

2026 / 2027 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою факультету (інституту, центру)

« ____ » _____ 2026 року, протокол № ____

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

Ямпольський Валерій Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця
Єзерська Олена Володимирівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент
кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця
Майзеліс Захар Олександрович, доктор фізико-математичних наук, доцент, професор
кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця

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

Протокол від « ____ » _____ 2026 року № ____

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця

_____ Нємченко К.Е.
підпис прізвище та ініціали

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми

«Інформаційні технології (ІТ) в фізиці» (спеціальність 104 - Фізика та астрономія)
назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми
(керівник проєктної групи) Чібісов Д.В.

_____ Чібісов Д.В.
підпис прізвище та ініціали

Програму погоджено науково-методичною комісією
фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від « ____ » _____ 2026 року № ____

Голова науково-методичної комісії фізичного факультету

_____ Лазоренко О.В.
підпис прізвище та ініціали

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Квантова механіка» складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 104 - Фізика та астрономія, освітньо-професійна програма «Інформаційні технології (ІТ) в фізиці»; спеціалізація не передбачена.

Дисципліна є обов'язковим компонентом освітньої програми (ОК 21) і вивчається протягом двох семестрів: у 6-му семестрі (3-й рік навчання) та 7-му семестрі (4-й рік навчання). Зміст дисципліни поділено на 29 тем, об'єднаних у шість розділів (модулів), по три розділи в кожному семестрі. Нумерація тем починається заново в кожному семестрі.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Квантова механіка» є формування системного розуміння принципів і методів нерелятивістської квантової теорії, елементів релятивістської квантової механіки, точних і наближених методів розв'язання квантових задач, а також основ опису складених, багаточастинкових і відкритих квантових систем.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Навчити здобувачів вищої освіти:

- застосовувати формалізм квантових станів, операторів, вимірювань, унітарної еволюції та оператора густини;
- досліджувати енергетичні спектри одновимірних і тривимірних квантових систем точними та наближеними методами;
- аналізувати квантову динаміку, переходи, адіабатичну еволюцію, декогеренцію та взаємодію випромінювання з речовиною;
- описувати спіни, складання моментів, рух заряджених частинок в електромагнітному полі та структуру атомних спектрів;
- працювати з тотожними частинками, багаточастинковими станами, елементами вторинного квантування та теорією розсіяння;
- розуміти інтеграл за траєкторіями, основи релятивістської квантової механіки та межі одночастинкового опису;
- користуючись навчальною і довідковою літературою та цифровими інструментами, обирати адекватні методи розв'язання задач, критично перевіряти результати й дотримуватися академічної доброчесності.

1.3. Кількість кредитів: 7

1.4. Загальна кількість годин*: 210

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Обов'язкова	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
3-й, 4-й	-
Семестр	
6-й, 7-й	-
Лекції	
64 год. (32 год. у 6-му семестрі, 32 год. у 7-му семестрі)	-
Практичні, семінарські заняття	
32 год. (16 год. у 6-му семестрі, 16 год. у 7-му семестрі)	-
Лабораторні заняття	
-	-
Самостійна робота	

114 год. (72 год. у 6-му семестрі, 42 год. у 7-му семестрі)	-
у тому числі індивідуальні завдання	
10 год. (розрахунково-графічна робота у 7-му семестрі)	-

* у разі формування малочисельних груп обсяг аудиторного навчального навантаження, відведеного на вивчення навчальної дисципліни, зменшується відповідно до Положення про планування й звітування науково-педагогічних працівників Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

1.6. Перелік компетентностей, що формує дана дисципліна

Інтегральна компетентність: Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних ІТ-технологій у фізиці, базується на глибокому знанні теорій і методів фізики та/або астрономії, математики та характеризується складністю та неповною визначеністю умов.

Загальні компетентності: ЗК 1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу. ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК 3. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій. ЗК 4. Здатність бути критичним і самокритичним. ЗК 5. Здатність приймати обґрунтовані рішення. ЗК 8. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт. ЗК 9. Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків. ЗК 12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово. ЗК 16. Здатність ухвалювати рішення та діяти, дотримуючись принципу неприпустимості корупції та будь-яких інших проявів недобросовісності.

Фахові компетентності: ФК 1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії. ФК 2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів. ФК 3. Здатність до математичного та логічного мислення, формулювання та досліджування математичних моделей, зокрема дискретних математичних моделей, обґрунтування вибору методів і підходів для розв'язування теоретичних і прикладних задач у галузі фізики та/або астрономії. ФК 4. Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів. ФК 6. Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних процесів та систем. ФК 8. Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси. ФК 12. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації. ФК 13. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії, програмування та суміжних галузей. ФК 14. Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю. ФК 16. Орієнтація на найвищі наукові стандарти - обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. ФК 17. Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту. ФК 18. Ґрунтовні знання з математики та навички їх практичного використання.

1.7. Перелік результатів навчання, що формує дана дисципліна

Програмні результати навчання відповідно до ОПП «Інформаційні технології (ІТ) в фізиці»:

- ПРН 1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного

ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.

- ПРН 3. Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.
- ПРН 4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.
- ПРН 5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.
- ПРН 6. Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії.
- ПРН 7. Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації.
- ПРН 8. Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшуковувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань.
- ПРН 11. Вміти упорядковувати, тлумачити, узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки та вміти використовувати можливості сучасних програмних продуктів та особистих розробок для їх наочного представлення.
- ПРН 16. Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти застосовувати основні фундаментальні та природничі знання, а також використовувати засади системного аналізу та технології моделювання, стандартних алгоритмів та дискретного аналізу для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів.

1.8. Пререквізити

Математичний аналіз, аналітична геометрія та лінійна алгебра, диференціальні та інтегральні рівняння, методи математичної фізики, класична механіка, електродинаміка, оптика, фізика атома.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

6-й семестр

Розділ 1. Основи та мова квантової механіки

Тема 1. Вступ до квантової механіки. Експериментальні передумови квантової теорії: фотоефект, корпускулярно-хвильовий дуалізм, співвідношення Планка та де Бройля, інтерференція окремих квантів. Поняття стану, суперпозиції, комплексної амплітуди й імовірності результату вимірювання. Відмінність квантового опису від класичного.

Тема 2. Хвильова функція і рівняння Шредінгера. Координатне представлення стану, нормування та правило Борна. Оператори координати й імпульсу, гамільтоніан, часове та стаціонарне рівняння Шредінгера. Енергетичні власні стани й еволюція їхніх суперпозицій.

Тема 3. Потік імовірності. Хвильовий пакет. Виведення рівняння неперервності та означення потоку імовірності. Імпульсне представлення, перетворення Фур'є, фазова й групова швидкості. Рух і розпливання хвильового пакета; теорема Еренфеста та умови наближення до класичного руху.

Тема 4. Вимірювання, оператори і невизначеності. Ермітові оператори, власні значення та вектори, проектори й спектральний розклад. Правила вимірювання, середні значення, дисперсії, комутатори та сумісні спостережувані. Співвідношення невизначеностей Робертсона і Гайзенберга.

Тема 5. Дворівневі системи. Двовимірний простір станів, матричні оператори й суперпозиції двох базисних станів. Матриці Паулі та сфера Блоха як загальний апарат дворівневої системи; унітарна еволюція і квантові осциляції. Спін тут використовується лише як можливий приклад дворівневої системи: його фізичне походження та теорію обертань буде розглянуто в другому семестрі.

Тема 6. Складені системи, змішані і сплутані стани. Тензорний добуток просторів, добуткові та сплутані стани двох підсистем. Оператор густини, чистота, статистичні суміші й частковий слід. Стани Белла та відмінність квантових кореляцій від класичних статистичних кореляцій.

Розділ 2. Одновимірна квантова механіка

Тема 7. Одновимірні квантові системи. Спектральна задача для стаціонарного рівняння Шредінгера, граничні умови та нормування. Нескінченна й скінченна потенціальні ями, дискретні зв'язані стани та неперервний спектр. Притягальний дельта-потенціал і стрибок похідної хвильової функції.

Тема 8. Одновимірні системи: загальні закономірності. Невиродженість зв'язаних рівнів, парність у симетричних потенціалах, кількість вузлів і порядок енергій. Якісна поведінка хвильової функції в класично дозволених і заборонених областях. Зв'язок форми потенціалу зі структурою спектра.

Тема 9. Гармонічний осцилятор. Квадратичний потенціал як універсальне наближення поблизу стійкої рівноваги. Алгебраїчне розв'язання за допомогою операторів народження і знищення, спектр енергій та основний стан. Координатні хвильові функції, невизначеності та матричні елементи координати й імпульсу.

Тема 10. Одновимірне розсіяння і потенціальні бар'єри. Падаючі, відбиті й пройдені хвилі; коефіцієнти відбиття та проходження, обчислені з потоків імовірності. Потенціальна сходинка й прямокутний бар'єр, підбар'єрне проникнення і тунелювання. Інтерференція всередині бар'єра та резонансне проходження.

Розділ 3. Тривимірні системи і наближені методи

Тема 11. Орбітальний момент імпульсу і рух у центральному полі. Комутаційна алгебра компонент орбітального моменту, оператори підвищення й пониження, квантові числа l, m . Сферичні гармоніки, відокремлення радіального та кутового руху. Радіальне рівняння Шредінгера і відцентровий доданок ефективного потенціалу.

Тема 12. Воднеподібний атом. Кулонівський потенціал, радіальне рівняння, енергетичні рівні та квантові числа n, l, m . Радіальні й кутові розподіли імовірності, орбітали та виродження нерелятивістського спектра. Це базова модель без спін-орбітальних, релятивістських та зовнішньопольових поправок.

Тема 13. Квазікласичне наближення. Побудова WKВ-розв'язків у дозволених і заборонених областях та критерій застосовності наближення. Точки повороту, формули зшивання і квазікласичне правило квантування. Тунельна експонента й зв'язок із класичною дією.

Тема 14. Стаціонарна теорія збурень. Невироджена теорія збурень: поправки до енергій і станів першого та другого порядків. Вироджена теорія збурень: побудова й діагоналізація матриці збурення у виродженому підпросторі. Використання симетрій для аналізу матричних елементів; підготовка до тонкої структури атома.

7-й семестр

Розділ 4. Спін, обертання та атомна квантова фізика

Тема 1. Повторення матеріалу першого семестру. Узгоджене повторення формалізму станів, операторів, вимірювань та унітарної еволюції. Одновимірні й тривимірні спектральні задачі, момент імпульсу, осцилятор та атом водню. Квазікласичне наближення і стаціонарна теорія збурень як основа для подальших тем.

Тема 2. Спін $1/2$ і квантові обертання. Дослід Штерна-Герлаха та спін як внутрішній момент імпульсу, відмінний від орбітального. Спінори, явні матриці Паулі, вимірювання уздовж довільної осі та оператори обертання. Зв'язок $SU(2)$ і $SO(3)$, знакова зміна спінора після оберту на 2π , ларморова прецесія.

Тема 3. Складання моментів імпульсу. Повний момент як сума двох моментів і перехід між добутковим та зв'язаним базисами. Коефіцієнти Клебша-Гордана, дозволені значення повного моменту та операторний метод їх знаходження. Синглет і триплет для двох спінів $1/2$, зв'язок зі сплутаними станами.

Тема 4. Заряджена частинка в електромагнітному полі. Мінімальна взаємодія, скалярний і векторний потенціали, калібрувальні перетворення та фаза хвильової функції. Ефект Ааронова-Бома; гамільтоніан з орбітальним і спіновим магнітними внесками. Рух у сталому магнітному полі, рівні Ландау та вступне пояснення квантового ефекту Холла.

Тема 5. Тонка структура атома і атом у зовнішніх полях. Відхилення спектра водню від нерелятивістської моделі: релятивістська поправка, спін-орбітальна взаємодія та дарвінівський член. Застосування складання моментів і стаціонарної теорії збурень до зняття виродження. Ефекти Зеемана і, за наявності часу, Штарка.

Розділ 5. Квантова динаміка, керування і декогеренція

Тема 6. Когерентні і стиснені стани. Когерентні стани осцилятора як власні стани оператора знищення, їхнє подання у фоківському базисі та часова еволюція. Квадратури і розподіл невизначеностей; стиснені (squeezed) стани. Застосування в квантовій оптиці та високоточних вимірюваннях.

Тема 7. Залежна від часу теорія збурень. Представлення взаємодії й рівняння для амплітуд енергетичних станів. Перше наближення для амплітуди та ймовірності переходу, часові інтеграли й резонансні умови. Загальна ідея наступних порядків і ряду Дайсона.

Тема 8. Квантові переходи і взаємодія випромінювання з речовиною. Гармонічне збурення, правило Фермі та густина кінцевих станів. Електричне дипольне наближення, правила відбору, поглинання і випромінювання. Дворівневий атом, осциляції Рабі, фізичні основи лазера.

Тема 9. Адіабатичне наближення, переходи Ландау-Зенера і геометрична фаза. Адіабатична теорема для повільно змінного гамільтоніана та умови її застосовності. Дворівнева задача Ландау-Зенера як модель неадіабатичного переходу. Фаза Беррі та коротке застосування адіабатичного розділення рухів у наближенні Борна-Оппенгеймера.

Тема 10. Відкриті квантові системи і декогеренція. Взаємодія системи з оточенням, частковий слід і редукована еволюція оператора густини. Дефазування, релаксація та часи T_1 , T_2 ; найпростіші квантові канали й вступ до рівняння Ліндблада. Виникнення ефективно класичної поведінки й фізичні обмеження квантових пристроїв.

Розділ 6. Багаточастинкова механіка і розширення формалізму

Тема 11. Тотожні частинки, бозони і ферміони. Нерозрізнюваність тотожних частинок, симетричні й антисиметричні стани та оператор перестановки. Принцип Паулі й обмінні кореляції. Зв'язок зі структурою атомів, фермі-газом і бозе-ейнштейнівською конденсацією.

Тема 12. Варіаційний метод і вступ до багаточастинкової квантової механіки. Варіаційний принцип та оцінювання енергії основного стану за допомогою пробних функцій. Атом гелію, екранування і фізична ідея самосумісного поля. Числа заповнення,

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усь го	у тому числі					усь го	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6-й семестр												
Розділ 1. Основи та мова квантової механіки												
Тема 1. Вступ до квантової механіки	9	3	1			5						
Тема 2. Хвильова функція і рівняння Шредінгера	9	3	1			5						
Тема 3. Потік імовірності. Хвильовий пакет	9	3	1			5						
Тема 4. Вимірювання, оператори і невизначеності	9	3	1			5						
Тема 5. Дворівневі системи	8	2	1			5						
Тема 6. Складені, змішані і сплутані стани	8	2	1			5						
Разом за розділом 1	52	16	6			30						
Розділ 2. Одновимірні квантова механіка												
Тема 7. Одновимірні квантові системи	9	2	2			5						
Тема 8. Одновимірні системи: загальні закономірності	8	2	1			5						
Тема 9. Гармонічний осцилятор	8	2	1			5						
Тема 10. Одновимірне розсіяння, бар'єри	8	2	1			5						
Разом за розділом 2	33	8	5			20						
Розділ 3. Тривимірні системи і наближені методи												
Тема 11. Орбітальний момент, центральне поле	9	2	2			5						
Тема 12. Воднеподібний атом	8	2	1			5						
Тема 13. Квазікласичне наближення	9	2	1			6						
Тема 14. Стаціонарна теорія збурень	9	2	1			6						
Разом за розділом 3	35	8	5			22						
Разом за 6-й семестр	120	32	16			72						
7-й семестр												
Розділ 4. Спін, обертання та атомна квантова фізика												

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усьо го	у тому числі					усьо го	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тема 1. Повторення матеріалу I семестру	8	3	2			3						
Тема 2. Спін 1/2 і квантові обертання	7	3	1		1	2						
Тема 3. Складання моментів імпульсу	6	2	1		1	2						
Тема 4. Заряджена частинка в ЕМ полі	6	2	1		1	2						
Тема 5. Тонка структура, атом у полях	6	2	1		1	2						
Разом за розділом 4	33	12	6		4	11						
Розділ 5. Квантова динаміка, керування і декогеренція												
Тема 6. Когерентні і стиснені стани	6	2	1		1	2						
Тема 7. Залежна від часу теорія збурень	6	2	1		1	2						
Тема 8. Квантові переходи	6	2	1		1	2						
Тема 9. Адіабатичне наближення	6	2	1		1	2						
Тема 10. Відкриті системи, декогеренція	6	2	1		1	2						
Разом за розділом 5	30	10	5		5	10						
Розділ 6. Багаточастинкова механіка і розширення формалізму												
Тема 11. Тотожні частинки	6	2	1		1	2						
Тема 12. Варіаційний метод	5	2	1			2						
Тема 13. Теорія розсіяння	6	2	1			3						
Тема 14. Інтеграл за траєкторіями	5	2	1			2						
Тема 15. Релятивістська квантова механіка	5	2	1			2						
Разом за розділом 6	27	10	5		1	11						
Разом за 7-й семестр	90	32	16		10	32						
Усього годин	210	64	32		10	104						

4. Темі практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
6-й семестр		
1	Оцінювання меж застосовності класичного опису: довжина хвилі де Бройля, інтерференція квантів і суперпозиція амплітуд.	1
2	Нормування хвильових функцій, правило Борна, середні значення координати й імпульсу; розв'язання стаціонарного рівняння Шредінгера.	1
3	Виведення рівняння неперервності, обчислення густини й потоку імовірності; побудова та еволюція гаусівського хвильового пакета.	1
4	Задачі на власні значення ермітових операторів, спектральний розклад, комутатори та співвідношення невизначеностей.	1
5	Матриці Паулі, сфера Блоха й унітарна еволюція дворівневої системи; імовірності результатів вимірювання у різних базисах.	1

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
6	Тензорні добутки, оператор густини, частковий слід, чистота і стани Белла; розрізнення добуткових та сплутаних станів.	1
7	Зв'язані стани в нескінченній і скінченній потенціальних ямах та у полі притягального дельта-потенціалу.	2
8	Якісний аналіз одновимірного спектра: парність, невиродженість, вузли хвильової функції та граничні умови.	1
9	Гармонічний осцилятор операторним методом: спектр, матричні елементи, середні значення та невизначеності.	1
10	Потенціальна сходинка і прямокутний бар'єр: коефіцієнти відбиття та проходження, тунелювання й резонансні умови.	1
11	Алгебра орбітального моменту імпульсу, сферичні гармоніки та ефективний радіальний потенціал.	2
12	Воднеподібний атом: енергетичні рівні, квантові числа, виродження і радіальні розподіли імовірності.	1
13	WKB-наближення: точки повороту, правило квантування та оцінювання тунельної експоненти.	1
14	Невироджена й вироджена стаціонарна теорія збурень: поправки до енергій і станів модельних систем.	1
	Разом за 6-й семестр	16
7-й семестр		
1	Комплексне повторення: спектральний розклад, часова еволюція, осцилятор, центральне поле та теорія збурень.	2
2	Спінори й вимірювання спіну вздовж довільної осі; оператори обертання, ларморова прецесія та оберт на 2π .	1
3	Складання двох моментів імпульсу, коефіцієнти Клебша-Гордана, синглетний і триплетні стани.	1
4	Мінімальна взаємодія та калібрувальні перетворення; ефект Ааронова-Бома і спектр рівнів Ландау.	1
5	Тонка структура воднеподібного атома, ефекти Зесмана і Штарка як задачі стаціонарної теорії збурень.	1
6	Когерентні та стиснені стани осцилятора: фоківський розклад, квадратури і часова еволюція.	1
7	Залежна від часу теорія збурень: амплітуди переходів, резонанс і межі застосовності першого порядку.	1
8	Правило Фермі, дипольні матричні елементи, правила відбору та осциляції Рабі.	1
9	Адіабатичний критерій, задача Ландау-Зенера і геометрична фаза для циклічної еволюції.	1
10	Редукована матриця густини, квантові канали, дефазування, релаксація та найпростіше рівняння Ліндблада.	1
11	Симетризація й антисиметризація станів тотожних частинок, принцип Паулі та обмінні кореляції.	1
12	Варіаційний метод для основного стану модельної системи або атома гелію; оптимізація пробної функції.	1
13	Тривимірне розсіяння: парціальні хвилі, фазові зсуви та перше борнівське наближення.	1
14	Дискретизація інтеграла за траєкторіями і побудова пропагатора вільної частинки та осцилятора.	1

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
15	Плоскохвильові розв'язки рівнянь Клейна-Гордона і Дірака та нерелятивістський перехід до рівняння Паулі.	1
	Разом за 7-й семестр	16
	Разом	32

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
6-й семестр		
1	Тема 1. Знайти в літературі приклади явищ, що потребують квантово-механічного опису. Оцінити довжину хвилі де Бройля для електрона, атома та макроскопічного тіла і порівняти результати.	5
2	Тема 2. Нормувати задані хвильові функції, перевірити їхню належність простору допустимих станів і вивести рівняння неперервності з рівняння Шредінгера.	5
3	Тема 3. Побудувати гаусівський хвильовий пакет, дослідити його рух і розпливання та перевірити виконання теореми Еренфеста для вільної частинки.	5
4	Тема 4. Довести основні властивості власних значень і власних векторів ермітових операторів. Обчислити комутатори координати, імпульсу та моменту імпульсу і застосувати співвідношення невизначеностей.	5
5	Тема 5. Для заданого стану кубіта знайти координати на сфері Блоха, імовірності результатів вимірювання вздовж різних осей та часову еволюцію у сталому полі.	5
6	Тема 6. Побудувати матриці густини для чистої та змішаної двокубітних систем, обчислити часткові сліди і чистоту та перевірити сплутаність станів Белла.	5
7	Тема 7. Розв'язати рівняння Шредінгера для скінченної прямокутної ями та притягального дельта-потенціалу; визначити число зв'язаних станів і дослідити їхню парність.	5
8	Тема 8. Довести невиродженість зв'язаних станів одновимірного руху і дослідити зв'язок кількості вузлів хвильової функції з порядком енергетичного рівня.	5
9	Тема 9. Розв'язати задачу про гармонічний осцилятор операторним методом; знайти матричні елементи координати й імпульсу та невизначеності в станах з фіксованим квантовим числом.	5
10	Тема 10. Обчислити коефіцієнти відбиття і проходження для потенціальної сходинки та прямокутного бар'єра, перевірити закон збереження потоку і дослідити умови резонансного проходження.	5
11	Тема 11. Вивести комутаційні співвідношення для компонент орбітального моменту, побудувати сходинкові оператори та обчислити середні значення його проєкцій у заданих станах.	5
12	Тема 12. Розділити радіальну і кутову частини рівняння Шредінгера для кулонівського поля, визначити кратність	5

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
	виродження рівнів воднеподібного атома та побудувати радіальні розподіли імовірності.	
13	Тема 13. Вивести умову застосовності WKВ-наближення, правило квантування та оцінити коефіцієнт тунелювання для заданого потенціального бар'єра.	6
14	Тема 14. Обчислити поправки до енергій і станів у невиродженій та виродженій теорії збурень для ангармонічного осцилятора або дворівневої системи.	6
	Разом за 6-й семестр	72
7-й семестр		
1	Тема 1. Розв'язати комплексну задачу, що поєднує операторний формалізм, спектральний розклад, часову еволюцію та обчислення середніх значень для матеріалу першого семестру.	3
2	Тема 2. Проаналізувати дослід Штерна-Герлаха, побудувати спінори власних станів уздовж довільної осі та показати зміну знака спінора після обертання на 2π .	2
3	Тема 3. Побудувати зв'язані стани двох моментів імпульсу, обчислити коефіцієнти Клебша-Гордана для найпростіших випадків і записати синглетний та триплетні стани двох спінів $1/2$.	2
4	Тема 4. Вивести гамільтоніан зарядженої частинки в електромагнітному полі, перевірити його калібрувальну інваріантність і знайти спектр рівнів Ландау.	2
5	Тема 5. За допомогою теорії збурень обчислити внески тонкої структури та дослідити нормальний ефект Зеємана і лінійний ефект Штарка для атома водню.	2
6	Тема 6. Побудувати когерентний стан осцилятора, обчислити середні значення та дисперсії координати й імпульсу і порівняти їх зі стисненим станом.	2
7	Тема 7. Для гармонічного збурення обчислити імовірність квантового переходу та дослідити її залежність від частоти, тривалості дії і розладу від резонансу.	2
8	Тема 8. Вивести дипольні правила відбору, порівняти спонтанне і вимушене випромінювання та обчислити матричний елемент переходу для модельної атомної системи.	2
9	Тема 9. Розв'язати дворівневу задачу Ландау-Зенера, перевірити адиабатичний критерій і обчислити геометричну фазу для циклічної зміни параметрів.	2
10	Тема 10. Для дворівневої системи у взаємодії з оточенням побудувати редуковану матрицю густини, дослідити втрату когерентності та розв'язати найпростіше рівняння Ліндблада.	2
11	Тема 11. Побудувати симетричні й антисиметричні стани тотожних частинок, довести принцип Паулі для ферміонів і порівняти статистичні властивості бозонів та ферміонів.	2
12	Тема 12. Застосувати варіаційний метод до основного стану модельної системи або атома гелію; знайти оптимальний параметр пробної функції та оцінити енергію.	2
13	Тема 13. Вивести амплітуду розсіяння у першому борнівському наближенні, обчислити диференціальний переріз для заданого потенціалу та визначити межі застосовності наближення.	3

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
14	Тема 14. Побудувати пропагатор вільної частинки шляхом дискретизації інтеграла за траєкторіями і показати виникнення класичного принципу дії у наближенні стаціонарної фази.	2
15	Тема 15. Знайти плоскохвильові розв'язки рівнянь Клейна-Гордона і Дірака, проаналізувати їхні спектри та виконати нерелятивістський перехід від рівняння Дірака до рівняння Паулі.	2
16	Виконання розрахунково-графічної роботи (розділ 6 програми)	10
	Разом за 7-й семестр	42
	Разом	114

6. Індивідуальні завдання

Навчальним планом передбачено одну розрахунково-графічну роботу у 7-му семестрі; на її виконання відведено 10 год. самостійної роботи. Перелік містить 30 комплексних варіантів, по п'ять за кожним із шести розділів програми; конкретний варіант і числові параметри задає викладач.

У розв'язанні потрібно обґрунтувати вибір методу, записати вихідні рівняння та граничні умови, виконати основні аналітичні перетворення, перевірити нормування, розмірності та граничні випадки, подати графік або числову ілюстрацію і пояснити фізичний зміст результату. Програмний код, якщо він використовується, додається до роботи разом із коротким описом алгоритму. Робота захищається у формі співбесіди з викладачем.

Розрахунково-графічна робота оцінюється до 10 балів: правильність і повнота розв'язання (5 балів), фізична інтерпретація та перевірка результату (2 бали), оформлення й ілюстрації (1 бал), захист (2 бали).

7. Методи навчання

Проблемно орієнтовані лекції з поясненням і демонстрацією ключових виведень; практичні заняття з розв'язування та обговорення задач; самостійна робота з навчальною і науковою літературою; виконання домашніх завдань і розрахунково-графічної роботи; консультації; використання електронних освітніх ресурсів і засобів візуалізації. Для кожної теми передбачено лекцію, практичне заняття, домашнє завдання та тематичний диктант.

8. Методи контролю

Розв'язування задач на практичних заняттях, усне опитування, тематичні диктанти, перевірка домашніх завдань, одна контрольна робота в кожному семестрі, підсумкова залікова робота у 6-му семестрі, виконання і захист розрахунково-графічної роботи та письмовий екзамен у 7-му семестрі.

9. Схема нарахування балів

6-й семестр: підсумковий контроль у формі заліку із заліковою роботою.

Поточний контроль, самостійна робота					Залікова робота	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Разом		
T1-T6	T7-T10	T11-T14				
15	15	15	15	60	40	100

T1, T2, ..., T14 позначають теми 6-го семестру відповідно до тематичного плану.

7-й семестр: підсумковий контроль у формі екзамену.

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання						Екзамен	Сума
Розділ 4	Розділ 5	Розділ 6	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Розрахунково-графічна робота	Разом		
T1-T5	T6-T10	T11-T15					
15	15	15	5	10	60	40	100

T1, T2, ..., T15 позначають теми 7-го семестру відповідно до тематичного плану.

Бали за розділ (до 15) нараховуються за тематичні диктанти (до 8 балів) і домашні завдання (до 7 балів). За роботу на практичних заняттях у межах розділу може бути додатково нараховано до 5 резервних балів, якими компенсуються бали, недобрані за диктанти та домашні завдання; сума балів за розділ не може перевищувати 15.

Для допуску до складання підсумкового контролю (заліку або екзамену) здобувач вищої освіти повинен набрати не менше 30 балів з навчальної дисципліни під час поточного контролю, самостійної роботи, індивідуального завдання відповідного семестру.

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Залікова робота (6-й семестр) і екзаменаційний білет (7-й семестр) мають однакову структуру: шість відкритих завдань, а саме два концептуально-теоретичні питання, два короткі розрахунково-операторні завдання, одне порівняльно-аналітичне питання та одна розгорнута розрахункова задача. Завдання 1 і 2 оцінюються по 6 балів, завдання 3-6 по 7 балів; разом 40 балів. Завдання залікової роботи охоплюють теми 6-го семестру (розділи 1-3), завдання екзаменаційного білета охоплюють теми 7-го семестру (розділи 4-6) з опорою на матеріал 6-го семестру. Залік зараховується, якщо сума балів за 6-й семестр становить не менше 50.

Відповідь має містити коректні означення, фізичне обґрунтування, послідовний математичний виклад, пояснення використаних наближень і чітко сформульований результат. Під час оцінювання кожної відповіді враховуються:

- коректність фізичних тверджень, означень і використаних формул;
- повнота та логічна послідовність міркувань;
- обґрунтованість проміжних кроків і застосованих наближень;
- правильність математичних перетворень і кінцевого результату;
- здатність пояснити фізичний зміст отриманої відповіді.

Розрахункові завдання мають містити вибір методу, запис вихідних рівнянь, послідовні перетворення, перевірку розмірностей або граничних випадків (де це доречно) та інтерпретацію результату. За кожне завдання виставляється:

- 90-100 % максимального бала: повний правильний розв'язок або відповідь із належним обґрунтуванням;
- 75-89 %: правильний метод і переважно правильний результат за наявності неістотних неточностей;
- 50-74 %: продемонстровано основний підхід і отримано частину правильних проміжних результатів, але розв'язок неповний;
- 0-49 %: відповідь фрагментарна або використаний метод не дає змоги одержати правильний результат.

Екзамен вважається складеним, якщо сума балів за поточний і підсумковий семестровий контроль становить не менше 50 балів.

Під час вивчення навчальної дисципліни використання технологій штучного інтелекту (ШІ) здійснюється відповідно до Політики використання технологій штучного інтелекту Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

У межах дисципліни застосовуються такі моделі використання ШІ:

1. Модель «ШІ заборонено».

Використання технологій штучного інтелекту не допускається під час виконання контрольних заходів, спрямованих на перевірку індивідуальних знань і сформованості компетентностей здобувача освіти, зокрема: усного опитування, модульних контрольних робіт, екзамену (заліку), якщо інше не визначено викладачем, інших видів оцінювання, для яких викладачем встановлено обмеження щодо використання ШІ.

2. Модель «ШІ як асистент».

Під час підготовки до практичних занять, виконання індивідуальних завдань, рефератів, аналітичних оглядів та інших письмових робіт дозволяється використання ШІ для: пошуку та систематизації інформації, добору та первинного аналізу наукових джерел, пояснення складних понять, удосконалення структури тексту, перевірки граматики, стилю та оформлення, генерації ідей, плану роботи або прикладів.

Фінальний текст роботи, висновки, аналіз, інтерпретація результатів та прийняті рішення повинні бути самостійно підготовлені здобувачем освіти.

3. Модель «ШІ як інструмент».

Для окремих лабораторних, практичних, проєктних або дослідницьких робіт використання технологій штучного інтелекту може бути обов'язковою складовою виконання завдання. У таких випадках здобувачі освіти можуть використовувати генеративні моделі ШІ для: аналізу та підготовки даних, генерації, аналізу й оптимізації програмного коду, порівняння результатів роботи різних моделей ШІ, створення візуалізацій, схем або зображень, аналізу великих масивів даних, проведення експериментів із застосуванням сучасних інструментів штучного інтелекту.

Усі результати, отримані за допомогою ШІ, підлягають критичному аналізу, перевірці та доопрацюванню здобувачем освіти.

Декларування використання ШІ.

У разі використання технологій штучного інтелекту здобувач освіти зобов'язаний зазначити: назву сервісу або моделі ШІ; дату використання; характер допомоги (генерація ідей, пошук інформації, аналіз даних, генерація коду, редагування тексту тощо).

За вимогою викладача здобувач освіти повинен надати використані запити (prompts) або пояснити спосіб використання інструментів ШІ.

Недеклароване використання технологій штучного інтелекту або подання згенерованого ШІ матеріалу як власного результату навчальної діяльності розглядається як порушення принципів академічної доброчесності відповідно до внутрішніх нормативних документів Університету.

У межах цієї дисципліни модель «ШІ заборонено» застосовується під час тематичних диктантів, усного опитування, контрольних робіт, залікової роботи та екзамену; модель «ШІ як асистент» застосовується під час підготовки до практичних занять і виконання домашніх завдань; модель «ШІ як інструмент» застосовується за рішенням викладача в окремих варіантах розрахунково-графічної роботи, де використання ШІ є складовою завдання (генерація й перевірка програмного коду для чисельних розрахунків, побудова графіків), з обов'язковим декларуванням.

Результати навчання, отримані у неформальній освіті, визнаються відповідно до Порядку визнання результатів навчання, отриманих у неформальній освіті, в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна (рішення Вченої ради від 30 червня 2025 року, протокол № 17). Здобувачеві може бути зараховано до 5 балів за кожний із таких курсів: MIT OpenCourseWare «8.04 Quantum Physics I» або «8.05 Quantum Physics II» (завершений тематичний блок із поданням виконаних завдань та усною перевіркою); Coursera, University of Colorado Boulder, «Foundations of Quantum Mechanics» (сертифікат і усна перевірка); IBM Quantum Learning, «Basics of Quantum Information» (підтвердження завершення курсу та демонстрація виконаних вправ). Загалом за результати неформальної освіти зараховується не більше 10 балів у межах поточного контролю відповідного

семестру. Рішення ухвалює викладач після перевірки підтвердних документів і відповідності результатів навчання програмі дисципліни.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90-100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
0-49	незадовільно	не зараховано

10. Рекомендована література

Основна література

1. Вакарчук І. О. Квантова механіка : підручник. 4-те вид., доповн. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с.
2. Кобушкін О. П. Квантова механіка : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. 253 с.
3. Griffiths D. J., Schroeter D. F. Introduction to Quantum Mechanics. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2018. 508 p.
4. Landau L. D., Lifshitz E. M. Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory. 3rd ed. Oxford : Pergamon Press, 1977. 673 p.
5. Shankar R. Principles of Quantum Mechanics. 2nd ed. New York : Springer, 1994. 676 p.
6. Ульянов В. В. Задачи по квантовой механике и квантовой статистике. Харьков : Вища школа, 1980. 216 с.
7. Galitski V., Karnakov B., Kogan V., Galitski V., Jr. Exploring Quantum Mechanics: A Collection of 700+ Solved Problems. Oxford : Oxford University Press, 2013. 880 p.

Допоміжна література

1. Sakurai J. J., Napolitano J. Modern Quantum Mechanics. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2020. 566 p.
2. Zwiebach B. Mastering Quantum Mechanics: Essentials, Theory, and Applications. Cambridge, MA : The MIT Press, 2022. 1104 p.
3. Кобушкін О. П., Кривенко-Еметов Я. Д. Збірник задач з квантової механіки : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 110 с.
4. Cohen-Tannoudji C., Diu B., Laloë F. Quantum Mechanics. Vols. 1-2. New York : Wiley, 1991.
5. Dirac P. A. M. The Principles of Quantum Mechanics. 4th ed. Oxford : Clarendon Press, 1981. 314 p.
6. Feynman R. P., Hibbs A. R. Quantum Mechanics and Path Integrals. Emended ed. Mineola : Dover, 2010. 371 p.
7. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum Computation and Quantum Information. 10th Anniversary ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 676 p.

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

1. Навчальні матеріали кафедри теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця: http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_study_ukr.html
2. MIT OpenCourseWare. Quantum Physics I (8.04): <https://ocw.mit.edu/courses/8-04-quantum-physics-i-spring-2016/>

3. MIT OpenCourseWare. Quantum Physics II (8.05): <https://ocw.mit.edu/courses/8-05-quantum-physics-ii-fall-2013/>
4. MIT OpenCourseWare. Quantum Physics III (8.06): <https://ocw.mit.edu/courses/8-06-quantum-physics-iii-spring-2018/>
5. Coursera, University of Colorado Boulder. Foundations of Quantum Mechanics: <https://www.coursera.org/learn/foundations-quantum-mechanics>
6. QuTiP, Quantum Toolbox in Python: <https://qutip.readthedocs.io/>
7. Електронний архів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Кобушкін О. П. «Квантова механіка»: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18348>
8. Електронний архів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Кобушкін О. П., Кривенко-Еметов Я. Д. «Збірник задач з квантової механіки»: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/32135>
9. Рішення Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна від 30.06.2025, протокол № 17: <https://rada.karazin.ua/ua/documents/docs-rishennya?protocol=2025-30-06-17&sort=alphabet&type=method>

Додаток до робочої програми навчальної дисципліни «Квантова механіка»
(назва дисципліни)

Дію робочої програми продовжено: на 20____/20____ н. р.

Заступник декана фізичного факультету з навчальної роботи

(підпис) (прізвище, ініціали)

«____» _____ 20__ р.

Голова науково-методичної комісії фізичного факультету

(підпис) (прізвище, ініціали)

«____» _____ 20__ р.