

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

фізичний факультет
(назва факультету, інституту)

Кафедра квантової теорії поля та космофізики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник декана з навчальної роботи

О.В. Момот
2023 року

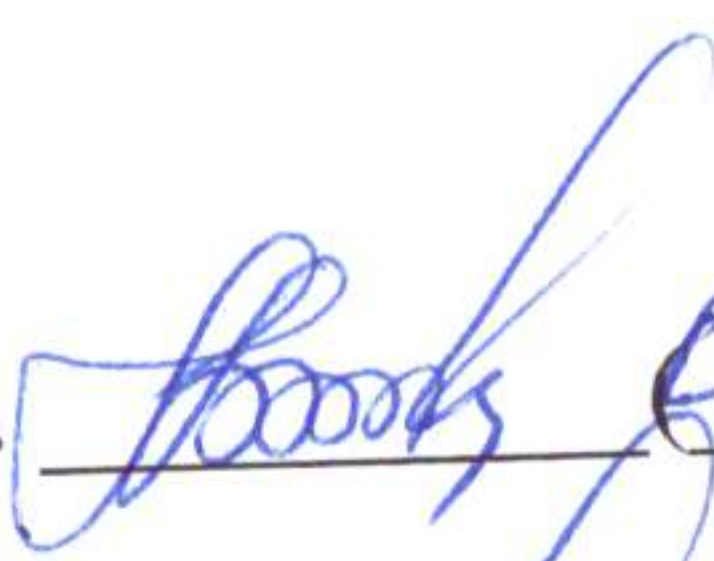
РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

КВАНТОВА МЕХАНІКА
(повна назва навчальної дисципліни)
для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)
спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)
освітній рівень бакалавр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Оптика
(назва освітньої програми)
вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання	<u>денна</u>
Навчальний рік	<u>2023/2024</u>
Семестр	<u>5-6</u>
Кількість кредитів ECTS	<u>8</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>залік+іспит</u>

Викладачі: Вільчинський Станіслав Йосипович, Горкавенко Володимир
Миколайович

Пролонговано: на 2024/2025 н.р.  (підпис, ПІБ, дата) «18» червня 2024 р.

на 2025/2026 н.р.  (підпис, ПІБ, дата) «23» червня 2025 р.

КИЇВ – 2023

Розробник(и): *Вільчинський Станіслав Йосипович, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри квантової теорії поля та космофізики*

ЗАТВЕРДЖЕНО

В.о. зав. кафедри оптики


(підпис)

(Кондратенко С.В.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 7 від «16» березня 2023 р.

Схвалено науково - методичною комісією фізичного факультету

Протокол №15 від «13» квітня 2023 року

Голова науково-методичної комісії


(підпис)

(Оліх О.Я.)
(прізвище та ініціали)

1. Мета дисципліни – Розкрити студентам проблему атомарності, дискретності, квантовості щодо матерії та її характеристик. Показати, що для матерії корпускулярно-хвильовий дуалізм хвиля-частинка, частинка-хвиля є універсальною властивістю. Звернути увагу на особливості об'єктів квантової фізики – мікročастинки та на макроскопічні квантові явища. Познайти студентів як з теоретичними, так і з обчислювальними методами квантової механіки.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни (за наявності):

1. *Знати основи математичного аналізу, лінійної алгебри, теорії функції комплексної змінної, математичної фізики.*
2. *Вміти розв'язувати елементарні диференціальні рівняння, диференціальні рівняння в частинних похідних, шукати власні числа та власні функції лінійних самоспряжених операторів.*
3. *Володіти елементарними навичками обчислення похідних від складних функцій, інтегралів.*

3. Анотація навчальної дисципліни:

Дисципліна присвячена вивченню основних понять, положень та принципів квантової механіки. Починається курс із розгляду абстрактного гільбертового простору, який дозволяє надати математичне підґрунтя для трактування квантової механіки, при цьому коротко викладається алгебра операторів, діючих у гільбертовому просторі. Потім даються основні постулати квантової механіки та основний наслідок з них – співвідношення невизначеностей. Наступна тема дисципліни присвячується двом різним способам опису еволюції квантової системи у часі. Після викладення теорії квантової механіки, розглядається її застосування на прикладах простих модельних задач, зокрема детально розглядається гармонічний осцилятор у термінах вторинного квантування. Решта першої частини курсу пов'язана з вивченням таких важливих тем, як проходження частинки через бар'єр, момент кількості руху, рух у центральному полі, нерелятивістська теорія атома водню. Приділяється також увага питанню узгодженості квантової та класичної механіки. На завершення першої частини курсу вивчаються наближені методи розв'язку рівняння Шредінгера, а саме стаціонарна та нестаціонарна теорія збурень і варіаційний метод.

Друга частина курсу присвячена викладенню основ квантування електромагнітного поля, релятивістської квантової механіки, квантової теорії випромінювання, квантової теорії дисперсії, фотоефекту, а також теорії розсіяння. Розглядаються приклади розв'язку рівнянь Дірака, Клейна-Гордона-Фока, Паулі для певних модельних потенціалів, що допускають аналітичні розв'язки. Отримуються основні формули теорії випромінювання і поглинання, а також квантової теорії дисперсії. На прикладі певних модельних потенціалів демонструється отримання основних характеристик розсіяння частинок. Завершальна частина курсу присвячена вивченню особливостей багаточастинкових квантових систем, проявів принципу тотожності частинок, властивостей атому гелію. Обговорюються також основи наближених методів розв'язування багаточастинкових задач з квантової механіки, такі як метод Хартрі-Фока, адіабатичне наближення.

4. Завдання (навчальні цілі):

Сформувати у студентів розуміння квантової природи матерії, основних постулатів та принципів квантової механіки. Навчити студентів обчислювати на базі квантовомеханічних принципів основні характеристики атомів водню та гелію, електромагнітного поля, процесів розсіяння частинок. Сформувати навички застосування наближених методів квантової механіки до дослідження складних фізичних систем.

Згідно освітньо-професійної програми дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних *компетентностей*:

Інтегральної:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та астрономії і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

Загальних

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК9. Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків.

ЗК12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

ЗК15. Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, їх місця у

загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя.

фахових:

ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК6. Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси.

ФК7. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.

ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.

ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.

ФК15. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної оптики.

5. Результати навчання за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1. Знати				
1.1	основні постулати квантової механіки	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
1.2	основи теорії представлень	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова /Екзаменаційна робота	7
1.3	базові наближені методи квантової механіки та умови їх застосування для простих потенціалів	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
1.4	головні особливості взаємодії атома з електромагнітним полем на квантовому рівні	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
1.5	головні досягнення релятивістської квантової механіки	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7

1.6	основні методи багаточастинкової квантової теорії	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова /Екзаменаційна робота	3
Загалом:				38
2. Вміти				
2.1	виконувати базові операції з операторами – рахувати комутатори операторів фізичних величин і знаходити їх середні значення	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	8
2.2	отримувати спектри енергій частинок у одномірних потенціалах	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
2.3	розраховувати спектр та хвильові функції частинки у дво- та три- вимірних потенціалах	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
2.4	розв'язувати рівняння Дірака для атома водню та прямокутного потенціалу.	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова / Екзаменаційна робота	7
2.5	одержувати основні результати квантової теорії випромінювання, теорії фотоефекту та дисперсії	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова /Екзаменаційна робота	7
2.6	обчислювати спектр та хвильові функції для атома гелію та йона водню	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	7
2.7	рахувати переріз розсіяння для модельних відштовхувальних потенціалів	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	7
Загалом:				50
3. Комунікація				

3.1	здатність презентувати результати самостійної роботи	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	3
3.2	бути толерантним впродовж вербальної взаємодії з колегами	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	3
Загалом:				6
4. Автономність та відповідальність				
4.1	обробка необхідної інформації, її упорядкування та оцінка достовірності	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	3
4.2	застосування отриманих знань до практичних завдань	Лекції, практичні заняття, самостійна робота, консультації	Колоквіум, Модульні контрольні роботи, Завдання для самостійної роботи Залікова/Екзаменаційна робота	3
Загалом:				6

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання
(необов'язково для вибіркових дисциплін які не входять до блоків спеціалізації)

Результати навчання дисципліни (код)																	
Програмні результати навчання (назва)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	3.1	3.2	4.1	4.2

навчання		навчання	min	max
Практичні завдання	Контрольна робота 1	2.1	4	20
	Контрольна робота 2	2.2-2.3	5	20
Лекційні заняття	Модульний контроль 1 (колоквіум)	1.1-1.2 4.2	5	20
Самостійна робота	Виконання домашніх завдань	1.1-1.2 2.1-2.3 3.1-3.2 4.1	6	20
Загалом за роботу у семестрі			20	80

- підсумкове оцінювання у формі заліку

- максимальна кількість балів, які можуть бути отримані студентом за залік – 20 балів за 100-бальною шкалою;
- оцінюються знання теорії та вміння розв'язувати задачі з курсу Квантова механіка;
- підсумкова кількість балів за залік з дисципліни (максимум 100 балів) визначається як сума (проста або зважена) балів за змістовими модулями;
- за необхідності може бути проведена підсумкова комплексна контрольна робота (ПККР), про яку студентам повідомляється заздалегідь, бали за яку додаються до підсумкової оцінки за семестр.

II-ий семестр

Форми викладання і навчання	Форми контролю	Результати навчання	Кількість балів	
			min	max
Практичні завдання	Контрольна робота 3	2.4-2.5	4	10
	Контрольна робота 4	2.6-2.7	5	10
Лекційні заняття	Модульний контроль 2 (колоквіум)	1.3-1.5 4.2	6	20
Самостійна робота	Виконання домашніх завдань	1.3-1.6 2.4-2.7 3.1-3.2 4.1	6	20
Загалом за роботу у семестрі			20	60

- підсумкове оцінювання у формі екзамену

- максимальна кількість балів, які можуть бути отримані студентом за іспит – 40 балів за 100-бальною шкалою;
- оцінюються знання теорії та вміння розв'язувати задачі з курсу Квантова механіка;
- форма проведення письмова, два теоретичних питання (20 балів) і задачі (20 балів);
- для отримання загальної позитивної оцінки з дисципліни оцінка за екзамен не може бути меншою 30 балів;
- якщо за результатами модульно-рейтингового контролю студент отримав за результатами третьої та четвертої контрольних та модульного контролю разом 40 балів, то студент на екзамені звільняється від виконання практичних задач, які автоматично зараховуються з оцінкою “відмінно”.

- умови допуску до підсумкового екзамену:

студент не допускається до екзамену, якщо під час семестру набрав у сумі менше, ніж 15 балів за семестрові контрольні роботи та колоквіум, має не виконані завдання з самостійної роботи та/або має нездані пропуски семінарів.

7.2 Організація оцінювання:

Самостійна робота перевіряється на кожному практичному занятті, колоквіуми проводяться один раз на семестр. Заключна оцінка з дисципліни формується як середнє з оцінок за обидва семестри.

Форма оцінювання	Форми викладання і навчання	Форми контролю	Графік оцінювання	
			конкретизований	загальний
Семестрова робота	Лекційні заняття	Модульний контроль 1	Листопад	Впродовж навчання у семестрі
		Модульний контроль 2	Кінець квітня – початок травня	
	Практичні заняття	Контрольна робота 1	Після тем 1-6	
		Контрольна робота 2	Після тем 7-9	
		Контрольна робота 3	Після тем 10-15	
		Контрольна робота 4	Після тем 16-17	
	Самостійна робота	Тематичний контроль домашніх завдань	В рамках навчання протягом семестру, до початку семестрового контролю	
Підсумкова	Письмова робота	Екзаменаційна робота	Залежно від графіку навчання	Впродовж семестрового контролю

7.3 Шкала відповідності оцінок

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно / Fail	0-59
Зараховано / Passed	60-100

Не зараховано / Fail	0-59
-----------------------------	------

8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекційних та практичних занять

№ п/п	Назва лекції	Кількість годин		
		лекції	практичні	С/Р
І-ий семестр				
Змістовий модуль 1				
1	Тема 1 Основні закони квантової механіки і її зв'язок з "класичною" фізикою.	3	4	8
2	Тема 2 Хвилі де Бройля. Основне завдання квантової механіки. Принцип доповнюваності.	3	2	4
3	Тема 3 Перший постулат квантової механіки.	2	2	4
4	Тема 4 Другий постулат квантової механіки.	2	2	4
5	Тема 5 Третій постулат квантової механіки.	2	2	4
6	Тема 6 Співвідношення невизначеностей.	3	3	6
7	Контрольна робота 1		1	2
Змістовий модуль 2				
8	Тема 7 Рівняння Шредингера. Рівняння неперервності. Проходження частинки крізь бар'єр.	3	3	7
9	Тема 8 Зміна середніх значень фізичних величин з часом. Квантові дужки Пуассона.	3	2	4
10	Тема 9 Гармонічний осцилятор: хвильовий підхід, вторинне квантування.	5	3	6
11	Колоквіум і контрольна робота 2		2	5
12	Тема 10 Чисті та змішані стани		2	2
13	Тема 11 Атом водню.	4	2	4
	ВСЬОГО	30	30	60
ІІ-ий семестр				
Змістовий модуль 3				
14	Тема 12 Перехід від квантових рівнянь руху до класичних.	2	2	6
15	Тема 13 Стаціонарна теорія збурень. Вироджений та невироджений випадки.	2	2	8

16	Тема 14 <i>Нестационарна теорія збурень.</i>	2	2	4
17	Тема 15 <i>Квантування електромагнітного поля. Взаємодія атома з електромагнітним полем.</i>	4	6	20
18	Тема 16 <i>Релятивістська теорія частинок зі спіном $s=1/2$</i>	10	6	20
19	<i>Контрольна робота 3</i>		2	3
Змістовий модуль 4				
20	Тема 17 <i>Теорія розсіювання.</i>	4	2	3
21	Тема 18 <i>Квантова механіка системи багатьох частинок.</i>	2	4	4
22	<i>Колоквіум і контрольна робота 4</i>		2	5
23	Тема 19 <i>Теорія атома гелію.</i>	4	2	2
	ВСЬОГО	30	30	60

Загальний обсяг 240 год. (I-ий сем.-120год, II-ий сем. – 120год), в тому числі:

Лекцій – **60 год.** (I-ий сем.-30год, II-ий сем. – 30год)

Практичні заняття - **60 год.** .(I-ий сем.-30год, II-ий сем. – 30год)

Консультації - **1 год.**

Самостійна робота - **120 год.** .(I-ий сем.-60год, II-ий сем. – 60 год)

Перелік питань, які виносяться на залік

1. Недостатність класичної фізики. Неможливість пояснення корпускулярних властивостей світла (фотоефект, ефект Комптона). Нестійкість класичної моделі атома. Парадокс коваля. Ультрафіолетова катастрофа. Проблема теплоємності. Макроскопічні квантові явища.
2. Виникнення основних квантових уявлень на основі припущення Планка, теорії фотоефекту Ейнштейна, гіпотези де Бройля і досліди Девісона та Джермера. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Хвиля де Бройля як критерій застосовності законів квантової механіки.
3. Процес вимірювання в квантовій механіці. Основна задача квантової механіки.
4. Уявні експерименти Фейнмана та статистична інтерпретація М. Борном хвиль де Бройля.
5. Перший постулат квантової механіки. Опис стану в квантовій механіці, хвильова функція та її інтерпретація, її зв'язок з експериментально вимірюваними величинами. Нормування хвильової функції.
6. Обґрунтування та формулювання другого постулату квантової механіки.
7. Оператори фізичних величин. Побудова операторів фізичних величин методом класичної аналогії. Оператори координати та імпульсу в координатному та імпульсному представленнях.
8. Третій постулат квантової механіки. Зв'язок операторів фізичних величин зі спостережуваними даними.
9. Співвідношення невизначеностей, його фізичний зміст і наслідки з нього.
10. Чистий і змішаний стани. Загальний метод знаходження ймовірностей у квантовій механіці для чистих станів.
11. Нестационарне та стаціонарне рівняння Шредінгера.
12. Рівняння неперервності. Оператор струму.
13. Проходження частинки крізь потенціальний бар'єр, розрахунок коефіцієнтів відбиття та проходження.
14. Оператор похідної за часом від оператора фізичної величини. Квантовомеханічне середнє.
15. Інтеграли руху в квантовій механіці. Теореми Еренфеста.
16. Представлення Шредінгера, Гейзенберга і представлення взаємодії.
17. Гармонічний осцилятор: хвильовий підхід.
18. Гармонічний осцилятор у формалізмі операторів народження і знищення. Вторинне квантування.
19. Вакуумний стан. Енергія і хвильова функція вакуумного стану.
20. Когерентні стани, власні функції когерентних станів.
21. Задача двох тіл у квантовій механіці.
22. Рух у полі центральної сили.
23. Радіальне рівняння Шредінгера.
24. Атом водню: енергетичний спектр та хвильові функції електрона, що знаходиться в стаціонарному електричному полі ядра атома водню.
25. Магнітний момент електрона в полі ядра атома водню. Неузгодженість теоретичних результатів з експериментальними даними.

Перелік питань, які виносяться на екзамен

1. Рівняння руху класичної механіки як граничний випадок рівнянь квантової механіки.
2. Хвильова функція у квазікласичному наближенні. Метод Вентцеля-Краммерса-Бріллюена.
3. Правило квантування Бора-Зоммерфельда.
4. Варіаційний метод Рітца.
5. Стаціонарна теорія збурень. Невироджений випадок.
6. Стаціонарна теорія збурень. Вироджений випадок.
7. Постановка задачі в нестаціонарній теорії збурень. Метод варіації сталих Дірака.
8. Знаходження ймовірності переходу системи з одного стану в інший внаслідок дії скінченного в часі збурення. Матриця розсіювання.
9. Ймовірність квантового переходу за одиницю часу. Золоте правило Фермі.
10. Вільне класичне електромагнітне поле як суперпозиція гармонічних осциляторів.
11. Квантування електромагнітного поля. Фотон.
12. Квантування електромагнітного поля у формалізмі операторів народження та знищення (вторинне квантування поля).
13. Вакуумний стан. Вакуумні флуктуації електромагнітного поля.
14. Випромінювання і поглинання світла. Формула Планка та закон Стефана-Больцмана.
15. Інтенсивності випромінювання та поглинання світла. Спонтанне випромінювання світла.
16. Ефект Казимира.
17. Електричне дипольне випромінювання. Правила відбору.
18. Електричні квадрупольні та магнітні дипольні переходи.
19. Час життя збуджених станів атома. Природна ширина спектральних ліній.
20. Квантова теорія дисперсії світла.
21. Теорія фотоефекту.
22. Проблеми нерелятивістської квантової механіки.
23. Рівняння Клейна-Гордона-Фока, його недоліки.
24. Рівняння Дірака.
25. Рівняння неперервності в теорії Дірака.
26. Момент кількості руху в теорії Дірака. Спін, оператор спіну.
27. Вільний рух релятивістської частинки (математичний аналіз).
28. Вільний рух релятивістської частинки (фізичний аналіз). Оператор спіральності.
29. Інтерпретація розв'язків рівняння Дірака, античастинки. Фізичний вакуум (море Дірака).
30. Нерелятивістська границя рівняння Дірака.
31. Рівняння Дірака для зарядженої частинки в електромагнітному полі.
32. Рівняння Паулі.
33. Спін-орбітальна взаємодія.
34. Енергетичний спектр атома водню з урахуванням релятивістських поправок.
35. Загальна характеристика вкладів у спектр атома водню.
36. Фізичні причини лембівського зсуву. Структура спектру атома водню та мюонного водню з урахуванням лембівського зсуву.
37. Атом у магнітному полі: випадок сильного магнітного поля.
38. Атом у магнітному полі: випадок слабого магнітного поля.
39. Постановка задачі в теорії розсіювання.
40. Метод функцій Гріна в теорії розсіювання.
41. Амплітуда і переріз розсіювання. Зв'язок між амплітудою і перерізом розсіювання.
42. Борнівське наближення та умова його застосовності.
43. Теорія непружного розсіювання.
44. Властивості динамічного структурного фактора.
45. Принцип тотожності частинок у квантовій механіці.
46. Симетричні хвильові функції та бозе-частинки. Антисиметричні хвильові функції та фермі-частинки.
47. Обмінна енергія.
48. Симетризовані хвильові функції системи двох тотожних частинок. Детермінант Слетера.

49. Перманент. Поняття бозе-конденсату та чисел заповнення. Хвильова функція основного стану системи n безспінових вільних бозе-частинок в об'ємі V .
50. Атом гелію в основному стані.
51. Властивості спінових хвильових функцій.
52. Обчислення енергії основного стану атома гелію за допомогою теорії збурень.
53. Обчислення енергії основного стану атома гелію за допомогою варіаційного методу.
54. Атом гелію у збудженому стані. Ортогелій і паргелій.
55. Обмінний і кулонівський інтеграл: їх фізична суть та обчислення.
56. Метод Хартрі-Фока.
57. Наближення Томаса-Фермі.
58. Адіабатичне наближення: суть і критерії застосовності.
59. Вивчення властивостей молекул за допомогою адіабатичного наближення: молекула водню.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

1. Dirac P.A.M. The Principles of Quantum Mechanics. Oxford at the Clarendon Press. 1947.
2. Федорченко А.М. Теоретична фізика. т.2, Київ, Вища школа, 1993.
3. Вакарчук І.О. Квантова механіка. - Львів, ЛДУ, 2004.
4. Машкевич В.С. Годенко Л.П. Квантова фізика. Конспект лекцій Київ, КПІ, 1990.
5. Bohm A. Quantum Mechanics: Foundations and Applications. Springer. 1986.
6. Messiah A. Quantum Mechanics. Dover Books on Physics. 2014.
7. Flugge S. Practical Quantum Mechanics. Springer. 1999.
8. Pereyra P. Fundamentals of Quantum Physics: Textbook for Students of Science and Engineering. Springer. 2012.
9. Sharma A.C. A Textbook on Modern Quantum Mechanics. CRC Press 2022.
10. Greiner W. Relativistic Quantum Mechanics: Wave Equations. Springer, Science. 2012.
11. Bjorken J.D., Drell S.D. Relativistic Quantum Mechanics. McGraw-Hill Education. 1998.
12. Weinberg S. Lectures on Quantum Mechanics. Cambridge University Press. 2013.
13. Cronin J.A., Greenberg D.F., Telegdi V.L. Graduate Problems in Physics with Solutions. University of Chicago Press. 1979.
14. Squires G.L. Problems in quantum mechanics with solutions. Cambridge University Press. 1995.
15. Tamvakis K. Problems and solutions in quantum mechanics. Cambridge University Press. 2005.
16. Yung-Kuo L. Problems and solutions on quantum mechanics. World Scientific. 2005.