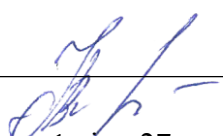


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ВИННИЧЕНКА**

Кафедра природничих наук та методик їхнього навчання

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри**


(Протокол 1 від «27» серпня 2020 року)

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ПП 2.23.1 ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА: КВАНТОВА МЕХАНІКА

(шифр і назва навчальної дисципліни)

галузь 01 Освіта/Педагогіка
(шифр галузі і назва галузі знань)

спеціальність 014 Середня освіта (за предметними спеціальностями)
(код і назва спеціальності)

предметна спеціальність 014.15 Середня освіта (Природничі науки)
(шифр і назва спеціальності (предметної спеціальності))

освітня програма Середня освіта (Природничі науки)
(назва освітньої програми)

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(назва рівня вищої освіти)

факультет природничо-географічний
(назва інституту, факультету, відділення)

форма навчання денна
(денна, заочна)

2020–2021 навчальний рік

Робоча програма з теоретичної фізики: квантова механіка для студентів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)» освітня програма «Середня освіта (Природничі науки)» на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти

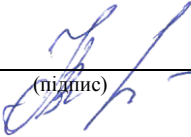
Розробник: Подопригора Наталія Володимирівна, завідувач кафедри природничих наук та методик їхнього навчання, доктор педагогічних наук, професор

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

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

Протокол № 1 від 27 серпня 2020 року

Завідувач кафедри природничих наук та методики їхнього навчання

 / Подопригора Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів (ECTS) – 4	Галузь знань 01 Освіта/Педагогіка	Вибіркова
Модулів – 1	Спеціальність 014 «Середня освіта (Природничі науки)	Рік підготовки:
Змістових модулів – 3		3-й
Індивідуальне науково-дослідне завдання _____ (назва)		Семестр
Загальна кількість годин – 120 48/72 (аудиторна/самостійна)		6-й
Кількість навчальних тижнів – 16 Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 ; самостійної роботи студента – 4,5	Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти	Лекції
		32 год.
		Практичні, семінарські
		16 год.
		Лабораторні
		0 год.
		Самостійна робота
		72 год.
		Індивідуальні завдання: 0 год.
		Вид контролю: 6-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: квантова механіка є вибірковою навчальною дисципліною робочого навчального плану підготовки бакалаврів спеціальності 014 «Середня освіта (Природничі науки)» (2018–2022 рр.), розробленого для студентів, які вступали на навчання на основі повної загальної середньої освіти.

Структурована система знань, розумінь, умінь, здатностей та інших компетенцій з квантової механіки (КМ) 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 КМ.

У процесі організації освітньої діяльності студентів орієнтуватись, перш за все, на кінцевий результат, визначаючи основні його цілі, – навчальну, дидактичну, розвивальну і виховну для забезпечення діагностично поставленої мети, а також, враховуючи можливість управління освітньою діяльністю студентів, щодо:

- формування та розвитку в студентів наукових знань і вмінь, необхідних та достатніх для розуміння явищ і процесів, які відбуваються на мікроскопічному з погляду статистичних уявлень про поведінку мікрооб'єктів, знання теоретичних основ квантової механіки, вміння застосовувати ці знання для розв'язування задач за допомогою стандартних (аналітичних) і нестандартних (синтетичних) методик;
- формування концептуальних і теоретичних основ квантової фізики як теоретичної схеми, її місця в загальній системі наук і цінностей в освітній діяльності;
- організації навчання теоретичній фізиці на основі єдності теоретичної та практичної складників професійної підготовки майбутніх учителів природничих наук;
- формування в студентів вмінь математичного моделювання фізичних систем, явища або процесу в фізичній системі в межах теоретичних схем квантової механіки в моделі Шредінгера;
- формування в студентів теоретичного типу мислення, уміння користуватись методами індукції та дедукції, аналізу й синтезу, робити висновки та узагальнення;
- формування в студентів уміння систематизувати здобуті знання про квантово-механічні явища фізики, використання їх у техніці;
- формування в студентів наукового світогляду, розвитку критичного мислення;
- озброєння студентів раціональним методологічним підходом до пізнавальної і практичної діяльності;
- формування в студентів вміння працювати з інформацією, сприяти розвитку їхніх комунікативних здібностей; позитивної мотивації до навчання;
- виховання екологічного мислення й поведінки, національної свідомості і патріотизму, працелюбності та наполегливості.

Кінцева мета вивчення дисципліни «Теоретична фізика квантова механіка» спрямована на *формування* у студентів засобами навчання КМ 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*: загальнонавчальних 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 основ КМ студенти знайомляться із застосуванням операторного підходу, заснованого на інтегралах руху та співвідношеннях комутації. Вивчаються постулати КМ 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 класичних понять.

Вивчення дисципліни передбачає, отримання знань та вмінь, які необхідні майбутньому вчителю природничих наук 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 природничих наук, фізики, хімії, біології та методики навчання природничих наук, фізики, хімії, біології при вирішенні професійних завдань при вивченні Всесвіту і природи Землі як планети.
- ФК2.** Володіння математичним апаратом природничих наук, фізики, хімії, біології.
- ФК3.** Здатність формувати в учнів предметні компетентності.
- ФК4.** Володіння основами цілепокладання, планування та проектування процесу навчання природничих наук, фізики, хімії, біології у закладах загальної середньої освіти.
- ФК5.** Здатність до організації і проведення освітнього процесу з природничих наук, фізики, хімії,

біології у закладах загальної середньої освіти.

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.

ПРН36. Знає зміст та методи різних видів позакласної та позашкільної роботи 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.

ПРНУ2. Володіє методикою проведення сучасного експерименту, здатністю застосовувати всі його види в освітньому процесі з природничих наук, фізики, хімії, біології.

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 квантової механіки фізики за різноманітними інформаційними джерелами.

ПРНУ11. Дотримується правових норм і законів, нормативно-правових 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: загальна фізика та

методика навчання фізики, засвоєння яких необхідно майбутнім учителям 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

Модуль 1. 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.

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. Комутируючі 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 потенціальній ямі. Проходження частинки через потенціальний бар'єр. Парадоксальність тунельного ефекту. Надбар'єрне розсіювання. Лінійний гармонічний осцилятор в координатному зображенні.

Електрон в потенціальній 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 (за наявності і відсутності виродження).

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

Тема 2. Атом гелію.

Якісна теорія атома гелію. Мультиплетність станів. Орто- і паргелій. *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 Зеемана. Пара- і діамангнітні властивості атомів і молекул. Напівпровідники і їх застосування.*

Тема 4. Електрон в ідеальному кристалі.

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

Тема 5. Висновки.

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

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

4. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин (денна форма)				
	усього	у тому числі			
		лекції	пр	інд.	ср.
Модуль 1. Квантова механіка					
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ					
Тема 1. Вступ	4	2	-	-	2
Тема 2. Експериментальні основи квантової механіки	10	2	4	-	4
Тема 3. Теоретичні основи квантової механіки	10	2	4	-	4
Тема 4. Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	10	4	2	-	4
Підсумкове тестове завдання №1 «Основи квантової механіки»	4	-	-	-	4
Разом за змістовим модулем 1	38	10	10	-	18
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ					
Тема 1. Одновимірний рух	10	4	-	-	6
Тема 2. Рух частинки в центрально-симетричному полі. Атом гідروгену	12	4	4	-	4
Тема 3. Спін електрона	8	2	2	-	4
Підсумкове тестове завдання №2 «Одновимірний рух»	4	-	-	-	4
Разом за змістовим модулем 2	34	10	6	-	18
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 3. ФІЗИКА АТОМІВ І МОЛЕКУЛ					
Тема 1. Теорія збурень	8	4	-	-	4
Тема 2. Атом гелію	10	4	-	-	6
Тема 3. Взаємодія атома з електромагнітним полем	8	2	-	-	6
Тема 4. Електрон в ідеальному кристалі	6	-	-	-	6
Тема 5. Висновки	2	2	-	-	-
Підсумкове тестове завдання №3 «Багатоелектронні системи»	4	-	-	-	4
Разом за змістовим модулем 1	38	12	-	-	26
Контрольна робота	4	-	-	-	4
Виконання і захист індивідуальних задач	6	-	-	-	6
Усього годин	120	32	16	-	72

5. ТЕМИ СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ (не передбачено)

6. ТЕМИ І ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

6.1. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1. 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. Інтеграли руху	2
5.	Стационарне рівняння Шредингера	2
6.	Рух частинки у центральній-симетричному полі	2
7.	Атом гідрогену	2
8.	Спін електрона. Магнітні властивості атомів	2
Усього годин		16

6.2. Зміст практичних занять

Модуль 1. КВАНТОВА МЕХАНІКА

Тема 1. Особливості поведінки мікрооб'єктів.

2 год.

В аудиторії: №№ 1; 2; 3; 4; 5. [18 (а)]

Додому: №№ 6; 8; 9. [18 (а)]

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 неозначеностей Гейзенберга у координатному представленні.
10. Яке значення мають співвідношення неозначеностей 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:

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

де $\dot{\mathbf{r}}$ – вектор прискорення електрона.

Відповідь: $\tau = R_0^3 - R_1 \frac{\pi^2 \epsilon_0^2 m^2 c^3}{e^4} \approx 1,4 \cdot 10^{-11}$ 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: $E_n = n\hbar\omega$.

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

4. Показати, що частота випромінювання воднеподібного 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) $E_D - E_H = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ еВ}$; б) $\lambda_D - \lambda_H = 0,176 \text{ нм}$; в) $U_D - U_H = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

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. [18 (а)]

Додому: №№ 14; 16; 24. [18 (а)]

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

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?

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

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

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).

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. [18 (а)]

Додому: №№ 39; 45; 57. [18 (а)]

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

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

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

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

Відповідь: $\hat{T}_a = e^{\frac{i}{\hbar} \vec{p} \cdot \vec{a}}$.

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

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

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 $\vec{\nabla}^2$.

Відповідь: $\left[\hat{\nabla}^2, \hat{x}\right] = 2 \frac{\partial}{\partial x}$

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) $[\hat{H}, \hat{p}_x] = i \hbar \frac{dU}{dx}$; в) $[\hat{H}, \hat{p}_x^2] = 2i \hbar \frac{dU}{dx} \hat{p}_x$.

57. Довести наступні правила комутації:

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

Тема 4. Зміна квантових станів. Інтеграли руху.

2 год.

В аудиторії: №№ 89; 91; 98; 101.

[18 (а)]

Додому: №№ 95; 106; 109.

[18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. За допомогою чого описується квантово-механічний стан мікрочастинок?
2. З якого рівняння квантової механіки шукають хвильову функцію мікрочастинки та її зміну? Записати його загальний вигляд.
3. Сформулювати квантовий принцип причинності.
4. Чому дорівнює оператор координати?
5. Який вигляд має оператор проєкції 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 $t=0$ має хвильову функцію:

а) $\psi(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin\left(\frac{p_0 x}{\hbar}\right)$; б) $\psi(x, 0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i \frac{p_0 x}{\hbar}}$. Знайти вигляд цієї функції в будь-який інший довільний момент часу t .

Відповідь: а) $\psi(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-i \frac{p_0^2}{2m_0} t} \sin\left(\frac{p_0 x}{\hbar}\right)$; б) $\psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i \left(p_0 x - \frac{p_0^2}{2m_0} t \right)}$.

98. У момент часу $t=0$ вільна частинка має хвильову функцію

$\psi(x, 0) = A e^{-\frac{x^2}{2a^2} + i k x}$. Відшукати коефіцієнт A та область локалізації частинки. Знайти густину потоку імовірності j .

Відповідь: $|A|^2 = \frac{1}{a\sqrt{\pi}}$; $j_x = \frac{\hbar}{2im_0} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial x} \right) = |A|^2 \frac{\hbar k}{m_0} e^{-\frac{x^2}{a^2}} = \frac{\hbar k}{m_0}$. Останній 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:

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

$$\text{б) } \frac{d}{dt} \langle \hat{p}_x \rangle = \frac{\hat{p}_x^2}{m_0} - x \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \text{в) } \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = - \left(\hat{p}_x \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \hat{p}_x \right).$$

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. Стационарне рівняння Шредінгера.**2 год.**

В аудиторії: №№ 115(1,2); 116, 120.

[18 (а)]

Додому: №№ 115(3,4).

[18 (а)]

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) $\overline{(\Delta x)^2}$; 4) $\overline{(\Delta p_x)^2}$.

Примітка: Хвильова функція такої частинки має наступний вигляд:

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

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

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.

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

Задача № 120. Визначити власні значення енергії та власні функції частинки масою m 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. Рух частинки у центрально-симетричному полі.

2 год.

В аудиторії: №№ 150; 152 (для p - стану); 153; 155. [18 (а)]

Додому: №№ 147; 152 (для d і f - станів); 157. [18 (а)]

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.

Задачі для розв'язку

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

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

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

152. Частинка, що рухається в центральній-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.

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

Таблиця 1.

Кульові функції для s -, p -, d - та f - станів з точністю до нормувального 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.

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 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?

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

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.

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

Тема 7. Атом водню.

2 год.

В аудиторії: №№ 162; 164; 166; 168. [18 (а)]

Додому: №№ 163; 165; 171; 172. [18 (а)]

Запитання для самоконтролю:

1. Які атоми вважаються водневоподібними?
2. Записати вигляд силового поля нерухомого точкового ядра водневоподібного атому.
3. Які властивості має поле нерухомого точкового ядра водневоподібного атому?
4. Яке рівняння зручно використати для розв'язку задачі про атом водню?
5. Який спектр енергій електрона утворюється під час розв'язання задачі про атом водню?
6. Чому дорівнює енергія n -ого рівня електрона у атомі водню?
7. Що називають радіальним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
8. Що називають головним квантовим числом, яких допустимих значень воно може набувати?
9. Намалюйте схематично картину рівнів енергії у водневоподібному атомі.
10. Яка кількість різних хвильових функцій відповідає головному квантовому числу n ?
11. Поясніть як можна описати стан електрона у водневоподібному атомі за допомогою квантових чисел?

Задачі для розв'язку

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

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{dR}{d\rho} + \left[\varepsilon + \frac{2Z}{\rho} - \frac{l(l+1)}{\rho^2} \right] R = 0, \quad (\text{перший})$$

обравши в якості одиниць вимірювання атомарну одиницю довжини a_0 (борівський радіус) та атомну одиницю енергії $E_{\text{іон}} = E_1$ (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 нормовочні коефіцієнти хвильових функцій $1s$ -, $2s$ -, $3p$ - станів електрона в атомі водню.

Відповідь: $\psi_{100} = \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-\frac{r}{a_0}};$

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

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

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

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 $\psi(r) = A e^{-\alpha r}$, 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 $r < r_{\text{ім}}$.

Відповідь: $r_{\text{ім}} = a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_0e^2}$; $W = 1 - 5e^{-2} \approx 0,323$.

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.

Відповідь: $\overline{E_k} = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} \cdot \sqrt{v^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

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

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

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

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

Тема 8. Спін електрона. Магнітні властивості атомів.

2 год.

В аудиторії: №№ 213; 214; 215; 216; 222. [18 (а)]

Додому: №№ 208; 209; 217; 233. [18 (а)]

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 $\hat{\sigma}$, для якого справджуються співвідношення $[\hat{\sigma}_i, \hat{\sigma}_j] = 2i\hat{\sigma}_k$, де (i, j, k) – циклічна перестановка. Відшукати також добуток $\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z$.

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) $S = 1/2, L = 3/2, g = 4/3$.

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

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

Відповідь: Для P -стану: $g_1 = \frac{2}{3}, g_2 = \frac{4}{3}$; для D -стану: $g_1 = \frac{4}{5}, g_2 = \frac{6}{5}$; для F -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 сприйнятливість атомарного водню за нормальних умов 1S , $p = 10^5 \text{ Па}$, 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 з квантової механіки (самостійне виконання за варіантами).

7. САМОСТІЙНА РОБОТА

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Модуль 1. Квантова механіка		
1.	Вступ	2
2.	Експериментальні основи квантової механіки	4
3.	Теоретичні основи квантової механіки	4
4.	Фізичні основи і математичний апарат квантової механіки	4
<i>Підсумкове тестове завдання №1 «Основи квантової механіки»</i>		4
5.	Одновимірний рух	6
6.	Рух частинки в центрально-симетричному полі	4
7.	Спін електрона	4
<i>Підсумкове тестове завдання №2 «Одновимірний рух»</i>		4
8.	Теорія збурень	4
9.	Атом гелію	6
10.	Взаємодія атома з електромагнітним полем	6
11.	Електрон в ідеальному кристалі	6
<i>Підсумкове тестове завдання №3 «Багатоелектронні системи»</i>		4
<i>Контрольна робота</i>		4
<i>Виконання і захист індивідуальних задач</i>		6
Усього годин		72

8. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

(визначаються за номером студента в списку академічної групи)

8.1. 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.

№ з/п	Номери індивідуальних задач за збірником: Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике. Учебное пособие для вузов. Изд. 5, перераб. М.: Атомиздат, 1971. 231 с.									
1.	2.28.	3.1.	3.15.	3.29.	3.43.	4.1.	4.15.	4.29.	4.43.	5.15.
2.	2.29.	3.2.	3.16.	3.30.	3.44.	4.2.	4.16.	4.30.	4.44.	5.16.
3.	2.30.	3.3.	3.17.	3.31.	3.45.	4.3.	4.17.	4.31.	4.45.	5.17.
4.	2.31.	3.4.	3.18.	3.32.	3.46.	4.4.	4.18.	4.32.	4.46.	5.18.
5.	2.32.	3.5.	3.19.	3.33.	3.47.	4.5.	4.19.	4.33.	4.47.	5.19.
6.	2.33.	3.6.	3.20.	3.34.	3.48.	4.6.	4.20.	4.34.	4.48.	5.20.
7.	2.34.	3.7.	3.21.	3.35.	3.49.	4.7.	4.21.	4.35.	4.49.	5.21.
8.	2.35.	3.8.	3.22.	3.36.	3.50.	4.8.	4.22.	4.36.	4.50.	5.22.
9.	2.36.	3.9.	3.23.	3.37.	3.51.	4.9.	4.23.	4.37.	4.51.	5.23.
10.	2.37.	3.10.	3.24.	3.38.	3.52.	4.10.	4.24.	4.38.	4.52.	5.24.
11.	2.38.	3.11.	3.25.	3.39.	3.53.	4.11.	4.25.	4.39.	4.53.	5.25.
12.	2.39.	3.12.	3.26.	3.40.	3.54.	4.12.	4.26.	4.40.	4.54.	5.26.
13.	2.40.	3.13.	3.27.	3.41.	3.55.	4.13.	4.27.	4.41.	4.55.	5.27.

Примітка: завдання виконуються в окремому зошиті з детальним поясненням до кожної задачі.

8.2. *Навчальний проект (індивідуальне навчально-дослідне завдання)* передбачає виконання мікро-дослідження 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 Шредингера на основі дисперсійного рівняння. Оператори.
3. Одержання рівняння Шредингера 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 фотоефекту.
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. Стационарні 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), тестування і перевірка письмових робіт (тематичних тестових завдань, контрольної, 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.

Завдання, яке одержує студент **на колоквіумі** складає два теоретичних запитання з висвітлення логічно завершеного елемента теорії із застосуванням математичного апарату.

5 балів ставиться тоді, коли студент: виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглядуваних 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 письмових самостійних та контрольних робіт:

5 балів 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.

4 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.

3 бали 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**.

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

11. РОЗПОДІЛ БАЛІВ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬ СТУДЕНТИ

Модуль 1 Квантова механіка

Поточне оцінювання та самостійна робота											Екзамен	Усього
Теоретичний модуль			Практичний модуль								40	100
T1	T2	T3	ДЗ1	ДЗ2	ДЗ3	ДЗ4	ДЗ5	ДЗ6	КР	ІДЗ		
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10		

Примітка: Оцінювання проводиться за видами навчальної діяльності: Т – тестовий контроль з теоретичного матеріалу; КР – контрольна робота; ДЗ – розв’язування домашніх задач; ІДЗ – виконання і захист індивідуальних завдань.

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	задовільно
60-63	E	
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 (зміст програми курсу, конспекти лекцій, перелік запитань для самоконтролю під час підготовки до практичних занять, завдання для виконання контрольних робіт, тематика рефератів, перелік питань для підготовки до екзамену тощо).

13. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Модуль 1. Квантова механіка

а) Базова

1. Астахов А.В. Квантовая физика / Астахов А.В., Широков Ю.М. – М.: Наука, 1983. – 249 с.
2. Бережной Ю.А. Лекції з квантової механіки: навч. посібник / Ю.А. Бережной. – К.: Видавництво «Майстер-клас», 2008. – 448 с.
3. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики / Д.И. Блохинцев. – [6-е изд.]. – М.: Высшая школа, 1983, – 64 с.
4. Борисоглебский Л.А. Квантовая механика / Л.А. Борисоглебский. – Минск: Издательство БГУ, 1988. – 622 с.
5. Венгер Є.Ф. Збірник задач з квантової механіки / Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. – К.: Вища шк., 2003. – 230 с.

6. Венгер Є.Ф. Основи квантової механіки / Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. – К.: Вища шк., 2002. – 286 с.
7. Глауберман А.Ю. Фізика атома та квантова механіка / Глауберман А.Ю., Манакин Л.О. – К.: Вища школа, 1972. – 291 с.
8. Грашин А.Ф. Квантовая механика / А.Ф. Грашин. – М.: Просвещение, 1974. – 208 с.
9. Давыдов А.С. Квантовая механика / А.С. Давыдов. – М.: Наука, 1973. – 704 с.
10. Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики / П.А.М. Дирак. – М.: Физматгиз, 1960. – 434 с.
11. Друкарев Г.Ф. Квантовая механика / Г.Ф. Друкарев. – Ленинград: изд. ЛГУ, 1988. – 200 с.
12. Компанеец А.С. Курс теоретической физики: [в 2-х т.] / А.С. Компанеец. – М.: Просвещение, 1972. – Т.1: Элементарные законы. – 1972. – 512 с.
13. Ландау Л.Д. Краткий курс теоретической физики: [в 3-х кн.] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1969. – Кн. 2: Квантовая механика. – 1972. – 378 с.
14. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Квантовая механика (Нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1989. – Т.3. – 768 с.
15. Левич В.Г. Курс теоретической физики: [в 2-х т.] / Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. – М.: Наука, 1969. – Т. 2: Квантовая механика. Квантовая статистика и физическая кинетика. – 1971. – 637 с.
16. Матвеев А.Н. Атомная физика / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1989, –150 с.
17. Матвеев А.Н. Квантовая механика и строение атома / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1965. – 356 с.
18. Серова Ф.Г. Сборник задач по теоретической физике: Квантовая механика, статистическая физика: [учеб. пособ. для студ. пед. ин-тов по физ. спец.] / Серова Ф.Г., Янкина А.А. – М.: Просвещение, 1979. – 192 с.
19. Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике. Учебное пособие для вузов. – Изд. 5, перераб. – М.: Атомиздат, 1971. 231 с.
20. Соколов А.А. Квантовая механика / Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч. – М.: Наука, 1979. – 529 с.
21. Соколов А.А. Квантовая механика и атомная физика / Соколов А.А., Тернов И.М. – М.: Просвещение, 1970. – 423 с.
22. Федорченко А.М. Основы квантовой механики / А.М. Федорченко. – К.: Вища школа, 1979. – 271 с.
23. Фок В.А. Начала квантовой механики / В.А. Фок. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
24. Шпольский Э.В. Атомная физика: [в 2-х т.] / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 1: Введение в атомную физику. - 1974. - 575 с.
25. Шпольский Э.В. Атомная физика: [в 2-х т.] / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 2: Основы квантовой механики и строение электронной оболочки атома. – 1974. – 447 с.
26. Энрико Ферми. Квантовая механика: конспект лекций / Энрико Ферми. – М.: Мир, 1968. – 366 с.

б) Допоміжна

27. Бережной Ю.А. Лекції з квантової механіки: навчальний посібник / Ю.А.Бережной. – К.: Видавництво «Майстер клас», 2008. – 448 с.
28. Мигдал А.Б. Квантовая физика для больших и маленьких / А.Б. Мигдал. – М.: Наука, 1989. – 144 с. – (Б-чка «Квант». Вып. 75.)

29. Подопригора Н.В. Фізика твердого тіла / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. – Кіровоград : “Авангард”, 2013. – 416 с.
30. Савельев И.В. Основы теоретической физики: [в 2-х т.] / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1975. – Т.2: Квантовая механика. – 1977. – 351 с.
31. Суханов А.Д. Лекции по квантовой физике / А.Д. Суханов. – М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.
32. Тарасов Л.В. Основы квантовой механики / Л.В. Тарасов. – М.: Высшая школа, 1978. – 286 с.
33. Фано У. Физика атомов и молекул / Фано У., Фано Л. – М.: Наука, 1980. – 656 с.
34. Фон Нейман Дж. Математические основы квантовой механики / Джон фон Нейман. – М.: Наука, 1964. – 367 с.

14. Інформаційні ресурси

1. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html>
2. <http://ilib.mirror1.mccme.ru/>
3. http://booksobzor.info/estestvoznanie_nauchnotehnicheskaja_literatura
4. <http://www.femto.com.ua/start.html>
5. <http://newlibrary.ru/genre/nauka/fizika/>
6. <http://www.netbook.perm.ru/fisika.html>
7. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/elementary.htm>