

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МАГНЕТИЗМУ ІМЕНІ В.Г. БАР'ЯХТАРА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
(ІМАГ НАН УКРАЇНИ)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІМаг НАН України

член-кор НАН України

Олександр ТОВСТОЛИТКІН
«13 лютого 2025 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)

В1 ВИБРАНІ РОЗДІЛИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 104 Фізика та астрономія

третього освітнього (освітньо-
наукового) рівня вищої освіти – доктора
філософії

Розробник:

старший науковий співробітник _____ Ігор ГЕРАСИМЧУК
(підпис)

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол від 28.06.2023р. № 1

Голова науково-методичної ради _____ Ольга САЛЮК
(підпис)

Робочу програму затверджено Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України

Протокол від 29 червня 2023 № 6-23

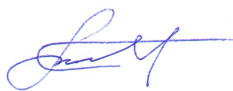
Голова Вченої ради _____ Олександр ТОВСТОЛИТКІН
(підпис)

Робочу програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником освітньої програми): Фізика 30 червня 2023 р.

(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми _____ Юрій ДЖЕЖЕРЯ
(підпис)

Пролонговано Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІМаг НАН України та МОН України	підпис	№ протоколу, дата протоколу
<u>2024</u> / <u>2025</u>	Товстолиткін О.І.		№5-24, 13.06.2024
20__ / 20__			
20__ / 20__			
20__ / 20__			

ВИБРАНІ РОЗДІЛИ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітня програма	Фізика
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	3 кредити: 90 годин (денна: 36 годин – лекції, 54 години – СРС)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Залік/МКР
Розклад занять	http://ukr.imag.kiev.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доктор фіз.-мат. наук, старший наук. співроб. Герасимчук Ігор Вікторович, E-mail: igor.gera@gmail.com
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс: http://ukr.imag.kiev.ua , група в Telegram

Програма навчальної дисципліни

Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Опис дисципліни. Програму навчальної дисципліни «Вибрані розділи квантової механіки» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика» підготовки доктора філософії спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Вивчення цілісного курсу Теоретичної фізики сприяє формуванню в аспірантів наукового світогляду і сучасного природничого мислення, а викладання Вибраних розділів квантової механіки враховує фахову орієнтацію майбутнього науковця. В результаті вивчення дисципліни «Вибрані розділи квантової механіки» аспірант повинен знати основні поняття квантової механіки, актуальні напрями її сучасного розвитку, основні математичні методи та моделі, які застосовуються при дослідженні проблем квантової механіки; вміти орієнтуватися в сучасних тенденціях розвитку квантової механіки,

перспективах практичного застосування сучасних розробок, встановлення взаємозв'язків між різними галузями. Дисципліна дає загальні уявлення про сучасні квантово-механічні підходи і методи до вивчення фізичних об'єктів. Передбачено контроль якості отриманих знань у вигляді опитувань на лекціях, тестових завдань та модульної контрольної роботи.

Мета навчальної дисципліни. Метою навчальної дисципліни є розширення та поглиблення об'єму знань з Квантової механіки та вдосконалення теоретичного апарату і методик розв'язання задач з квантової механіки у аспірантів, а також підготовка майбутнього науковця-фахівця, який буде здатний коректно проводити теоретичну інтерпретацію одержаних експериментальних результатів на основі апарату квантової механіки.

Предмет навчальної дисципліни: методи та моделі, що застосовуються у квантовій механіці.

Програмні результати навчання:

Компетентності:

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність)

СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

Результати навчання:

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

РН04. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп'ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

РН05. Розробляти моделі процесів і систем у фізиці та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямках, використовувати їх у науково-дослідницькій діяльності для отримання нових знань та/або створення розробок та інноваційних продуктів.

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

Пререквізити. Дисципліна «Вибрані розділи квантової механіки» базується на навичках, отриманих студентами при вивченні таких дисциплін як «Математичний аналіз», «Диференціальні та інтегральні рівняння», «Лінійна алгебра», «Теорія функцій комплексного змінного», всі розділи дисципліни «Методи математичної фізики», «Механіка», «Електрика

та магнетизм», «Оптика», «Класична механіка», «Теорія поля» і «Атомна фізика».

Постреквізити. Навчальна дисципліна «Вибрані розділи квантової механіки» є однією з основ формування наукової складової структурно-логічної схеми освітньої програми. Компетентності, знання, уміння та досвід, отримані в процесі вивчення дисципліни «Вибрані розділи квантової механіки», є необхідними для якісного ґрунтовного виконання наукових досліджень за темою дисертації.

Зміст навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин		
	Всього	У тому числі	
		Лекції	СР
Розділ 1. Загальні принципи квантової механіки			
Тема 1.1. Основні поняття теорії лінійних операторів. Добуток операторів, комутатор операторів, одиничний оператор, обернений оператор, ермітові оператори, унітарні оператори. Зв'язок операторів з фізичними величинами. Квантові дужки Пуассона. Оператор Гамільтона. Рівняння Шрьодінгера.	5	2	3
Тема 1.2. Теорія представлень. Матрична форма квантової механіки. Вектор стану як вектор в гільбертовому просторі. Кет- та бра-вектори. Представлення Шрьодінгера, Гайзенберга та взаємодії.	5	2	3
Разом по розділу 1	10	4	6
Розділ 2. Наближені методи розв'язку рівняння Шрьодінгера			
Тема 2.1. Метод квазікласичного наближення. Квазікласичний розклад рівняння Шрьодінгера. Хвильова функція в квазікласичному наближенні.	5	2	3
Тема 2.2. Умови допустимості квазікласичного наближення. Умови квантування Бора-Зоммерфельда.	5	2	3
Тема 2.3. Теорія збурень. Випадок дискретного спектру без виродження. Теорія збурень для двох або більше близьких рівнів. Адіабатична теорія збурень. Варіаційний метод Рітца.	5	2	3
Разом по розділу 2	15	6	9
Розділ 3. Електрон у зовнішньому електромагнітному полі			
Тема 3.1. Рівняння Паулі. Калібровочна інваріантність. Квантова частинка в однорідному магнітному полі.	5	2	3
Тема 3.2. Ефект Штарка. Магнітна сприйливість. Ефект Штарка для атома водню. Ефект Штарка у другому порядку теорії збурень.	5	2	3
Разом по розділу 3	10	4	6
Розділ 4. Теорія квантових переходів			
Тема 4.1. Нестационарна теорія збурень. Розрахунок ймовірності переходу. Переходи під дією збурення, яке	5	2	3

змінюється по гармонічному закону. Ймовірність електромагнітних переходів частинки без спіну.			
<i>Тема 4.2.</i> Вимушене і спонтанне випромінювання світла. Правила відбору для дипольних переходів. Квадрупольні та магнітні переходи. Час життя збудженого стану.	5	2	3
Разом по розділу 4	10	4	6
Розділ 5. Системи багатьох частинок			
<i>Тема 5.1.</i> Тотожність частинок у квантовій механіці. Принцип Паулі. Схеми Юнга.	5	2	3
<i>Тема 5.2.</i> Метод вторинного квантування. Оператори народження та знищення бозонів. Оператор числа частинок. Вектор стану. Оператори фізичних величин. Вторинне квантування для ферміонів. Гармонічний осцилятор.	6	2	4
<i>Тема 5.3.</i> Метод Хартрі-Фока. Поняття самоузгодженого поля. Метод Хартрі. Врахування принципу Паулі.	6	2	4
Разом по розділу 5	17	6	11
Розділ 6. Квантова теорія розсіювання			
<i>Тема 6.1.</i> Пружне розсіювання частинок без спіну. Функція Гріна для вільної частинки. Амплітуда розсіювання і диференціальний перетин пружного розсіювання частинок. Розрахунок амплітуди розсіювання по теорії збурень.	6	2	4
<i>Тема 6.2.</i> Наближені методи. Борнівське наближення. Метод парціальних хвиль. Оптична теорема. Принцип тотожності частинок в задачі розсіювання.	6	2	4
Разом по розділу 6	12	4	8
Розділ 7. Релятивістська квантова механіка			
<i>Тема 7.1.</i> Рівняння для частинки із спіном 0. Рівняння Клейна-Гордона-Фока. Релятивістсько-інваріантний запис рівняння Клейна-Гордона-Фока. Плоско-хвильові розв'язки рівняння.	6	2	4
<i>Тема 7.2.</i> Рівняння для частинки із спіном 1/2 (рівняння Дірака). Обґрунтування рівняння. Рівняння неперервності. Коваріантні структури в теорії Дірака. Розв'язок для вільної діраківської частинки. Нерелятивістське наближення для рівняння Дірака. Інтерпретація розв'язків з від'ємною енергією. Відкриття позитрона.	6	2	4
Разом по розділу 7	12	4	8
<i>Модульна контрольна робота</i>	2	2	
<i>Залік</i>	2	2	
Всього годин	90	36	54

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Давидов О.С., Квантова механіка, К.: Академперіодика, 2012, 706 с.
2. Вакарчук І.О., Квантова механіка, 4-е вид., доп., Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012, 872 с.
3. Landau L.D., Lifshitz E.M., Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory, Vol. 3 (3rd ed.), Butterworth-Heinemann, 1981, 689 p.
4. Кобушкін О.П., Квантова механіка, Київ: НТУУ «КПІ», 2016, 263 с.
5. Федорченко А.М., Теоретична фізика. У 2-х т. Т.2. Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика, К.: Вища школа, 1993, 415 с.

Додаткова література

6. Блажиевський Л.Ф., Операторні методи квантової теорії: Текст лекцій, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 1993, 64 с.
7. Боголюбов М.М., Лекції з квантової статистики. Питання статистичної механіки квантових систем, Київ: Рад. школа, 1949, 228 с.
8. Ферми Э., Квантовая механика, М.: Мир, 1965.
9. Блохинцев И., Основы квантовой механики, М.: Высшая школа, 1963.
10. Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д., Релятивистская квантовая теория. Т.1, М.: Наука, 1978.
11. Елютин П.Е., Кривченко В.Д., Квантовая механика с задачами, М.: Физматлит, 2001.
12. Стасюк І.В., Функції Гріна у квантовій статистиці твердих тіл, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2013, 392 с.
13. Абрикосов А.А., Основы теории металлов, М.: Наука, 1987.

Навчальний контент

Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СР)
1	Основні поняття теорії лінійних операторів. Добуток операторів, комутатор операторів, одиничний оператор, обернений оператор, ермітові оператори, унітарні оператори. Зв'язок операторів з фізичними величинами. Квантові дужки Пуассона. Оператор Гамільтона. Рівняння Шрьодінгера. [1–4]
2	Метод квазікласичного наближення. Квазікласичний розклад рівняння Шрьодінгера. Хвильова функція в квазікласичному наближенні. [1–4]
3	Метод квазікласичного наближення (продовження). Умови допустимості квазікласичного наближення. Умови квантування Бора-Зоммерфельда. [1–4]
4	Теорія представлень. Матрична форма квантової механіки. Вектор стану як вектор в гільбертовому просторі. Кет- та бра-вектори. Представлення Шрьодінгера, Гайзенберга та взаємодії. [1–4]
5	Оператор моменту кількості руху в матричному представленні. Знаходження матричних елементів компонент оператора моменту кількості руху. Матричні елементи компонент моменту $j=1/2$. Матриці Паулі. Властивості спінорів. [1–4]
6	Квантова частинка в центральному полі. Радіальне рівняння Шрьодінгера. Знаходження енергетичних рівнів і хвильових функцій атома водню. Густина розподілу електронної «хмари» в атомі водню. [1–4]
7	Наближені методи розв'язання стаціонарного рівняння Шрьодінгера. Теорія збурень,

	випадок дискретного спектру без виродження. Теорія збурень для двох або більше близьких рівнів. [1–4]
8	Наближені методи розв’язання стаціонарного рівняння Шрьодінгера (продовження). Адіабатична теорія збурень. Варіаційний метод Рітца. [1–4]
9	Електрон у зовнішньому електромагнітному полі. Рівняння Паулі. Калібровочна інваріантність. Квантова частинка в однорідному магнітному полі. Ефект Штарка для атома водню. [1–4]
10	Нестационарна теорія збурень. Розрахунок ймовірності переходу. Переходи під дією збурення, яке змінюється по гармонічному закону. Ймовірність електромагнітних переходів частинки без спіну. [1–4]
11	Системи багатьох частинок. Тотожність частинок у квантовій механіці. Принцип Паулі. Схеми Юнга. [1–4]
12	Системи багатьох частинок (продовження). Розрахунок енергії атома з багатьма електронами методом Хартрі-Фока. Самоузгоджене поле. Метод Хартрі. Врахування принципу Паулі. [1–4]
13	Метод вторинного квантування. Метод вторинного квантування для тотожних бозонів. Оператори народження, знищення та числа частинок. Оператор числа частинок. Вектор стану. Оператори фізичних величин. Вторинне квантування для ферміонів. [1–4]
14	Квантова теорія розсіяння. Функція Гріна для вільної частинки. Амплітуда розсіяння і диференціальний перетин пружного розсіяння частинок. Розрахунок амплітуди розсіяння по теорії збурень. [1–4]
15	Квантова теорія розсіяння (продовження). Борнівське наближення. Метод парціальних хвиль. Оптична теорема. Принцип тотожності частинок в задачі розсіяння. [1–4]
16	Основи релятивістської квантової механіки. Рівняння Клейна-Гордона-Фока. Релятивістсько-інваріантний запис рівняння Клейна-Гордона-Фока. Плоско-хвильові розв’язки рівняння. [1–4]
17	Основи релятивістської квантової механіки (продовження). Рівняння Дірака. Обґрунтування рівняння. Рівняння неперервності. Коваріантні структури в теорії Дірака. Розв’язок для вільної діраківської частинки. [1–4]
18	Основи релятивістської квантової механіки (продовження). Нерелятивістське наближення для рівняння Дірака. Інтерпретація розв’язків з від’ємною енергією. Відкриття позитрона. [1–4]

Самостійна робота аспіранта

З метою чіткої організації самостійної роботи аспірантів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки конспектів та рефератів із вибраних тем. Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Обсяг СР, годин
1	Підготовка до аудиторних занять	17
2	Підготовка до МКР	17

3	Підготовка до заліку	20
Загалом		54

Політика та контроль

Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Рекомендовані методи навчання: вивчення основної та допоміжної літератури за тематикою лекцій, розв'язування стандартних і проблемних задач під час самостійної роботи та при виконанні домашніх завдань. Важливим аспектом якісного засвоєння матеріалу, опрацювання методів та алгоритмів розв'язування завдань дисципліни є самостійна робота. Вона включає опрацювання літератури, огляд літератури за темою, підготовку до занять, до МКР і до заліку.

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- *правила відвідування занять*: згідно розкладу і згідно загально-інститутського розпорядку. Присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті не оцінюються. Відповідно до РСО даної дисципліни (підрозділ 8 силабусу) заохочувальні бали нараховуються за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях;
- *правила поведінки на заняттях*: студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача та в інтернеті здійснюється за умови вказівки викладача;
- *правила призначення заохочувальних та штрафних балів*: студент має можливість отримувати заохочувальні бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені РСО дисципліни;
- *політика дедлайнів та перескладань*: згідно загально-інститутського розпорядку; якщо аспірант не з'явився на МКР без поважної причини, його результат оцінюється у 0 балів;
- *політика щодо академічної доброчесності*;
- *інші вимоги*, що не суперечать законодавству України та нормативним документам Інституту магнетизму.

Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Поточний контроль: опитування за темою заняття та за результатами самостійної роботи, модульна контрольна робота (МКР).

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: залік.

Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система та інститутська шкала.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

На першому занятті аспіранти ознайомлюються із рейтинговою системою оцінювання (РСО) дисципліни.

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на аудиторних заняттях – максимум **28 балів**;

2) за модульну контрольну роботу (МКР) – максимум **32 бали**;

3) за відповіді на заліку – максимум **40 балів**.

Система рейтингових (вагових) балів та критеріїв оцінювання:

1) *Аудиторні заняття*. Ваговий коефіцієнт дорівнює 1. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на аудиторних заняттях, становить $18 \times 1 = 18$ **балів**. Нарахування балів на одному аудиторному занятті за опитування за темою заняття та за результатами самостійної роботи:

- відмінні відповіді – 1 бал;
- добрі відповіді – 0,7–0,9 бали;
- задовільні відповіді – 0,2–0,6 бали.

Також, за активність на аудиторних заняттях і наявний конспект лекцій можна отримати максимум **10 балів**.

2) *Модульна контрольна робота (МКР)*. Ваговий коефіцієнт дорівнює 32. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить $1 \times 32 = 32$ **бали**. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 30–32 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації або незначні неточності) – 23–29 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 16–22 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) – 0 балів.

3) *Залік*. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюється у 20 балів. Максимальна кількість балів за залік становить $2 \times 20 = 40$ **балів**. Нарахування балів за відповіді на заліку:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 36–40 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації або незначні неточності) – 28–35 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 20–27 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) – 0 балів.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів, він може отримати залік автоматом.

Для виставлення фінальних оцінок рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці:

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за інститутською шкалою

<i>Кількість балів</i>	<i>Оцінка</i>
90–100	Відмінно
75–89	Добре
60–74	Задовільно
Менше 60	Незадовільно
Не виконано умови допуску	Не допущено

Робочу програму навчальної дисципліни (Силабус):

Складено доктором фіз.-мат. наук, старшим науковим співробітником Герасимчуком Ігорем Вікторовичем