

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ВИННИЧЕНКА

Факультет математики, природничих наук та технологій
Кафедра природничих наук і методик їхнього навчання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
В.о. завідувача кафедри

_____ (Протокол 1 від «03» серпня 2023 року)



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

НПП 2.12.3 ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА: КВАНТОВА МЕХАНІКА

(шифр і назва навчальної дисципліни)

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 01 Освіта/Педагогіка

(шифр галузі і назва галузі знань)

Спеціальність 014.15 Середня освіта (Природничі науки)

(код і назва спеціальності)

Освітня програма Середня освіта (Природничі науки)

(назва освітньої програми)

Форма навчання денна

(денна, заочна)

2023–2024 навчальний рік

Робоча програма з теоретичної фізики: квантова механіка розроблена на основі освітньо-професійної програми «Середня освіта (Природничі науки)» на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти, навчального плану підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 014.15 «Середня освіта (Природничі науки)

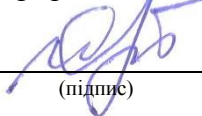
Розробник: Подопригора Наталія Володимирівна, професор кафедри природничих наук та методик їхнього навчання, доктор педагогічних наук, професор

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

Робочу програму обговорено та схвалено на засіданні кафедри природничих наук і методик їхнього навчання

Протокол № 1 від 03 серпня 2023 року

В.о.завідувача кафедри природничих наук і методик їхнього навчання

 / Сальник І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Робоча програма навчальної дисципліни Теоретична фізика: квантова механіка для студентів спеціальності 014.15 «Середня освіта (Природничі науки) за першому рівні вищої освіти. ЦДУ імені В. Винниченка, 2023. 38 с.

1. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

1.1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів (ECTS) – 3	Галузь знань 01 Освіта/Педагогіка	Нормативна (фахова)
Модулів – 1	Спеціальність 014 «Середня освіта (Природничі науки)	Рік підготовки:
Змістових модулів – 3		4-й
Індивідуальне науково-дослідне завдання _____ (назва)		Семестр
Загальна кількість годин – 90 32/58 (аудиторна/самостійна)		7-й
		Лекції
Кількість навчальних тижнів – 16 Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 2 ; самостійної роботи студента – 4	Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти	16 год.
		Практичні, семінарські
		16 год.
		Лабораторні
		0 год.
		Самостійна робота
		58 год.
Індивідуальні завдання:		
	0 год.	
	Вид контролю: 7-й семестр – <i>екзамен</i>	

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної роботи становить:

для денної форми навчання – 40% / 60%

2. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

2.1. Мета дисципліни «Теоретична фізика: квантова механіка» визначається метою освітньо-професійної програми (ОПП) підготовки бакалаврів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)», що сприяє формуванню інтегрованої динамічної комбінації знань і умінь для вивчення студентами теоретичних та методологічних засад теоретичної фізики відповідно до структури спеціальної фахової компетентності з теоретичної фізики: *квантова механіка*. Теоретична фізика, як навчальна дисципліна, згідно робочого навчального плану підготовки бакалаврів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)» (2020–2024) входить до нормативних (фахових) дисциплін циклу професійної підготовки майбутніх вчителів природничих наук, фізики, хімії, біології закладу загальної середньої освіти.

Структурована система знань, розумінь, умінь, здатностей та ін. компетенцій з квантової механіки в структурі професійної компетентності майбутніх фахівців забезпечується їхньою теоретичною і практичною підготовкою, сприяючи *формуванню* в студентів: цілісного бачення світу, виробленню в них наукового підходу до аналізу проблем оточуючого світу; теоретичного та критичного мислення під час тлумачення явищ мікросвіту та процесів на мікроскопічному рівні відповідно до теоретичних основ квантової механіки.

Кінцева мета вивчення дисципліни «Теоретична фізика квантова механіка» спрямована на *формування* у студентів засобами навчання квантової механіки цілісного бачення світу, науковому світогляду; виробленню здатності до: реалізації наукового підходу під час аналізу проблем оточуючого світу, методології наукового пізнання у навчально-пізнавальній діяльності; *розвитку*: загально-навчальних умінь (аналізу, узагальненню, систематизації, моделюванню і ін.), абстрактно-логічного, теоретичного та критичного мислення; творчих здібностей на засадах фундаменталізації, міждисциплінарної інтеграції, інформатизації та професійної спрямованості навчання.

2.2. Завдання вивчення дисципліни: під час вивчення теоретичних основ квантової механіки студенти знайомляться із застосуванням операторного підходу, заснованого на інтегралах руху та співвідношеннях комутації. Вивчаються постулати квантової механіки та їхнє прикладне застосування для опису найпростіших квантових систем у задачах, які мають точні розв'язки (частинка в потенціальній ямі, гармонічний осцилятор і атом гідрогену). кількісного підходу до опису та аналізу квантово-механічних станів мікроскопічних фізичних систем. При цьому наголос робиться на загальних підходах щодо опису цих станів у найпростіших зовнішніх умовах (стаціонарні, одновимірні потенціальні поля). Особлива увага приділяється загальним теоретичним методам (квантово-механічне рівняння та закони збереження) знаходження квантових станів мікрооб'єктів (стандартні методи розв'язування рівняння Шредінгера), або системи мікрооб'єктів (стандартні методики виконання наближених розрахунків: теорія збурень, метод послідовних наближень і ін.) у періодичних фізичних полях на базі методу Хартрі-Фока. Встановлюються межі застосування квантової механіки та критерії її виродження при переході до класичної механіки.

Вивчення дисципліни передбачає, отримання знань та вмінь, які необхідні майбутньому вчителю природничих наук та фізики в його майбутній професійній діяльності.

У результаті вивчення навчальної дисципліни у студента мають бути сформовані такі **компетентності**:

Інтегральна компетентність – здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми в галузі середньої освіти, що передбачає застосування теорій та методів освітніх наук та природничих наук, фізики, хімії, біології і характеризується комплексністю та невизначеністю педагогічних умов організації освітнього процесу в закладах загальної середньої освіти.

Загальні компетентності:

ЗК1. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК2. Здатність діяти на основі етичних міркувань (мотивів).

ЗК3. Здатність діяти соціально відповідально та свідомості.

ЗК4. Здатність працювати в команді.

ЗК5. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК6. Здатність застосовувати набуті знання в практичних ситуаціях.

ЗК7. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК8. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

ЗК10. Здатність до адаптації та дії в новій ситуації.

Предметні (спеціальні фахові) компетентності:

ФК1. Здатність використовувати систематизовані теоретичні та практичні знання з квантової механіки при вивченні Всесвіту і природи Землі як планети.

ФК2. Володіння математичним апаратом квантової механіки.

ФК8. Здатність до рефлексії та самоорганізації професійної діяльності.

ФК11. Здатність характеризувати досягнення природничих наук та їх ролі у житті суспільства; формування цілісних уявлень про природу, використання природничо-наукової інформації на основі оперування базовими загальними закономірностями природи.

Програмними результатами навчання є:

Знання:

ПРН32. Демонструє знання та розуміння основи квантової механіки, взаємозв'язок квантової механіки в структурі природничих наук та з іншими науками;

ПРН33. Знає й розуміє математичні методи квантової механіки в моделі Шредінгера;

ПРН34. Знає основні психолого-педагогічні теорії навчання, інноваційні технології навчання природничих наук, фізики, хімії, біології, актуальні проблеми розвитку педагогіки та методики навчання природничих наук, фізики, хімії, біології.

ПРН35. Знає форми, методи і засоби контролю та корекції знань учнів з природничих наук, фізики, хімії, біології.

ПРН37. Знає основи безпеки життєдіяльності, безпечного використання обладнання кабінетів фізики, хімії, біології.

Уміння:

ПРНУ1. Аналізує природні явища і процеси, оперує базовими закономірностями природи на рівні сформованої природничо-наукової компетентності з погляду квантової механіки як теоретичної схеми, її принципів і основ, а також на основі

відповідних математичних методів.

ПРНУ3. Розв'язує задачі з квантової механіки різних рівнів складності.

ПРНУ4. Користується математичним апаратом квантової механіки, використання математичних та числових методів, які часто застосовуються в квантовій фізиці.

ПРНУ7. Уміє знаходити, обробляти та аналізувати інформацію з різних джерел, насамперед за допомогою інформаційних та хмарних технологій.

ПРНУ8. Самостійно вивчає нові питання природничих наук, фізики, хімії, біології та методики навчання природничих наук, фізики, хімії, біології за різноманітними інформаційними джерелами.

ПРНУ11. Дотримується правових норм і законів, нормативноправових актів України, усвідомлює необхідність їх дотримання.

Комунікація:

ПРНК1. Володіє основами професійної мовленнєвої культури при вивченні квантової механіки.

ПРНК2. Пояснює фахівцям і не фахівцям стратегію сталого розвитку людства та екологічної безпеки і шляхи вирішення глобальних проблем людства.

Автономія і відповідальність

ПРНА1. Усвідомлює соціальну значущість майбутньої професії, сформованість мотивації до здійснення професійної діяльності.

ПРНА2. Відповідально ставиться до забезпечення охорони життя і власного здоров'я та оточуючих у освітньому процесі та позаурочній діяльності.

2.3. Міждисциплінарні зв'язки: Дисципліна «Теоретична фізика: квантова механіка» вивчається у тісному дидактичному зв'язку із дисциплінами циклу професійної підготовки (математичні методи фізики, загальна фізика та методика навчання природничих наук), засвоєння яких необхідно майбутнім учителям фізики та інтегрованих курсів природничих наук для подальшої навчально-пізнавальної та професійної діяльності. Дисципліна охоплює достатню кількість засобів і прийомів теоретичної фізики під час вивчення явищ мікросвіту. Здатність студентів застосовувати знання та вміння сформовані під час вивчення квантової механіки в подальшому є основою для вивчення інших дисциплін: статистичної фізики, загальної фізики (квантова фізика), лабораторного практикум з квантової фізики, фізико-хімічних методів дослідження, фізичної і колоїдної хімії тощо.

3. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА: КВАНТОВА МЕХАНІКА

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

Тема 1. Вступ.

Предмет і місце квантової механіки в сучасній фізиці.

Тема 2. Експериментальні основи квантової механіки.

Обмеженість класичної фізики при поясненні явищ мікросвіту і необхідність переходу до квантових понять. Ідеї Планка, Ейнштейна, де Бройля: дискретність процесів випромінювання і поглинання світла (*експериментальне вивчення випромінювання і поглинання світла в спектрах абсолютно чорного тіла: закони*

Кірхгофа, Стефана-Больцмана, Віна; формули Релея-Джинса, Планка), модель атома Резерфорда-Бора, корпускулярно-хвильовий дуалізм (досліди Франка і Герца, Штерна і Герлах, Девісона і Джермера). Необхідність статистичної інтерпретації квантових явищ. Принцип відповідності. Роль сталої Планка.

Тема 3. Теоретичні основи квантової механіки.

Специфіка фізики мікрооб'єктів: ідеї квантування (дискретності), корпускулярно-хвильового дуалізму, співвідношення невизначеностей Гейзенберга, імовірнісний характер поведінки мікрооб'єктів. Деякі результати, що впливають із співвідношення невизначеностей. Неможливість класичної інтерпретації мікрооб'єктів – відмова від уявлень класичної фізики. Співвідношення невизначеностей для макросистем.

Тема 4. Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки.

Оператори і дії над ними. Лінійні оператори. Самоспряжені оператори. Опис стану мікросистем. Хвильова функція. Квантово-механічний принцип суперпозиції. Власні функції і власні значення самоспряжених операторів, їх фізичний зміст. Основні властивості функцій операторів квантової механіки. Середні значення фізичних величин, ймовірність їх дозволених значень. Комутуючі оператори. Умови можливості одночасного вимірювання різних механічних величин у квантовій механіці. Повний набір спостережуваних.

Принцип причинності у квантовій механіці і рівняння Шредінгера. Властивості стаціонарних станів. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Основні оператори квантової механіки в координатному зображенні. Оператори координати і імпульсу, кінетичної, потенціальної і повної енергії, оператор моментів імпульсу, гамільтоніан. Похідні оператора за часом. Теореми Еренфеста. Граничний перехід до класичної механіки. Інтеграли руху в квантовій механіці. Закон збереження числа частинок. Середня густина речовини. Середня густина електричного заряду. *Нерівності Гейзенберга у загальному представленні (для будь-якої пари спряжених квантово-механічних величин).*

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

Тема 1. Одновимірний рух.

Загальні властивості одновимірного руху. Задача про частинку в потенціальної ямі. Проходження частинки через потенціальний бар'єр. Парадоксальність тунельного ефекту. Надбар'єрне розсіювання. Лінійний гармонічний осцилятор в координатному зображенні.

Електрон в потенціальної ямі скінченої висоти.

Електрон в металі. Робота виходу. Холодна емісія. Контактна різниця потенціалу.

Тунельний ефект і теорія альфа-розпаду. Тунельний ефект і термоядерні реакції.

Тунельний ефект і його застосування.

Тема 2. Рух частинки в центральній-симетричному полі.

Загальні властивості руху в полі центральних сил. Власні функції і власні значення операторів орбітального моменту імпульсу і проекції моменту імпульсу в полі центральних сил. Радіальне рівняння Шредінгера. Рух у кулонівському полі. Теорія атома водню: радіальне рівняння Шредінгера, енергетичний спектр електрона (формула Бальмера). Хвильові функції атома водню. Класифікація атомів за допомогою квантових чисел.

Тема 3. Спін електрона. Власний механічний і магнітний моменти електрона. *Експериментальні методи доказу існування спіну електрона. Досліди Ейнштейна і де Гааза, Штерна і Герлаха.* Оператори спіна. Хвильова функція електрона з урахуванням спіна. Повний набір величин, що спостерігаються для електрона в атомі.

Повний магнітний момент атома. Множник Ланде.

Струми в атомі. Магнетон.

Модель оптичного електрона в атомах лужних металів. Ротатор.

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 3. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ.

Тема 1. Теорія збурень.

Наближені методи квантової механіки. Стаціонарна теорія збурень в квазікласичному наближенні (при наявності і відсутності виродження).

Система тотожних частинок. Принцип тотожності частинок: симетричні та антисиметричні стани. Зв'язок спіну із статистикою: бозони, ферміони. Принцип Паулі.

Тема 2. Атом гелію. Якісна теорія атома гелію. Мультиплетність станів. Орто- і парагелій. Наближена кількісна теорія атома гелію: поняття про метод самоузгодженого поля. Обмінна та кулонівська енергії.

Багатоелектронні атоми. Класифікація станів електрона в атомі. Періодична система елементів Д.І. Менделєєва.

Тема 3. Взаємодія атома з електромагнітним полем.

Молекула водню. Природа хімічного зв'язку. Атоми в зовнішньому полі. Ефект Зеємана. Пара- і діамагнітні властивості атомів і молекул. *Напівпровідники і їх застосування.*

Тема 4. Електрон в ідеальному кристалі.

Рух електрона в періодичному полі кристала. Метод Хартрі-Фока. Адиабатичне наближення. Елементи зонної теорії твердих тіл.

Тема 5. Теорія розсіювання.

Постановка задачі в теорії розсіювання мікрочастинок. Розрахунок пружного розсіювання наближеним методом Борна. Пружне розсіювання атомами швидких заряджених мікрочастинок. Теорія розсіювання, матриця розсіювання. Загальний випадок розсіювання. Дисперсійні співвідношення. Розсіювання зарядженої частинки в кулонівському полі.

Релятивістська квантова механіка.

Тема 6. Висновки.

Формальна схема квантової механіки. Межі застосування квантової теорії. Фізична картина мікросвіту.

Примітки: курсивом виділені питання програми, які виносяться на самостійне опрацювання.

5. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма)				
	усього	у тому числі			
		лекції	пр	інд.	ср
Модуль 3. Квантова механіка					
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ					
Тема 1. Вступ	2	1	-		1
Тема 2. Експериментальні основи квантової механіки	6	1	2		3
Тема 3. Теоретичні основи квантової механіки	8	2	2		4
Тема 4. Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	12	2	4		6
<i>Тестове завдання №1 «Експериментальні та теоретичні основи квантової механіки»</i>	2	-	-		2
<i>Тестове завдання №2 «Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки»</i>	2	-	-		2
Разом за змістовим модулем 1	32	6	8	0	18
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ					
Тема 1. Одновимірний рух	10	2	2		6
Тема 2. Рух частинки в центральном-симетричному полі. Атом гідрогену	12	2	4		6
Тема 3. Спін електрона	10	2	2		6
Разом за змістовим модулем 2	32	6	8		18
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 3. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ					
Тема 1. Теорія збурень	4	2	-		2
Тема 2. Атом гелію	4	2	-		2
Тема 3. Взаємодія атома з електромагнітним полем	2	-	-		2
Тема 4. Електрон в ідеальному кристалі	2	-	-		2
Тема 5. Теорія розсіювання	2	-	-		2
Тема 6. Висновки	2	-	-		2
Разом за змістовим модулем 3	16	4	-	-	12
<i>Контрольна робота</i>	4	-	-	-	4
<i>Розв'язування і захист індивідуальних задач</i>	6	-	-	-	6
Усього годин	90	16	16	-	58

6. ТЕМИ СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ (не передбачено)

7. ТЕМИ І ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

6.1. ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 3. Квантова механіка		
1.	Особливості поведінки мікрооб'єктів	2
2.	Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга	2
3.	Самоспряжені оператори. Власні функції і власні значення. Комутатори операторів	2
4.	Зміна квантових станів. Інтеграл руху	2
5.	Стаціонарне рівняння Шредінгера	2
6.	Задача про частинку в потенціальній ямі	2
7.	Рух частинки у центральній-симетричному полі. Атом гідрогену	2
9.	Спін електрона. Магнітні властивості атомів	2
Усього годин		16

6.2. ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Модуль 1. КВАНТОВА МЕХАНІКА

1. Тематика практичних занять

Тема 1. Особливості поведінки мікрооб'єктів.

2 год.

В аудиторії: №№ 1; 2; 3; 4; 5.

Додому: №№ 6; 8; 9.

Запитання для самоконтролю:

1. Який розділ фізики називають квантовою механікою?
2. Що є предметом дослідження квантової механіки?
3. Сформулювати принцип відповідності для квантової теорії.
4. У чому полягає ідея Планка стосовно пояснення характеру випромінювання у спектрі абсолютно чорного тіла?
5. У чому полягає ідея Ейнштейна стосовно пояснення квантового характеру електромагнітного випромінювання?
6. Сформулювати постулати та правило відбору напівкласичної теорії Бора.
7. У чому полягають основні ідеї Луї де Бройля, щодо пояснення корпускулярно-хвильових властивостей мікрооб'єктів?
8. У чому полягає фізичний зміст сталої Планка?
9. Записати співвідношення невизначеностей Гейзенберга у координатному представленні.

10. Яке значення мають співвідношення невизначеностей Гейзенберга для фізичної теорії?

Задачі для розв'язку

Задача № 1. Оцінити час, за який електрон, що рухається навколо протона в атомі водню з радіусом $R_0 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м, впав би на ядро, якщо він втрачав би енергію на випромінювання у відповідності з формулою класичної електродинаміки:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2}{3} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 c^3} \ddot{r}^2,$$

де \vec{r} – вектор прискорення електрона.

Відповідь: $\tau = \frac{(R_0 - R_1)^3}{4\pi^2 \epsilon_0^2 m^2 c^3 e^4} \approx 1,4 \cdot 10^{-11}$ с, де $R_1 \approx 10^{-15}$ м – радіус ядра

гідрогену.

2. Користуючись правилом квантування: $\oint p_i dq_i = hn_i$, де h – стала Планка; p_i – узагальнений імпульс; q_i – узагальнена координата; n_i – відповідний набір цілих чисел, відшукати рівні енергії одновимірного гармонічного осцилятора з частотою

Відповідь: $E_n = n \cdot \omega$.

3. Частинка масою m_0 рухається за коловою орбітою у центральній-симетричному потенціальному полі. Потенціальна енергія частинки $U = \frac{1}{2}kr^2$ (r – радіус орбіти).

Використавши правило квантування орбітального моменту імпульсу частинки на орбіті визначити рівні енергії частинки.

Відповідь: $E_n = n \cdot \omega$ (де $n = 1, 2, 3, \dots$); $\omega = \sqrt{\frac{k}{m_0}}$.

4. Показати, що частота випромінювання гідрогеноподібного атома, що відповідає переходу електрона з $n+1$ орбіти на n , дорівнює частоті обертання електрона на n орбіті, якщо $n \gg 1$ (принцип відповідності).

Вказівка: Використати постулат частот і вираз для енергії для гідрогеноподібних атомів.

5. Відшукати квантове число n для збудженого стану атома водню, якщо відомо, що у процесі переходу до основного стану атом випромінює два фотони з довжинами хвиль $\lambda_1 = 65630$ нм та $\lambda_2 = 12160$ нм.

Відповідь: $n = 3$.

6. Обрахувати потенціали іонізації і перші потенціали збудження для іонів гелію He^+ та літію Li^{++} .

Відповідь: $U_{\text{He}^+} = 54 \text{ В}$; $U_{\text{Li}^{++}} = 122 \text{ В}$.

8. Відшукати для гідрогену та дейтерію різницю: а) енергій зв'язку електронів в основних станах; б) довжин хвиль головних ліній серії Бальмера; в) перших потенціалів збудження.

Відповідь: а) $E_{\text{D}} - E_{\text{H}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ eВ}$; б) $\lambda_{\text{D}} - \lambda_{\text{H}} = 0,176 \text{ нм}$;

в) $U_{\text{D}} - U_{\text{H}} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

9. Обрахувати для зв'язаної системи *позитрон+електрон*: а) радіуси стаціонарних орбіт позитрона; б) позитронний потенціал іонізації; в) довжину хвилі резонансної лінії.

Відповідь: а) $r_n = n^2 r_1$, $r_1 = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; б) $U = 6,8 \text{ В}$; в) $\lambda = 243 \text{ нм}$.

Тема 2. Хвильові властивості мікрочастинок. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

2 год.

В аудиторії: №№ 11; 12; 15; 17; 18; 28; 30.

Додому: №№ 14; 16; 24.

Запитання для самоконтролю:

1. Сформулюйте основні проблеми, з якими зіткнулась класична фізика наприкінці XIX століття під час пояснень явищ мікросвіту?
2. Які фізичні явища вказують на хвильову природу мікрооб'єктів?
3. Які фізичні явища вказують на корпускулярну природу мікрооб'єктів?
4. У чому полягає ідея корпускулярно-хвильового дуалізму?
5. Які фундаментальні експериментальні дослідження підтвердили ідею Луї де Бройля щодо корпускулярно-хвильового дуалізму елементарних частинок?
6. Як розрахувати довжину хвилі де Бройля?
7. У чому полягає концепція математичних хвиль де Бройля?
8. Чи диспергують хвилі де Бройля у вакуумі?
9. Як визначається фазова швидкість хвиль де Бройля?
10. Як визначається групова швидкість хвиль де Бройля?
11. Чи має фізичний зміст групова швидкість для плоскої монохроматичної хвилі де Бройля, у чому полягає ідея введення цієї величини?
12. У чому полягає необхідність статистичної інтерпретації квантових явищ?

Задачі для розв'язку

11. Яка довжина хвилі де Бройля електрона, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів $U = 10^3 \text{ В}$?

Відповідь: $\lambda = 0,0387 \text{ нм}$.

12. Які дебройлівські довжини хвиль протона та електрона, кінетичні енергії яких дорівнюють середній кінетичній енергії теплового руху одноатомних молекул при кімнатній температурі?

Відповідь: $\lambda_p = 6,5 \text{ нм}$; $\lambda_e = 0,15 \text{ нм}$.

14. Відшукати довжину хвилі де Бройля для α -частинки з кінетичною енергією $7,7 \text{ МеВ}$. В дослідях з резерфордівського розсіювання суттєвими є віддалі порядку 10^{-15} м ; під час аналізу результатів дослідів за звичай не враховують хвильові властивості α -частинок. Чи можна вважати таке припущення вірним?

Відповідь: $\lambda = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}$; хвильові властивості α -частинок потрібно враховувати.

15. У 1929 році Естерман і Штерн виконали експеримент з дифракції атомів гелію, що падали на кристал фтористого літію (LiF). Яка довжина хвилі де Бройля атома гелію (He) з енергією $3/2 \cdot kT$ при температурі 290 К ?

Відповідь: $\lambda_{\text{He}} = 0,07 \text{ нм}$.

16. Відшукати значення кінетичної енергії електрона, за якої похибка у довжині хвилі де Бройля, що визначається за релятивістською формулою, не перевищує 1% від значення, що отримують за релятивістською формулою. Виконайте аналогічні обчислення також і для протона.

Відповідь: $E_k^{(e)} \leq 0,02 \text{ МеВ}$; $E_k^{(p)} \leq 37,5 \text{ МеВ}$.

17. Використовуючи функцію статистичного розподілу Максвелла для молекул ідеального газу за модулем їх швидкості, отримати розподіл молекул в стані теплової рівноваги за дебройлівськими довжинами хвиль. Відшукати найбільш ймовірну довжину хвилі де Бройля для молекули водню при температурі 300 К .

Відповідь: $dW(\lambda) = 4\pi h^3 (2\pi m k T)^{-3/2} \lambda^{-4} e^{-\frac{h^2}{2m\lambda^2 k T}} d\lambda$; $\lambda_{\text{ім}} = 0,09 \text{ нм}$.

18. Нерелятивістська частинка масою m_1 і кінетичною енергією E_k пружно виконує лобовий співудар з нерухомою частинкою масою m_2 . Відшукати дебройлівські довжини хвиль після співудару в системі відліку, зв'язаної із центром мас цих частинок.

Відповідь: $\lambda_1 = \lambda_2 = \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \frac{h}{\sqrt{2m_1 E_k}}$.

24. Електрон перебуває в області з лінійними розмірами порядку 0,1 нм. Якою є невизначеність імпульсу електрона? Якій енергії відповідає цей імпульс?

$$\text{Відповідь: } \Delta p \geq 10^{-24} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}}; \quad E = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \geq 3,5 \text{ еВ.}$$

28. Показати, що довжина хвилі де Бройля вкладається на довжині будь-якої борівської орбіти ціле число раз.

$$\text{Відповідь: } \frac{r_n}{\lambda} = n.$$

30. Виходячи із співвідношення неозначеностей, показати, що мінімально можлива енергія лінійного гармонічного осцилятора за порядком величини дорівнює $\hbar\omega$ (ω – власна циклічна частота осцилятора).

$$\text{Відповідь: } E_{\min} \sim \hbar\omega.$$

Тема 3. Самоспряжені оператори. Власні функції і власні значення. Комутатори операторів.

2 год.

В аудиторії: №№ 32; 35; 36; 49; 50; 51; 52; 53.

Додому: №№ 39; 45; 57.

Запитання для самоконтролю:

1. Що називають оператором?
2. Які оператори називають лінійними?
3. Що називають комутатором операторів?
4. Які оператори називають комутуючими?
5. Які оператори називають самоспряженими?
6. Що називають хвильовою функцією?
7. Яким умовам повинна задовольняти хвильова функція внаслідок її фізичних обмежень?
8. Як визначається густина місцезнаходження мікрочастинки?
9. Запишіть умову нормування хвильової функції.
10. Сформулюйте квантовий принцип суперпозиції.
11. Запишіть у загальному вигляді рівняння для власних функцій і власних значень деякого довільного оператора.
12. Що означає твердження «власне значення ермітового оператора вироджене»?
13. Які типи спектрів власних значень Ви знаєте?
14. Власні значення ермітових операторів належать до множини дійсних чи уявних чисел?
15. Як визначити середнє значення фізичної величини із урахуванням імовірності їх дозволених значень.
16. Що у квантовій механіці розуміють під повним набором спостережуваних?

Задачі для розв'язку

32. Відшукати результат дії наступних операторів $\frac{d^2}{dx^2}$ та $\left(\frac{d}{dx}\right)^2$ на функції: а) $\sin x$; б) e^{2x} .

Відповідь: а) $(2 - x^2)\sin x + 4x \cos x$, $(1 - x^2)\sin x + 3x \cos x$;

б) $2(1 + 4x + 2x^2)e^{2x}$, $(1 + 6x + 4x^2)e^{2x}$.

35. Подати оператор паралельного переносу $\hat{T}_a \psi(\vec{r}) = \psi(\vec{r} + \vec{a})$ через оператор імпульсу.

Відповідь: $\hat{T}_a = e^{i(\vec{p}, \vec{a})}$.

36. Відшукати результат дії оператора $e^{kx \frac{\partial}{\partial x}}$ на функцію $\psi(x)$.

Відповідь: $e^{kx \frac{\partial}{\partial x}} \psi(x) = e^{i k x \hat{p}_x} \psi(x) = \psi[(k + 1)x]$.

39. Чи є оператор комплексного спряження $\hat{M}\psi = \psi^*$ лінійним оператором?

Відповідь: Ні.

45. Довести ермітовість наступних операторів: а) \hat{p}_x ; б) \hat{L}_z ; в) \hat{p}_x^2 ; г) \hat{H} .

49. Довести, що якщо оператори \hat{A} і \hat{B} комутують, тоді:

а) $(\hat{A} + \hat{B})^2 = \hat{A}^2 + 2\hat{A}\hat{B} + \hat{B}^2$; б) $(\hat{A} + \hat{B})(\hat{A} - \hat{B}) = \hat{A}^2 - \hat{B}^2$; в) $[(\hat{A} + \hat{B}), (\hat{A} - \hat{B})] = 0$.

50. Довести, що якщо оператори \hat{A}_i комутують з оператором \hat{B} , тоді з ним комутує і оператор $\hat{A} = \sum_i \hat{A}_i^2$.

51. Довести, що якщо оператори $[\hat{A}, \hat{B}] = 1$, тоді: а) $[\hat{A}, \hat{B}^2] = 2\hat{B}$; б) $[\hat{A}, \hat{B}^3] = 3\hat{B}^2$; в) $[\hat{A}^2, \hat{B}^2] = 2(\hat{A}\hat{B} + \hat{B}\hat{A})$.

52. Відшукати комутатор оператора \hat{x} та оператора Лапласа ∇^2 .

Відповідь: $[\hat{p}_y^2, \hat{x}] = 2 \frac{\partial}{\partial x}$

53. Перевірити наступні правила комутації для гамільтоніана \hat{H} у потенціальному полі $U(x)$: а) $[\hat{H}, y] = i \frac{\hbar}{m_e} \hat{p}_y$; б) $[\hat{H}, \hat{p}_x] = i \frac{dU}{dx}$; в) $[\hat{H}, \hat{p}_x^2] = 2i \frac{dU}{dx} \hat{p}_x$.

57. Довести наступні правила комутації:

а) $[\hat{L}_x, \hat{p}_x] = 0$; б) $[\hat{L}_x, \hat{p}_y] = i \hat{p}_z$; в) $[\hat{L}_x, \hat{p}_z] = -i \hat{p}_y$.

Тема 4. Зміна квантових станів. Інтеграли руху.

2 год.

В аудиторії: №№ 89; 91; 98; 101.

Додому: №№ 95; 106; 109.

Запитання для самоконтролю:

1. За допомогою чого описується квантово-механічний стан мікрочастинок?
2. З якого рівняння квантової механіки шукають хвильову функцію мікрочастинок та її зміну? Записати його загальний вигляд.
3. Сформулювати квантовий принцип причинності.
4. Чому дорівнює оператор координати?
5. Який вигляд має оператор проекції імпульсу на вісь Ox ?
6. Записати загальний вигляд оператора Гамільтона?
7. Який вигляд має оператор кінетичної енергії?
8. Який вигляд має оператор потенціальної енергії?
9. Записати стаціонарне рівняння Шредінгера в операторному представленні.
10. Записати квантове рівняння руху, що воно визначає?
11. Записати квантові рівняння Гамільтона.
12. Записати квантові співвідношення, які відображають теореми Еренфеста.
13. За яких умов можна стверджувати, що квантовий рух переходить в класичний?
14. Які інтеграли руху квантової механіки Вам відомі?
15. Записати рівняння неперервності квантової механіки.
16. Сформулювати закон збереження числа частинок для квантової системи.
17. Як визначає густина потоку ймовірностей?
18. Як визначається середня густина речовини?
19. Як визначається середня густина електричного заряду?

Задачі для розв'язку

89. З'ясувати, чи є хвильова функція $\psi(x,t) = \sum_k \psi_k(x) e^{-i\omega_k t}$ (де $\omega_k = \frac{E_k}{\hbar}$), яка є суперпозицією стаціонарних станів, розв'язком часового та стаціонарного рівнянь Шредінгера.

Відповідь: Задовольняє лише часовому рівнянню Шредінгера.

91. Показати, що в стаціонарних станах густина імовірності та густина потоку імовірності не залежить від часу.

95. Вільна частинка має у момент часу $t=0$ хвильову функцію:

$$\text{а) } \psi(x,0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin\left(\frac{p_0 x}{\hbar}\right); \quad \text{б) } \psi(x,0) = (2\pi\hbar)^{-1/2} e^{i p_0 x / \hbar}$$

$$\text{Відповідь: а) } \psi(x,t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-i \frac{p_0^2}{2m_0} t} \sin\left(\frac{p_0 x}{\hbar}\right);$$

$$\text{б) } \psi(x,t) = (2\pi\hbar)^{-1/2} e^{i \left(p_0 x - \frac{p_0^2}{2m_0} t \right) / \hbar}$$

98. У момент часу $t=0$ вільна частинка має хвильову функцію $\psi(x,0) = A e^{-\frac{x^2}{2a^2} + ikx}$. Відшукати коефіцієнт A та область локалізації частинки. Знайти густину потоку імовірності j .

$$|A|^2 = \frac{1}{a\sqrt{\pi}}; \quad j = \frac{\hbar}{2im_0} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial x} \right) = |A|^2 \frac{\hbar k}{m_0} e^{-\frac{x^2}{2a^2}} = \frac{\hbar k}{m_0} \omega$$

вираз співпадає з класичним; величина $\frac{\hbar k}{m_0}$ – аналог класичної швидкості частинки.

101. Довести, що для частинки, яка рухається в потенціальному полі $U(x)$, виконуються операторні рівності:

$$\text{а) } \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = \frac{1}{m_0} \langle x \hat{p}_x - \hat{p}_x x \rangle;$$

$$\text{б) } \langle x \hat{p}_x \rangle = \frac{\hbar}{2} \langle \hat{p}_x^2 \rangle - \langle x \rangle \langle \hat{p}_x \rangle; \quad \text{в) } \langle \hat{p}_x \rangle = -i \langle \hat{p}_x \left(\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial x} \right) \rangle$$

106. Довести істинність наступних операторних рівнянь руху частинки у потенціальному полі $U(x)$: $\frac{dx}{dt} = \frac{\hat{p}_x}{m_0}$; $\frac{d\hat{p}_x}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial x}$.

Тема 5. Стаціонарне рівняння Шредінгера.

2 год.

В аудиторії: №№ 115(1); 116, 120.

Додому: №№ 115(2,3,4).

Запитання для самоконтролю:

1. Який стан квантової системи називають стаціонарним?
2. Записати стаціонарне рівняння Шредінгера для координатної частини хвильової функції в диференціальній формі.
3. Записати інтегральну форму стаціонарного рівняння Шредінгера для часової складової хвильової функції.
4. Який рух квантової частинки називають одновимірним?
5. Сформулюйте основні властивості одновимірного руху.
6. Як визначити середнє значення фізичної величини?

Задачі для розв'язку

Задача № 115. Для частинки, що перебуває на n -ому рівні в одновимірній прямокутній потенціальній ямі з абсолютно непроникними стінками, обчислити:

1) \bar{x} ; 2) $\overline{p_x}$; 3) \overline{E} ; 4) $\overline{E^2}$

Примітка: Хвильова функція такої частинки має наступний вигляд:

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} x, \text{ де } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{Відповідь: 1) } \bar{x} = \frac{a}{2}; \text{ 2) } \overline{p_x} = 0; \text{ 3) } \overline{E} = \frac{\hbar^2}{2m_0 a^2} \left(\frac{6}{12} \left(1 - \frac{1}{\pi^2 n^2} \right) \right); \text{ 4) } \overline{E^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2 n^2}{a^2}.$$

Задача № 116. В одновимірній прямокутній потенціальній ямі з абсолютно непроникними стінками шириною a перебуває частинка, стан якої описується хвильовою функцією

$$\psi(x) = A \sin^2 \frac{\pi x}{a}.$$

Відшукати імовірність перебування частинки в основному стані та середнє значення кінетичної енергії.

$$\text{Відповідь: } W_1 \approx 0,96; T = \frac{2\pi^2 \cdot 2}{3m_0 a^2}.$$

Задача № 120. Визначити власні значення енергії та власні функції частинки масою m_0 , яка перебуває у 3-х вимірній прямокутній потенціальній ямі з абсолютно

непроникними стінками ($0 < x < a$; $0 < y < b$; $0 < z < c$). Відшукати значення енергії для перших трьох рівнів, якщо $a = b = c$.

Відповідь:

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_1^2}{2m_0 a^2}; E_2 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_2^2}{2m_0 b^2}; E_3 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n_3^2}{2m_0 c^2};$$

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_0} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right), n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$$

$$\psi_{n_1}(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n_1 \pi}{a} x; \psi_{n_2}(y) = \sqrt{\frac{2}{b}} \sin \frac{n_2 \pi}{b} y; \psi_{n_3}(z) = \sqrt{\frac{2}{c}} \sin \frac{n_3 \pi}{c} z;$$

$$\psi_{1,2,3}(x, y, z) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{abc}} \sin \frac{n_1 \pi}{a} x \sin \frac{n_2 \pi}{b} y \sin \frac{n_3 \pi}{c} z, n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots$$

Тема 6. Задача про частинку в потенціальній ямі.

2 год.

В аудиторії: №№ 122; 124.

Додому: №№ 123, 127.

Запитання для самоконтролю:

1. Намалюйте малюнок та запишіть умову, яка відображає постановку задачі про частинку в одновимірному потенціальному ящику з нескінченно високими непроникними стінками.
2. Записати одновимірне стаціонарне рівняння Шредінгера.
3. Який вигляд мають хвильові функції мікрочастинки поза межами потенціальної ями, поясніть чому?
4. До якого математичного вигляду можна звести рівняння Шредінгера для частинки всередині потенціальної ями, записати його загальний розв'язок?
5. Сформулюйте граничні умови для хвильової функції частинки біля меж потенціальної ями.
6. Записати формули Ейлера для комплексних чисел.
7. Записати умову нормування хвильової функції.
8. Записати частковий розв'язок задачі про частинку в одновимірній потенціальній ямі з нескінченно високими стінками.
9. Який енергетичний спектр власних значень оператора Гамільтона отримується під час розв'язку задачі про частинку в одновимірній потенціальній ямі з нескінченно високими стінками?
10. Як визначається віддаль між сусідніми енергорівнями у задачі про частинку в одновимірній потенціальній ямі з нескінченно високими стінками.
11. Чому дорівнює імовірність місцезнаходження квантової частинки в одновимірній потенціальній ямі з нескінченно високими стінками?
12. Яке застосування має задача про частинку в одновимірній потенціальній ямі з нескінченно високими стінками?

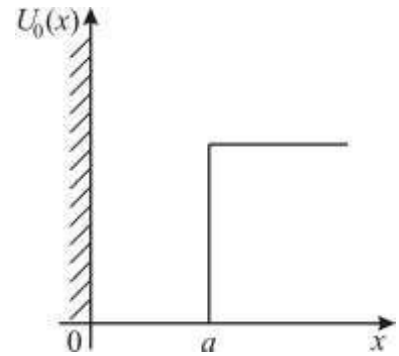
Задачі для розв'язку

Задача № 122. Частинка масою m_0 перебуває в потенціальній ямі (рисунок)

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0, \\ 0, & 0 < x < a, \\ U_0, & x > a. \end{cases}$$

Отримати рівняння, яке визначає спектр власних значень енергії частинки в області $E < U_0$ і подати його у вигляді:

$$\sin ka = \pm \frac{\hbar}{a} \frac{ka}{\sqrt{2m_0U_0}}, \text{ де } k = \frac{\sqrt{2m_0U_0}}{\hbar}.$$



До задачі № 122.

Обґрунтувати дискретність енергетичного спектру для випадку коли $E \geq \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m_0 a^2}$

$$\text{Відповідь: } E_{\min} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m_0 a^2}.$$

Задача № 123. Використовуючи результати попередньої задачі, відшукати:

а) значення величини $a^2 U_0$, при якому з'являється n -й дискретний рівень;

б) кількість енергетичних рівнів в ямі, у якої $a^2 U_0 = \frac{110 \cdot \hbar^2}{m_0}$; в) значення $a^2 U_0$, при

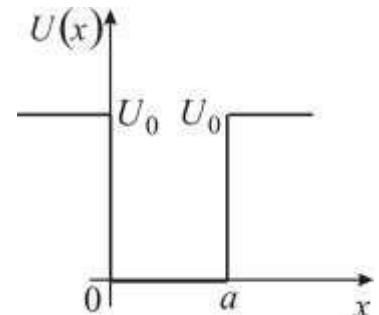
якому енергія єдиного рівня дорівнює $E = \frac{1}{2} U_0$. Якою за таких обставин є імовірність перебування частинки поза ямою?

$$\text{Відповідь: а) } a^2 U_0 = (2n-1)^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{8m_0}; \text{ б) } 5 \text{ рівнів};$$

$$\text{в) } a^2 U_0 = \frac{9\pi^2 \hbar^2}{16m_0}, W_{a < x < \infty} = 0,15.$$

Задача № 124. Частинка масою m_0 рухається у потенціальній ямі (див. рис.):

$$U(x) = \begin{cases} U_0, & x < 0 \\ 0, & 0 < x < a \\ U_0, & x > a \end{cases}$$



До задачі № 124.

Отримати рівняння з якого можна відшукати спектр власних значень енергії. В області $E < U_0$ обґрунтувати дискретність енергетичного спектра.

Відповідь: $ka = n\pi - 2 \arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_0}}$, де $k = \frac{1}{\cdot} \sqrt{2m_0 E}$, $n=1,2,\dots$. Значення

$\arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_0}}$ беруть з першої чверті, причому

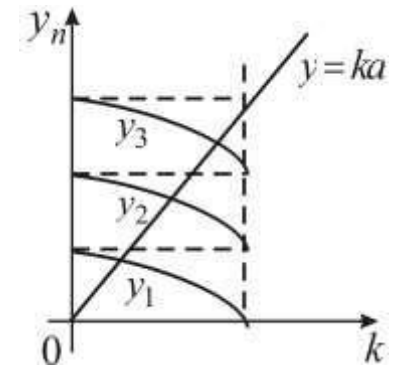
$k \leq \frac{1}{\cdot} \sqrt{2m_0 E}$, оскільки $\frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_0}} \leq 1$. Останнє рівняння

розв'язують графічно. Точки перетину прямої $y = ka$ з

кривими $y_n = n\pi - 2 \arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_0}}$ визначають корені

k_1, k_2, \dots рівняння (див. рис.). Ці корені дають

дискретний енергетичний спектр $E_n = \frac{\cdot 2k^2 n}{2m_0}$.



До розв'язку задачі № 124.

Задача № 127. Частинка масою m_0 перебуває у потенціальній ямі наступного вигляду:

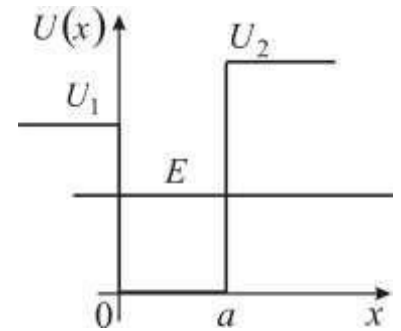
$$U(x) = \begin{cases} U_1, & x < 0 \\ 0, & 0 < x < a \\ U_2, & x > a \end{cases}$$

Отримати рівняння, з якого можна відшукати спектр власних значень енергії в області $E < U_0$ (див. рис.)

Відповідь: $ka = n\pi - \arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_1}} - \arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_2}}$

, де $k = \frac{1}{\cdot} \sqrt{2m_0 E}$, $n=1,2,\dots$. Значення $\arcsin \frac{\cdot k}{\sqrt{2m_0 U_{1,2}}}$

беруть з першої чверті, оскільки $\cdot k \leq \sqrt{2m_0 U_1}$.



До задачі № 127.

Тема 7. Рух частинки у центрально-симетричному полі. Атом гідрогену

2 год.

В аудиторії: №№ 150; 152 (для p - стану); 153; 155.

Додому: №№ 147; 152 (для d і f - станів); 164.

Запитання для самоконтролю:

1. Яке поле називають центрально-симетричним?
2. Які закони збереження виконуються у центрально-симетричному полі?
3. Який вигляд має оператор проекції орбітального моменту імпульсу на вісь Oz у сферичній системі координат?
4. Чому дорівнює власна функція оператора проекції орбітального моменту імпульсу на вісь Oz у сферичній системі координат?

5. Який спектр власних значень має оператор проекції орбітального моменту імпульсу на вісь Oz у сферичній системі координат?
6. Що являє собою магнітне квантове число?
7. Який вигляд має оператор квадрата моменту імпульсу у сферичній системі координат?
8. Який спектр власних значень має оператор квадрата моменту імпульсу у сферичній системі координат?
9. Що являє собою орбітальне квантове число?
10. Який вигляд має радіальне рівняння Шредінгера?
11. Проаналізувати розв'язок радіального рівняння Шредінгера у випадку додатного значення повної енергії квантової частинки по відношенню до силового центру.
12. Проаналізувати розв'язок радіального рівняння Шредінгера у випадку від'ємного значення повної енергії квантової частинки по відношенню до силового центру.
13. Які атоми вважаються гідрогеноподібними?
14. Записати вигляд силового поля нерухомого точкового ядра гідрогеноподібного атому.
15. Які властивості має поле нерухомого точкового ядра гідрогеноподібного атому?
16. Яке рівняння зручно використати для розв'язку задачі про атом водню?
17. Який спектр енергій електрона утворюється під час розв'язання задачі про атом водню?
18. Чому дорівнює енергія n -ого рівня електрона у атомі водню?
19. Що називають радіальним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
20. Що називають головним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
21. Намалюйте схематично картину рівнів енергії у гідрогеноподібному атомі.
22. Яка кількість різних хвильових функцій відповідає головному квантовому числу n ?
23. Поясніть як можна описати стан електрона у гідрогеноподібному атомі за допомогою квантових чисел?

Задачі для розв'язку

147. Показати, що для частинки масою μ , що рухається в центральньо-симетричному полі $U(r)$, рівняння Шредінгера допускає розділення змінних. Записати рівняння для радіальної та кульової частин хвильової функції $\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)Y(\theta, \varphi)$. Відшукати залежність хвильової функції від азимутального кута.

150. Відшукати середнє значення квадрата моменту імпульсу в стані $\psi(\theta, \varphi) = A \sin \theta \cos \varphi$.

$$\text{Відповідь: } A = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{\frac{1}{2}}, \bar{E} = 2\hbar^2.$$

152. Частинка, що рухається в центральньо-симетричному полі $U(r)$, перебуває в стані $\psi(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$. Який фізичний зміст функції $|Y_{lm}(\theta, \varphi)|^2$?

Скориставшись таблицею 1, відшукати нормовочні коефіцієнти кульових функцій для p -, d - та f - станів.

$$\begin{aligned} \text{Відповідь: } Y_{1,0} &= \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta; & Y_{1,\pm 1} &= \pm \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta \cdot e^{\pm i\varphi}; & Y_{2,0} &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{4\pi}} (3\cos^2 \theta - 1); \\ Y_{2,\pm 1} &= \pm \sqrt{\frac{15}{8\pi}} \sin \theta \cos \theta \cdot e^{\pm i\varphi}; & Y_{2,\pm 2} &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{15}{8\pi}} \sin^2 \theta \cdot e^{\pm 2i\varphi}; & Y_{3,0} &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{7}{\pi}} (5\cos^3 \theta - 3\cos \theta); \\ Y_{3,\pm 1} &= \pm \frac{1}{8} \sqrt{\frac{21}{\pi}} \sin \theta (5\cos^2 \theta - 1) \cdot e^{\pm i\varphi}; & Y_{3,\pm 2} &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{105}{2\pi}} \sin^2 \theta \cos \theta \cdot e^{\pm 2i\varphi}; \\ Y_{3,\pm 3} &= \pm \frac{1}{8} \sqrt{\frac{35}{\pi}} \sin^2 \theta \cdot e^{\pm 3i\varphi}. \end{aligned}$$

Таблиця 1.

Кульові функції для s -, p -, d - та f - станів з точністю до нормовочного множника

Квантовий стан	l	m	$Y_{lm}(\theta, \varphi)$
s	0	0	1
p	1	0	$\cos \theta$
	1	± 1	$\pm \sin \theta e^{\pm i\varphi}$
d	2	0	$3\cos^2 \theta - 1$
	2	± 1	$\pm \sin \theta \cos \theta e^{\pm i\varphi}$
	2	± 2	$\sin^2 \theta e^{\pm 2i\varphi}$
f	3	0	$5\cos^3 \theta - 3\cos \theta$
	3	± 1	$\pm \sin \theta (5\cos^2 \theta - 1) \cdot e^{\pm i\varphi}$
	3	± 2	$\sin^2 \theta \cos \theta \cdot e^{\pm 2i\varphi}$
	3	± 3	$\sin^2 \theta \cdot e^{\pm 3i\varphi}$

153. Відшукати хвильові функції і рівні енергії частинки масою m_0 та нульовим орбітальним моментом. Частинка перебуває в сферично-симетричній потенціальній ямі радіуса r_0 з нескінченими стінками.

$$\text{Відповідь: } \psi_{n,0,0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r_0}} \frac{1}{r} \sin \frac{\pi n}{r_0} r.$$

155. Відшукати для основного s - стану частинки, що перебуває в сферично-симетричній потенціальній ямі радіуса r_0 з нескінченими стінками, найбільш імовірне значення віддалі $r_{\text{ім}}$ та імовірність перебування частинки в області $r < r_{\text{ім}}$. Зобразіть приблизний вигляд графіка функції $|\psi(r)|^2$. Яким є фізичний зміст цієї функції?

$$\text{Відповідь: } |\psi_{1s}(r)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi r_0}} \frac{1}{r^2} \sin^2 \frac{\pi}{r_0} r, \quad r_{\text{ім}} = \frac{r_0}{2}, \quad W_{r < r_{\text{ім}}} = \frac{1}{2}.$$

157. Відшукати розподіл ймовірностей різноманітних значень імпульсу в основному стані частинки масою m_0 , що перебуває в сферично-симетричній потенціальній ямі радіуса r_0 з абсолютно непроникними стінками.

$$\text{Відповідь: } W(p) dp = |\psi(\vec{p})|^2 4\pi p^2 dp = \frac{4\pi r_0 \hbar^3}{(\pi^2 \hbar^2 - p^2 r_0^2)^2} \sin^2 \frac{r_0}{\hbar} p.$$

Задача № 162. Звести рівняння, що визначає радіальну складову хвильової функції електрона у гідрогеноподібному атомі, до безрозмірного вигляду:

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{dR}{d\rho} \left[\frac{2z}{\rho} - \frac{\ell(\ell+1)}{\rho^2} \right] R = 0,$$

обравши в якості одиниць вимірювання атомарну одиницю довжини a_0 (перший борівський радіус) та атомну одиницю енергії $E_{iOH} = E_1$ (енергія іонізації атома водню для основного стану) і, позначаючи

$$\rho = \frac{r}{a_0}; \quad \varepsilon = \frac{E}{E_1}.$$

Задача № 163. Користуючись таблицями 1 та 2, обрахувати нормувальні коефіцієнти хвильових функцій $1s$ -, $2s$ -, $3p$ - станів електрона в атомі водню.

$$\text{Відповідь: } \psi_{100} = \left(\frac{1}{\pi a_0^3} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}};$$

$$\psi_{200} = \left(\frac{1}{4(2\pi a_0^3)^{\frac{1}{2}}} \right)^{-1} \left(2 - \frac{r}{a_0} \right) e^{-\frac{r}{2a_0}};$$

$$\psi_{310} = \frac{1}{81} \sqrt{\frac{2}{\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} \left(6 - \frac{r}{a_0} \right) e^{-\frac{r}{3a_0}} \cdot \cos\theta;$$

$$\psi_{31\pm 1} = \pm \frac{1}{81} \sqrt{\frac{1}{\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} \left(6 - \frac{r}{a_0} \right) e^{-\frac{r}{3a_0}} \cdot \sin\theta \cdot e^{\pm i\varphi},$$

де a_0 – радіус першої борівської орбіти в атомі водню.

Задача № 164. Електрон в атомі водню перебуває в стаціонарному стані, що описується сферично-симетричною хвильовою функцією $\psi(r) = A(1 + ar)e^{\alpha r}$, де A, a, α деякі сталі. За допомогою рівняння Шредінгера відшукати значення сталих a, α та енергію електрона. Визначити у якому стані перебуває електрон.

$$a = \alpha = -\frac{1}{2a_0}, \text{ де } a_0 \text{ – радіус першої борівської орбіти; електрон перебуває у}$$

$2s$ -стані.

Таблиця 2

Радіальні хвильові функції для s -, p - станів з точністю до нормувального множника.

Квантовий стан	n	ℓ	$R_{n\ell} \left(\frac{r}{a_0} \right)$
----------------	-----	--------	--

1s	1	0	$e^{-\frac{r}{a_0}}$
2s	2	0	$\left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{2a_0}}$
2p	2	1	$\frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{2a_0}}$
3s	3	0	$\left(27 - 18\frac{r}{a_0} + 2\left(\frac{r}{a_0}\right)^2\right) e^{-\frac{r}{3a_0}}$
3p	3	1	$\frac{r}{a_0} \left(6 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{3a_0}}$

Задача № 165. Відшукати для електрона, що перебуває в 1s стані в атомі гідрогену, найбільш імовірну віддаль від ядра $r_{\text{ім}}$ та імовірність перебування електрона в області $r < r_{\text{ім}}$.

$$\text{Відповідь: } r_{\text{ім}} = a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2}; W = 1 - 5e^{-2} \approx 0,323.$$

Задача № 166. Розрахувати імовірність перебування 1s електрона в атомі водню поза класичних меж поля.

Відповідь: 5,9 %

Задача № 168. Розрахувати середнє значення кінетичної енергії та середньоквадратичну швидкість для 1s електрона в атомі водню.

$$\text{Відповідь: } \bar{E}_k = -\frac{me^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2}; \sqrt{\bar{v}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

171. Відшукати середнє значення сили взаємодії з ядром і потенціальної енергії для 2p електрона в атомі водню і для іонів з одним електроном.

$$\text{Відповідь: } F_{\text{вз}} = \frac{Ze^2}{48\pi\epsilon_0 a_0^2}; U = -\frac{Ze^2}{16\pi\epsilon_0 a_0}, \text{ де } a_0 \text{ – радіус першої борівської}$$

орбіти.

172. Відшукати середній електростатичний потенціал, що збуджується 1s електроном у центрі гідрогеноподібного атома.

$$\text{Відповідь: } \varphi_0 = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 a_0}, \text{ де } a_0 \text{ – радіус першої борівської орбіти.}$$

Тема 8. Спін електрона. Магнітні властивості атомів.**2 год.**

В аудиторії: №№ 213; 214; 215; 216; 222.

Додому: №№ 208; 209; 217.

Запитання для самоконтролю:

1. Що називають спіном електрона?
2. Які експериментальні факти підтверджують існування у електрона власного механічного моменту?
3. Чому дорівнює магнетон Бора?
4. Чому дорівнює власний магнітний момент електрона?
5. Чому дорівнює власний механічний момент електрона?
6. Записати гіромагнітне співвідношення.
7. Записати математичний вигляд спінових матриць Паулі.
8. Записати математичний вигляд операторів спіна.
9. Який вигляд має хвильова функція електрона з урахуванням його спіна?
10. Як визначається повний магнітний момент атома?
11. Який вигляд має спектральне позначення терма?
12. Як розраховується g – фактор розщеплення Ланде?

Задачі для розв'язку

Задача № 208. Відшукати власні функції та власні значення операторів, що визначаються матрицями Паулі.

Задача № 209. Показати, що матриці Паулі можна розглядати як компоненти

векторного оператора $\vec{\sigma}$, для якого справджуються співвідношення $[\vec{\sigma}, \vec{\sigma}] = 2i\vec{\sigma}$,
 $(\vec{\sigma}, \vec{\sigma}) = 3 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Відшукати також добуток $\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z$.

$$\text{Відповідь: } \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z = i \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Задача № 213. Виписати спектральні позначення терма, у якого
 а) $S = 3/2, L = 2, g = 0$; б) $S = 1/2, L = 3/2, g = 4/3$.

$$\text{Відповідь: а) } {}^4D_{1/2}; \text{ б) } {}^2P_{3/2}.$$

Задача № 214. Відшукати множник Ланде для атомів з одним валентним електроном в станах P, D та F .

$$\text{Відповідь: Для } P\text{-стану: } g_1 = \frac{2}{3}, g_2 = \frac{4}{3}; \text{ для } D\text{-стану: } g_1 = \frac{4}{5}, g_2 = \frac{6}{5}; \text{ для } F\text{-} \\ \text{стану: } g_1 = \frac{6}{7}, g_2 = \frac{8}{7}.$$

Задача № 215. Відшукати магнітний момент атома водню в основному стані.

Відповідь: $\mu = \sqrt{3}\mu_B$.

Задача № 216. Відшукати можливі значення магнітного моменту атома в стані 3D .

Відповідь: $\frac{\sqrt{2}}{2}\mu_B$; $\frac{7}{\sqrt{6}}\mu_B$; $\frac{8}{\sqrt{3}}\mu_B$.

Задача № 217. Відшукати магнітний момент μ і можливі значення проекції μ_H атома в станах: а) 4D ; б) $^2P_{3/2}$.

Відповідь: а) $\mu = \sqrt{6}\mu_B$; $\mu_H = 0, \pm\mu_B, \pm 2\mu_B$; б) $\mu = \frac{2\sqrt{5}}{\sqrt{3}}\mu_B$,

$\mu_H = \pm\frac{2}{3}\mu_B, \pm 2\mu_B$.

Задача № 222. Вузкий пучок атомів пропускають за методом Штерна і Герлаха через різко неоднорідне магнітне поле. На яку кількість компонент розщепиться пучок атомів, що перебувають в станах: а) 6S ; б) 5F_1 ?

Відповідь: а) 6; б) пучок не розщеплюється.

Задача № 233. Відшукати діамагнітну сприйнятливості атомарного водню за нормальних умов (0°C , $p = 10^5\text{Па}$), якщо розподіл густини заряду електронної

хмарини в атомі подається у вигляді функції $\rho(r) = \frac{e}{\pi a_0^3} e^{-\frac{2r}{a_0}}$, де a_0 – радіус першої

борівської орбіти.

Відповідь: $\chi = -1,31 \cdot 10^{-9}$.

Контрольна робота (за варіантами виконується самостійно)

7. САМОСТІЙНА РОБОТА

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1. Квантова механіка		
1.	Вступ	1
2.	Експериментальні основи квантової механіки	3
3.	Теоретичні основи квантової механіки	4
4.	Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	6
Тестове завдання №1 «Експериментальні та теоретичні основи квантової механіки»		2

<i>Тестове завдання №2 «Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки»</i>		2
5.	Одновимірний рух	6
6.	Рух частинки в центрально-симетричному полі	6
7.	Спін електрона	6
8.	Теорія збурень	2
9.	Атом гелію	2
10.	Взаємодія атома з електромагнітним полем	2
11.	Електрон в ідеальному кристалі	2
12.	Елементи теорії квантових переходів	2
13.	Теорія розсіювання	2
<i>Контрольна робота</i>		4
<i>Розв'язування і захист індивідуальних задач</i>		6
Усього годин		58

8.

ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

(визначаються за номером студента в списку академічної групи)

Методичні рекомендації з індивідуальних завдань. Індивідуальні завдання з курсу теоретичної фізики мають на меті перевірити вміння студента самостійно розв'язувати різноманітні фізичні задачі, аналогічні до тих, що були розглянуті під час практичних занять.

Пам'ятайте, що широту погляду на запропоновану задачу, вміння пов'язувати її з законами природи і з іншими суміжними задачами треба рішуче протиставити пошукам «потрібної формули» на основі здогадів, з'ясуванню, для чого дано ту чи іншу величину.

Розв'язування фізичних задач, як правило, має три етапи:

- 1) аналізу фізичної проблеми або опису фізичної ситуації;
- 2) пошуку математичної моделі розв'язку;
- 3) реалізації розв'язку та аналізу одержаних результатів.

На першому етапі фактично відбувається побудова фізичної моделі задачі, що подана в її умові:

- аналіз умови задачі, визначення відомих параметрів і величин та пошук невідомого;
- конкретизація фізичної моделі задачі за допомогою графічних форм (малюнки, схеми, графіки тощо);
- скорочений запис умови задачі, що відтворює фізичну модель задачі в систематизованому вигляді.

На другому, математичному етапі розв'язування фізичних задач відбувається пошук зв'язків і співвідношень між відомими величинами і невідомим:

- вибудовується математична модель фізичної задачі, робиться запис загальних рівнянь, що відповідають фізичній моделі задачі;

– враховуються конкретні умови фізичної ситуації, що описується в задачі, здійснюється пошук додаткових параметрів (початкові умови, фізичні константи тощо);

– приведення загальних рівнянь до конкретних умов, що відтворюються в умові задачі, запис співвідношення між невідомим і відомими величинами у формі часткового рівняння.

На третьому етапі здійснюються такі дії:

– аналітичне, графічне або чисельне розв'язання рівняння відносно невідомого;

– аналіз одержаного результату щодо його вірогідності й реальності, запис відповіді;

– узагальнення способів діяльності, які властиві даному типу фізичних задач, пошук інших шляхів розв'язку.

Модуль 1. Квантова механіка

Бородин О.М. Теоретична фізика. Квантова механіка: навч. посібник [Електронне видання]. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 233 с. Режим доступу: http://surl.li/putxj								
№ з/п	Номери завдань визначено на відповідних сторінках навчального посібника							
	С. 17	С. 23	С. 31	С.50	С.57	С.67	С.80	С.127-128
1.	1	2 (а)	1	1	1	7 (а)	2	1
2.	2	2 (б)	2	2	2	7 (б)	3	2
3.	3 (а)	2 (г)	3	3	3	7 (в)	4 (а)	3
4.	3 (б)	2 (д)	4	7	4	7 (г)	4 (б)	4

Примітка: завдання визначаються за номером студента в списку академічної групи, виконуються в окремому зошиті з детальним поясненням до кожної задачі не пізніше останнього тижня до початку заліково-екзаменаційної сесії

9. ЗАВДАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕЙТИНГУ (не є обов'язковими)

9.1. Неформальна освіта:

а) Навчання на одній з міжнародних онлайн-платформ: Coursera, Udemy, Edx – пройти онлайн курс (тривалістю не менше ніж 5 тижнів) та отримати сертифікат про його завершення.

б) Навчання на платформі Labster та виконання завдань симуляторів:

1) «Atomic Structure: Assess the possibility of life on other planets»

Будова атома: оцініть можливість існування життя на інших планетах

Наприкінці цієї симуляції ви зможете:

- Пояснити поняття атома
- Пояснити властивості основних субатомних частинок: протонів, нейтронів і електронів
- Визначати атомний номер і атомну масу
- Визначати визначення ізотопів
- Зрозуміти основи квантової атомної моделі та описати значення чотирьох квантових чисел

2) «*Basic Electricity: Understand how electricity works*»

Основи електрики: зрозуміти як працює електрика

Наприкінці цієї симуляції ви зможете:

- Дати визначення понять заряду, напруги, сили струму та їх одиниць
- Описати як утворюється електричний струм в електричному колі і що є його носіями
- Визначати основні складники електричного кола
- Складати електричні кола
- Застосовувати закон збереження заряду та енергії до електричного кола

3) «*Atomic Structure: Assess the possibility of life on other planets*»

Атомна будова (принципи): атоми та ізотопи

Наприкінці цієї симуляції ви зможете:

- Пояснити поняття атома
- Пояснити властивості основних субатомних частинок: протонів, нейтронів і електронів
- Використовувати позначення квантового стану атома для визначення кількості протонів, нейтронів і електронів в атомах і іонах.
- Визначати атомний номер і масове число
- Давати визначення ізотопів та іонів
- Описувати, як атомний номер і масове число застосовуються до ізотопів

4) «*Atomic Structure (Principles): Bohr and quantum models*»

Атомна будова (принципи): квантова модель Бора

Наприкінці цієї симуляції ви зможете:

- Описати історичну еволюцію атомних моделей
- Описати, як атомні спектри пояснюються за допомогою моделі Бора
- Описувати квантові стани атома за допомогою квантових чисел
- Використовувати атомний спектр, щоб визначити склад газу

Зареєструватись на пропонувані онлайн-платформах можна через адміністратора ЦДУ ім. В. Винниченка, звернувшись до нього листом на адресу: webmaster@cuspu.edu.ua з власної корпоративної адреси в домені @cuspu.edu.ua.

9.2. *Навчальний проект (індивідуальне навчально-дослідне завдання)* передбачає виконання аналіз наукової літератури і його оформлення у вигляді реферату на задану тему:

Модуль 1. Квантова механіка

1. Експериментальні основи квантової механіки і її зв'язок з класичною фізикою.
2. Одержання рівняння Шредінгера на основі дисперсійного рівняння. Оператори.
3. Одержання рівняння Шредінгера на основі оптико-механічної аналогії.
4. Зв'язок хвильової функції з експериментально вимірюваними величинами.
5. Чисті та мішані квантові стани. Матриця густини.
6. Теорія зображень.
7. Тензорний формалізм в теорії моменту імпульса.
8. Квантові стани дискретного спектра в центральних полях.
9. Канонічні перетворення в квантовій механіці.
10. Рух без спінової зарядженої частинки в магнітному полі.
11. Частинка зі спіном у магнітному полі.
12. Магнітне поле орбітальних струмів і спінові магнітні моменти.
13. Задача двох частинок у квантовій механіці.
14. Тотожні частинки. Основи формалізму вторинного квантування.
15. Нестационарні явища в атомах і молекулах.

16. Фазова теорія розсіювання. Розсіювання повільних частинок. Резонансні явища під час розсіювання.
17. Розсіювання складних частинок.
18. Теорія фотоэффекту.
19. Квантова теорія дисперсії.
20. Варіаційний метод у квантовій механіці.
21. Релятивістське хвильове рівняння для частинок з напівбілим спіном.
22. Релятивістська теорія атома гідрогену.
23. Енергетичний спектр атомних систем у магнітному полі. Ефект Зеемана.
24. Квантування електромагнітного поля.
25. Взаємодія атомних систем з квантовим електромагнітним полем.
26. Атоми і молекули як квантові системи. Стаціонарні стани атомів з одним і двома електронами.
27. Основні уявлення про ядерні сили. Дейтрон. Модель ядерних оболонок.
28. Кінематика розпадів і зіткнень.
29. Збереження моменту імпульсу і парності під час розпадів і зіткнень. Ізотонічні співвідношення.
30. Основи релятивістської квантової механіки.

9. МЕТОДИ НАВЧАННЯ

– *методи пізнання*: абстрагування, ідеалізація, узагальнення і систематизація знань, проблемно-пошуковий, моделювання фізичних явищ і процесів на лекціях; актуалізація опорних знань та послідовне виконання визначеної системи завдань на практичних заняттях; індивідуальне обговорення складних для засвоєння студентами теоретичних питань та індивідуальних завдань курсу на консультаціях;

– *методи управління*: моніторинг рівнів сформованості (мотивації – професійної, навчально-пізнавальної, соціальної інтенсифікації, утилітарної; засвоєння – глибина, міцність, системність знань, успішність вивчення дисципліни; наукового світогляду – фундаментальності, інтегрованості і технологічності знань з дисципліни тощо) – діагностика, аналіз, коригування.

10. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

Усне опитування (на практичних заняттях, на екзамені), тестування і перевірка письмових робіт (тестових завдань, контрольних, домашніх та індивідуальних завдань), колективне обговорення (запитань, що виносяться на самостійне опрацювання студентами, рефератів ін.).

Норми оцінювання усних відповідей:

При оцінюванні усної відповіді студентом оцінюються:

- висвітлення логічно відповідає змісту питань курсу;
- знання фактів до визначених елементів теорії та їх узагальнення;
- знання й висвітлення експериментальних результатів;
- знання принципів і постулатів;
- уміння пов'язувати зміст питань курсів загальної й теоретичної фізики;
- виражати власну точку зору стосовно аналізу елементів курсу та наукового світогляду людства;
- вміння застосувати знання в новій ситуації.

Оцінювання теоретичних питань під час усного опитування.

5 балів ставиться тоді, коли студент: виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглянутих явищ і закономірностей, законів і теорій, дає точне визначення і тлумачення основних понять, законів і теорій, а також правильне визначення фізичних величин будує відповідь за власним планом, супроводжує розповідь власними прикладами, вміє застосувати знання в новій ситуації; може встановити зв'язок між матеріалом, що вивчається, і раніше вивченим.

4 бали студент одержує в разі неповного відтворення відповіді, пов'язане з випущенням або нерозумінням одного-двох положень, постулатів, принципів і невмінням визначити їх за довідниками, посібниками.

3 бали оцінюється відповідь, у якій лише відтворено основні постулати й принципи, на яких ґрунтується зміст відповідей без математичного виведення лише фрагментарним описом окремих елементів.

У 0 балів оцінюється відповідь, що складають логічно не зв'язані фрагментарні відомості, які не дозволяють судити про розуміння суті відповіді; відсутність знань законів, постулатів і їх математичних виразів.

Оцінювання тестових завдань

Оцінювання тестових завдань здійснюється відповідно до критеріїв і структури завдання (1 бал за кожну правильну відповідь з накопиченням за кількістю запитань тесту. Підсумкова кількість балів переводиться в оцінку за рівнями – високий «відмінно», достатній «добре», середній «задовільно», низький «незадовільно»).

Тестове завдання 1 "Експериментальні та теоретичні основи квантової механіки" передбачає виконання 25 завдань: Кількість балів за правильну відповідь з одним варіантом =1. Максимальна кількість балів за тест = 25, яка переводиться в оцінку, з округленням у бік цілого, в чотирибальну шкалу: 25 балів – високий рівень – "відмінно", 20 балів – достатній рівень – "добре", 15 балів – середній рівень – "задовільно", 10 балів – низький рівень – "незадовільно".

Тестове завдання 2 "Квантова механіка в моделі Шредінгера" передбачає виконання 50 завдань: Кількість балів за правильну відповідь з одним варіантом =1. Максимальна кількість балів за тест = 50, яка переводиться в оцінку, з округленням у бік цілого, в чотирибальну шкалу: 50 балів – високий рівень – "відмінно", 40 балів – достатній рівень – "добре", 30 балів – середній рівень – "задовільно", 20 балів – низький рівень – "незадовільно".

Незадовільна оцінка передбачає перескладання.

Оцінювання завдань з розв'язування домашніх задач

Домашнім завданням передбачено розв'язування 3 задач по 2 бали за кожну відповідно до таких критеріїв

за розв'язування однієї задачі:

2 бали ставиться тоді, коли студент вільно володіє теоретичним матеріалом (законами, формулами), що проявляється у самостійному розв'язку задач на 4 й більше й більше логічних кроків, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

1,5 бали ставиться тоді, коли студент засвоїв теоретичний матеріал, може самостійно розв'язувати задачі на 4 й більше логічних кроків репродуктивного

характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

1 бал ставиться тоді, коли студент вміє розв'язувати задачі і вправи на 1-3 кроки репродуктивного характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

В усіх останніх випадках ставиться відповідь оцінюється у **0 балів**.

Підсумкова кількість балів переводиться в оцінку за рівнями – високий (6 балів) «відмінно», достатній (4 балів) «добре», середній (2 балів) «задовільно», низький (1 і нижче балів) «незадовільно».

При оцінюванні письмових робіт враховується частка завдання, яка виконана правильно.

Оцінювання завдань з розв'язування індивідуальних задач та контрольної роботи

Індивідуальним завданням передбачено розв'язування 8 задач по 2 бали за кожною, контрольна робота виконується за варіантами і передбачає розв'язування 5 задач по 2 бали за кожною відповідно до таких критеріїв

за розв'язування однієї задачі:

2 бали ставиться тоді, коли студент вільно володіє теоретичним матеріалом (законами, формулами), що проявляється у самостійному розв'язку задач на 4 й більше й більше логічних кроків, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

1,5 бали ставиться тоді, коли студент засвоїв теоретичний матеріал, може самостійно розв'язувати задачі на 4 й більше логічних кроків репродуктивного характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

1 бал ставиться тоді, коли студент вміє розв'язувати задачі і вправи на 1-3 кроки репродуктивного характеру, зводить значення фізичних величин до єдиної системи вимірювання, робить перевірку одиниць вимірювання шуканої фізичної величини.

В усіх останніх випадках ставиться відповідь оцінюється у **0 балів**.

Підсумкова кількість балів переводиться в оцінку за рівнями – високий (16 балів) «відмінно», достатній (12 балів) «добре», середній (8 балів) «задовільно», низький (6 і нижче балів) «незадовільно».

При оцінюванні письмових робіт враховується частка завдання, яка виконана правильно.

Оцінювання завдань для підвищення рейтингу (до 10 балів):

1) За проходження одного онлайн курсу (тривалістю не менше ніж 5 тижнів) та отримати сертифікату про його завершення на одній з міжнародних онлайн-платформ Coursera, Udemy або Edx передбачено врахування 10 балів, які корелюють підсумкову кількість балів за семестр до початку екзамену до 60 балів.

2) Накопичити до 10 балів, виконуючи завдання симуляторів на платформі Labster та скроплювати підсумкову кількість балів за семестр до початку екзамену до 60 балів.

Кількість балів за симулятор виставляється лише за умови виконання завдання повністю (з прогресом 100%) через встановлення пропорційності за часткою визначеного симулятором кількістю балів за чотирибальною шкалою:

- 90-100% - 5 балів – високий рівень «відмінно»
- 74-89% - 4 бали – достатній рівень «добре»
- 60-73% - 3 бали – середній рівень «задовільно»
- 1-59% - 0 балів – низький рівень «незадовільно»

3) Оцінювання завдань для підвищення рейтингу – рефератів (5 балів за один реферат):

Вид оцінювання	Розподіл балів
<p><i>Наявність:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - загальна характеристика роботи (актуальність, мета, об'єкт, предмет дослідження, завдання, методи дослідження, характеристика етапів виконання дослідження, структура роботи); - структурування змісту роботи - наявність висновків; - перелік використаних першоджерел; - (додатків, за необхідності) 	<p>0,5 балів</p> <p>0,5 балів</p> <p>0,5 балів</p> <p>0,5 балів</p>
<i>Оформлення</i> (дотримання вимог щодо написання рукопису)	0,5 балів
<i>Зміст</i> (повнота теоретичних відомостей, що відповідають змістові роботи)	1 балів
<p><i>Прилюдний захист:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - доповідь (логічність, структурованість, локанічність, цілісність, системність і ін.); - унаочнення – мультимедійна презентація (схеми, таблиці, малюнки, відеоролики, фотографії і ін.); - відповіді на запитання під час обговорення (рівень теоретичної підготовки, широка ерудиція, інтелектуальні, комунікативні якості і ін.). 	<p>0,5 балів</p> <p>0,5 балів</p> <p>0,5 балів</p>
Загальна кількість балів	5 балів

Додаткові до 10 балів для підвищення рейтингу корелюють підсудкові бали до екзамену, який у підсумку не може перевищувати 60 балів.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ НА ЕКЗАМЕНІ

Підсумкове оцінювання **на екзамені** обраховується як сума балів за виконанні завдання в екзаменаційному білеті. Зміст **екзаменаційних білетів** складається з теоретичного і практичного складників (2 теоретичних питань за програмою курсу – 5 балів за кожне $(5+5) \times 2 = 20$ балів; 1 практичне завдання з розв'язування задачі – $5 \text{ балів} \times 4 = 20$ балів. Усього 40 балів).

Оцінювання теоретичного питання:

5 балів ставиться тоді, коли студент: виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглянутих явищ і закономірностей, законів і теорій, дає точне визначення і тлумачення основних понять, законів і теорій, а також правильне визначення фізичних величин будує відповідь за власним планом, супроводжує

розповідь власними прикладами, вмiє застосувати знання в новiй ситуацiї; може встановити зв'язок мiж матерiалом, що вивчається, i ранiше вивченим.

4 бали студент одержує в разi неповного вiдтворення вiдповiдi, пов'язане з випущенням або нерозумiнням одного-двох положень, постулатiв, принципiв i невмiнням визначити їх за довiдниками, посiбниками.

3 бали оцiнюється вiдповiдь, у якiй лише вiдтворено основнi постулати й принципи, на яких ґрунтується змiст вiдповiдей без математичного виведення лише фрагментарним описом окремих елементiв.

У 0 балiв оцiнюється вiдповiдь, що складають логiчно не зв'язанi фрагментарнi вiдомостi, якi не дозволяють судити про розумiння сутi вiдповiдi; вiдсутнiсть знань законiв, постулатiв i їх математичних виразiв.

Оцiнювання завдань з розв'язування задачi:

5 балiв ставиться тодi, коли студент вiльно володiє теоретичним матерiалом (законами, формулами), що проявляється у самостiйному розв'язку задач на 4 й бiльше й бiльше логiчних крокiв, зводить значення фiзичних величин до єдиної системи вимiрювання, робить перевiрку одиниць вимiрювання шуканої фiзичної величини.

4 бали ставиться тодi, коли студент засвоїв теоретичний матерiал, може самостiйно розв'язувати задачi на 4 й бiльше логiчних крокiв репродуктивного характеру, зводить значення фiзичних величин до єдиної системи вимiрювання, робить перевiрку одиниць вимiрювання шуканої фiзичної величини.

3 бали ставиться тодi, коли студент вмiє розв'язувати задачi i вправи на 1-3 кроки репродуктивного характеру, зводить значення фiзичних величин до єдиної системи вимiрювання, робить перевiрку одиниць вимiрювання шуканої фiзичної величини.

В усiх останнiх випадках ставиться вiдповiдь оцiнюється у **0 балiв**.

При оцiнюванні письмових робiт враховується частка завдання, яка виконана правильно.

11. РОЗПОДІЛ БАЛІВ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬ СТУДЕНТИ

Модуль 1 Квантова механiка

Поточне оцiнювання – 60 балiв											Екзамен	Усього	
Теоретична		Практична										40	100
T1	T2	Пр1	Пр2	Пр3	Пр4	Пр5	Пр6	Пр7	Пр8	КР	ІДЗ		
5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	10	16		

Примiтка: Оцiнювання проводиться за видами навчальної дiяльностi: Т – виконання тестових завдань за змiстом теоретичних питань програми; КР – розв'язування задач контрольної роботи за варiантами; Пр – виконання домашнiх задач за програмою практичного заняття; ІДЗ – виконання i захист iндивiдуальних завдань. Підсумковий бал до екзамену обраховується як сума всiх накопичених балiв з теоретичної i практичної пiдготовки:

$$ПБ = (T1 + T2 + Пр1 + Пр2 + Пр3 + Пр4 + Пр5 + Пр6 + Пр7 + Пр8 + КР + ІДЗ) * 0,71,$$

З урахуванням коригувального коефiцiєнту 0,71 вiдповiдно до максимально можливої кiлькостi балiв:

$$ПБ (max) = 84 * 0,71 = 60 \text{ балiв.}$$

Екзаменаційний бал обраховується як сума балів за виконані завдання в екзаменаційному білеті. Зміст **екзаменаційних білетів** складається з теоретичного і практичного складників (2 теоретичних питань за програмою курсу – 5 балів за кожне $(5+5) \times 2 = 20$ балів; 1 практичне завдання з розв'язування задачі – 5 балів $\times 4 = 20$ балів. Усього 40 балів).

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		для екзамену
90 – 100	A	відмінно
82-89	B	добре
74-81	C	
64-73	D	
60-63	E	задовільно
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

12. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Підручники, навчальні посібники, навчально-методичний комплекс дисципліни (конспекти лекцій, перелік запитань для самоконтролю під час підготовки до практичних занять, завдання для розв'язування домашніх і індивідуальних задач, виконання контрольної роботи, тематика рефератів, перелік питань для підготовки до екзамену із застосуванням засобів дистанційного навчання в корпоративному домені @cusp.edu.ua:

- Classroom курсу: <https://classroom.google.com/c/NjE3NDIwOTQ2OTc0?cjc=w6j5csg>,
- Google meet класу: <https://meet.google.com/jso-tkdg-yup>.

13.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Модуль 1. Квантова механіка

а) базова

1. Бережной Ю.А. Лекції з квантової механіки : підручник. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. 432 с. Режим доступу: <http://surl.li/puuem>
2. Бородин О.М. Теоретична фізика. Квантова механіка: навч. посібник [Електронне видання]. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 233 с. Режим доступу: <http://surl.li/putxj>
3. Вакарчук І.О. Квантова механіка : підручник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с. Режим доступу: <http://surl.li/putv1>
4. Висоцький В.І. Квантова механіка та її використання у прикладній фізиці: підручник. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. 367 с. Режим доступу: <http://194.44.152.155/elib/local/sk/sk778701.pdf>
5. Давидов О.С. Квантова механіка: Підручник [Електронне видання]. К.: 2013. 708 с. Режим доступу: <http://surl.li/puuix>
6. Кобушкін О.П. Квантова механіка: навч. посібник. К. : 2016. 253 с. Режим доступу: <http://surl.li/putuk>

7. Кубіс Я.Д., Шкатуляк Н.М. Деякі питання квантової механіки: навч. посібник. Одеса: 2018. 219 с. Режим доступу: <http://surl.li/puugr>
 8. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: навч. посібник. К. : «Либідь», 2002. 392 с. Режим доступу: <http://surl.li/puubu>
- б) допоміжна**
9. Фізика твердого тіла / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. Кіровоград : “Авангард”, 2013. 416 с. Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/83099871.pdf>
 10. Подопригора Н.В. Методична система навчання математичних методів фізики у педагогічних університетах. Монографія. Міністерство освіти і науки України ; Кіровоградський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка. Кіровоград : ФО-П Александрова М.В., 2015. 512 с. Режим доступу: <http://surl.li/pugxm>
 11. Математичні методи фізики : навч. посібник / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка, 2012. 300 с. Режим доступу: <http://surl.li/pugsu>
 12. Подопригора Н.В. Таксономічний підхід до формування фахової компетентності майбутніх учителів і викладачів фізики в процесі навчання теоретичної фізики. Наукові записки. Серія: проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. 2016. Вип. 10. Ч. 2. С. 77–81. (КДПУ ім. В. Винниченка). Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/228636316.pdf>
 13. Подопригора Н.В. Комплексне представлення співвідношень невизначеностей у процесі підготовки майбутніх учителів фізики. Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology. 2014. II (13). Issue: 26.pp. 48-54. Режим доступу: www.seanewdim.com
 14. Подопригора Н.В., Ткаченко А.В. Вивчення співвідношень невизначеностей на засадах модельного та реального експериментів. Наукові записки. Серія: проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. 2014. Вип.6. Ч.1. С. 94-104. (КДПУ ім. В. Винниченка). Режим доступу: <https://core.ac.uk/reader/228636410>
 15. Podoprygora N.V., Tkachenko A.V. How the Cycle of Scientific Knowledge is Reflected in the Course of Solid State Physics: the Effect of Magnetic Flux Quantization. American Journal of Educational Research. 2014. Vol. 2. № 12 B. pp. 61–69. Режим доступу: <http://pubs.sciepub.com/education/2/12B/12>

14. Політики

Відвідування занять. Очікується, що здобувачі освіти відвідуватимуть заняття.

Під час відвідування занять очікується дотримання [Правил внутрішнього трудового розпорядку в ЦДУ ім. В. Винниченка](#) та етичних норм поведінки відповідно до [Етичного кодексу університетської спільноти в ЦДУ ім. В. Винниченка](#).

Очікується, що здобувачі дотримуватимуться **строків виконання всіх видів робіт**, передбачених курсом. За несвоєчасно подані роботи / завдання (з порушенням визначених строків) знижуватимуться бали.

Якщо здобувач не відпрацював пропущені навчальні заняття, не виправив оцінки 0,1,2 отримані на заняттях, не виконав завдання самостійної роботи та поточного контролю або виконав менше ніж на 60% від максимальної кількості балів, виділених на цей вид роботи, він вважається таким, що має академічну заборгованість за результатами поточного контролю.

Пропущені заняття здобувач має відпрацювати. За відпрацьовані заняття нараховуються бали достатнього (3), високого (4) та високого рівня (5) відповідно до критеріїв оцінювання відповідного завдання.

Очікується, що **здобувачі освіти не будуть запізнюватися** на заняття, а мобільні телефони під час занять використовуватимуть лише з освітньою метою.

Під час організації занять з використанням технологій дистанційного навчання (із використанням платформ для відеоконференцій) очікується, що **здобувачі працюватимуть на заняттях з увімкненою веб камерою.**

15. Академічна доброчесність

Дотримання академічної доброчесності регулюється [ЕТИЧНИМ КОДЕКСОМ університетської спільноти в Центральноукраїнському державному університеті імені Володимира Винниченка](#)

Враховуючи нульову толерантність до вияву академічної недоброчесності, очікується, що роботи здобувачів будуть містити їхні оригінальні міркування.

Вияви недоброчесності:

- ✓ відсутність покликань на використані джерела,
- ✓ фабрикування джерел списування,
- ✓ втручання в роботу інших здобувачів,
- ✓ списування під час занять та виконанні завдань, підготовки до них, самостійної роботи тощо.

Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмових роботах здобувачів та фактів списування є підставою для їхнього не зарахування викладачем (незалежно від масштабів плагіату чи обману).