

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра квантової радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Перший проректор

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 р.

Програма навчальної дисципліни

**КВАНТОВА РАДІОФІЗИКА**

(назва навчальної дисципліни)

напря́м \_\_\_\_\_ **6.040204 – Прикладна фізика** \_\_\_\_\_  
(шифр, назва напряму)

спеціальність **8.04020402 Радіофізика і електроніка** \_\_\_\_\_  
(шифр, назва спеціальності)

факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

2015 / 2016 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Протокол від “ 21 ” червня 2016 року № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)

завідувач кафедри квантової радіофізики, д.ф.-м.н., професор Маслов Вячеслав Олександрович

Програму схвалено на засіданні кафедри квантової радіофізики

Протокол від “ 21 ” червня 2016 року № 8

Завідувач кафедри квантової радіофізики

\_\_\_\_\_ проф. Маслов В.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією  
факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Протокол від “ 16 ” червня 2016 року № 6

Голова методичної комісії факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

\_\_\_\_\_ (проф. Черногор Л. Ф.)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ КВАНТОВА РАДІОФІЗИКА” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки бакалавр  
(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності (напряму) 8.04020402 Радіофізика і електроніка

### 1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є забезпечення відповідним сучасним вимогам знань студентів про квантові властивості атомів, молекул, основи квантової теорії взаємодії випромінювання з речовиною.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є сформувані у студента сучасне представлення про фотонну структуру електромагнітного поля, про елементарні квантові акти однофотонної і баготофотонної взаємодії поля з речовиною і їхнім конкретним проявом при перетворенні, посиленні і генерації когерентного електромагнітного випромінювання.

Велику увагу в курсі приділено супутньому математичному опису зазначених процесів, особливо квантовим кінетичним рівнянням для матриці щільності і їхньому використанню для розрахунку основних характеристик квантових генераторів.

1.3. Кількість кредитів – 3

1.4. Загальна кількість годин – 108

| 1.5. Характеристика навчальної дисципліни |                                |
|---|--------------------------------|
|   | За вибором                     |
|   | Денна форма навчання           |
|   | Рік підготовки                 |
|   | 4-й                            |
|   | Семестр                        |
|   | 7-й                            |
|   | Лекції                         |
|   | 32 год.                        |
|   | Практичні, семінарські заняття |
|   | 16 год.                        |
|   | Лабораторні заняття            |
|   |                                |
|   | Самостійна робота              |
|   | 60 год.                        |
|   | Індивідуальні завдання         |
|   |                                |

### 1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

#### знати:

- квантові властивості атомів, молекул і йонів ;
- квантову теорію випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль речовиною;
- основні елементарні квантові процеси за участю фотонів;
- основні механізми розширення спектральних ліній;
- квантові кінетичні рівняння для матриці густини;
- різні методи створення інверсної населеності в середовищі;
- основні типи нелінійних і параметричних процесів при взаємодії поля із середовищем.

#### вміти:

- знаходити аналітичні рішення завдань квантової теорії вільного електромагнітного поля (хвильові функції, операторні розв'язання рівнянь Гейзенберга, імовірнісні розподіли, середні значення і дисперсії для різних величин поля);
- проводити розрахунки і робити чисельні оцінки величин імовірностей переходів для однофотонних і двофотонних процесів та їхніх залежностей від параметрів спектральних ліній;
- робити чисельні оцінки часів релаксації для різних середовищ;
- розв'язувати квантове кінетичне рівняння для матриці щільності двоурівневих електро- і магнітодипольних систем, взаємодіючих із класичним резонансним полем;
- знаходити аналітичне рішення та робити чисельні оцінки інверсії заселеностей коефіцієнта підсилення (поглинання) у двух-, трьох- і чотирьохрівневих середовищах.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### РОЗДІЛ 1. АТОМ ВОДНЮ І ВОДНЕПОДІБНІ АТОМИ.

#### Тема 1. Вступ.

Визначення предмета. Історична довідка. Застосування пристроїв квантової радіофізики. Перспективи. Структура курсу, його завдання.

#### Тема 2. Теорія атома Бора.

Зарядове число. Масове число. Ізотопи. Воднеподібний атом, його потенційна енергія. Модель атома Томсона. Досліди Резерфорда. Планетарна модель атома і проблема стійкості атомів. Постулати Бора. Момент імпульсу електрона. Умова квантування орбіт в теорії Бора. Радіуси стаціонарних орбіт в теорії Бора. Енергія, швидкість, частота електрона, що знаходиться на  $n$  борівської орбіті. Вплив маси ядра на характеристики електрона в моделі Бора. Спектральні серії переходів атома водню.

#### Тема 3. Квантовомеханічний опис воднеподібних атомів.

Стаціонарне рівняння Шредінгера. "Магнітне" рівняння Шредінгера. "Орбітальний" рівняння Шредінгера. "Радіальне" рівняння Шредінгера. Уровні енергії атома водню. Хвильові функції стаціонарних станів. Оператори кутового моменту. Оператори магнітного моменту та їх зв'язок з операторами кутового моменту. Спін. Оператори власного кутового і магнітного моменту. Атомні квантові числа. Невироджені і вироджені рівні енергії. Повний механічний момент одноелектронного атома. Повний магнітний момент одноелектронного атома.

#### Тема 4. Тонка і надтонка структура термів.

Тонка структура спектра одноелектронного атома. Енергія спин-орбітальної взаємодії. Облік релятивістської зв'язку імпульсу і кінетичної енергії електрона. Повна

поправка до енергії терма. Формула тонкої структури. Систематика станів атома водню. Надтонка структура рівнів енергії.

#### **Тема 5. Воднеподібні атоми й іони.**

Воднеподібні іони. Атоми лужних металів. Модель валентного електрона. Рідбергівські терми. Квантовий дефект. Гігантські (рідбергівські) атоми, молекули. Екситони.

### **РОЗДІЛ 2. АТОМИ С БАГАТЬМА ЕЛЕКТРОНАМИ.**

#### **Тема 1. Атом гелію.**

Принцип тотожності частинок. Обмінне виродження для атома гелію. Бозони і ферміони. Симетричні і несиметричні хвильові функції для атома гелію. Принцип Паулі (принцип заборони). Хвильові функції спина для атома гелію. Спін-орбіталі для атома гелію. Систематика енергетичних станів атома гелію. Енергія атома гелію.

#### **Тема 2. Багатоелектронні атоми.**

Одночасткове наближення. Оболочечная модель в багатоелектронних атомах. Еквівалентні електрони. Правила заповнення. Електронна конфігурація багатоелектронного атома. Повні моменти багатоелектронних атомів. Рассел-саундерівська і LS-зв'язок. Терми багатоелектронних атомів. Основні терми атома. Правила Гунда. Мультиплетність розщеплення. Правило інтервалів Ланде. Правила відбору.

### **РОЗДІЛ 3. СТАЦІОНАРНІ СТАНИ МОЛЕКУЛ.**

#### **Тема 1. Молекула водню. Електронні стани двохатомних молекул.**

Хімічна зв'язок в молекулах. Види руху в молекулах. Порядок величини електронної, коливальної і обертальної енергії. Адіабатичне наближення (Борна-Оппенгеймера) для молекул. Молекула водню (теорія Гайтлера-Лондона). Електронні стани двохатомних молекул. Параводород і ортоводород. Орбітальний момент. Спін. Повний момент. Енергія спін-орбітальної взаємодії. Молекулярні терми. Правила відбору.

#### **Тема 2. Коливання молекул.**

Лінійний гармонійний осцилятор. Ступені свободи молекул. Класифікація коливань по виду симетрії і формі. Класичне рішення коливальної задачі для багатоатомних молекул. Квантовомеханічний рішення коливальної задачі для багатоатомних молекул. Позначення коливальних станів в багатоатомних молекулах. Анггармонічність коливань.

#### **Тема 3. Обертальний рух жорсткої багатоатомної молекули.**

Загальна характеристика обертання молекул. Гамільтоніан жорсткого дзиги. Обертальна енергія жорсткої лінійної молекули. Обертальна енергія симетричного жорсткого дзиги. Обертальна енергія сферичного дзиги. Обертальна енергія асиметричного вовчка.

#### **Тема 4. Взаємодія внутрішніх видів руху молекули.**

Коліально-обертальний взаємодія.  $l$ - подвоєння в спектрах лінійних молекул. Електронно-коливально-обертальна взаємодія.  $\lambda$  - подвоєння в спектрах лінійних молекул. Інверсійний спектр молекули аміаку. Населеність коливально-обертальних станів для двохатомних молекул і для багатоатомних молекул.

### **РОЗДІЛ 4. ВЗАЄМОДІЯ ПОЛЯ З РЕЧОВИНОЮ.**

#### **Тема 1. Індуковане і спонтанне випромінювання. Вірогідність переходів**

Типи переходів між енергетичними станами. Властивості спонтанних переходів. Властивості індукованих переходів. Властивості безвипромінювальних переходів. Умови теплової рівноваги для квантових переходів. Постулат Ейнштейна Невзаємодіюча (взаємодіюча) система. Перше наближення теорії збурень. Дипольне взаємодія частинки з

перемінним електромагнітним полем. Повна ймовірність переходу в поле теплового випромінювання. Ймовірність переходу в одиницю часу

#### **Тема 2. Форма і ширина спектральної лінії.**

Природна ширина спектральної лінії. Релаксаційні безвипромінювальні переходи. Часи релаксації. Однорідне і неоднорідне ушпиреніє. Допплерівське ушпиреніє. Профіль Фойгта.

#### **Тема 3. Поглинання і посилення випромінювання в середовищі. Ефект насичення.**

Поглинання випромінювання в рівноважній середовищі. Коефіцієнт поглинання слабого сигналу. Перетин поглинання. Про можливості посилення випромінювання. Інверсія. Негативна температура. Коефіцієнт посилення. Ефект насичення в режимі поглинання.

#### **Тема 4. Матриця густини.**

Чисті та змішані стани. Загальне рівняння для матриці густини. Рівняння руху матриці густини. Деякі властивості матриці густини. Когерентність станів. Облік релаксаційних явищ. Матриця густини і сприйнятливості речовини.

### **3. Структура навчальної дисципліни**

| Назви розділів і тем  | Кількість годин |              |          |      |       |           |
|---|-----------------|--------------|----------|------|-------|-----------|
|   | денна форма     |              |          |      |       |           |
|   | усього          | у тому числі |          |      |       |           |
| л   |                 | п            | лаб.     | інд. | с. р. |           |
| 1   | 2               | 3            | 4        | 5    | 6     | 7         |
| <b>Розділ 1. Атом водню і воднеподібні атоми</b>              |                 |              |          |      |       |           |
| Тема 1. Вступ.  | 1               | 1            |          |      |       |           |
| Тема 2. Теорія атома Бора.                                    | 4               | 2            | 2        |      |       |           |
| Тема 3. Квантовомеханічний опис воднеподібних атомів.         | 7               | 5            | 2        |      |       |           |
| Тема 4. Тонка і надтонка структура термів.                    | 4               | 2            | 2        |      |       |           |
| Тема 5. Воднеподібні атоми й іони.                            | 14              | 2            |          |      |       | 12        |
| Разом за розділом 1   | <b>30</b>       | <b>12</b>    | <b>6</b> |      |       | <b>12</b> |
| <b>Розділ 2. Атоми с багатьма електронами</b>                 |                 |              |          |      |       |           |
| Тема 1. Атом гелію.   | 2               | 2            |          |      |       |           |
| Тема 2. Багатоелектронні атоми.                               | 16              | 2            | 2        |      |       | 12        |
| Разом за розділом 2   | <b>18</b>       | <b>4</b>     | <b>2</b> |      |       | <b>12</b> |
| <b>Розділ 3. Стаціонарні стани молекул</b>                    |                 |              |          |      |       |           |
| Тема 1. Молекула водню. Електронні стани двохатомних молекул. | 2               | 2            |          |      |       |           |
| Тема 2. Коливання молекул.                                    | 4               | 2            | 2        |      |       |           |
| Тема 3. Обертальний рух жорсткої багатоатомної молекули.      | 4               | 2            | 2        |      |       |           |

|  |            |           |           |  |  |           |
|--|------------|-----------|-----------|--|--|-----------|
| Тема 4. Взаємодія внутрішніх видів руху молекули.                            | 14         | 2         |           |  |  | 12        |
| Разом за розділом 3  | <b>24</b>  | <b>8</b>  | <b>4</b>  |  |  | <b>12</b> |
| <b>Розділ 4. Взаємодія поля з речовиною</b>                                  |            |           |           |  |  |           |
| Тема 1. Індуковане і спонтанне випромінювання. Вірогідність переходів        | 15         | 2         | 1         |  |  | 12        |
| Тема 2. Форма і ширина спектральної лінії                                    | 3          | 2         | 1         |  |  |           |
| Тема 3. Поглинання і посилення випромінювання в середовищі. Ефект насичення. | 4          | 2         | 2         |  |  |           |
| Тема 4. Матриця густини.   | 14         | 2         |           |  |  | 12        |
| Разом за розділом 4  | <b>36</b>  | <b>8</b>  | <b>4</b>  |  |  | <b>12</b> |
| <b>Усього годин</b>  | <b>108</b> | <b>32</b> | <b>16</b> |  |  | <b>60</b> |

#### 4. Темі практичних занять

| № з/п | Назва теми   | Кількість годин |
|-------|--|-----------------|
| 1     | Боровська теорія атома   | 2               |
| 2     | Елементи квантово-механічної теорії атома водню  | 2               |
| 3     | Обчислення поправок до рівнів енергії воднеподібного атома                                 | 2               |
| 4     | Тонка і надтонка структура рівнів енергії  | 2               |
| 5     | Терми багатоелектронних атомів   | 2               |
| 6     | Молекулярні рівні енергії. Коливальний рух. Обертальна енергія молекул. Населеність рівнів | 2               |
| 7     | Взаємодія поля з квантовою системою. Ширина спектральних ліній.                            | 2               |
| 8     | Поглинання і посилення випромінювання квантовою системою. Ефект насичення.                 | 2               |
|       | Разом  | <b>16</b>       |

#### 5. Завдання для самостійної роботи

| № з/п | Види, зміст самостійної роботи                                       | Кількість годин |
|-------|--|-----------------|
| 1     | Спектроскопія атомів в рідбергівських станах.                        | 12              |
| 2     | Атоми з незаповненими внутрішніми оболонками                         | 12              |
| 3     | Електронні, ковальні та обертальні стани молекул                     | 12              |
| 4     | Радіаційні переходи  | 12              |
| 5     | Розрахунок поляризації активного середовища методом матриці густини. | 12              |
|       | Разом  | <b>60</b>       |

## 6. Індивідуальні завдання

Індивідуальних завдань не заплановано.

## 7. Методи контролю

Після вивчення двох розділів курсу проводиться письмова контрольна робота, яка оцінюється в відповідних балах.

## 8. Схема нарахування балів

| Поточний контроль та самостійна робота |    |    |    |    |          |    |           |    |    |    |           |    |    | Залікова робота | Сума   |           |           |            |
|--|----|----|----|----|----------|----|-----------|----|----|----|-----------|----|----|-----------------|--|-----------|-----------|------------|
| Розділ 1                               |    |    |    |    | Розділ 2 |    | Розділ 3  |    |    |    | Розділ 4  |    |    |                 | Контрольна робота, передбачена навчальним планом | Разом     |           |            |
| T1                                     | T2 | T3 | T4 | T5 | T1       | T2 | T1        | T2 | T3 | T4 | T1        | T2 | T3 | T4              |  |           |           |            |
| 2                                      | 2  | 3  | 2  | 2  | 4        | 3  | 3         | 2  | 3  | 3  | 2         | 3  | 3  | 3               |  |           |           |            |
| <b>11</b>                              |    |    |    |    | <b>7</b> |    | <b>11</b> |    |    |    | <b>11</b> |    |    |                 | <b>10</b>  | <b>50</b> | <b>50</b> | <b>100</b> |

## 9. Рекомендована література

1. Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Перепечай М.П., Тютюнник В.Б. Квантовая радиофизика: Методические указания и задания к практическим занятиям. – Харьков: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2006. – 44 с.

### Основна література

1. А.Н.Матвеев. Атомная физика. М. Оникс. 2007.
2. Н.В.Карлов, Н.А.Кириченко. Начальные главы квантовой механики. М. Физматлит. 2004.
3. Л.Л.Гольдин, Г.И.Новикова. Введение в квантовую физику. М. Наука. 2002 .
4. М.А.Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия. М. Эдиториал УРСС. 2001.
5. Э.В.Шпольский. Атомная физика. М. Наука. в 2 томах.1984
6. А.Соколов, И.Тернов. Квантовая механика и атомная физика. М. Просвещение.1970.
7. Б.М.Смирнов. Физика атома и иона. М. Энергоатомиздат. 1986.
8. С.Ф.Дюбко. Квантовая радиофизика. Курс лекций для радиофиз. ф-та ХНУ. Електр.версія. 2002г .260 с.
9. Н.В.Карлов. Лекции по квантовой электронике: Учебное пособие. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
10. Д.Н.Клышко. Физические основы квантовой электроники. – М.: Наука, 1986. – 296 с

### Допоміжна література

1. И.И.Кондиленко, П.А.Коротков. Введение в атомную спектроскопию. К. Вища школа. 1978.



2. А.Зоммерфельд. Строение атома и спектры. М. 1956.
3. Г. Бете и Э.Солпитер. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. М. 1960.
4. Л.В.Тарасов. Физические основы квантовой электроники. М. Либроком. 2010.
5. Физические основы квантовой радиофизики. Под ред. П.М.Бородина, Л.Н.Лабзовского. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. – 320 с.
6. Григорук В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика: Підруч. – К.: 1999. – 528 с.
7. В.М.Файн, Я.И Ханин. Квантовая радиофизика. – М., Сов.Радио, 1965, тт. 1, 2.
8. В.М.Файн. Квантовая радиофизика. – М., Сов.Радио, 1972.
9. Бете и Солпитер. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами.М.1960.
10. Г.Герцберг. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул.М.,ИИЛ, 1949г.
11. У.Флайгер. Строение и динамика молекул.Том 1 и 2.Мир.1982г.
12. С.Г.Зейгер и др. Волновые и флуктуационные процессы в лазерах.М. Наука, 1974г.

#### **10. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

1. Энциклопедия лазерной техники и технологии  
<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
2. Библиотека книг по лазерам  
<http://gen.lib.rus.ec/>