Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра комп'ютерної фізики

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
В.о. директора
навчально-наукового інституту
комп'ютерної фізики та енергетики

Ірина ГАРЯЧЕВСЬКА

2025 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Квантова механіка. Частина 2

рівень вищої освіти	перший (бакалаврський) рівень
галузь знань	10 Природничі науки
спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма	Прикладна фізика енергетичних систем
	Прикладна фізика нетрадиційної енергетики
	Комп'ютерна фізика
вид дисципліни	Обов'язкова
ННІ	комп'ютерної фізики та енергетики

2025 / 2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики

Протокол від "27" серпня 2025 року № 14

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: Костянтин НЄМЧЕНКО, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерної фізики

Програму схвалено на засіданні кафедри комп'ютерної фізики

Протокол від "26" серпня 2025 року № 8

Завідувач кафедри комп'ютерної фізики

_____ Костянтин НЄМЧЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником проектної групи)
Прикладна фізика енергетичних систем
назва освітньої програми

_____ Денис ПРОТЕКТОР
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником проектної групи)
Прикладна фізика нетрадиційної енергетики
назва освітньої програми

_____ Ілля МАРУЩЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником проектної групи)
Комп'ютерна фізика
назва освітньої програми

_____ Єгор НЄМЧЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики
назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від "27" серпня 2025 року № 7

Голова методичної комісії Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики

_____ Денис ПРОТЕКТОР
(підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Квантова механіка. Частина 2» складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів спеціальності 10 Прикладна фізика та наноматеріали.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни:

Підготовка фахівців зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали до розумінняоснов нерелятивістської квантової механіки, формування наукового підходу до вирішеннязадач, які виникають при розгляді фізичних явищ на основі квантової теорії, необхідних длярозвитку фізичних та енергетичних технологій на об`єктах енергетики.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни:

Забезпечити формування у студентів знань основних фактів і методів нерелятивістського наближення квантової механіки, отримання навиків застосування наукових знань на практиці при аналізуванні та вирішенні фізичних задач, які виникають при вирішенні фізичних проблем мікроскопіки.

1.3. Кількість кредитів - 5

1.4. Загальна кількість годин - 150

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Обов’язкова	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
4-й	
Семестр	
7-й	
Лекції	
32 год.	
Практичні, семінарські заняття	
32 год.	
Лабораторні заняття	
0 год.	
Самостійна робота	
86 год.	
у тому числі індивідуальні завдання	

1.6. Заплановані результати навчання:

- згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми, студенти мають отримати такі компетентності (ЗК, СК):

ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
ЗК03. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.
ЗК05. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.
ЗК06. Здатність до проведення досліджень на відповідному рівні.
ЗК07. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
ЗК08. Навички міжособистісної взаємодії.
ЗК09. Здатність працювати автономно.

ЗК10. Навички здійснення безпечної діяльності.
ЗК12. Здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії та закономірностей розвитку предметної області, її місця у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та ведення здорового способу життя.
СК01. Здатність брати участь у плануванні та виконанні наукових та науково-технічних проектів.
СК02. Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленій презентації їхніх результатів.
СК03. Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.
СК04. Здатність брати участь у впровадженні результатів досліджень та розробок.
СК05. Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп’ютерних технологій.
СК06. Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем.
СК07. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.
СК08. Здатність працювати в колективах виконавців, у тому числі в міждисциплінарних проектах.
СК09. Здатність проводити самостійно та в команді наукові дослідження фізичних систем, явищ і процесів (експериментальні, теоретичні, комп’ютерне моделювання) в галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

- згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми, студенти повинні досягти таких результатів навчання (РН):
РН01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв’язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.
РН02. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.
РН03. Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв’язанні практичних проблем прикладної фізики.
РН04. Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій.
РН05. Вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики.
РН06. Відшуковувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.
РН07. Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики.
РН09. Презентувати результати досліджень і розробок фахівцям і нефахівцям, аргументувати власну позицію.
РН10. Планувати й організовувати результативну професійну діяльність індивідуально і як член команди при розробці та реалізації наукових і прикладних проєктів.
РН11. Знати цілі сталого розвитку та можливості своєї професійної сфери для їх досягнення, в тому числі в Україні.
РН12. Розуміти закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв'язанні екологічних проблем.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 3. Квантові фізичні системи.

Тема 1. Гармонійний осцилятор.

Гармонійний осцилятор. Розв'язок рівняння Шредінгера. Поліноми Ерміта.

Тема 2. Властивості гармонійного осцилятора.

Рівні енергії і хвильові функції. Нульова енергія. Оператори народження та знищення.

Тема 3. Квантовий ротатор.

Обертання в класичному випадку. Обертання в квантовому випадку.

Тема 4. Властивості квантового ротатора.

Оператор проекції моменту імпульсу. Виведення явного вигляду.

Тема 5. Момент імпульсу.

Момент імпульсу: оператори, комутаційні співвідношення, рішення рівнянь на власні значення. Матриці операторів моменту.

Тема 6. Спін частинки. Тотожність частинок

Поняття про спін частинки. Спінорна хвильова функція. Коммутатори.

Тема 7. Квантова статистика. Двоатомні молекули.

Ступені свободи двоатомних молекул. Теплоємність газів.

Тема 8. Квантова статистика Бозе. Фонони у твердому тілі.

Поняття фононів. Теплоємність твердих тіл. Закон Дюлонга –Пті. Формула Дебая.

Тема 9. Квантова статистика Фермі. Електрони у твердому тілі.

Поняття ферміонів. Енергія Фермі.

Тема 10. Квазікласичне наближення. Ентропія класичних систем.

Квазікласичне наближення. Рішення рівняння Шредінгера та зшивання квазікласичних рішень. Правило квантування Бора-Зомерфельда. Фазовий об'єм. Ентропія класичних систем..

Розділ 4. Побудова атомів.

Тема 11. Задача двох тіл.
Задача двох тіл. Рух в центральному полі. Загальні властивості руху в центральному полі. Виродження по проекції і випадкове виродження.

Тема 12. Рівняння Шредінгера в задачі двох тіл
Рівняння для радіальної хвильової функції. Класифікація стаціонарних станів дискретного спектра в центральному полі.

Тема 13. Водородоподібний атом.
Рішення рівняння Шредінгера в декартових і сферичних координатах. Водородоподібний атом. Рівні енергії і хвильові функції. Кратність виродження.

Тема 14. Побудова атомів.
Таблиця Мєндєлєєва. Принципи та закономірності періодичної таблиці елементів..

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	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
Розділ 1. *Основні поняття та загальна теорія*												
Тема 1.	10	2	2			6						
Тема 2.	10	2	2			6						
Тема 3.	10	2	2			6						
Тема 4.	10	2	2			6						
Тема 5.	10	2	2			6						
Тема 6.	10	2	2			6						
Тема 7.	10	2	2			6						
Тема 8.	10	2	2			6						
Тема 9.	10	2	2			6						
Тема 10.	10	2	2			6						
Разом за розділом 3	100	20	20			60						
Розділ 2. *Конкретні фізичні системи*												
Тема 11.	12	3	3			6						
Тема 12.	12	3	3			6						
Тема 13.	12	3	3			6						
Тема 14.	14	3	3			8						
Тема 11.	12	3	3			6						
Тема 12.	12	3	3			6						
Разом за розділом 4	50	12	12			26						
Усього годин	150	32	32			86						

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Гармонійний осцилятор.	2
2	Властивості гармонійного осцилятора.	2
3	Квантовий ротатор.	2
4	Властивості квантового ротатора.	2
5	Момент імпульсу.	2
6	Спін частинки. Тотожність частинок	2
7	Квантова статистика. Двоатомні молекули.	2
8	Квантова статистика Бозе. Фонони у твердому тілі.	2
9	Квантова статистика Фермі. Електрони у твердому тілі.	2
10	Квазікласичне наближення. Ентропія класичних систем	2
11	Задача двох тіл.	3
12	Рівняння Шредінгера в задачі двох тіл	3
13	Водородоподібний атом.	3

14	Побудова атомів.	3
	Разом	32

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Вивчити поняття гармонійний осцилятора.	6
2	Дослідити властивості гармонійного осцилятора.	6
3	Ознайомитись з поняттям квантовий ротатора.	6
	Вивчити властивості квантового ротатора.	6
	Вивчити поняття моменту імпульсу.	6
	Ознайомитись з поняттям спіну частинки.	6
	Розв’язати задачі за темою «Квантова статистика. Двоатомні молекули»	6
	Розв’язати задачі за темою «Квантова статистика Бозе. Фонони у твердому тілі».	6
	Розв’язати задачі за темою «Квантова статистика Фермі. Електрони у твердому тілі».	6
	10 Розв’язати задачі за темою «Квазікласичне наближення. Ентропія класичних систем»	6
	11 Розв’язати задачі за темою «Задача двох тіл».	6
	12 Розв’язати задачі за темою «Рівняння Шредінгера в задачі двох тіл»	6
	13 Розв’язати задачі за темою «Водородоподібний атом».	6
	Разом	86

6. Індивідуальні завдання

Не передбачені.

7. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються всі основні методи навчання:

1. пояснювально – ілюстративний метод з використанням мультимедійних презентацій
2. проблемні методи навчання з застосуванням
– розв’язання проблемних задач
– тестових завдань
– навчальних дискусій
– активізації самостійного вивчення студентами літератури
3. метод проблемного викладання з постановкою проблеми на початку нової теми
4. евристичний метод з самостійною або керованою викладачем роботою студентів при виконанні поточних завдань
5. дослідницький метод при самостійному вирішенні студентами завдань контрольних робіт.

8. Методи контролю

Сумарна кількість балів, яку студент отримує по закінчені вивчення дисципліни складається з кількості балів, отриманих по кожному з двох розділів та кількості балів, отриманих на підсумковому семестровому контролі – екзамені.
При оцінюванні кожного розділу враховуються робота студента на практичних заняттях (максимум 7 балів), самостійна робота (максимум 3 бали), та правильність виконання

завдань письмової контрольної роботи по закінченні кожного розділу (максимум 20 балів). Таким чином за кожний з двох розділів студент може отримати максимум 30 балів. Максимальна кількість балів за екзамен складає 40.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання в кожному з двох розділів:

1. Експрес-контроль (ваговий бал – 3) проводиться тричі в кожному розділі у формі усного опитування з метою перевірки якості самостійної роботи студента і освоєння лекційного матеріалу. Тривалість експрес-контролю 5-10 хвилин. Кожен експрес- контроль включає запитання, за правильну відповідь на яке студент отримує 1 бал. Відсутність студента на занятті або невиконання експрес-контролю приносить студенту 0 балів.

2. Контроль на практичних заняттях (ваговий бал – 7) проводиться з метою перевірки якості роботи студента на практичних заняттях в аудиторії. Студент отримує задачу, яку зобов'язаний розв'язати у дошки перед загальною аудиторією.

Критерії оцінювання:

 Повністю самостійно та правильно розв'язана задача оцінюється в 7 балів;

 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але присутні незначні грубі помилки в розрахунках, які виправив викладач, оцінюється в 6 балів;

 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але розрахунки виконані за допомогою викладача, оцінюється в 5 балів;

 Задача, при розв'язанні якої присутні незначні помилки в логіці розв'язанні, які виправив викладач, при правильних розрахунках оцінюється в 4 бали;

 Задача, при розв'язанні якої присутні незначні помилки в логіці розв'язанні, які виправив викладач, при помилках в розрахунках оцінюється в 3 бали;

 Задача, при розв'язанні якої присутні суттєві помилки в логіці розв'язання, які виправив викладач, оцінюється в 2 бали;

 Задача, при розв'язанні якої всю логіку розв'язання викладач наводить замість студента, оцінюється в 1 бал;

 Повна нездатність розв'язати задачу навіть з допомогою викладача оцінюється в 0 балів.

Якщо інший студент, що знаходиться в аудиторії розв'язує задачу самостійно, скоріше ніж хід розв'язання викладається на дошці, то він також отримує оцінку згідно з критеріями, що зазначені вище.

3. Модульний контроль (ваговий бал –- 20) проводиться у вигляді модульної контрольної роботи (МКР) тривалістю 2 академічні години. Кожна з МКР складається з

чотирьох задач, кожна з яких оцінюється в 5 балів.

Критерії оцінювання:

 Повністю правильно розв'язана задача оцінюється в 5 балів;

 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але присутні незначні грубі помилки в розрахунках, оцінюється в 4 балів;

 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але присутні грубі помилки в розрахунках, оцінюється в 3 бали;

 Задача, при розв'язанні якої присутні незначні помилки в логіці розв'язання оцінюється в 2 бали;

 Задача, при розв'язанні якої присутні суттєві помилки в логіці розв'язання оцінюється в 1 бал;

 Повністю неправильно виконане завдання, або відсутність студента на МКР оцінюється в 0 балів.

Якщо студент отримав оцінку менше 5 балів за МКР, то він може переписати цю роботу, але не більше двох разів.

Екзаменаційна робота (ваговий бал - 40). Необхідною умовою допуску студента до екзамену з дисципліни є позитивний рейтинг з усіх форм семестрової атестації, але не менше 10 балів.

Екзаменаційний білет містить одне теоретичне питання і одну задачу. Критерії оцінювання відповіді на теоретичне питання:
 Повністю розкрите теоретичне питання оцінюються в 20 балів
 Якщо питання висвітлювалося в повному об'ємі, але з незначними помилками – 16 балів.
 Якщо питання висвітлювалося в повному об'ємі, але з істотними помилками – 12 балів.
 Часткова відповідь на питання – 8 бали,
 Часткова відповідь на питання при наявності помилок – 4 бали,
 Відсутність відповіді – 0 балів.
Критерії оцінювання розв'язання екзаменаційної задачі:
 Повністю правильно розв'язана задача оцінюється в 20 балів;
 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але присутні незначні грубі помилки в розрахунках, оцінюється в 16 балів;
 Задача, при розв'язанні якої правильно обрана логіка, але присутні грубі помилки в розрахунках, оцінюється в 12 балів;
 Задача, при розв'язанні якої присутні незначні помилки в логіці розв'язання оцінюється в 8 бали;
 Задача, при розв'язанні якої присутні суттєві помилки в логіці розв'язання оцінюється в 4 бали;
Повністю неправильно виконане завдання оцінюється в 0 балів.

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, контрольні роботи				Екзаменаційна робота	Сума
Розділ 3	Розділ 4	Контрольна робота	Разом		
Т1-Т10	Т11-Т14				
30	20	10	60	40	100

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	для чотирирівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно
70-89	добре
50-69	задовільно
1-49	незадовільно

Нарахування балів при поточному контролі.

1(2) бал – робота в аудиторії
2(3) бали – виконання самостійної роботи

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Критерії оцінювання відповідей на контрольній роботі

Теоретичні питання (4 балів)
Наявність відповіді – 2 бал
Правильність відповіді – 2 бал
Відсутність помилок в розрахунках – 2 бал
Розв'язання задачі № 1 (4 балів)
Наявність відповіді – 2 бал
Коректність викладок, визначень – 1 бал
Правильність відповіді – 1 бал

Критерії оцінювання відповідей на підсумковій роботі

Питання 1 – теоретичне питання (5 балів)
Відсутність помилок в теоретичній частині – 2 бал
Коректність викладок – 1 бал
Послідовність викладок – 1 бал
Логічність викладок – 1 бал
Питання 2 дослідницька задача. (15 балів)
Наявність відповіді – 1 бал
Коректність викладок – 2 бал
Логічність викладок – 1 бал
Коректність визначень – 1 бал
Повнота відповіді – 1 бал
Правильність відповіді – 2 бал
Наявність графічного відображення – 2 бал
Знання цілей задачі – 1 бал
Відсутність помилок в розрахунках – 2 бал
Відсутність помилок в теоретичній частині – 2 бал
Питання 3 – дослідницька (15 балів)
Наявність відповіді – 1 бал
Коректність викладок – 2 бал
Логічність викладок – 1 бал
Коректність визначень – 1 бал
Повнота відповіді – 1 бал
Правильність відповіді – 2 бал
Наявність графічного відображення – 2 бал
Знання цілей задачі – 1 бал
Відсутність помилок в розрахунках – 2 бал
Відсутність помилок в теоретичній частині – 2 бал

10. Рекомендована література

Основна література

1. Eckert, Michael (2006). The Dawn of Fluid Dynamics: A Discipline Between Science and Technology. Wiley. p. ix. ISBN 3-527-40513-5.
2. Anderson, J. D. (2007). Fundamentals of Aerodynamics (4th ed.). London: McGraw–Hill. ISBN 978-0-07-125408-3.
3. Nangia, Nishant; Johansen, Hans; Patankar, Neelesh A.; Bhalla, Amneet Pal S. (2017). "A moving control volume approach to computing hydrodynamic forces and torques on

immersed bodies". Journal of Computational Physics. 347: 437–462. arXiv:1704.00239. Bibcode:2017JCoPh.347..437N. doi:10.1016/j.jcp.2017.06.047. S2CID 37560541.
4. White, F. M. (1974). Viscous Fluid Flow. New York: McGraw–Hill. ISBN 0-07-069710-8. 5. Wilson, DI (February 2018). "What is Rheology?". Eye. 32 (2): 179–183. doi:10.1038/eye.2017.267. PMC 5811736. PMID 29271417.
6. Platzer, B. (2006-12-01). "Book Review: Cebeci, T. and Cousteix, J., Modeling and Computation of Boundary-Layer Flows". ZAMM. 86 (12): 981–982. Bibcode:2006ZaMM...86..981P. doi:10.1002/zamm.200690053. ISSN 0044-2267. 7. Shengtai Li, Hui Li "Parallel AMR Code for Compressible MHD or HD Equations" (Los Alamos National Laboratory) [1] Archived 2016-03-03 at the Wayback Machine 8. "Transient state or unsteady state? -- CFD Online Discussion Forums". www.cfd-online.com. 9. Pope, Stephen B. (2000). Turbulent Flows. Cambridge University Press. ISBN 0-521-59886-9. 10. See, for example, Schlatter et al, Phys. Fluids 21, 051702 (2009); doi:10.1063/1.3139294 11. Landau, Lev Davidovich; Lifshitz, Evgenii Mikhailovich (1987). Fluid Mechanics. London: Pergamon. ISBN 0-08-033933-6.
12. Ortiz de Zarate, Jose M.; Sengers, Jan V. (2006). Hydrodynamic Fluctuations in Fluids and Fluid Mixtures. Amsterdam: Elsevier.
13. Landau, Lev Davidovich; Lifshitz, Evgenii Mikhailovich (1959). Fluid Mechanics. London: Pergamon.

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

1. Бібліотеки ХНУ ім. Каразіна та ІПМаш НАН України