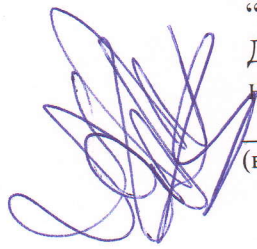


Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.ліфшиця



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан факультету (директор
навчально-наукового інституту)
фізичний факультет

(вказати назву структурного підрозділу)

ВОВК Руслан Володимирович

(вказати П.І.Б керівника)

“ _____ 2024р.



Робоча програма навчальної дисципліни

Квантова механіка

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ бакалавр _____

галузь знань _____ 10 Природничі науки _____
(шифр і назва)

спеціальність _____ 104 – Фізика та астрономія _____
(шифр і назва)

освітня програма «Фізика», «Астрономія», «Інформаційні технології (ІТ) в фізиці»
(шифр і назва)

спеціалізація _____
(шифр і назва)

вид дисципліни _____ обов'язкова _____
(обов'язкова / за вибором)

факультет _____ фізичний _____

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 30 ” 08 2024 року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Ямпольський Валерій Олександрович, д. фіз.-мат.наук, проф.

Майзеліс Захар Олександрович, д. фіз.-мат.наук

Єзерська Олена Володимирівна, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

Програму схвалено на засіданні кафедри

теоретичної фізики імені академіка М. Ліфшиця

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

Протокол від “ 27 ” 08 2024 року № 12

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

Рашба Г.І.

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми

фізика (спеціальність 104 – фізика та астрономія)

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми

(керівник проектної групи) Лазоренко О.В.

Лазоренко О.В.

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 29 ” 08 2024 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету

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.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Здатність розв’язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов (ІК).

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК-1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК-2).
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК-3).
- Здатність бути критичним і самокритичним (ЗК-4).
- Здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК-5).
- Навички міжособистісної взаємодії (ЗК-6).
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт (ЗК-8).
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов’язків (ЗК-9).
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово (ЗК-12).
- Здатність спілкуватися іноземною мовою (ЗК-13).
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК-1).

- Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень (ФК-4).

- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв’язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем (ФК-5).

- Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси (ФК-6).

- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту (ФК-7).
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації (ФК-9).
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК-10).
- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень (ФК-12).
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти - обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. (ФК-13).
- Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК-14).

1.3. Кількість кредитів 6.

1.4. Загальна кількість годин 180.

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.	16 год.
Лабораторні	
немає	
Самостійна робота	
42 год.	42 год.
	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.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії (ПРН-1).
- Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них (ПРН-2).
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій (ПРН-3).
- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії (ПРН-5).
- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії (ПРН-6).
- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації (ПРН-7).
- Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань (ПРН-8).
- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки (ПРН-11).
- Розуміти зв'язок фізики та/або астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень (ПРН-13).
- Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду (ПРН-17).
- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства (ПРН- 22).
- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії (ПРН-23).
- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій (ПРН-24).
- Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку (ПРН-25).

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. Комуताція 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. Інтеграл руху. Повний набір фізичних величин.

Тема 16. Співвідношення невизначеності для часу та енергії.

Тема 17. Хвильова функція частинки у центрально-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 стаціонарний стан завдяки збуренням.

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

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 Казиміра.

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
6 семестр						
Розділ 1. ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РІВНЯННЯ ШРЕДІНГЕРА						
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			2
Тема 6	6	2	1			3
Тема 7	6	2	1			3
Разом за розділом 1	29	10	3			16
Розділ 2. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ. РУХ У ЦЕНТРАЛЬНО-СИМЕТРИЧНОМУ ПОЛІ						
Тема 8	5	2	1			2
Тема 9	5	2	1			2
Тема 10	5	2	1			2
Тема 11	5	2	1			2
Тема 12	5	2	1			2
Тема 13	4	1	1			2
Тема 14	4	1	1			2
Тема 15	5	2	1			2
Тема 16	5	2	1			2
Тема 17	5	2	1			2
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			26
Разом за 6-й семестр	90	32	16			42
Залік						
7 семестр						
Розділ 3. НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ У КВАНТОВІЙ МЕХАНІЦІ						
Тема 21	4	1	1		1	1
Тема 22	4	1	1		1	1
Тема 23	5	1	2		1	1
Тема 24	5	1	2		1	1
Тема 25	5	1	2		1	1
Разом за розділом 3	23	5	8		5	5

Розділ 4 СПІН ТА ТОТОЖНІСТЬ ЧАСТИНОК. ЕЛЕКТРОННА СТРУКТУРА АТОМІВ. РУХ В ОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ. ТЕОРІЯ ПРУЖНОГО РОЗСИВАННЯ						
1	2	3	4	5	6	7
Тема 26	3	1	1			1
Тема 27	3	1	1			1
Тема 28	2	1				1
Тема 29	3	1	1			1
Тема 30	4	1	1		1	1
Тема 31	2	1				1
Тема 32	2	1				1
Тема 33	2	1				1
Тема 34	2	1				1
Тема 35	2	1				1
Тема 36	2	1				1
Тема 37	3	1			1	1
Тема 38	2	1				1
Тема 39	3	1			1	1
Тема 40	3	1			1	1
Тема 41	2	1				1
Разом за розділом 4	40	16	4		4	16
Розділ 5. МЕТОД ВТОРИННОГО КВАНТУВАННЯ. ВЗАЄМОДІЯ СВІТЛА З РЕЧОВИНОЮ. РЕЛЯТИВІСТСЬКА КВАНТОВА МЕХАНІКА						
Тема 42	4	1	1		1	1
Тема 43	3	1	1			1
Тема 44	2	1				1
Тема 45	2	1				1
Тема 46	2	1				1
Тема 47	2	1				1
Тема 48	2	1				1
Тема 49	2	1				1
Тема 50	3	1	1			1
Тема 51	3	1	1			1
Тема 52	2	1				1
Разом за розділом 5	27	11	4		1	11
Разом за 7-й семестр	90	32	16		10	32
Екзамен						
Усього годин	180	64	32		20	64

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.	2
9.	Рух в центральному полі. Плоский та просторовий ротатори. Сферична прямокутна яма кінцевої глибини. Воднеподібний атом.	2
10.	Стационарна теорія збурень для невироджених рівнів.	2
11.	Стационарна теорія збурень для вироджених станів.	2
12.	Нестационарна теорія збурень. Ймовірність переходу в новий стан.	2
13.	Квазікласичне наближення. Правила квантування Бора-Зомерфельда. Знаходження рівнів енергії в квазікласичному наближенні.	2
14.	Квазікласичне наближення. Знаходження коефіцієнта проходження через потенціальний бар'єр в квазікласичному наближенні.	2
15.	Властивості оператора спіну $s = \frac{1}{2}$.	2
	Разом	32

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

Створений Google Class «Квантова механіка». Код курсу: [e2eirz4](#)

В Telegram працює група "Квантовая механика"

https://web.telegram.org/#/im?p=s1329278591_7613827629894475429

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 символьної 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.	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.	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).	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.	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 координатному та в імпульсному зображенні.	2
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.	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.	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.	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 полів 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.	1
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 діамagnetиків та парамагнетиків та яка принципова різниця між ними, чим принципово відрізняються діа- та парамагнетизм атомів (теорії Ландау та Паулі). Прочитати про теорему Бора-Ван Леевен.	1
36	Застосувати стаціонарну теорію збурень для аналізу ефекта Штарка для нелінійного та лінійний ефекту Штарка (атом водню).	1
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.	1
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 розсіювання. 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.	1
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.	1
44	Знайти в підручниках з теорії поля вивід формули квантування поля випромінювання. Знайти пояснення, чому спин фотона вважають рівним одиниці	1
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.	1
46	Знайти відповідь на питання: які закони збереження виконуються при взаємодії випромінювання з електроном. Як змінюється енергія атому при поглинання та випромінюванні світла.	1
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	1
48	Самостійно розібрати по підручнику [2] тему когерентне та комбінаційне розсіювання світла атомами.	1
49	Знайти у Інтернет-джерелах відомості про авторів, іменами яких названі ефект Ааронова–Бома та ефект Казиміра. З'ясувати, що таке «сила Казиміра».	1
50	Пояснити, чому хвильове релятивістське рівняння Клейна-Гордона-Фока не можна застосовувати для атому водню.	1
51	Розв'язати рівняння Дірака для вільної частинки та пояснити, де в рівнянні Дірака «приховане» поняття про позитрон	1
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.	1
	Разом	84

6. Індивідуальні завдання

Залікове завдання виконується в 6-му семестрі.

Індивідуальне розрахунково-графічне завдання виконується в 7-му семестрі. Індивідуальні завдання виконуються під час самостійної роботи по відповідним темам. Запропоновані залікові завдання та 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

4 курс:

http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/ind_zavd_qm_ukr.pdf

7. Методи контролю

Розв'язання задач на практичних заняттях, опитування, контрольні роботи за основними розділами, перевірка домашніх завдань, залік за результатами поточного контролю та здача та захист 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	Залікове завдання	Разом	
T1-T7	T8-T20	(1 контрольна робота)			
30	30	20	20	100	100

Для зарахування розділу треба виконати контрольну роботу, домашні завдання та набрати в сумі не менше 25 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	(1 контрольна робота)	Індивідуальне розрахунково-графічне завдання			
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. Landau L.D. Quantum Mechanics. Non-Relativistic Theory. Course of Theoretical Physics. V.3 / L.D.Landau, E.M.Lifshitz. Pergamon Press, 1991. – 674 p.
2. J.-L. Basdevant, J. Dalibard. Quantum Mechanics. – Springer-Verlag, Berlin, 2002. – 512 p.
3. Вакарчук І.О. Квантова механіка: Підручник.— 2-ге вид., доп.— Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2004.— 784с.

4. Гречко Л.Г., Єжов С.М., Сугаков В.О. Збірник задач із теоретичної фізики. Квантова механіка: К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2013. – 215 с.
5. Вакарчук І. О., Кулій Т. В., Книгіницький О. В., Ткачук В. М. Збірник задач з квантової механіки. Львів, Львівський університет, 1997.
6. Апостолов С.С. Основи квантової механіки. Теорія та практичні завдання : навч.-метод. посіб. / С.С. Апостолов, О.В. Єзерська. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. – 140 с.

Допоміжна література

7. Flugge S. Practical Quantum mechanics / S.Flugge. – – Springer-Verlag, Berlin, 1994. – 648 p.

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

1. Учні 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_ref_ukr.html
2. Курс лекцій з квантової механіки (англійською мовою) проф. Дж.Бінні, Оксфордський університет:
<https://www.youtube.com/watch?v=AufmV0P6mA0&list=PLB3CF07ACB3DBC849>
3. 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/>
4. Частина, яка стосується квантової механіки з відеокурсу проф. Р.Шанкара Йельський університет (R.Shankar, Yale University) «Основи фізики II»
<http://oys.yale.edu/physics/phys-201>
6. Посилання на електронні версії деяких підручників та посібників
<https://ia903206.us.archive.org/4/items/landau-and-lifshitz-physics-textbooks-series/Vol%203%20-%20Landau%2C%20Lifshitz%20-%20Quantum%20mechanics%20-%20non-relativistic%20theory%20%283ed.%2C%201991%29.pdf>
<https://ia600809.us.archive.org/16/items/PracticalQuantumMechanicsS.Flgge/Practical%20Quantum%20Mechanics%20%28S.%20Flügge%29.pdf>
<http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/Robochi%20programy/QuantMech-final-2021.pdf>