

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 31.08.23 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

Силабус

**з навчальної дисципліни «Фундаментальні проблеми квантової механіки
(Fundamental problems of quantum mechanics)»,
що викладається в межах
ОНП «Теоретична фізика та астрофізика», ОНП «Експериментальна фізика»,
ОНП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»
другого (магістерського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія**

Львів 2023

Назва дисципліни	Фундаментальні проблеми квантової механіки (Fundamental problems of quantum mechanics)
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 лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/fundamentalni-problemy-kvantovoji-mehaniky-napryam-fizyka
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Фундаментальні проблеми квантової механіки (Fundamental problems of quantum mechanics)» є нормативною навчальною дисципліною, яка розрахована студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти, що навчаються за спеціальністю — 104 Фізика та астрономія. Її викладають у I семестрі загальним обсягом 6,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	В курсі розглянуто фундаментальні проблеми квантової механіки та квантової інформації. Він включає такі питання як: двостанові квантові системи, нерівності Белла, заплутані стани, квантові комунікації, квантова телепортація та квантова криптографія, теорема про неклонування, квантові біти та основи квантових обчислень, геометрія простору квантових станів., еволюція квантових систем, квантова брахистохрона, ефект Зенона, декогеренція квантових систем та, як приклад, декогеренція кота Шредінгера.
Мета та цілі дисципліни	Метою цієї дисципліни є формування поглибленого розуміння основ квантової механіки та квантової інформації. Ціллю курсу є розвиток вмінь використання квантової теорії для квантових обчислень та квантової інформації.
Література для вивчення дисципліни	Базова 1. Ткачук В. М. <i>Фундаментальні проблеми квантової механіки</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 2. Вакарчук І. О. <i>Квантова механіка</i> (вид. 4-е, доп.). Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. (Розділ XII. Основи квантової інформації.) Допоміжна 1. Понеділок Г. В. <i>Основи квантової фізики</i> . Львів, вид-во «Львівська політехніка», 2009. 2. Глауберман А. Ю. <i>Квантова механіка</i> . Львів, 1962. 3. Юхновський І. Р. <i>Квантова механіка</i> . Київ, 1995. 4. Zeilinger A. “A Foundational Principle for Quantum Mechanics,” <i>Foundations of Physics</i> . 1999. Vol. 29, No. 4, P. 631–643; https://doi.org/10.1023/A:1018820410908

	<p>5. Basso Basset F. <i>et al.</i> "Quantum teleportation with imperfect quantum dots." <i>npj Quantum Inf.</i> 2021. Vol. 7, Article 7; https://doi.org/10.1038/s41534-020-00356-0</p> <p>Інформаційні ресурси Wikipedia. http://www.wikipedia.org</p>
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	195 годин, з яких 64 годин аудиторних занять, з них 32 год лекційних занять, 32 год лабораторних занять та 131 год самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p>СК01. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.</p> <p>СК02. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>СК04. Здатність комунікувати з колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>СК05. Здатність сприймати новоздобуті знання у галузі фізики та астрономії та інтегрувати їх з уже наявними, а також самостійно опановувати знання та навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних галузях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.</p> <p>Програмні <i>результати навчання</i> (РН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</p> <p>РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної та експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.</p> <p>РН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.</p> <p>РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</p> <p>РН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>РН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші</p>

	<p>досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.</p> <p>PH13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.</p>
Ключові слова	<p>Singlet state, Bell inequalities, quantum teleportation, quantum logical elements, quantum state space metric, evolution rate, Zeno effect, decoherence / синглетний стан, нерівності Белла, квантова телепортація, квантові логічні елементи, метрика простору квантових станів, швидкість еволюції, ефект Зенона, декогеренція.</p>
Формат курсу	Очний
Теми	наведено у табл. 1
Підсумковий контроль, форма	<p>Іспит в кінці семестру</p> <p>Форма: Письмово-усний.</p>
Пререквізити	<p>Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких розділів математики і фізики: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, атомна фізика, квантова механіка.</p>
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	<p>а) <i>словесні</i> — лекція, пояснення, бесіда;</p> <p>б) <i>наочні</i> — ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками;</p> <p>в) <i>практичні</i> — виконання лабораторних 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.</p>
Необхідне обладнання	персональний комп'ютер, доступ до Інтернету
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • робота на лабораторних заняттях тощо: 10% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 10 <ul style="list-style-type: none"> 9–10 — активна участь у 13–16 заняттях; 7–8 — активна участь у 9–12 заняттях; 4–6 — активна участь у 5–8 заняттях; 1–3 — активна участь у 1–4 заняттях; 0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях; • підсумкова контрольна робота за двома змістовими модулями (по 20 балів): 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40; кожне завдання на контрольній роботі оцінюється у такій пропорції від максимальної кількості балів: <ul style="list-style-type: none"> 100% — завдання виконане повністю правильно; 75% — незначні недоліки у виконанні завдання; 50% — завдання виконане частково; 25% — зазначено лише вихідні вирази для виконання завдання; 0 — відповідь відсутня; • іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 50. Білет на іспиті складається з 2 розширених завдань (по 15 балів) і 10 простих завдань (по 2 бали). Розширені завдання оцінюються за такою шкалою: <ul style="list-style-type: none"> 15 — студент повністю володіє матеріалом; 10–14 — рівень володіння матеріалом достатній; 4–9 — рівень володіння матеріалом частковий;

	<p>1–3 — студент майже не володіє матеріалом; 0 — відповідь відсутня.</p> <p>Прості завдання оцінюються за такою шкалою: 2 — завдання виконане повністю правильно; 1 — завдання виконане частково; 0 — відповідь відсутня.</p> <p>Додаткові бали (до 5 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.</p> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p>Письмові роботи: Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (контрольні роботи, письмова частина іспиту).</p> <p>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.</p> <p>Відвідання занять є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні 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.</p> <p>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.</p> <p>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані на лабораторних та поточному тестуванні. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнь 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.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання до іспиту</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. State space. 2. Operators. 3. Representation of the state vectors and operators. 4. Properties of eigenvalues and eigenvectors of Hermitian operators. 5. Unitary transformations. 6. Postulate of measurement in quantum mechanics. 7. Mean value of physical quantities. Pure-state ensemble. 8. Mixed-state ensemble. Density matrix. 9. Quantum Poisson bracket.

- | | |
|--|---|
| | <ol style="list-style-type: none"> 10. Dynamics of quantum system. 11. Dynamics of quantum system. Mixed-state ensemble. 12. Heisenberg uncertainty relation. 13. Measurement in pure-state and mixed-state ensembles. 14. Quantum states of spin-1/2 particle. 15. Spin-density matrix. 16. Quantum states of N spins. 17. Singlet state. EPR paradox. 18. Bell's inequalities. 19. Entangled states. Measure of entanglement. 20. GHZ equality. 21. No-cloning theorem. 22. Quantum teleportation. 23. Quantum cryptography. 24. From classical bit to quantum bit. 25. Quantum processor. Quantum gates. 26. Quantum algorithms. The Deutsch–Jozsa problem. 27. Physical implementation of single-qubit gates 28. Single-qubit quantum computer. 29. Measurement of the projection of spin on a given direction. 30. Stern–Gerlach experiment. 31. Is it possible to measure the quantum state? 32. Measurement without interaction. 33. Distance between quantum states. 34. Metric of quantum state space. 35. Metric of two-dimensional quantum space. 36. Speed of quantum evolution. 37. Quantum brachistochrone problem. 38. Zeno effect. 39. Adiabatic theorem. 40. Berry phase. 41. Spin in a fluctuating magnetic field. 42. Exact model of decoherence.
<ol style="list-style-type: none"> 1. Простір станів. 2. Оператори. 3. Представлення векторів станів та операторів. 4. Властивості власних значень і власних векторів ермітових операторів. 5. Унітарні перетворення. 6. Постулат про вимірювання у квантовій механіці. 7. Середнє значення фізичних величин. Чистий ансамбль станів. 8. Змішаний ансамбль станів. Матриця густини. 9. Квантова дужка Пауссона. 10. Динаміка квантової системи. 11. Динаміка квантової системи. Змішаний ансамбль. 12. Співвідношення невизначеностей Гайзенберга. 13. Вимірювання в чистому та змішаному ансамблях. 14. Квантові стани спіну $s = 1/2$. |
|--|---|

	<ol style="list-style-type: none"> 15. Спінова матриця густини. 16. Квантові стани N спінів. 17. Синглетний стан. Парадокс EPR. 18. Нерівності Белла. 19. Заплутані стани. Міра заплутаності. 20. GHZ рівність. 21. Теорема про неклонування та неможливість миттєвої передачі інформації. 22. Квантова телепортація. 23. Квантова криптографія. 24. Від класичного біту до квантового. 25. Квантовий процесор. Квантові логічні елементи. 26. Квантові алгоритми. Задача Дойча–Джозси. 27. Фізична реалізація однокубітових операцій. Напівпрозорий бар'єр. 28. Однокубітовий квантовий комп'ютер. 29. Вимірювання проекції спіну на заданий напрямок. 30. Експеримент Штерна–Герлаха. 31. Чи можна виміряти квантовий стан. 32. Вимірювання без взаємодії. 33. Відстань між квантовими станами. 34. Метрика простору квантових станів. 35. Метрика двовимірного квантового простору. 36. Швидкість еволюції. 37. Квантова брахістохрона. 38. Ефект Зенона. 39. Адіабатична теорема. 40. Фаза Беррі. 41. Спін у флуктуюючому магнітному полі. 42. Точна модель декогеренції.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Схема курсу «Фундаментальні проблеми квантової механіки
(Fundamental problems of quantum mechanics)»*

Тиж- день	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<i>Змістовий модуль 1</i>			
1–2	1. Mathematical foundations of quantum mechanics [Математичні основи квантової механіки]. Література: Б1, Б2, Д1–Д5	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 18 год	2 тижні
3–4	2. Two state quantum systems [Двостанові квантові системи]. Література: Б1	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 16 год	2 тижні
5–6	3. Квантові комунікації [Quantum communications]. Література: Б1, Б2	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 16 год	2 тижні
7–8	4. Квантові обчислення та квантові комп'ютери [Quantum computing and quantum computers]. Література: Б1, Д5	лекції — 4 год, лаб. заняття — 2 год, контрольна робота — 2 год, самостійна робота — 18 год	2 тижні
<i>Змістовий модуль 2</i>			
9–10	5. Вимірювання у квантовій механіці [Measurement in quantum mechanics] Література: Б1, Д4	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 16 год	2 тижні
11–12	6. Геометрія простору квантових станів [Geometry of quantum state space]. Література: Б1	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 16 год	2 тижні
13–14	7. Еволюція квантової системи [Evolution of a quantum system]. Література: Б1, Д4	лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 16 год	2 тижні
15–16	8. Декогеренція [Decoherence]. Література: Б1	лекції — 4 год, лаб. заняття — 2 год, контрольна робота — 2 год, самостійна робота — 15 год	2 тижні

* Поклики на літературу подано відповідно до переліку базової (Б) та допоміжної (Д) літератури.