

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 01.09.2025 р.)

Завідувач кафедри  _ професор В. М. Ткачук

Силабус
з навчальної дисципліни «Вступ до квантової інформації»,
що викладається в межах
ОПП «Комп'ютерна фізика»
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

Львів 2025

Назва дисципліни	Вступ до квантової інформатики
Адреса викладання дисципліни	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. 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
Викладач дисципліни	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н, доц. Стецко Микола Миколайович
Контактна інформація викладачів	mykola.stetsko@lnu.edu.ua mstetsko@gmail.com
Консультації з 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 Zoom, Microsoft Teams.
Сторінка курсу	
Інформація про дисципліну	Курс «Вступ до квантової інформатики» належить до нормативної навчальної дисципліни і розрахований на слухачів, що навчаються у межах спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Його викладають студентам освітньо-професійної програми “Комп’ютерна фізика” у VII семестрі 4-го року підготовки бакалаврів із обсягом 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб ознайомити студентів з основами математичного апарату квантової інформації, квантовими логічними елементами, базовими алгоритмами квантових обчислень, а також фізичними принципами роботи квантових комп’ютерів.
Мета та цілі дисципліни	Метою і завданням навчальної дисципліни «Вступ до квантової інформатики» є ознайомлення студентів із фізичними основами квантової інформації, квантовими комунікаціями, а також, принципами роботи квантових комп’ютерів.
Література для вивчення дисципліни	<p>Базова:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>M. A. Nielsen, I. L. Chuang</i>, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2010, 702 p. 2. <i>Т. Є. Крохмальський</i>. Вступ до квантових обчислень. Л.: “Львівський національний університет імені Івана Франка”, 2018, 204 с. 3. <i>S. M. Barnett</i>, Quantum Information, Oxford, Oxford University Press, 2009, 313 p. <p>Допоміжна:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>І. О. Вакарчук</i>, Квантова механіка. Л.: “Львівський національний університет імені Івана Франка”, 2012, 872 с. 2. <i>О. С Давидов</i>, Квантова механіка, К.: ВД “Академперіодика”, 2012, 702 с. 3. <i>В. М. Ткачук</i>. Фундаментальні проблеми квантової механіки. Л.: “ЛНУ імені Івана Франка”, 2011, 144 с 4. <i>J.J. G. Ripoll</i>, Quantum Information & Quantum Optics with Superconducting Circuits, Cambridge, Cambridge University Press, 2022, 302 p. <p>Інформаційні ресурси Wikipedia. http://www.wikipedia.org</p>
Тривалість курсу	один семестр

Обсяг курсу	90 годин, з яких 64 годин аудиторних занять, з них 32 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 26 години самостійної роботи. Тижневе навантаження становить 4 години аудиторних занять та 1.6 години самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні (СК) компетентності:</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК 4. Здатність спілкуватися іноземною мовою</p> <p>ЗК 5. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.</p> <p>ЗК 7. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p>ЗК 9. Здатність працювати автономно.</p> <p>ЗК 12. 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.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p>СК 3. Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.</p> <p>СК 5. Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій.</p> <p>СК 7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.</p> <p>СК 8. Здатність працювати в колективах виконавців, у тому числі в міждисциплінарних проектах.</p> <p>СК 9. Здатність планувати та створювати програмне забезпечення використовуючи мови високого рівня.</p> <p><i>Програмні результати навчання (Р), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p>Р03. Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв'язанні практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>Р05. Вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики.</p> <p>Р11. Знати цілі сталого розвитку та можливості своєї професійної сфери для їх досягнення, в тому числі в Україні.</p> <p>Р14. Володіти навичками програмування використовуючи мови високого рівня.</p>
Ключові слова	Постулат про вимірювання. Чистий та змішаний стани. Матриця густини. Спін 1/2. Кубіт. Еволюція спіну в магнітному полі. Сфера Блоха. Заплутані стани. Стани Белла. Алгебра логіки. Однокубітові логічні елементи. Двокубітові логічні елементи. Квантові алгоритми. Квантове перетворення Фур'є. Алгоритм Дойча-Джозси. Алгоритм факторизації. Квантові процесори. Процесори на основі ЯМР. Надпровідні КЛЕ.

Формат курсу	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять та консультації для кращого засвоєння програмного матеріалу.
Теми	<ol style="list-style-type: none"> 1. Опис стану в квантовій механіці. Чисті та змішані стани. Матриця густини. 2. Спін $\frac{1}{2}$. Рух спіна у магнітному полі. Опис стану спіна $\frac{1}{2}$, сфера Блоха. 3. Система спінів. Факторизовані та заплутані стани. Стани Белла. 4. Класичні та квантові обчислення. Квантова перевага. Квантові логічні елементи. 5. Квантові алгоритми. Помилки при квантових обчисленнях та їх виправлення. 6. Вимоги до квантових комп'ютерів. Фізична реалізація квантових процесорів.
Підсумковий контроль, форма	<p>Поточний контроль: усне та письмове опитування, модульні тести, оцінка практичних завдань.</p> <p>Підсумковий контроль: залік в кінці 7-го семестру.</p> <p>Форма: письмово-усний.</p>
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують ґрунтовних знань із дисциплін загальної фізики та вищої математики, зокрема, математичного аналізу, лінійної алгебри, диференціальних рівнянь, а також атомної фізики та особливо квантової механіки.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	<p>Презентація, лекції, дискусія, розв'язок задач.</p> <p>Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками.</p>
Необхідне обладнання	Дошка, маркери або крейда, персональний комп'ютер, проектор
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 під час семестру (усереднена оцінка): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20; • підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 20 балів, проводиться на під час лабораторних занять): 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40; • розширена доповідь (або декілька доповідей) на лабораторних заняттях за тематикою курсу (усереднена оцінка): 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40; <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100</p> <p>Письмові роботи: Передбачається, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (два підсумкові тестування: за першою і другою та третьою четвертою темами відповідно).</p> <p>Академічна доброчесність: Очікується, що роботи студентів будуть їх оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p> <p>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 письмових робіт, передбачених</p>

	<p>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 заняттях та підсумкових тестуваннях. 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>Перелік контрольних питань</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оператори фізичних величин. 2. Власні значення і власні стани операторів фізичних величин. 3. Постулат про вимірювання. 4. Чистий стан. 5. Змішаний стан. Матриця густини. 6. Властивості матриці густини. 7. Середнє значення фізичної величини у чистому стані. 8. Рівняння руху для матриці густини. 9. Еволюція спіна $\frac{1}{2}$ в магнітному полі. 10. Квантовий біт. Приклад спіна $\frac{1}{2}$. 11. Сфера Блоха. 12. Система спінів $\frac{1}{2}$. Простір станів для системи N спінів. 13. Факторизовані та заплутані стани. Стани Белла. 14. Парадокс ЕПР. 15. Алгебра логіки. Логічні операції. 16. Класичні логічні елементи (елементи NOT, AND, OR, XOR, NAND). 17. Оборотноість класичних логічних елементів. Елемент Тофолі. 18. Унітарність еволюції квантових систем та оборотноість квантових логічних елементів (КЛЕ). 19. Однокубітові КЛЕ: елементи NOT, зсуву фази, повороту та Адамара. 20. Двокубітові КЛЕ. Контрольовані елементи: CNOT, контрольований зсув фази. Елемент SWAP. 21. Багатокубітові КЛЕ. Квантовий елемент Тофолі. 22. Класичні та квантові алгоритми. Квантова перевага. 23. Квантовий регістр. Стани квантового регістра. Регістр аргументу та регістр значень функції. 24. Квантове перетворення Фур'є. 25. Задача Дойча-Джозси. 26. Алгоритм визначення періоду функції. 27. Факторизація чисел, алгоритм Шора. 28. Алгоритм пошуку Гровера. 29. Шуми в квантових процесорах. Помилки при квантових

	<p>обчисленнях. Типи помилок.</p> <p>30. виправлення помилок класичного типу.</p> <p>31. Основні вимоги до квантових комп'ютерів. Критерії ді Вінченцо.</p> <p>32. Типи квантових комп'ютерів (процесорів).</p> <p>33. Процесори на основі ЯМР. Реалізація, переваги та недоліки схеми.</p> <p>34. Процесори на основі іонів у пастках.</p> <p>35. Надпровідні КЛЕ, типи надпровідних кубітів.</p> <p>36. Фотонні квантові комп'ютери та квантові комунікації.</p> <p>37. Адіабатичні квантові комп'ютери.</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Вступ до квантової інформатики»

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1, 2	Тема 1. Оператори фізичних величин. Постулат про вимірювання в квантовій механіці. Чистий ансамбль. Змішаний ансамбль. Матриця густини. Властивості матриці густини. Середні значення фізичних величин. Рівняння руху для матриці густини. Література: Б1, Б2, Б3, Д2, Д3	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні
3,4	Тема 2. Спін $\frac{1}{2}$. Кубіт. Еволюція спіна $\frac{1}{2}$ у магнітному полі. Опис стану спіну $\frac{1}{2}$, сфера Блоха. Система N спінів, простір станів для системи спінів. Факторизовані та заплутані стани. Заплутаність в системі двох спінів, стани Белла. Парадокс ЕПР. Література: Б1, Б2, Б3, Д1, Д2	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні
5, 6	Тема 3. Алгебра логіки. Класичні логічні елементи. Оборотність в класичних елементах, елемент Гофолі. Унітарність еволюції квантових систем та обортність в квантових логічних елементів. Однокубітові КЛЕ: елементи NOT, зсуву фази, елемент Адамара. Література: Б1, Б2, Б3, Д3, Д4	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 4 год	2 тижні
7, 8	Тема 4. Двокубітові КЛЕ: елементи CNOT, контрольовані елементи, елемент SWAP. Багатокубітові КЛЕ. Класичні та квантові алгоритми. Квантова перевага. Квантовий регістр. Стан квантового регістра. Література: Б1, Б2 Б3, Д4	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні
9, 10	Тема 5. Квантове перетворення Фур'є. Алгоритм Дойча-Джозси. Визначення періоду функції. Факторизація чисел, алгоритм Шора. Література: Б1, Б2, Б3	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні
11,12	Тема 6. Алгоритм пошуку Гровера. Шуми у квантових процесорах. Помилки при квантових обчисленнях, типи помилок. виправлення помилок. Література: Б1, Б2, Б3, Д4	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 4 год	2 тижні
13, 14	Тема 7. Основні вимоги до квантових процесорів. Критерії ді Вінченцо. Типи квантових процесорів: переваги і недоліки. Процесори на основі ЯМР.	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні

Тиж-ні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	Процесори на основі іонів у пастках. Література: Б1, Б2, Д4		
15, 16	Тема 4. Надпровідні КЛЕ, типи надпровідних елементів. Фотонні квантові комп'ютери, використання у квантових комунікаціях. Адіабатичні квантові комп'ютери. Література: Б1, Б2, Д4	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 3 год	2 тижні