МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука

Затверджено

На засіданні кафедри теоретичної фізики
Імені професора Івана Вакарчука
фізичного факультету
Львівського національного університету
імені Івана Франка
(протокол № 1 від 31.08.22 р.)

Завідувач кафедри проф. В. М. Ткачук

Силабус
з навчальної дисципліни «Квантова механіка»,
що викладається в межах
ОПП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія

Львів 2022

Назва дисципліни	Квантова механіка
Адреса викладання курсу	вул. Драгоманова, 12, 79005, Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	Фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань – 10 Природничі науки Спеціальність – 104 Фізика та астрономія
Викладачі курсу	Лектор: завідувач кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука д.фіз.-мат. н., проф. Ткачук Володимир Михайлович
Контактна інформація викладачів	volodymyr.tkachuk@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/tkachuk-volodymyr-myhajlovych
Консультації по курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams.
Сторінка курсу	
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Квантові механіка» є нормативною навчальною дисципліною, яка розрахована студентів III курсу (бакалавр), що навчаються за спеціальністю – 104 Фізика та астрономія. Її викладають у V та VI семестрах загальним обсягом 9 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	В курсі представлені основи квантової механіки. Також робочою програмою курсу передбачено практичні заняття, які включають всі основні розділи квантової механіки. Курс охоплює такі теми: основні принципи квантової механіки, математичний апарат квантової механіки, рівняння Шредінґера, найпростіші задачі квантової механіки, зв'язок квантової механіки з класичною, момент кількості руху, рух частинки в центральносиметричному полі, теорія збурень, взаємодія атома з електромаґнітним полем, релятивістська квантова механіка, квантова механіка системи багатьох частинок, теорія розсіяння.
Мета та цілі дисципліни	Метою цієї дисципліни є формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із мікросвітом. Ціллю курсу є оволодіння навичок опису та розрахунку властивостей квантових систем.
Література для вивчення дисципліни	**Базова** 1. *Вакарчук І. О.* Квантова механіка. Львів, 2012. 2. *Глауберман А. Ю*. Квантова механіка. Львів, 1962. 3. *Юхновський І. Р.* Квантова механіка. Київ, 1995. 4. *Вакарчук І. О., Кулій Т. В.,Книгініцький О. В., Ткачук В. М.* Збірник задач з квантової механіки. Львів, 1996. **Допоміжна** 5. *Ткачук В. М.* Фундаментальні проблеми квантової механіки. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 6. *Понеділок Г. В*. Основи квантової фізики. Львів, 2009. **Інформаційні ресурси** Wikipedia: http://www.wikipedia.org
Тривалість курсу	два семестри

Обсяг курсу	270 годин, з яких 160 годин аудиторних занять, з них 64 год лекційних занять, 96 год практичних занять та 110 год самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	Після завершення цього курсу студент буде : - **знати** основні поняття та рівняння предмету викладені у програмі курсу. - **вміти** застосовувати знання квантової механіки для розв'язування задач квантової механіки, володіти апаратом квантової механіки та розв'язувати відповідні рівняння. Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК): *Загальні компетентності:* **К01.** Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу. **К06.** Навички міжособистісної взаємодії. *Спеціальні компетентності:* **К16.** Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії. **К18.** Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів. **К21.** Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси. **К24.** Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації. **К25.** Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей. **К26.** Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю. **К27.** Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень. **К29.** Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту. Програмні результати навчання (ПРН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу: **ПР01.** Знати, розуміти та вміти застосовувати 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. **ПР03.** Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. **ПР04.** 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. **ПР05.** Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії. **ПР06.** Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвито сучасної фізики та астрономії. **ПР08.** 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. **ПР11**. Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки. **ПР12.** Вміти представляти одержані наукові результати, брати участь у дискусіях стосовно змісту і результатів власного наукового дослідження. **ПР16.** Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів. **ПР25.** Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку.
Ключові слова	квантова механіка, оператор, комутатор, ермітовий оператор, рівняння Шредінґера, рівняння Дірака, теорія збурень, імовірність квантових переходів.
Формат курсу	очний
	проведення лекцій, практичних занять та консультацій для кращого розуміння тем
Теми	наведено у табл.1
Підсумковий контроль, форма	Іспит у кінці VI семестру. Форма: Письмово-усний
Пререквізити	Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких розділів математики і фізики: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, атомна фізика.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	*а) словесні* – лекція, пояснення, бесіда; б) *наочні* – ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками; в) *практичні* – виконання практичних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань, перевірки певних наукових гіпотез на рівні досліджень, узагальнень та аналізу та формування вмінь і навичок інтерпретації результатів досліджень різноманітних об'єктів.
Необхідне обладнання	персональний комп'ютер, доступ до Інтернету
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням: • робота на практичних заняттях тощо: 10% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 10 • контрольні заміри (модулі): 40% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 40

	• іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 50 Підсумкова максимальна кількість балів 100. **Письмові роботи:** Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (тестування, письмова частина іспиту). **Академічна доброчесність** здобувачами вищої освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій чи усній роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів обману. **Відвідання занять** є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і практичні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків, визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом. **Література.** Усю література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих. **Політика виставлення балів.** Враховуються бали, набрані на практичних та поточному тестуванні. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнень на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін. Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.
Питання до іспиту	1. Опис стану в квантовій механіці. Хвильова функція. 2. Принцип суперпозиції. 3. Хвильовий пакет. 4. Хвильова функція вільної частинки. Властивості плоских хвиль. 5. Середні значення координати та імпульсу. Оператор імпульсу. Координатне та імпульсне представлення. 6. Оператори фізичних величин. Дії над операторами. Приклади операторів фізичних величин. 7. Власні функції і власні значення операторів. 8. Властивості власних значень і власних функцій ермітових операторів. 9. Співвідношення невизначеностей для фізичних величин, що представляються некомутуючими операторами. 10. Різні представлення хвильових функцій. бра- і кет-вектори. 11. Різні представлення операторів. Матриці операторів. 12. Хвильове рівняння Шредінґера. 13. Оператор еволюції. Унітарні оператори. 14. Приклад квантових ґейтів як унітарних операторів. 15. Рівняння неперервності. Закон збереження густини ймовірності.

	16. Зміна середніх значень фізичних величин з часом. Квантові дужки Пуасона. 17. Стаціонарні стани. 18. Представлення Шредінґера і представлення Гайзенберґа. Представлення взаємодії. 19. Частинка в потенціальній ямі з безмежно високими стінками. 20. Гармонічний осцилятор. Хвильовий та матричний підходи. Оператори народження і знищення. 21. Проходження частинки через потенціальний бар'єр. 22. Оператор повороту і орбітальний момент кількості руху. 23. Власні значення і власні функції операторів квадрата та проекцій моменту кількості руху. 24. Власні функції операторів квадрата та проекцій орбітального моменту кількості руху. 25. Оператор моменту кількості руху для $j = 1/2$. 26. Властивості матриць Паулі. 27. Квантовий біт. Двовимірна квантова система. 28. Представлення квантового біта на сфері Блоха. 29. Зведення задачі двох тіл до задачі одного тіла у квантовій механіці. 30. Рух в полі центральної сили. Радіальне рівняння Шредінґера. 31. Рух в кулонівському полі. Атом водню. 32. Стаціонарна теорія збурень. Невироджений випадок. 33. Теорія збурень при наявності виродження. Дворівнева система. Ефект Штарка для атома водню. 34. Варіаційний метод. 35. Теорія збурень, залежних від часу. 36. Ймовірність квантового переходу за одиницю часу. 37. Випромінювання поглинання фотонів. 38. Рівняння Кляйна–Ґордона–Фока. 39. Рівняння Дірака. Матриці Дірака. Рівняння неперервності. 40. Момент кількості руху в теорії Дірака. Спін. 41. Вільний рух релятивістської частинки. Проблема від'ємних енергій. Позитрони. 42. Квазірелятивістське наближення рівняння Дірака. Рівняння Паулі. Спін-орбітальна взаємодія. 43. Атом в маґнітномі полі. 44. Принцип тотожності частинок в квантовій механіці. Симетричні та антисиметричні хвильові функції. Бозони, ферміони. 45. Теорія атома гелію. Пара- та ортогелій. 46. Метод Хартрі–Фока. 47. Молекула водню.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу "Квантова механіка"

Тиждень	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання

1–2	Тема 1. Основні принципи квантової механіки	лекції – 4 год, практ. заняття – 6 год, самостійна робота – 10 год	2 тижня
3–5	Тема 2. Математичний апарат квантової механіки	лекції – 6 год, практ. заняття – 10 год, самостійна робота – 12 год	3 тижня
6–8	Тема 3. Рівняння Шредінґера. Оператор еволюції. Квантові ґейти.	лекції – 6 год, практ. заняття – 8 год, самостійна робота – 12 год	3 тижня
9–11	Тема 4. Найпростіші задачі квантової механіки	лекції – 6 год, практ. заняття – 10 год, самостійна робота – 12 год	3 тижня
12–14	Тема 5. Зв’язок квантової механіки з класичною	лекції – 6 год, практ. заняття – 8 год, самостійна робота – 12 год	3 тижня
15–16	Тема 5. Момент кількості руху. Спін. Квантовий біт.	лекції – 4 год, практ. заняття – 6 год, самостійна робота – 12 год	2 тижня
17–18	Тема 7. Рух частинки в центральносиметричному полі	лекції – 4 год, практ. заняття – 6 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
19–21	Тема 8. Теорія збурень	лекції – 6 год, практ. заняття – 10 год, самостійна робота – 7 год	3 тижня
22–24	Тема 9. Взаємодія атома з електромагнітним полем	лекції – 6 год, практ. заняття – 8 год, самостійна робота – 7 год	3 тижня
25–27	Тема 10. Релятивістська квантова механіка	лекції – 6 год, практ. заняття – 10 год, самостійна робота – 7 год	3 тижня
28–30	Тема 11. Квантова механіка системи багатьох частинок	лекції – 6 год, практ. заняття – 8 год, самостійна робота – 7 год	3 тижня
31–32	Тема 12. Теорія розсіяння	лекції – 4 год, практ. заняття – 6 год, самостійна робота – 5 год	2 тижня