

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**Інститут фізики НАН України**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директором Інституту фізики НАН  
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.



М.В. Бондар (підпис)

новоя 2021 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ДВА.03**

**Квантова і нелінійна оптика**

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня  
вищої освіти – доктор філософії

**Київ - 2021**

**Розробник:**

Головний науковий співробітник відділу теоретична фізика Інституту фізики НАНУ,  
доктор. фіз.-мат. наук. О.О. Чумак /О.О. Чумак/

**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Головою науково-методичної ради М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Робочу програму затверджено Вченою радою Інституту фізики НАНУ**

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Голова Вченої ради М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.**

Гарант освітньої програми М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:**

| навчальні роки<br>пролонгації | Голова Вченої ради ІФ<br>НАН України | підпис | № протоколу | дата протоколу |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------|-------------|----------------|
| 20____/20____                 |                                      |        |             |                |
| 20____/20____                 |                                      |        |             |                |
| 20____/20____                 |                                      |        |             |                |
| 20____/20____                 |                                      |        |             |                |

## 1. Загальні відомості

| Найменування показників                  | Характеристика дисципліни за денною формою навчання |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Вид дисципліни                           | вибіркова                                           |
| Мова викладання, навчання та оцінювання  | українська                                          |
| Загальний обсяг кредитів / годин         | 4/120                                               |
| Курс                                     | 2                                                   |
| Семестр                                  | 2                                                   |
| Кількість змістових модулів з розподілом | 1                                                   |
| Обсяг кредитів                           | 4                                                   |
| Обсяг годин,<br>В тому числі:            | 120                                                 |
| Лекції                                   | 30                                                  |
| Практичні заняття                        | 15                                                  |
| Самостійна робота                        | 75                                                  |
| Форма підсумкового контролю              | екзамен                                             |

## 2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № від 20 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

**Передумова вивчення.** Навчальний курс ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які вже знайомі з загальним курсом фізики оптики, твердого тіла, молекулярної фізики, термодинаміки та математичною фізикою.

**Мета навчальної дисципліни.** ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»: набуття вміння розв’язувати найпростіші задачі, що ілюструють теоретичний матеріал і сприяють розвитку у аспіранта самостійного мислення та ініціативності при проведенні власних досліджень.

**Зміст навчальної дисципліни.** Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика», набуття систематичних знань щодо квантового та квазікласичного опису електромагнітного випромінювання та розуміння принципової відмінності квантових вимірювань від класичних, ознайомлення з фізичними явищами в дворівневих системах та їх використанням в електричних колах для створення квантових кубітів різних типів.

**Предметом навчальної дисципліни** ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика» є викладання базових знань з області квантової та нелінійної оптики.

**Основними завданнями навчальної дисципліни** ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика» є формування фізичного мислення у аспірантів в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

### **Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)**

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

**Знати:** основні методи опису динаміки електромагнітного поля, зокрема використання рівняння Шредінгера для опису квантових електричних кіл та (б) можливі практичні застосування одержаних знань.

**Вміти:** аналізувати, проводити чи описувати конкретні теоретичні та експериментальні завдання в області квантової та нелінійної оптики

**Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП)** ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика» набути компетентності:

Загальні: ЗК1, ЗК2, ЗК3, ЗК4, ЗК5, ЗК6, ЗК7, ЗК8.

Фахові: ФК1, ФК2, ФК3, ФК6

### 3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

(2 курс – 2 семестр)

| № | Зміст                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Лекції,<br>год. | Практичні,<br>год. | Самостійна<br>робота, год. | Разом,<br>год. |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|----------------|
| 1 | <b>Тема 1.</b><br>Х. Гюйгенс та І. Ньютон — засновники хвильової та корпускулярної теорій світла. Експерименти, на яких базується сучасна теорія, рівняння Максвелла, хвильове рівняння для світлових хвиль у вакуумі.                                                                | 3               | 0                  | 7                          | 10             |
| 2 | <b>Тема 2.</b> Спектр і поляризація власних коливань у проміжку між плоско-паралельними металевими пластинами. Квантування поля у резонаторі. Фоківські стани або представлення чисел заповнення. Комутаційні співвідношення між полями. Теплове випромінювання [1].                  | 3               | 3                  | 7                          | 13             |
| 3 | <b>Тема 3.</b> Ефект Казимира – явище, зумовлене залежністю нульових коливань вакууму від граничних умов в обмежених системах; залежність енергії нульових коливань від відстані між паралельними металевими пластинами; фізичне пояснення та зв'язок із силою Ван-дер-Ваальса [1,9]. | 3               | 0                  | 8                          | 11             |
| 4 | <b>Тема 4.</b> Означення оператора густини фотонів у фазовому просторі; квазікласичність функції розподілу. Власні значення та власні функції операторів функцій розподілу та густини фотонів. Загальний розв'язок кінетичного рівняння для функції розподілу фотонів.                | 3               | 0                  | 7                          | 10             |
| 5 | <b>Тема 5.</b> Умови взаємності Стокса та квантовий опис проходження світла через світлоподільник. Однофотонні кореляції та деструктивна інтерференція. Вимірювання часових проміжків між двома однофотонними                                                                         | 3               | 3                  | 7                          | 13             |

|               |                                                                                                                                                                                                                                             |           |           |           |            |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|               | імпульсами інтерференційним методом.                                                                                                                                                                                                        |           |           |           |            |
| 6             | <b>Тема 6.</b> Взаємодія випромінювання з дворівневою системою. Надпровідні елементи в джозефсоновських контактах, принцип дії SQUIDa.                                                                                                      | 3         | 3         | 8         | 14         |
| 7             | <b>Тема 7.</b> Струмовий кубіт, сфера Блоха, еволюція квантового стану та можливість керування ним, змінюючи струм у колі. Зарядовий кубіт.                                                                                                 | 6         | 3         | 16        | 25         |
| 8             | <b>Тема8.</b> Кубіт, керований магнітним потоком через поверхню, обмежену надпровідними елементами електричного кола. Внесок окремих елементів кіл у гамільтоніан усієї системи. Необхідні технічні умови для роботи квантового комп'ютера. | 6         | 3         | 15        | 24         |
| <b>Всього</b> |                                                                                                                                                                                                                                             | <b>30</b> | <b>15</b> | <b>75</b> | <b>120</b> |

**Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:**

опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

#### **4. Зміст навчальної дисципліни**

ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

**Тема 1** (лекція 1).

Відомі з літератури експерименти, що свідчили як про хвильову природу світла, так і його корпускулярні властивості. Це зокрема явища дифракції та інтерференції, і водночас - існування тиску світла, поширення світла дискретними порціями, тобто квантами, комптонівське розсіяння. (Література 1,4-7)

**Тема 2** (лекція 2)

Квантування електромагнітного поля в щілині між двома металевими поверхнями та в одновимірному випадку. Власні значення та власні функції, оператори народження та знищення окремих квантів електромагнітного поля, фоківське представлення поля. Властивості рівноважного випромінювання. (Література 1,4-7)

**Тема 3** (лекція 3)

Модифікація нульових коливань вакуума в проміжку між тілами, зумовлена граничними умовами, є причиною взаємодії останніх (ефект Казимира). Він є не лише квантовим явищем, але ще й має релятивістську природу. Сила, зумовлена цим ефектом, має неадитивний характер.

**Тема 4.** (лекція 4)

Згідно з твердженням Ландау і Ліфшиця (див. 12) ансамбль фотонів можна характеризувати їх функцією розподілу у фазовому ( $r$ - $p$ ) просторі. Справедливість такого твердження забезпечується усередненням фотонного розподілу по невеликому об'єму фазового простору. Саме для такої (“загрубленої”) функції розподілу одержане **квазікласичне** кінетичне рівняння, знайдено його загальний розв'язок.

(Література 1, 9, 11)

**Тема 5** (лекція 5)

Якісна відмінність кореляцій невеликої кількості фотонів від відомих класичних виразів для багатофотонного випадку - яскраве свідчення квантової природи випромінювання. Особливо показовим є випадок деструктивної інтерференції інтенсивності. Саме цей ефект був використаний для вимірювання дуже малих відстаней між короткими однофотонними імпульсами.

(Література 1, 4-6)

**Тема 6** (лекція 6)

Можливість використання дворівневих систем для створення квантового комп'ютера привернула до них надзвичайну увагу учених. Після того, як замість “рідберговських” атомів були запропоновані дворівневі системи на основі джозефсонівських контактів, спостерігається швидкий прогрес у цьому напрямку. Досліджується ансамбль дворівневих систем, що взаємодіють з окремими квантами НВЧ випромінювання, які акумулюються у високодобротних резонаторах і об'єднують усі кубіти в єдину когерентну систему - квантовий комп'ютер. Протягом останніх років були подолані значні математичні і технічні труднощі, що надає впевненості в успішному завершенні проекту. І це буде не тільки конкурентноздатний комп'ютер, але на ньому ще й можна буде виконувати квантові симуляції фізичних процесів. Це дасть можливість глибше зрозуміти суть квантової механіки. Метою цієї і наступних лекцій є вивчення можливості керування станами кубітів і ознайомлення з методами захисту їх від шкідливого впливу шумів.

(Література 2-3 і додаткова).

**Тема 7** (лекції 7,8)

Використовуючи той факт, що в надпровідному стані в рівнянні Кірхгофа відсутні дисипативні члени, був побудований ефективний гамільтоніан, що описує квантове коло з дворівневою системою, зашунтованою ємністю. Струм, що надходить із зовнішнього джерела, дає можливість встановити оптимальний режим функціонування схеми а також можливість керування нею (струмовий кубіт). Описана найпростіша схема вимірювання (руйнівного типу) такого кубіта. Інший тип — зарядовий кубіт, в ідейному плані схожий на попередній, але джозефсонівський контакт створюється невеликим надпровідним островком, відділеним від масивного контакту. Тут керуючу функцію виконує прикладена різниця потенціалів між островком і “землею”, де основою є механізм “кулонівської блокади”.

(Література 1-3 і додаткова)

**Тема 8** (лекції 9,10)

Ще один тип керування кубітом використовується в схемі, що має назву “потоківий” кубіт. Зовнішній потік магнітної індукції через надпровідне кільце з джозефсонівським контактом впливає на параметри схеми і дає можливість змінювати робочу частоту. В усіх типах кубітів є практична можливість оптимального вибору робочої точки, де проникнення шумів з навколишнього простору в електричну схему є мінімальним. Останні призводять не лише до релаксації дворівневих систем, але й до явища дефазування, внаслідок якого втрата когерентності найбільш ймовірна. В лекціях пояснено, як систематичним чином можна одержати гамільтоніан складних систем, і таким чином записати рівняння Шредінгера для всього комп'ютера.

(Література 2-3 і додаткова)

## 5. Практичні заняття

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

## 6. Самостійна робота

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

| №                                     | Зміст самостійної роботи аспірантів                        | Обсяг, годин |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------|
| 1.                                    | Вивчення матеріалу лекції                                  | 30           |
| 2.                                    | Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення | 45           |
| <b>Усього за навчальну дисципліну</b> |                                                            | <b>75</b>    |

## 7. Методи викладання

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

## 8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

### Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.

Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою  $0,1R$ , де  $R$  – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

### Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

### Шкала відповідності оцінок

| Рейтингова оцінка | Значення оцінки | Рейтинг у відсотках, % |
|-------------------|-----------------|------------------------|
|-------------------|-----------------|------------------------|

|           |                                                                                                                                                                                             |        |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>A</b>  | <b>Відмінно</b> – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з, можливими незначними недоліками.                                                                        | 90-100 |
| <b>B</b>  | <b>Дуже добре</b> – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.                                                                   | 82-89  |
| <b>C</b>  | <b>Добре</b> – добрий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.                                                                                   | 75-81  |
| <b>D</b>  | <b>Задовільно</b> – посередній рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.         | 69-74  |
| <b>E</b>  | <b>Достатньо</b> - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу.                                                                                     | 60-100 |
| <b>FX</b> | Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання. | 35-59  |
| <b>F</b>  | Незадовільно з з обов’язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.                    | 1-34   |

## 9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

1. В чому принципова відмінність пояснень природи світла, запропонованих Гюйгенсом та Ньютоном?
2. Які експерименти підтверджують хвильові властивості світла?
3. Які експерименти вказали на квантові властивості світла?
4. Чи можна вважати світло у вакуумі ідеальним газом фотонів?
5. В чому принципова відмінність в описі оптичних явищ на основі хвильового рівняння чи рівняння для функції розподілу фотонів у фазовому просторі?
6. Що саме квантується в електромагнітному полі у вакуумі?
7. Змінне електромагнітне поле у вакуумі - поперечне чи поздовжнє? Як відповісти на це питання, використовуючи лише рівняння Максвелла?
8. Чому в загальному випадку перестановку операторів у добутку не можна робити? Яка фізична причина для цього?
9. Чому сила Казимира між двома плоско-паралельними пластинами є притягальною?
10. Чому два атоми з нульовими значеннями середніх дипольних моментів притягуються на великих відстанях?
11. Як ця сила залежить від відстані?
12. Чому функціональна залежність може змінитись на великих відстанях?
13. Сила Казимира - адитивна чи це колективний ефект різних середовищ?
14. Чи класичні вирази для кореляцій двох амплітуд відрізняються від класичних?
15. Чи класичні вирази для кореляцій інтенсивності?
16. Чому квантування магнітного потоку існує в шайбі і не існує в суцільному надпровідному середовищі?
17. Чи випромінює енергію джозефсонівський контакт? Якщо випромінює, то від чого залежить енергія квантів?
18. В чому суть руйнівного вимірювання стану кубіта?
19. Чи зміна кута (тета) означає зміну енергії дворівневої системи? А зміна кута (фі) ?
20. Що означає термін "кулонівська блокада" для зарядового кубіта?
21. Який параметр для струмового кубіта є керуючим, а який є керуючим для зарядового кубіта?

## 10.Рекомендована література:

з навчальної дисципліни ДВА.03 «Квантова і нелінійна оптика»

### Основна:

1. Олександр Чумак. Квантова оптика – Львів: СП “Євросвіт”, 2012 – 271 с.
2. <https://zfft.kpi.ua/images/Chumak/Part1ChumakLectures.pdf>
3. <https://zfft.kpi.ua/images/Chumak/Part2ChumakLectures.pdf>
4. Л. Мандель, Э. Вольф, “Оптическая когерентность и квантовая оптика“, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2000.
5. М.О. Скалли, М.С. Зубайри, “Квантовая оптика“, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2003.
6. W.P. Schleich “Quantum Optics in Phase Space”, WILEY-VCH, 2001.
7. D.F. Walls, G.J. Milburn, “Quantum Optics”, Springer, Berlin, 1994.
8. H. Louisell, “Radiation and Noise in Quantum Electronics”, Huntington, NY, 1977.
9. P.W. Milonni, “The Quantum Vacuum. An Introduction to Quantum Electrodynamics”, Academic Press, INC, 1994.
10. C.W. Gardiner, P. Zoller, “Quantum noise”, Springer, 2000.
11. H.B.G. Casimir, On the Attraction between Two Perfectly Conducting Plates, Proc. Kon. Nederl. Acad. Wet. 51, 793 (1948).
12. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц “Статистическая физика. Теория конденсированного состояния” т. 5, ч. 1., Москва, “Наука” , 1976.

### Додаткова:

1. P. W. Shor, Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring, Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundation of Computer Science, S. Goldwasser ed., p. 124, IEEE Press (1994).
2. P. W. Shor, Polynomial time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer, SIAM J. Comput. 26, 1484 (1997).
3. P. W. Shor, Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory, Phys. Rev. A52, 2493 (1995).
4. A. M. Steane, Error Correcting Codes in Quantum Theory, Phys. Rev. Lett. 77, 793 (1996).
5. B. D. Josephson, Possible new effects in superconductive tunnelling, Phys. Lett., 1, 251 (1962).
6. R. C. Jaklevic, John Lambe, A. H. Silver, and J. E. Mercier eau, Quantum interference effects in Josephson tunneling, Phys. Rev. Lett. 12, 159 (1964).
7. C. Hilbert and J. Clarke, DC SQUIDS as radiofrequency amplifiers, J. Low Temp. Phys., 61, 263 (1985).
8. J. M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, and K. M. Lang, and C. Urbina, Decoherence of a superconducting qubit due to bias noise, Phys. Rev. B67, 094510 (2003).
9. G. P. Berman, A. A. Chumak, and V. I. Tsifrinovich, Dynamics of a Phase Qubit-Resonator System: Requirements for Fast Nondemolition Readout of a Phase Qubit, J. Low Temp. Phys., 170, pp. 172-184 (2013).
10. M. Boissonneault, J. M. Gambetta, and A. Blais, Dispersive regime of circuit QED: Photon-dependent qubit dephasing and relaxation rates, Phys. Rev. A 79, 013819 (2009).
11. G. P. Berman, A. A. Chumak, Influence of External Fields and Environment on the Dynamics of Phase-Qubit-Resonator System, Phys. Rev. A 83, 042322
12. I.S.V. Yepes, M.R.R. Gesualdi, Dynamic digital holography for recording and reconstruction of 3D images using optoelectronic devices, J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Appl., (2017), Vol. 16, № 3, P. 801-815.