрольних заходів з «Основ квантової електродинаміки» протягом семестру складає:

**$R_C = 50$  балів.**

Екзаменаційна складова шкали  **$R_E = 50$  балів.**

Рейтингова шкала з «Основ квантової електродинаміки» складає  **$R_D = R_C + R_E = 100$  балів.**

Для виставлення оцінок до залікової книжки рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Студенти, які набрали протягом семестру стартовий рейтинг з дисципліни ( $r_C$ ) менше 0,4  $R_C = 20$  балів, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з «Основ квантової електродинаміки» і мають академічну заборгованість.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

| Кількість балів                            | Оцінка       |
|--------------------------------------------|--------------|
| 95-100                                     | Відмінно     |
| 85-94                                      | Дуже добре   |
| 75-84                                      | Добре        |
| 65-74                                      | Задовільно   |
| 60-64                                      | Достатньо    |
| Менше 60                                   | Незадовільно |
| Не виконані інші умови допуску до екзамену | Не допущено  |

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль наведено в тестах в системі дистанційного навчання Google Клас <https://classroom.google.com/c/NzEwMzl3MjExMjQ0?cjc=pol6k3s>;
- можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою не передбачена.

### Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, д.ф.-м.н., професором Горобець О.Ю.

Ухвалено кафедрою загальної фізики та моделювання фізичних процесів (протокол № 06-26 від 24.06.26).

Погоджено Методичною комісією Фізико-математичного факультету (протокол № 11 від 26.06.26).