

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Кафедра теоретичної фізики

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
з навчальної дисципліни «КВАНТОВА МЕХАНІКА»

для студентів III-IV курсів фізичного факультету

ЛЬВІВ–2011

Квантова механіка. Методичні рекомендації з навчальної дисципліни для студентів за напрямом підготовки 6.040203 Фізика — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. — 14 с.

Розробник:

Ткачук В. М., докт. фіз.-мат. наук, професор кафедри теоретичної фізики

Опис навчальної дисципліни
(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни
“Квантова механіка”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		<i>денна форма навчання</i>	
Кількість кредитів – 7.5	галузь знань 0402 Фізико-математичні науки	Нормативна	
Модулів – 2	Напрямок підготовки 6.040203 Фізика	<i>Рік підготовки:</i> 3-й	<i>Рік підготовки:</i> 4-й
Змістових модулів – 4		<i>Семестр</i> 6-й	<i>Семестр</i> 7-й
Загальна кількість годин - 307		<i>Лекції</i> 51 год.	<i>Лекції</i> 32 год.
Тижневих годин для денної форми навчання: <i>Аудиторних:</i> VI семестр – 5 VII семестр – 4 <i>Самостійної роботи студента:</i> VI семестр – 5 VII семестр – 4	Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр	<i>Практичні</i> 34 год.	<i>Практичні</i> 32 год.
		<i>Лабораторні</i> год.	
		<i>Самостійна робота</i> 90 год.	<i>Самостійна робота</i> 68 год.
		<i>Вид контролю:</i> залік	<i>Вид контролю:</i> іспит

1. Мета та завдання навчальної дисципліни

Курс квантова механіка є фундаментальним розділом основного курсу теоретичної фізики.

Мета: формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із мікросвітом.

Завдання: навчити студентів самостійно виконувати розрахунки, необхідні для розв'язування задач квантової механіки.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати основні поняття та рівняння предмету викладені у програмі курсу

вміти: застосовувати знання квантової механіки для розв'язування задач квантової механіки, володіти апаратом квантової механіки та розв'язувати відповідні рівняння

Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких розділів математики і фізики: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, атомна фізика.

2. Програма навчальної дисципліни

МОДУЛЬ 1

Змістовий модуль 1. Вступ до квантової механіки

Вступ [1: Розділ «Вступ»)

Основні етапи розвитку квантової теорії. Гіпотеза Планка і «стара» квантова механіка. Хвильова і матрична механіка.

Тема 1. Основні принципи квантової механіки [1: Розділ (Р.) 1; 4: Р. 1; 8: Р.1]

1. Опис стану в квантовій механіці. Хвильова функція.
2. Принцип суперпозиції (*приклад з теорії ядерних сил, квантової хімії, фізики твердого тіла, Кім Шредінгера*)¹.
3. Хвильовий пакет.
4. Хвильова функція вільної частинки. Властивості плоских хвиль.
5. Середні значення координати та імпульсу. Оператор імпульсу.
6. *Співвідношення невизначеностей Гайзенберга. Мінімізуючий хвильовий пакет. (Приклади: розміри атомного ядра, рідкий гелій, енергія основного стану атома).*

Тема 2. Математичний апарат квантової механіки [1: Р. 2; 4: Р. 1; 8: Р. 1]

7. Оператори фізичних величин. Дії над операторами. Приклади операторів фізичних величин.
8. Власні функції і власні значення операторів.
9. Властивості власних значень і власних функцій ермітових операторів.
10. Співвідношення невизначеностей для фізичних величин, що представляються некомутуючими операторами. *Когерентні стани.*
11. Різні представлення хвильових функцій. Бра- і кет- вектори.
12. Різні представлення операторів. Матриці операторів.

¹ Курсивом позначені теми, винесені на самостійне опрацювання.

13. Квантова механіка — теорія лінійних операторів в гільбертовому просторі.

Тема 3. Рівняння Шредінгера [1: Р. 3; 2: Р. 4; 8: Р. 3]

14. Хвильове рівняння Шредінгера.

15. Рівняння неперервності. Закон збереження густини ймовірності.

16. Зміна середніх значень фізичних величин з часом. Квантові дужки Пуасона.

17. Стаціонарні стани.

18. Представлення Шредінгера і представлення Гайзенберга. Представлення взаємодії.

Змістовий модуль 2. Найпростіші задачі квантової механіки та момент кількості руху

Тема 4. Найпростіші задачі квантової механіки [1: Р. 4; 4: Р. 5]

19. Частинка в потенціальній ямі з безмежно високими стінками.

20. Гармонічний осцилятор. Оператори народження і знищення.

21. Проходження частинки через потенціальний бар'єр. Резонансні стани.

22. Холодна емісія електронів з металу.

23. Теорія Гамова α -розпаду важких ядер.

Тема 5. Зв'язок квантової механіки з класичною [1: Р. 5; 4: Р. 3]

24. Перехід від квантових рівнянь руху до класичних. Розпливання хвильових пакетів з часом.

25. Хвильова функція в квазікласичному наближенні. Метод Вентцеля-Крамерса-Бріллюена.

26. Правило квантування Бора-Зоммерфельда.

27. Квантова механіка і інтеграли по траєкторіях.

Тема 6. Момент кількості руху [1: Р. 6; 4: §40; 8: Р. 4]

28. Оператор повороту і орбітальний момент кількості руху.

29. Власні значення і власні функції операторів квадрата та проекцій моменту кількості руху.

30. Власні функції операторів квадрата та проекцій орбітального моменту кількості руху.

31. Оператор моменту кількості руху для $j = 1/2$.

32. Ротатор. Квантове обертання твердого тіла.

33. Ядерний квадрупольний резонанс.

Тема 7. Рух частинки в центральносиметричному полі

[1: Р. 7; 4: Р. 6; 8: Р. 5]

34. Рух в полі центральної сили. Радіальне рівняння Шредінгера.

35. Рух в кулонівському полі. Атом водню.

36. Атом водню. Інтеграл руху Лапласа-Рунге-Ленца (метод В. Паулі).

МОДУЛЬ 2

Змістовий модуль 3. Рух частинки в центрально-симетричному полі та теорія збурень

Тема 8. Теорія збурень [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]

37. Стаціонарна теорія збурень. Невироджений випадок. (*Ангармонічні осцилятори*

$x^2 + x^4$ та x^4 . *Моделі з малими параметрами створеними «з нічого» I/N - розклади).*

38. *Ефективна маса домішок в конденсованих тілах.*

39. *Модель з неаналітичною залежністю енергії від константи взаємодії: надпровідник Бардіна-Купера-Шріффера.*

40. Теорія збурень при наявності виродження. Дворівнева система.

41. Ефект Штарка для атома водню.

42. *Енергетичні рівні електрона в кристалі. π -електронна теорія органічних молекул.*

43. *Варіаційний метод. (Ангармонічний осцилятор).*

44. Теорія збурень, залежних від часу.

45. Ймовірність квантового переходу за одиницю часу. Золоте правило Фермі.

46. *Дифракція нейтронів в рідинах та твердих тілах.*

47. Квантові переходи під дією раптових збурень.

Тема 9. Взаємодія атома з електромагнітним полем [1: Р. 9]

48. Квантування вільного електромагнітного поля. Фотони. Векторний потенціал

як оператор. Ефект Казимира.

49. Теорія випромінювання та поглинання світла. Формула Планка.

50. Електричне дипольне випромінювання. Правила відбору.

51. *Електричні квадрупольні та магнітні дипольні переходи. Правила відбору.*

52. Час життя збуджених станів атомів. Природна ширина спектральних ліній.

Змістовий модуль 4. Релятивістська квантова механіка. Квантова механіка системи багатьох частинок. Теорія розсіяння.

Тема 10. Релятивістська квантова механіка [1: Р. 10; 4: Р. 8]

55. Рівняння Кляйна-Гордона-Фока. π -мезонний атом.

56. *Кеплерівська проблема в теорії Кляйна-Гордона-Фока.*

57. Рівняння Дірака. Матриці Дірака. Рівняння неперервності.

58. Момент кількості руху в теорії Дірака. Спін.

59. *Спінові функції. Сферичний спінор.*

60. Вільний рух релятивістської частинки. Проблема від'ємних енергій. Позитрони.

61. Квазірелятивістське наближення рівняння Дірака. Рівняння Паулі.

62. Квазірелятивістське наближення рівняння Дірака. Спін-орбітальна взаємодія.

63. Атом водню з врахуванням релятивістських поправок. Формула тонкої структури. Лембівський зсув рівнів.

64. Атом в магнітному полі.

Тема 11. Квантова механіка системи багатьох частинок

[1: Р. 11; 4: Р. 10; 8: Р. 9]

63. Принцип тотожності частинок в квантовій механіці. Симетричні та антисиметричні

хвильові функції. Бозони, ферміони.

64. Теорія атома гелію. Пара- та ортогелій.

65. *Від'ємний іон водню H^- .*

66. Метод Хартрі-Фока.

67. Метод Томаса-Фермі.

68. Теорія молекул. Адіабатичне наближення.

69. Молекула водню. Метод Гайтлера-Лондона.

70. *Молекулярний йон водню H_2^+ .*

71. Хімічний зв'язок. Типи хімічного зв'язку. Властивості ковалентного зв'язку. *s-p* -гібридизація.

72. Сили Ван-дер-Ваальса.

Тема 12. Теорія розсіювання [1: Р. 12; 4: Р. 11; 8: Р. 17]

73. Амплітуда розсіювання.

74. Борнівське наближення для амплітуди розсіювання.

75. Розсіювання електронів на атомі.

76. *Метод парціальних хвиль. Оптична теорема.*

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
л		п	лаб	інд	ср	
1	2	3	4	5	6	7
МОДУЛЬ 1						
<i>Змістовий модуль 1. Вступ до квантової механіки</i>						
Тема 1. Основні принципи квантової механіки	28	8	4			16
Тема 2. Математичний апарат квантової механіки	30	10	6			14
Тема 3. Рівняння Шредінгера	28	8	6			14
Разом – зм. модуль 1	86	26	16			44
<i>Змістовий модуль 2. Найпростіші задачі квантової механіки та момент кількості руху</i>						
Тема 4. Найпростіші задачі квантової механіки	24	6	6			12
Тема 5. Зв'язок квантової механіки з класичною	24	8	4			12
Тема 6. Момент кількості руху	22	6	4			12
Тема 7. Рух частинки в центральносиметричному полі	19	5	4			10
Разом – зм. модуль 2	89	25	18			46
Усього годин за VI семестр	175	51	34			90
МОДУЛЬ 2						
<i>Змістовий модуль 3. Рух частинки в центрально-симетричному полі та теорія збурень</i>						
Тема 8. Теорія збурень	33	8	8			17
Тема 9. Взаємодія атома з електромагнітним полем	33	8	8			17
Разом – зм. модуль 3	66	16	16			34
<i>Змістовий модуль 4. Релятивістська квантова механіка. Квантова механіка системи багатьох частинок. Теорія розсіяння.</i>						
Тема 10. Релятивістська квантова механіка	24	6	6			12
Тема 11. Квантова механіка системи багатьох частинок	24	6	6			12
Тема 12. Теорія розсіяння	18	4	4			10
Разом – зм. модуль 4	66	16	16			34
Усього годин за VII семестр	132	32	32			68
Усього годин	307	83	66			158

5. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Основні принципи квантової механіки. Хвиля де Бройля. [2: 3.1]	2
2	Співвідношення невизначеностей Гайзенберга. [2: 3.2]	2
3	Зведення операторів до нормального вигляду. [2: 3.3]	2
4	Комутатор. [2: 3. 3,5]	2
5	Оператор інверсії. Оператор трансляції. [2: 3. 8,10]	2
6	Спрощення операторних виразів. [2: 3. 9]	2
7	Власні значення, власні функції оператора. [2: 3. 11]	2
8	Різні зображення станів та операторів. [2: 3. 13, 14]	2
9	Рівняння Шредінгера. [2: 3. 17–19]	2
10	Зміна квантових станів та середніх величин з часом. [2: 3. 19]	2
11	Частинка в потенціальних ямах різної форми. [2: 3. 20–27]	6
12	Гармонічний осцилятор. [2: 3. 28–30]	4
13	Метод операторів породження-знищення. [2: 3. 29, 30]	2
14	Зв'язок квантової механіки з класичною. Правило квантування Бора–Зоммерфельда [2: 3. 35–37]	4
15	Оператор моменту кількості руху. [2: 3. 38–41]	4
16	Рух у центральній-симетричному полі. [2: 3. 42–44]	2
17	Теорія збурень для невиродженого випадку. [2: 3. 45–50]	4
18	Теорія збурень при наявності виродження. [2: 3. 51, 56]	2
19	Варіаційний метод. [2: 3. 52–56]	4
20	Теорія збурень, залежних від часу. [2: 3. 57, 58]	4
21	Взаємодія атома з електромагнітним полем. [2: 3. 60–64]	4
23	Рівняння Дірака. Властивості матриць Дірака [1: с. 557]	2
24	Квантова механіка систем багатьох частинок. [2: 65–71]	2
25	Теорія розсіяння. [2: 72–73]	2
	Разом	66

6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
VI семестр		
1	Принцип суперпозиції (прикладі з теорії ядерних сил, квантової хімії, фізики твердого тіла, Кіт Шредінгера). [1: Р.1; 4: Р. 1; 8: Р.1]	9
2	Співвідношення невизначеностей Гайзенберга. Мінімізуючий хвильовий пакет. (Приклади: розміри атомного ядра, рідкий гелій, енергія основного стану атома). [1: Р.1; 4: Р. 1; 8: Р.1]	9
3	Когерентні стани. [1: Р. 2; 4: Р. 1; 8: Р. 1]	9
4	Гармонічний осцилятор. Хвильовий та матричний підходи. [1: Р. 4; 4: Р. 5]	9
5	Холодна емісія електронів з металу. [1: Р. 4; 4: Р. 5]	9
6	Теорія Гамова α -розпаду важких ядер. [1: Р. 4; 4: Р. 5]	9
7	Правило квантування Бора-Зоммерфельда. Приклад гармонічного осцилятора. [1: Р. 5; 4: Р. 3]	9
8	Оператор моменту кількості руху для $j = 1/2$. Розпад Λ^0 -частинки. [1: Р. 6; 4: §40; 8: Р. 4]	9
9	Ядерний квадрупольний резонанс. [1: Р. 6; 4: §40; 8: Р. 4]	9
10	Атом водню. Інтеграл руху Лапласа-Рунге-Ленца (метод В. Паулі) [1: Р. 7; 4: Р. 6; 8: Р. 5]	9
Разом за VI семестр		90
VII семестр		
1	Стаціонарна теорія збурень. Невироджений випадок. (Ангармонічні осцилятори $x^2 + x^4$ та x^4 . Моделі з малими параметрами створеними «з нічого» $1/N$ -розклади) [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	4
2	Ефективна маса домішок в конденсованих тілах. [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	8
3	Модель з неаналітичною залежністю енергії від константи взаємодії: надпровідник Бардіна-Купера-Шріффера. [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	8
4	Енергетичні рівні електрона в кристалі. π -електронна теорія органічних молекул. [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	8
5	Варіаційний метод. (Ангармонічний осцилятор). [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	4
6	Дифракція нейтронів в рідинах та твердих тілах [1: Р. 8; 4: Р. 7; 8: Р. 6]	8
7	Електричні квадрупольні та магнітні дипольні переходи. Правила відбору. [1: Р. 9]	4
8	Кеплерівська проблема в теорії Кляйна-Гордона-Фока. [1: Р. 10; 4: Р. 8]	8
9	Спінкові функції. Сферичний спінор [1: Р. 10; 4: Р. 8]	4
10	Від'ємний іон водню H^- [1: Р. 11; 4: Р. 10; 8: Р. 9]	4
	Молекулярний йон водню H_2^+ . [1: Р. 11; 4: Р. 10; 8: Р. 9]	4
	Метод парціальних хвиль. Оптична теорема [1: Р. 12; 4: Р. 11; 8: Р. 17]	4
Разом за VII семестр		68
Разом		158

7. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (контрольні роботи за двома змістовими модулями, $2 \times 20 = 40$ балів), оцінку відповідей та роботи на практичних заняттях (10 балів) — разом за семестр 50 балів; залік — 50 балів (VI семестр); іспит — 50 балів (VII семестр). Сумарна оцінка за семестр, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою.

8. Розподіл балів, що присвоюється студентам

Приклад розподілу балів, які отримують студенти (для заліку) I семестр

Поточне тестування та самостійна робота						Робота на практичних	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 1			Змістовий модуль 2					
T1	T2	T3	T4	T5	T6			
7	7	6	7	7	6	10	50	100

Приклад розподілу балів, які отримують студенти (для екзамену) II семестр

Поточне тестування та самостійна робота						Робота на практичних	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 3			Змістовий модуль 4					
T1	T2	T3	T4	T5	T6			
7	7	6	7	6	7	10	50	100

Шкала оцінювання: Університету, національна та ECTS

Оцінка в балах	Оцінка ECTS	Визначення	За національною шкалою	
			Екзаменаційна оцінка, оцінка з диференційованого заліку	Залік
90–100	A	Відмінно	Відмінно	Зараховано
81–89	B	<i>Дуже добре</i>	<i>Добре</i>	
71–80	C	<i>Добре</i>		
61–70	D	<i>Задовільно</i>		
51–60	E	<i>Достатньо</i> о	<i>Задовільно</i>	

9. Методичне забезпечення

1. Вакарчук І. О. Квантова механіка. Львів, 2007.
2. І. О. Вакарчук, Т. В. Кулій, О. В. Книгініцький, В. М. Ткачук. Збірник задач з квантової механіки. Львів, 1996.

10. Рекомендована література

Базова

3. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. М., 1983.
4. Давыдов А. С. Квантовая механика. М., 1973.
5. Юхновський І. Р. Квантова механіка. К., 1995.
6. Глауберман А. Ю. Квантова механіка. Львів, 1962.
7. Соколов А. А., Тернов И. М., Жуковский В. И. Квантовая механика. М., 1979.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., 1989.
9. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики. М., 1960.

Допоміжна

10. Фок В. А. Начала квантовой механики. М., 1976.
11. Ферми Е. Квантовая механика: Конспект лекций. М., 1968.
12. Шифф Л. Квантовая механика. М., 1959.
13. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 8,9. М., 1966.
14. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. М., 1968.
15. Зоммерфельд А. Строение атома и спектра. Т.2. М., 1956.
16. Мессиа А. Квантовая механика. Т. 1,2. М., 1979.

11. Приклад завдань, що виносяться на іспит

Варіант № QM-1.

- (1) Виходячи з хвильового рівняння Шредінгера отримайте рівняння неперервності (15б.).
- (2) Знайдіть енергетичні рівні частинки масою m в потенціальній ямі $U(x) = -\alpha\delta(x)$, $\alpha > 0$ (15б.).
- (3) Для оператора $A = x \frac{d}{dx} \sin(x)$ знайдіть:
 - а. його нормальний вигляд (2б.),
 - б. A^+ (2б.),
 - с. комутатор $[A, A^+]$ (2б.).
- (4) Знайдіть дію оператора $e^{a \frac{d}{dx}}$ на функцію x^2 (2б.).
- (5) Знайдіть σ_x^2 (2б.).
- (6) Запишіть рівняння Дірака (2б.).
- (7) Запишіть правило квантування Бора-Зомерфельда (2б.).
- (8) Запишіть оператор координати та імпульсу (2б.).
- (9) Запишіть енергетичні рівні атома водню (2б.).
- (10) Запишіть оператор еволюції (2б.).

12. Приклад тесту для контролю якості знань студентів

Львівський національний університет імені Івана Франка

Квантова механіка Зріз знань

Варіант ___ Студент _____ Група _____

Завдання № 1. Суть квантово-механічного принципу суперпозиції полягає в тому, що квантова система з можливих станів обирає

1) один стан 2) правильна відповідь відсутня 3) будь-який стан 4) "той або той" стан 5) "і той і той" стан

Завдання № 2. За гіпотезою де Бройля із частинкою пов'язаний хвильовий процес з довжиною хвилі

1) прямо пропорційною до енергії 2) обернено пропорційною до енергії 3) обернено пропорційною до імпульса 4) не залежить від імпульса 5) прямо пропорційною до імпульса

Завдання № 3. Ермітово спряжений оператор до оператора $x(d/dx)x$ є

1) правильна відповідь відсутня 2) $x^2 d/dx$ 3) $2xd/dx$ 4) $x(d/dx)x$ 5) $-x(d/dx)x$

Завдання № 4. Координата частинки, що описується хвильовою функцією e^{ikx} дорівнює

1) $k\hbar$ 2) $ik\hbar$ 3) невизначена 4) km 5) правильна відповідь відсутня

Завдання № 5. Стаціонарне рівняння Шредингера має вигляд

1) $H\psi = E^2\psi$ 2) $H\psi = E$ 3) $H\psi = E\psi$ 4) $H^2\psi = E\psi$ 5) правильна відповідь відсутня

Завдання № 6. Спектр гармонічного осцилятора, залежить від квантового числа n таким чином

1) n 2) $-1/n^2$ 3) Ніяк не залежить 4) n^2 5) $1/n^2$

Завдання № 7. Умова квантування Бора-Зоммерфельда залежить від квантового числа n таким чином

1) Правильна відповідь відсутня 2) лінійно 3) не залежить 4) квадратично 5) кубічно

Завдання № 8. Потенціальна енергія взаємодії електрона та ядра в атомі водню рівна

1) e^2/r 2) Правильна відповідь відсутня 3) $m\omega^2 r^2/2$ 4) e^2/r^2 5) $-e^2/r$

Завдання № 9. Для частинки, яка перебуває на n -му s -рівні в сферично-симетричній потенціальній ямі з абсолютно непроникними стінками визначте $\langle r \rangle$

1) R 2) Правильна відповідь відсутня 3) $R/2$ 4) 1 5) 0

Завдання № 10. Обчисліть першу поправку до енергії основного стану одновимірного гармонічного осцилятора при накладанні збурення γx^6

1) $3\gamma\omega/2$ 2) Правильна відповідь відсутня 3) $2\omega\gamma$ 4) $\omega\gamma^2$ 5) 0

Екзаменатор
