

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор  
з науково-педагогічної роботи

Пантелеймонов А. В.

«    »



Робоча програма навчальної дисципліни

Квантова механіка

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти бакалавр

галузь знань 10 Природничі науки  
(шифр і назва)

Спеціальність/напрямок підготовки 104 – Фізика та астрономія /  
(шифр і назва)

освітня програма “Фізика”  
(шифр і назва)

спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

вид дисципліни обов’язкова  
(обов’язкова / за вибором)

факультет фізичний

2019 / 2020 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою факультету (інституту, центру)

“ 21 ” 06 2019 року, протокол № 6

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

**Ямпольський Валерій Олександрович, д. фіз-мат. н., професор кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця**  
**Єзерська Олена Володимирівна, к.фіз.-мат.н., доцент кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця**

Програму схвалено на засіданні кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

Протокол від “ 10 ” 06 2019 року № 9

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

(підпис)

Рапба Г.І.  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 20 ” 06 2019 року № 6

Голова методичної комісії фізичного факультету

(підпис)

Макаровський М.О.  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Квантова механіка**” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки першого рівню вищої освіти – бакалавр,

спеціальності 104 – фізика та астрономія  
освітня програма – фізика

### 1. Опис навчальної дисципліни

#### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Квантова механіка» є надання студентам уявлень про принципи і методи нерелятивістської квантової теорії, точні та наближені методи розв’язання рівняння Шредінгера.

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни «Квантова механіка» навчити студентів

- досліджувати енергетичні спектри простих квантових систем, як за допомогою точного вирішення рівняння Шредінгера, так і наближеними методами,
- досліджувати еволюцію квантово-механічних систем за допомогою вирішення нестационарного хвильового рівняння,
- аналізувати динаміку спінових систем в магнітному полі,
- обчислювати атомні терми,
- володіти технікою вторинного квантування,
- використовувати квантові правила відбору для знаходження спектрів випромінювання та поглинання атомних систем,
- користуючись навчальною та довідковою літературою, обирати адекватні методи вирішення задач квантової механіки.

#### 1.3. Кількість кредитів 7.

#### 1.4. Загальна кількість годин 210.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
денна форма навчання	
Нормативна	
Рік підготовки	
3-й	4-й
Семестри	
6-й	7-й
Лекції	
32 год.	32 год.
Практичні, семінарські	
16 год.	32 год.
Лабораторні	
немає	
Самостійна робота	
42 год.	56 год.
В тому числі 10 год. на 1 індивідуальне розрахунково-графічне завдання	В тому числі 10 год. на 1 індивідуальне розрахунково-графічне завдання

### 1.6. Заплановані результати навчання

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

Знати, розуміти та бути здатним застосовувати на базовому рівні квантово-механічні методи, аналізу, тлумачення, пояснення і класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів, які відбуваються у мікроскопічних системах, з метою розв'язування типових фізичних задач.

Бути здатним застосовувати базові математичні знання з нерелятивістської квантової механіки, розв'язувати рівняння Шредінгера точними та наближеними методами, володіти методами квантової теорії, вільно користуватись ними при розрахунках характеристик мікросистем з метою отримання фізичних характеристик. На основі відомих властивостей хвильової функції та енергетичного спектру вміти розраховувати фізичні характеристики квантових систем.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни 6-й семестр

### Розділ 1. ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РІВНЯННЯ ШРЕДІНГЕРА.

Тема 1. Явища, що вимагають квантово-механічний опис. Хвильові властивості частинок. Гіпотеза Де-Бройля.

Тема 2. Принцип додатковості. Хвильова функція. Статистична інтерпретація хвильової функції.

Тема 3. Принцип суперпозиції. Розклад хвильової функції по плоским хвилям.

Тема 4. Співвідношення невизначеності. Принцип відповідності. Принцип причинності у квантовій механіці.

Тема 5. Хвильове рівняння Шредінгера. Густина потоку ймовірності.

Тема 6. Частинка у одновимірній прямокутній потенціальній ямі. Одновимірний осцилятор. Сингулярні потенціали.

Тема 7. Відбиття та проходження крізь потенційний бар'єр.

## **Розділ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РУХ У ЦЕНТРАЛЬНО-СИМЕТРИЧНОМУ ПОЛІ.**

Тема 8. Лінійні оператори. Власні вектори та власні значення операторів. Ермітові оператори. Ортогональність та нормування власних векторів ермітових операторів.

Тема 9. Квантово-механічні величини та оператори. Гільбертів простір хвильових функцій.

Тема 10. Хвильова функція та ймовірність результатів вимірювання. Середні значення фізичних величин.

Тема 11. Комутація операторів. Нерівність Гейзенберга. Дужки Пуасона у квантовій механіці.

Тема 12. Оператори та власні функції координати та імпульсу. Оператор Гамільтона. Стационарні стани.

Тема 13. Бра- та кет-вектори. Теорія представлень. Перехід до імпульсного представлення. Рівноприскорений рух. Вігнерівська функція розподілу.

Тема 14. Оператори, власні значення та власні функції механічного моменту та квадрату моменту. Парність станів.

Тема 15. Диференціювання операторів за часом. Інтеграли руху. Повний набір фізичних величин.

Тема 16. Співвідношення невизначеності для часу та енергії.

Тема 17. Хвильова функція частинки у центральній-симетричному полі. Розділення змінних у рівнянні Шредінгера.

Тема 18. Рух у кулоновому полі. Випадкове виродження.

Тема 19. Матрична форма квантової механіки. Власні функції та власні значення операторів, що задані у матричній формі. Знаходження спектру гармонічного осцилятора матричним методом.

Тема 20. Представлення Шредінгера та Гейзенберга.

### **7-й семестр**

## **Розділ 3. НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ У КВАНТОВІЙ МЕХАНІЦІ.**

Тема 21. Квазікласичне наближення. Граничний перехід до класичної механіки.

Тема 22. Рух у потенційній ямі у квазікласичному наближенні. Правила квантування Бора-Зомерфельда.

Тема 23. Проходження крізь потенційний бар'єр. Тунельний ефект. Польова емісія. Альфа-розпад. Синтез легких ядер.

Тема 24. Теорія збурень, що не залежать від часу. Теорія збурень у системах з виродженням.

Тема 25. Теорія нестационарних збурень. Перехід систем в новий стационарний стан завдяки збуренням.

## **Розділ 4. СПІН ТА ТОТОЖНІСТЬ ЧАСТИНОК. ЕЛЕКТРОННА СТРУКТУРА АТОМІВ. РУХ В ОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ. ТЕОРІЯ ПРУЖНОГО РОЗСПЮВАННЯ.**

Тема 26. Спін елементарних частинок. Оператори спіну. Власні функції та власні значення операторів спіну.

Тема 27. Повний механічний момент. Додавання моментів.

Тема 28. Рівняння Паулі. Спіновий магнітний момент.

Тема 29. Принцип тотожності частинок. Симетричні та антисиметричні стани. Хвильові функції систем бозонів та ферміонів. Принцип Паулі. Наслідки принципу Паулі: вироджений електронний газ, атомне ядро, білі карлики, нейтронні зірки.

Тема 30. Хвильова функція двохчастинкової системи. Обмінна взаємодія.

Тема 31. Хвильова функція багато електронного атома. Метод Хартрі-Фока.

Тема 32. Статистична модель атома.

Тема 33. Тонка структура атомів. Атомні терми.

Тема 34. Періодична система елементів.

Тема 35. Ефекти Зеемана та Пашена-Бака. Діа- та парамагнетизм атомів.

Тема 36. Ефект Штарка.

Тема 37. Енергетичний спектр та хвильова функція електрона у постійному однорідному магнітному полі. Рівні Ландау.

Тема 38. Двовимірний електронний газ. Графени. Квантовий ефект Холла.

Тема 39. Амплітуда та переріз розсіювання. Функція Гріна задачі розсіювання.

Тема 40. Борнівське наближення.

Тема 41. Розсіювання у кулонівському полі. Формула Резерфорда.

### **Розділ 5. МЕТОД ВТОРИННОГО КВАНТУВАННЯ. ВЗАЄМОДІЯ СВІТЛА З РЕЧОВИНОЮ. РЕЛЯТИВІСТСЬКА КВАНТОВА МЕХАНІКА.**

Тема 42. Метод факторизації. Оператори народження та знищення.

Тема 43. Вторинне квантування систем бозонів та ферміонів.

Тема 44. Квантування поля випромінювання.

Тема 45. Когерентні стани електромагнітного поля.

Тема 46. Взаємодія випромінювання з електроном.

Тема 47. Поглинання та випромінювання світла. Дипольні переходи в атомних системах. Правила відбору.

Тема 48. Розсіювання світла атомами.

Тема 49. Ефекти Ааронова-Бома та Казимира.

Тема 50. Хвильове релятивістське рівняння Клейна-Гордона-Фока.

Тема 51. Рівняння Дірака. Розв'язок рівняння Дірака для вільної частинки. Уявлення про позитрон.

Тема 52. Спін частинки у теорії Дірака. Перехід до напівкласичного рівняння Паулі.

## 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>6 семестр</b>						
<b>Розділ 1. ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РІВНЯННЯ ШРЕДІНГЕРА</b>						
Тема 1	3	1				2
Тема 2	3	1				2
Тема 3	3	1				2
Тема 4	3	1				2
Тема 5	5	2	1		1	1
Тема 6	6	2	1		2	1
Тема 7	6	2	1		2	1
Разом за розділом 1	29	10	3		5	11
<b>Розділ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РУХ У ЦЕНТРАЛЬНО-СИМЕТРИЧНОМУ ПОЛІ</b>						
Тема 8	5	2	1			2
Тема 9	5	2	1			2
Тема 10	5	2	1		1	1
Тема 11	5	2	1			2
Тема 12	5	2	1		1	1
Тема 13	4	1	1		1	1
Тема 14	4	1	1			2
Тема 15	5	2	1		1	1
Тема 16	5	2	1			2
Тема 17	5	2	1		1	1
Тема 18	5	2	1			2
Тема 19	4	1	1			2
Тема 20	4	1	1			2
Разом за розділом 2	61	22	13		5	21
<b>Разом за 6-й семестр</b>	<b>90</b>	<b>32</b>	<b>16</b>		<b>10</b>	<b>32</b>
<b>Залік</b>						
<b>7 семестр</b>						
<b>Розділ 3. НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ У КВАНТОВІЙ МЕХАНІЦІ</b>						
Тема 21	6	1	3		1	1
Тема 22	6	1	3		1	1
Тема 23	6	1	3		1	1
Тема 24	6	1	3		1	1
Тема 25	7	1	4		1	1
Разом за розділом 3	31	5	16		5	5

<b>Розділ 4 СПІН ТА ТОТОЖНІСТЬ ЧАСТИНОК. ЕЛЕКТРОННА СТРУКТУРА АТОМІВ. РУХ В ОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ. ТЕОРІЯ ПРУЖНОГО РОЗСИЮВАННЯ</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Тема 26	4	1	2			1
Тема 27	4	1	2			1
Тема 28	2	1				1
Тема 29	4	1	2			1
Тема 30	5	1	2		1	1
Тема 31	3	1				2
Тема 32	2	1				1
Тема 33	2	1				1
Тема 34	2	1				1
Тема 35	2	1				1
Тема 36	3	1				2
Тема 37	3	1			1	1
Тема 38	3	1				2
Тема 39	3	1			1	1
Тема 40	3	1			1	1
Тема 41	3	1				2
Разом за розділом 4	48	16	8		4	20
<b>Розділ 5. МЕТОД ВТОРИННОГО КВАНТУВАННЯ. ВЗАЄМОДІЯ СВІТЛА З РЕЧОВИНОЮ. РЕЛЯТИВІСТСЬКА КВАНТОВА МЕХАНІКА</b>						
Тема 42	5	1	2		1	1
Тема 43	5	1	2			2
Тема 44	3	1				2
Тема 45	3	1				2
Тема 46	3	1				2
Тема 47	3	1				2
Тема 48	3	1				2
Тема 49	3	1				2
Тема 50	5	1	2			2
Тема 51	5	1	2			2
Тема 52	3	1				2
Разом за розділом 5	41	11	8		1	21
<b>Разом за 7-й семестр</b>	<b>120</b>	<b>32</b>	<b>32</b>		<b>10</b>	<b>46</b>
<b>Екзамен</b>						
<b>Усього годин</b>	<b>210</b>	<b>64</b>	<b>48</b>		<b>20</b>	<b>78</b>

#### 4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	2	3
1.	Математичний апарат квантової механіки. Лінійний простір. Приклади лінійних просторів. Лінійні оператори. Властивості лінійних операторів.	2



1	2	3
2.	Ермітові оператори, унітарні оператори. Властивості власних функцій та власних значень ермітових операторів. Унітарне перетворення. Розв'язання рівняння на власні функції та власні значення для типових операторів квантової механіки. Комутатори.	2
3.	Функції від операторів. Елементи теорії зображень. Перехід від координатного до імпульсного представлення. Властивості матриць Паулі.	2
4.	Одновимірний рух. Стани дискретного спектру. Розв'язання рівняння Шредінгера для потенціалів з локальними особливостями (прямокутна нескінченно глибока яма, прямокутна яма кінцевої глибини, дельта-яма та ін.)	2
5.	Одновимірний рух. Проходження через потенціальний бар'єр. Знаходження коефіцієнтів проходження та відбиття для різних бар'єрів.	3
6.	Застосування методу трансфер-матриці для знаходження рішень рівняння Шредінгера для одновимірних потенціалів з локальними особливостями.	3
7.	Матрична форма квантової механіки. Властивості матричних елементів ермітових і унітарних операторів. Знаходження власних функцій і власних значень операторів, що задані в матричній формі. Матричні елементи операторів координати та імпульсу для одновимірного гармонічного осцилятора. Спектр осцилятора.	2
8.	Оператор механічного моменту. «Сходінкові» оператори. Комутаційні співвідношення, власні функції та власні значення $\hat{L}_z$ , $\hat{L}^2$ . Обчислення середніх і середніх квадратичних значень проєкцій механічного моменту для станів з певним значенням магнітного квантового числа та для станів з певними значеннями орбітального та магнітного квантового числа.	4
9.	Рух в центральному полі. Плоский та просторовий ротатори. Сферична прямокутна яма кінцевої глибини. Воднеподібний атом.	4
10.	Стационарна теорія збурень для невідроджених рівнів.	4
11.	Стационарна теорія збурень для відроджених станів.	4
12.	Нестационарна теорія збурень. Ймовірність переходу в новий стан.	4
13.	Квазікласичне наближення. Правила квантування Бора-Зомерфельда. Знаходження рівнів енергії в квазікласичному наближенні.	4
14.	Квазікласичне наближення. Знаходження коефіцієнта проходження через потенціальний бар'єр в квазікласичному наближенні.	4
15.	Властивості оператора спіну $s = \frac{1}{2}$ .	4
	<b>Разом</b>	<b>48</b>

Плани всіх практичних занять та домашні завдання є в електронному вигляді на сайті кафедри за посиланням

[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_study\\_ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_study_ukr.html)

### 5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	2	3
1	Знайти у літературі опис явищ, що вимагають квантово-механічний опис. Оцінка довжин де-Бройля для мікро- та макро-частинок.	2
2	Самостійно, користуючись підручниками та Інтернет джерелами прочитати про дискусію Н.Бора та А.Ейнштейна про основи квантової механіки, зокрема статистичну трактовку хвильової функції, про уявний експеримент Шредінгера.	2
3	Знайти в літературних джерелах різні формулювання принципу принцип суперпозиції. Розглянути застосування принципу суперпозиції в квантовій механіці на прикладі хвильових пакетів. Для одновимірного хвильового пакету знайти вигляд хвильової функції у лінійному наближенні. Провести моделювання точного рішення із «розпливанням» хвильового пакету за допомогою будь-якого пакету символічної математики (Maple, Mathematica тощо)	2
4	Провести оцінки співвідношення невизначеності для мікро та макрочастинок. Знайти приклади «роботи» принципу відповідності. Чим принцип причинності в квантовій механіці відрізняється від аналогічного принципу в класичній механіці?	2
5	Записати стаціонарне рівняння Шредінгера для модельних задач. Провести обчислення середніх значень оператора координати для модельних задач. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
6	Навчитися аналізувати принципові особливості енергетичного спектру частинки, яка рухається в полі різних потенціальних енергій з фінітним рухом (тобто у потенціальних ямах) у координатному зображенні. В тому числі <u>2 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	3
7	Самостійно провести розв'язок задачі про відбиття та проходження частинок крізь одновимірні потенційні бар'єри найпростіших форм (прямокутний несиметричний бар'єр, дельта-бар'єр). В тому числі <u>2 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	3
8	Знайти та записати якомога більше прикладів лінійних операторів, ермітових операторів. Самостійно провести доказ особливостей власних функцій та власних значень ермітових операторів	2
9	Самостійно обґрунтувати, чому квантово-механічним величинам ставляться у відповідність саме ермітові оператори.	2
10	Хвильова функція та ймовірність результатів вимірювання. Самостійно провести доказ формули для обчислення середніх значень фізичних величин, користуючись відомою формулою з теорії імовірності. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
11	Самостійно повторити доказ теорем про зв'язок комутатора двох операторів з можливістю чи неможливістю одночасного вимірювання двох фізичних величин.	2
12	Розрахувати самостійно ядра операторів координати, імпульсу, оператора Гамільтона для частинки у зовнішньому полі у	2

	координатному та в імпульсному зображенні. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	
13	Записати Рівняння Шредінгера за допомогою бра- та кет-векторів безвідносно до зображення. Знайти вигляд стаціонарного рівняння Шредінгера в імпульсному зображенні та приклади потенціалів, для яких рішення в імпульсному зображенні є більш простим, ніж в координатному зображенні. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
14	Розрахувати всі комутаційні співвідношення для операторів координати, імпульсу, механічного моменту та квадрату моменту.	2
15	Прослідити аналогію між диференціюванням по часу функції координат, імпульсів та часу в класичній механіці та диференціюванням квантовомеханічних операторів за часом. Як інтеграли руху в класичній механіці, пов'язані із квантовими числами в квантовій механіці. Розібрати наведені в підручниках приклади повних наборів фізичних величин. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
16	Знайти в підручниках різні способи доказу співвідношення невизначеності для часу та енергії.	2
17.	Самостійно провести перехід від задачі двох тіл до задачі про рух у центральному полі для двох однакових частинок, скориставшись загальними формулами, виведеними на лекції. Повторити за допомогою конспекту курсу «Методи математичної фізики» та підручників властивості сферичних функцій, поліномів Лежандра та узагальнених поліномів Лежандра. Побудувати графіки кутової частини хвильової функції частинки у центрально-симетричному полі. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
18	Знайти в літературі відомості про випадкове виродження енергетичних рівнів у кулоновому полі. Самостійно розрахувати кратності виродження рівнів енергії із фіксованим значенням головного квантового числа.	2
19	Самостійно вивчити параграф 22 в [2] про знаходження спектру гармонічного осцилятора матричним методом.	2
20	Самостійно розібрати особливості зображень Шредінгера та Гейзенберга та довести, що перехід здійснюється за допомогою унітарного перетворення.	2
21	Самостійно знайти нерівності, які є необхідною умовою застосування квазікласичного наближення. Провести в нульовому наближенні граничний перехід від рівняння Шредінгера до рівняння Гамільтона–Якобі класичної механіки. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
22	Самостійно дослідити, як змінюється правило квантування Бора–Зомерфельда в залежності від особливостей потенціальної ями. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
23	По виведеним на лекції формулам для імовірності тунелювання в квазікласичному наближенні провести оцінки току при польовій емісії та альфа-розпаду у квазікласичному наближенні. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2

24	В рамках теорії збурень, що не залежать від часу самостійно розрахувати поправки до рівнів енергії у системах з невиродженим та виродженим спектром таких як заряджений осцилятор, плоский ротатор в електричному полі, довільна дворівнева система. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
25	Побудувати графіки залежності імовірності переходу під дією збурення, яке діє протягом скінченного проміжку часу для однорідних змінних полей з задачі 8.24 в [5]. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
26	Спін елементарних частинок. Оператори спіну. Власні функції та власні значення операторів спіну.	1
27	Для різних значень орбітального квантового числа та спінового квантового числа навчитися знаходити повний механічний момент. Знайти в літературі обґрунтування формул додавання моментів.	1
28	Посторити формули з курсу електродинаміки для функції Гамільтона частинки в магнітному полі та порівняти її з оператором Гамільтона частинки в магнітному полі, тобто з гамільтоніаном Паулі.	1
29	Знайти в літературі пояснення принципу тотожності частинок та пояснення, чому такого принципу немає в класичній механіці. Посторити самостійно вивод формул для хвильових функцій пари бозонів та ферміонів. Узагальнити ці формули для довільної кількості однакових частинок. Самостійно довести наявність принципу Паулі для системи ферміонів. Прочитати в літературних джерелах про прояви принципу Паулі в таких квантових системах: вироджений електронний газ, атомне ядро, білі карлики, нейтронні зірки.	1
30	Самостійно за допомогою варіаційного принципу вивести формулу для обмінного інтегралу. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
31	Самостійно провести викладки для знаходження хвильової функції багатоелектронного атома в методі Хартрі–Фока.	2
32	Статистична модель атома.	1
33	Самостійно записати атомні терми для перших 10 атомів періодичної системи атомів згідно з правилами Хунда.	1
34	Самостійно знайти в літературі відповідь на питання: «Як хімічні властивості атомів пов'язані зі структурою електронних оболонок?»	1
35	Знайти в літературі пояснення, чим відрізняються Нормальний та аномальний ефекти Зеємана та ефект Пашена-Бака у сильних магнітних полях. Повторити основні властивості діаманетиків та парамагнетиків та яка принципова різниця між ними, чим принципово відрізняються діа- та парамагнетизм атомів (теорії Ландау та Паулі). Прочитати про теорему Бора-Ван_Леєвен.	1
36	Застосувати стаціонарну теорію збурень для аналізу ефекта Штарка для нелінійного та лінійний ефекту Штарка (атом водню).	2
37	Самостійно вирішити задачу про енергетичний спектр та хвильову функцію електрона у постійному однорідному магнітному полі, застосувавши калібровку Ландау для векторного потенціалу. Знайти в літературі відомості про квантові осциляції кінетичних та термодинамічних коефіцієнтів у чистих металах. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2

38	Самостійно прочитати про двовимірний електронний газ, гетероструктури, графени, квантовий ефект Хола.	2
39	Згадати визначення функції Гріна в математичній фізиці. Навчитися виводити формулу теорії Борна для диференціального перерізу розсіювання. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
40	Знайти нерівності, які визначають границі застосування борнівського наближення у теорії розсіяння. Методи зшивки хвильових функцій. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
41	Порівняти квантову та класичну формули Резерфорда для розсіювання у кулоновому полі.	2
42	Записати всі комутаційні співвідношення для операторів народження та знищення бозонів та ферміонів. Самостійно вирішити рівняння Шредінгера для осцилятора за допомогою методу факторизації. В тому числі <u>1 год.</u> – виконання індивідуального розрахунково-графічного завдання.	2
43	Прочитати в підручниках про вторинне квантування систем бозонів та ферміонів та про комутаційні співвідношення для бозонних та ферміонних операторів народження та знищення. З'ясувати, чому квантування називається вторинним.	2
44	Знайти в підручниках з теорії поля вивід формули квантування поля випромінювання. Знайти пояснення, чому спин фотона вважають рівним одиниці	2
45	Самостійно знайти в літературних джерелах відомості про когерентні та стислі стани електромагнітного поля. Розрахувати самостійно добуток середніх квадратичних відхилень координати на імпульсу для когерентного стану.	2
46	Знайти відповідь на питання: які закони збереження виконуються при взаємодії випромінювання з електроном. Як змінюється енергія атому при поглинання та випромінюванні світла.	2
47	Знайти пояснення в підручниках, чим спонтанне випромінювання відрізняється від вимушеного випромінювання. Прочитати в конспекті лекцій про дипольні переходи в атомних системах. Записати формули правил відбору для дипольних переходів	2
48	Самостійно розібрати по підручнику [2] тему когерентне та комбінаційне розсіювання світла атомами.	2
49	Знайти у Інтернет-джерелах відомості про авторів, іменами яких названі ефект Ааронова–Бома та ефект Казимира. З'ясувати, що таке «сила Казимира».	2
50	Пояснити, чому хвильове релятивістське рівняння Клейна-Гордона-Фока не можна застосовувати для атому водню.	2
51	Розв'язати рівняння Дірака для вільної частинки та пояснити, де в рівнянні Дірака «приховане» поняття про позитрон	2
52	Самостійно зробити перехід до напівкласичного рівняння Паулі з точністю до лінійного наближення та вивести спіновий магнітний момент, тобто від рівняння Дірака перейти до рівняння Паулі.	2
	<b>Разом</b>	<b>98</b>

### 6. Індивідуальні завдання

Два індивідуальних розрахунково-графічних завдання: по одному індивідуальному розрахунково-графічному завданню в 6-му та в 7-му семестрі. Індивідуальні завдання

виконуються під час самостійної роботи по відповідним темам. Запропоновані індивідуальні розрахунково-графічні завдання можна знайти за такими посиланнями:

3 курс:

[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/zachet\\_quant\\_mech\\_ukr.pdf](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/zachet_quant_mech_ukr.pdf)

4 курс:

[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/ind\\_zavd\\_qm\\_ukr.pdf](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/ind_zavd_qm_ukr.pdf)

### 7. Методи контролю

Рішення задач на практичних заняттях, опитування, контрольні роботи за основними розділами, перевірка домашніх завдань, залік за результатами поточного контролю та здача індивідуальних розрахунково-графічних завдань, екзамен.

### 8. Схема нарахування балів

#### Залік (6-семестр)

Поточний контроль, самостійна робота, контрольна робота, індивідуальні завдання					Сума
Розділ 1	Розділ 2	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Індивідуальне завдання	Разом	
T1-T7	T8-T20	(2 контрольні роботи)	Індивідуальне розрахунково-графічне завдання		
20	20	20 + 20	20	100	100

Для зарахування розділу треба виконати контрольну роботу, домашні завдання та набрати в сумі не менше 15 балів, для зарахування індивідуального розрахунково-графічного завдання треба набрати не менше 10 балів. Для отримання заліку треба набрати в сумі не менше 50 балів.

#### Екзамен (7-семестр)

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання						Екзамен	Сума
Розділ 3	Розділ 4	Розділ 5	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Індивідуальне завдання	Разом		
T21-T25	T26-T41	T42-T52	(2 контрольні роботи)	Індивідуальне розрахунково-графічне завдання			
10	10	10	10 + 10 = 20	10	60	40	100

Для зарахування розділів 3-4 треба написати контрольну роботу та виконати домашні завдання і набрати у підсумку не менше 10 балів. Для зарахування розділу 5 треба виконати та захистити індивідуальне розрахункове завдання, виконати домашні завдання і набрати у підсумку не менше 10 балів.

Для допуску до підсумкового семестрового контролю студент повинен за 3 розділи набрати у підсумку не менше 30 балів.

Екзаменаційна робота складається з чотирьох питань – двох теоретичних та двох практичних (задач). Максимальна оцінка за кожне з питань білету – 10 балів.

### **Критерії оцінювання письмової екзаменаційної роботи**

У відповіді на теоретичне питання студент повинен продемонструвати знання теорії навчальної дисципліни «Квантова механіка» та її понятійно-категоріального апарату, термінології, понять і принципів предметної області дисципліни.

Максимальні бали виставляються в разі чіткої, логічної, послідовної відповіді на поставлене питання, з виводами основних формул, формулюванням фізичних законів

У процесі оцінювання теоретичних завдань екзаменаційного білету враховуються:

- повнота розкриття питання (2 бали);
- уміння чітко формулювати визначення фізичних понять, термінів та пояснювати їх (2 бали);
- здатність аргументувати отриману відповідь (2 бали);
- здатність робити аналітичні міркування, порівняння, формулювання висновків (2 бали);
- логічна послідовність викладення матеріалу у відповіді на завдання (2 бали).

Рішення задач повинні бути обґрунтованими, з посиланням на відповідні фізичні закони та рівняння, які застосовуються при рішенні, з послідовними розрахунками всіх основних формул, доведеним до кінцевого результату з чіткою відповіддю на поставлене питання. За рішення задачі (практичного завдання) нараховуються такі бали:

1. Завдання розв'язано на оцінку 10 балів у випадку, коли студент отримав правильну відповідь і продемонстрував метод і спосіб її отримання.
2. Завдання розв'язано на оцінку 8-9 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, але продемонстрував вірний метод і спосіб її отримання.
3. Завдання розв'язано частково на оцінку 5-7 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, але частково розв'язав задачу та отримав деякі проміжні результати.
4. Завдання розв'язано на оцінку 0-4 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, причому метод і спосіб розв'язання завдання були не вірними.

**Екзамен зданий, якщо сумарна оцінка за письмову екзаменаційну роботу не менше 20 балів, а сумарний підсумковий бал не менше 50 балів.**

### **Шкала оцінювання**

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

### **9. Рекомендована література**

### Основна література

1. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Т. 2. - М.: Физматгиз, 1971. - 936 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика.-М.: Наука, 1989.-768 с.
3. Елютин П.В., Кривченков В.Д. Квантовая механика. - М.: Наука, 1976. – 336с.
4. J.-L. Basdevant, J. Dalibard. Quantum Mechanics. – Springer-Verlag, Berlin, 2002. – 512 p.
5. Галицкий Е.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. - М.:Наука, 1981. – 648с.
6. Гречко Л.Г., Сугаков В.И., Томасевич О.Ф., Федорченко А.М. Сборник задач по теоретической физике. – М.:Высшая школа, 1984. – 319с.

### Допоміжна література

1. Давыдов А.С. Квантовая механика. - М.: Наука, 1973. - 704 с.
2. Мессия А. Квантовая механика. В 2-х т. – М.: Наука, 1979. – Т.1. – 478с, Т.2. – 583с.
3. Бете Г. Квантовая механика. - М.: Мир, 1965. - 333 с.
4. Фейнман Р., Хиббс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. - М.: Мир, 1968. - 382 с.
5. Вакарчук І.О. Квантова механіка: Підручник. – Львів: ЛДУ ім. І. Франка, 1998. – 616с.
6. Ульянов В.В. Задачи по квантовой механике и квантовой статистике. - Харьков: Вища школа, 1980. - 216 с.
7. Ульянов В.В. Методы квантовой кинетики. - Харьков: Вища школа, 1987. - 144 с.
8. Гольдман И.И., Кривченков В.Д. Сборник задач по квантовой механике. – М.: Гос.изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – 275с.
9. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. В 2-х т.- М.: Мир, 1974. – Т. 1. - 341с., Т. 2. -315с.

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

1. Учбові матеріали на сайті кафедри теоретичної фізики  
[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_study\\_ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_study_ukr.html)  
[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_ref\\_ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_ref_ukr.html)
2. Відеолекції та відкриті освітні матеріали МФТІ  
<http://lectoriy.mipt.ru/course/viewall/>
3. Курс лекцій з квантової механіки (англійською мовою) проф. Дж.Бінні, Оксфордський університет:  
[http://rss.oucs.ox.ac.uk/oxitems/generatersstwo2.php?channel\\_name=mp/quantum\\_mechanics-video](http://rss.oucs.ox.ac.uk/oxitems/generatersstwo2.php?channel_name=mp/quantum_mechanics-video) або <http://mediapub.it.ox.ac.uk/feeds/129115/video.xml> (Обидва посилання відкриває Internet Explorer)
4. Відкриті матеріали Массачусетського технологічного інституту, США (MIT USA)  
<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-04-quantum-physics-i-spring-2013/>  
<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-05-quantum-physics-ii-fall-2013/>



<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-06-quantum-physics-iii-spring-2005/>

<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-321-quantum-theory-i-fall-2002/>

<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-322-quantum-theory-ii-spring-2003/>

5. Частина, які стосується квантової механіки з відеокурсу проф. Р.Шанкара Йельський університет (R.Shankar, Yale University) «Основи фізики II»

<http://oyc.yale.edu/physics/phys-201>