



# ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА-1. КВАНТОВА МЕХАНІКА 1

## НЕРЕЛЯТИВІСТСЬКА КВАНТОВА МЕХАНІКА

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

<b>Рівень вищої освіти</b>	<b>Перший (бакалаврський)</b>
<b>Галузь знань</b>	10 Природничі науки
<b>Спеціальність</b>	104 Фізика та астрономія
<b>Освітня програма</b>	Комп'ютерне моделювання фізичних процесів
<b>Статус дисципліни</b>	Нормативна
<b>Форма навчання</b>	очна(денна)
<b>Рік підготовки, семестр</b>	3 курс, весняний семестр
<b>Обсяг дисципліни</b>	120 годин (36 годин – лекції, 36 годин – практичні)
<b>Семестровий контроль/ контрольні заходи</b>	Екзамен/МКР
<b>Розклад занять</b>	<a href="http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ScheduleGroupSelection.aspx">http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ScheduleGroupSelection.aspx</a>
<b>Мова викладання</b>	Українська
<b>Інформація про керівника курсу / викладачів</b>	Лектор: професор Бродин Олександр Михайлович, <a href="mailto:alex.brodin@gmail.com">alex.brodin@gmail.com</a> , моб. +38(097)368-19-18 Практичні: професор Бродин Олександр Михайлович, <a href="mailto:alex.brodin@gmail.com">alex.brodin@gmail.com</a> , моб. +38(097)368-19-18
<b>Розміщення курсу</b>	<a href="https://campus.kpi.ua">https://campus.kpi.ua</a>

## Програма навчальної дисципліни

### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

**Опис дисципліни.** Дисципліна квантова механіка відіграє роль фундаментальної фізико-математичної бази, без якої неможлива успішна діяльність фахівця з фізики. Під час навчання студенти отримають теоретичну підготовку в області фізики, набудуть навичок правильного розуміння меж застосування фізичних понять, законів та теорій, що дозволить у майбутньому орієнтуватись в потоці наукової і технічної інформації. На практичних заняттях навчатись розв'язувати практичні задачі, зокрема застосовувати математичний апарат для вирішення певних фізичних задач. На лабораторних заняттях студенти оволодіють навичками роботи з електричними приладами, апаратурою та вимірювальною технікою. Передбачено контроль якості отриманих знань у вигляді модульної контрольної роботи.

**Предмет навчальної дисципліни:** Нерелятивістська квантова механіка.

**Міждисциплінарні зв'язки.** Дисципліна Квантова механіка є невід'ємною складовою курсу теоретичної фізики для студентів фізичної спеціальності.

**Мета навчальної дисципліни.** Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей використовувати фундаментальні фізичні поняття, основні принципи і закони для опису стану мікроскопічних систем, оперувати фундаментальними фізичними поняттями та законами при вирішенні певних фізичних задач, оволодіти базовим матеріалом для подальшого вивчення дисциплін циклу професійно-практичної підготовки.

### Основні завдання навчальної дисципліни

#### Знання:

- змісту основних положень квантової механіки;
- основних характеристик стану квантових систем;
- основних підходів до опису стану в теорії зображень;
- основних рівнянь еволюції стану квантових систем;

#### Уміння:

- застосовувати закони квантової механіки для аналізу мікросистем;
- розраховувати стани квантових систем;
- виконувати необхідні розрахунки в професійній діяльності;

#### Досвід:

- розв'язання простих задач з квантової механіки;
- правильного використання загальнонаукової та спеціальної термінології;
- самостійного здобування знань, використовуючи традиційні і сучасні освітні та інформаційні технології;
- підходу до вирішення задач, що постають в процесі професійної діяльності, обираючи методи дослідження на основі наукового світогляду

### Програмні результати навчання

#### Компетентності:

ЗК1.Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК3.Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК4.Здатність бути критичним і самокритичним.

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

ФК9.Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК12. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень.

ФК15. Дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.

ФК18. Здатність захищати інтелектуальну власність, зокрема вміти патентувати корисні моделі та винаходи.

ПРН1. 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.

ПРН17. Вміти розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії

ПРН19. Вміти розповісти та пояснити місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки та технологій.

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Вивчення даного кредитного модуля базується на дисциплінах «Загальна фізика. Механіка», «Теоретична фізика. Класична механіка», «Математичний аналіз», «Основи векторного та тензорного аналізу», «Аналітична геометрія та лінійна алгебра», «Теорія функцій комплексних змінних», «Теоретична фізика. Теорія поля» «Диференціальні та інтегральні рівняння». Знання, отримані студентами з курсу квантової механіки, використовуються в курсах «Теоретична фізика. Квантова електродинаміка», «Фізика твердого тіла» та ін.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

#### Лекційні заняття

Розділ 1. Опис стану квантової системи

1.1. Постулати квантової механіки

1.2. Властивості  $\psi$ -функції

Розділ 2. Оператори фізичних величин

2.1. Принцип відповідності

2.2. Оператор довільної механічної величини

2.3. Середнє значення величини. Смысл середнього значення

2.4. Операторна алгебра операторів спостережуваних величин

Розділ 3. Хвильове рівняння. Рівняння Шрьодінгера

3.1. Рівняння Шрьодінгера для стаціонарних станів

3.2. Хвильове рівняння Шрьодінгера

Розділ 4. Теорія зображень

4.1. Р-, x-, E- зображення.

4.2. Оператори в р- зображенні та в E- зображенні

Розділ 5. Момент імпульсу

5.1 Орбітальний момент

5.2 Спін

Розділ 6. Квантова механіка одночастинкових систем

6.1 Трикутна потенціальна яма.

6.2 Рух в  $\delta$ - подібній потенціальній ямі.

6.3 Гармонічний осцилятор

6.4 Атом водню

Розділ 7. Тунелювання

7.1 Тунельна іонізація.

7.2 Елементарна теорія  $\alpha$ -розпаду.

#### Практичні заняття

1. Опис стану квантової системи. Постулати квантової механіки: про хвильову функцію, приклади хвильових функцій, густина (щільність) ймовірності, нормування хвильової функції. Властивості  $\psi$ -функції (стандартні умови).
2. Середнє значення імпульсу та координати. Координатне та імпульсне представлення  $\psi$ -функції. Оператори координати та імпульсу в цих представленнях
3. Оператори спостережуваних величин. Принцип відповідності. Оператор довільної механічної величини, її середнє значення. Смысл середнього значення.
4. Операторна алгебра операторів спостережуваних величин
5. Власні функції та власні значення операторів, їх смисл. Спектр власних значень оператора. Неперервний та дискретний спектри. Квантування. Роль стандартних умов.
6. Повна ортонормована система власних функцій (ортонормований базис). Представлення функції стану в базисі деякого ермітового оператора (розклад по базису).
7. Сумісні та несумісні величини.
8. Функціональний простір Гільберта.
9. Момент імпульсу

10. Момент імпульсу, продовження
11. Спін.
12. Спін, продовження.
13. Додавання моментів імпульсу.
14. Хвильове рівняння Шрьодінгера. Стационарні стани.
15. Густина потоку ймовірності.
16. Оператори породження та знищення квантів енергії, їх властивості.
17. Атом водню.
18. Квантово-механічне тунелювання.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### Базова література

1. І.О.Вакарчук. Квантова механіка. Львів: ЛДУ ім І.Франка, 1988.
2. О.С.Давидов. Квантова механіка. К.: Електронне видання, 2013.

##### Допоміжна література

3. David J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics (2nd Edition), Pearson Education, 2005.
4. П.А.Дирак. Принципы квантовой механики. М: Физматгиз. 1960.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. М: Физматгиз, 1963.
6. Д.И.Блохинцев. Основы квантовой механики. М.: Высшая школа, 1961

### Навчальний контент

#### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

##### Лекційні заняття (денна форма навчання)

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	<b>Лекція 1.</b> Історія становлення квантової механіки. Теплове випромінювання: закон Релея-Джінса, УФ катастрофа. Закон випромінювання Планка. Закони фотоэффекту, квантова теорія Айнштейна. Лінійчасті спектри, теорія Бора. Досліди Штерна-Герлаха. Гіпотеза де Бройля. Література: [1], Вступ.
2	<b>Лекція 2.</b> Корпускулярно-хвильовий дуалізм Корпускулярно-хвильовий дуалізм фотонів та матеріальних частинок, його математичне формулювання. Експериментальні свідчення. Література: [1], 1.2.
3	<b>Лекція 3.</b> Опис стану квантової системи. Постулати квантової механіки: про хвильову функцію, приклади хвильових функцій, густина (щільність) ймовірності, нормування хвильової функції. Властивості $\psi$ -функції (стандартні умови). Література: [1], 1.1 – 1.3.
4	<b>Лекція 4.</b> Середні значення. Середнє значення імпульсу та координати. Координатне та імпульсне представлення $\psi$ -функції. Оператори координати та імпульсу в цих представленнях. Література: [1], 1.6 – 1.7.

5	<p><b>Лекція 5.</b> Оператори спостережуваних величин. Принцип відповідності. Оператор довільної механічної величини <math>f(\mathbf{r}, \mathbf{p})</math>, її середнє значення. Смысл середнього значення. Література: [1], 1.8.</p>
6	<p><b>Лекція 6.</b> Операторна алгебра. Операторна алгебра операторів спостережуваних величин. Транспоновані, ермітово-спряжені оператори. Лінійність, ермітовість (<math>\Leftrightarrow</math> дійсність спостережуваних величин). Комутатор двох операторів. Література: [1], 2.8.</p>
7	<p><b>Лекція 7.</b> Власні функції та власні значення операторів, їх смисл. Спектр власних значень оператора. Неперервний та дискретний спектр. Квантування. Роль стандартних умов. Література: [1], 2.8 – 2.9.</p>
8	<p><b>Лекція 8.</b> Ортогональність власних. Повна ортонормована система власних функцій (ортонормований базис). Представлення функції стану в базисі деякого ермітового оператора (розклад по базису). Література: [1], 2.10, 2.12.</p>
9	<p><b>Лекція 9.</b> Власні функції та власні значення операторів, їх смисл. Спектр власних значень оператора. Неперервний та дискретний спектри. Квантування. Роль стандартних умов. Література: [1], 2.8 – 2.9.</p>
10	<p><b>Лекція 10.</b> Сумісні та несумісні величини. Спільна система власних функцій для сумісних величин, комутатор їх операторів. Принцип невизначеності. Література: [1], 2.10.</p>
11	<p><b>Лекція 11.</b> Функціональний простір Гільберта. Розклад функції стану по базису. Внутрішній добуток. Визначення операторів через матрицю по відношенню до деякого базису. Матричні елементи. Бра-кет (bra-ket) нотація Дірака. Література: [1], 2.12 – 2.13.</p>
12	<p><b>Лекція 12.</b> Момент імпульсу. Оператори <math>\hat{L}^2, \hat{L}_x, \hat{L}, \hat{L}_\pm</math> їх властивості. Аналітичний підхід: власні функції, сферичні гармоніки. Література: [1], 6.33 – 6.35.</p>
13	<p><b>Лекція 13.</b> Спін Література: [1], 6.36.</p>
14	<p><b>Лекція 14.</b> Оператор Гамільтона. Хвильове рівняння Шрьодінгера. Стаціонарні стани. Література: [1], 3.16 – 3.20.</p>

15	<p><b>Лекція 15.</b> Рух в потенціальній ямі.  Рух в одновимірній прямокутній нескінченно глибокій потенціальній ямі.  Трикутна потенціальна яма. Рух в <math>\delta</math>- подібній потенціальній ямі.  Література: [1], 4.21.</p>
16	<p><b>Лекція 16.</b> Гармонічний осцилятор.  Аналіз з допомогою операторної алгебри. Аналітичні розв'язки для хвильових функцій.  Література: [1], 4.22 – 4.23.</p>
17	<p><b>Лекція 17.</b> Атом водню.  Квантово-механічна модель (нехтуючи спіном).  Література: [1], 7.42.</p>
18	<p><b>Лекція 18.</b> Тунелювання.  Тунельна іонізація. Елементарна теорія <math>\alpha</math>-розпаду.  Література: [1], 4.26 – 4.28.</p>

## Практичні заняття

№ з/п	Назва практичного заняття	Кількість ауд. годин
1	Опис стану квантової системи. Постулати квантової механіки: про хвильову функцію, приклади хвильових функцій, густина (щільність) ймовірності, нормування хвильової функції. Властивості у-функції (стандартні умови).	2
2	Середнє значення імпульсу та координати. Координатне та імпульсне представлення у-функції. Оператори координати та імпульсу в цих представленнях	2
3	Оператори спостережуваних величин. Принцип відповідності. Оператор довільної механічної величини, її середнє значення. Смысл середнього значення. Операторна алгебра операторів спостережуваних величин	2
4	Операторна алгебра операторів спостережуваних величин	2
5	Власні функції та власні значення операторів, їх смисл. Спектр власних значень оператора. Неперервний та дискретний спектр. Квантування. Роль стандартних умов.	2
6	Повна ортонормована система власних функцій (ортонормований базис). Представлення функції стану в базисі деякого ермітового оператора (розклад по базису).	2
7	Сумісні та несумісні величини.	2
8	Функціональний простір Гільберта.	2
9	Момент імпульсу	2
10	Момент імпульсу, продовження	2
11	Спін.	2
12	Спін, продовження.	2
13	Додавання моментів імпульсу.	2
14	Хвильове рівняння Шрьодінгера. Стаціонарні стани.	2
15	Густина потоку ймовірності.	2
16	Оператори породження та знищення квантів енергії, їх властивості.	2
17	Атом водню.	2
18	Квантово-механічне тунелювання.	2



## 6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студента є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	26
2	Підготовка до МКР	6
3	Підготовка до екзамену	20

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які ставляться перед студентом:

- відвідування лекційних та практичних занять є обов'язковою складовою вивчення матеріалу;
- на лекції викладач користується власним презентаційним матеріалом; використовує зум та гугл-міт для викладання матеріалу лекційних, практичних та лабораторних занять, розв'язки практичних завдань та модульних контрольних робіт завантажуються студентами в гугл-клас;
- питання на лекції задаються у відведений для цього час;
- для захисту практичної або розрахункової роботи необхідно розв'язати відповідні задачі, завантажити розв'язок в гугл-клас та відповісти на запитання;
- модульні контрольні роботи пишуться без застосування допоміжних засобів (мобільні телефони, планшети та ін.); результат завантажується до гугл-класу;
- заохочувальні бали виставляються за: активну роботу на практичних заняттях; участь у факультетських та інститутських олімпіадах з фізики, участь в університетських конференціях з доповіддю, яка стосується сучасних досягнень з фізики у технологічному світі. Кількість заохочуваних балів не більше 10.

### 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Рейтинг студента денної форми навчання складається з балів, що він отримує за:

- 1) виконання домашніх завдань;
- 2) 4 експрес-контролі;
- 3) модульну контрольну роботу;

#### Система рейтингових балів та критерії оцінювання

##### Виконання домашніх завдань:

Протягом семестру випадковим чином перевіряється 2 виконаних домашніх завдання. Максимальна оцінка за одне виконане домашнє завдання – 10 балів.

### **Експрес-контролі:**

Протягом семестру на практичних заняттях проводяться експрес-контролі (5 хвилин), в яких міститься одне коротке завдання за змістом поточного матеріалу.

Повна правильна відповідь – 5 балів.

Неповна відповідь або відповідь з незначними помилками – 3-4 бали.

Відповідь з грубими помилками – 1-2 бали.

Відсутність відповіді – 0 балів.

Про проведення експрес-контролю викладач повідомляє заздалегідь. Кількість проведених експрес-контролів – 4. Таким чином максимально студент може набрати протягом семестру 20 балів.

Крім того, проявляючи активність на практичних заняттях у вигляді численних вірних відповідей з місця або численних добрих відповідей при розв'язуванні задач біля дошки, студент може набрати до 6 заохочувальних балів.

### **Модульна контрольна робота:**

Модульна контрольна робота складається з 3-х задач, кожна з яких оцінюється у 20 балів. За модульну контрольну студент максимально може отримати 60 балів. Мінімальна кількість балів, за умови якої контрольна вважається зданою – 36. Бали за виконання завдань нараховуються таким чином:

- повністю правильний розв'язок задачі (правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання, чіткий схематичний рисунок з позначенням напрямків векторних величин, якщо потрібно, правильний фізичний розв'язок задачі, розрахунок невідомої величини без помилок, записані одиниці вимірювання для всіх фізичних величин) – 20 балів;
- розв'язок задачі виконаний з помилками на рівні математичного обчислення невідомої величини та помилкового вживання розмірності – 16-18 балів;
- розв'язок задачі виконаний частково: основні формули і закони записані вірно, але помилки виникли у перетворенні формул і через це фізичний розв'язок вийшов невірний – 12-14 балів;
- розв'язку задачі немає, але записані основні формули і закони, які потрібні для нього – 8-10 балів;
- розв'язку задачі немає, фізичні формули відсутні, але виконано правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання, а також зроблено чіткий схематичний рисунок з позначенням напрямків векторних величин – 6 балів;
- розв'язку задачі немає, фізичні формули та схематичний рисунок відсутні, але виконано правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання – 2-4 бали;

відсутність будь-яких записів щодо завдання та розв'язку чи помилки у записі заданих величин – 0 балів.

### **Міжсесійна атестація**

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів максимально можлива кількість балів – 20 балів (2 експрес-контролі, 1 перевірене домашнє завдання). На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менший ніж 10 балів (у разі якщо студент ще не здавав домашнє завдання на перевірку, то не менше ніж 5 балів).

За результатами 13 тижнів навчання максимально можлива кількість балів – 80 балів (2 експрес-контролі, МКР, одне перевірене домашнє завдання у всіх студентів). На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менший ніж 40 балів.

Максимальна сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:

$$RD = 4 * r_{\text{експ.к.}} + 2 * r_{\text{д.з.}} + 1 * r_{\text{МКР}} = 4 * 5 + 2 * 10 + 1 * 60 = 100,$$

де  $r_{\text{експ.к.}}$  – бал за експрес-контроль (0...5);

$r_{\text{д.з.}}$  – бал за виконане домашнє завдання (0...10);

$r_{\text{МКР}}$  – бал за написання МКР (0...60);

Додатково до рейтингу додаються заохочувальні бали у разі їх отримання.

Умова допуску до екзамену: не менше 30 балів.

На екзамені студенти готують короткі письмові розрахунки та дають усну відповідь. Кожне завдання містить два теоретичних запитання. Кожне запитання в білеті оцінюється у 20 балів за такими критеріями:

- «відмінно», повна відповідь, не менше 90% потрібної інформації (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 20-17 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації або незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 16-13 балів;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 12-8 балів;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «задовільно» – 0 балів.

Для об'єктивної оцінки знань студента викладач має право ставити додаткові питання з програми курсу, які не містяться в білеті.

Для визначення сумарних балів за семестр семестровий рейтинг (максимально 100 балів) множиться на 0.6 та до результату додаються екзаменаційні бали. Результат переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з наступною таблицею.

**Таблиця 1 — Переведення рейтингових балів до оцінок за університетською шкалою**

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

## **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

### **Робочу програму навчальної дисципліни (Силабус):**

Складено професор Бродин Олександр Михайлович

Ухвалено кафедрою загальної фізики ФМФ (протокол засідання кафедри № 6 від 06.06.2023 р.).

Погоджено Методичною комісією фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2023 р.)