

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 31.08.2023 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

Силабус
з навчальної дисципліни «Архітектура квантових комп'ютерів»,
що викладається в межах
ОНП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»
другого (магістерського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія

Львів 2023

Назва дисципліни	Архітектура квантових комп'ютерів
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	10 Природничі науки. 104 Фізика та астрономія
Викладач дисципліни	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н, доц. Кузьмак Андрій Романович
Контактна інформація викладачів	andrij.kuzmak@lnu.edu.ua
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	https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&p=43535&preview=true
Інформація про дисципліну	Курс «Архітектура квантових комп'ютерів» належить до вибіркової навчальної дисципліни з спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Його викладають студентам ОНП «Квантові комп'ютери та квантове програмування» у 1 семестрі обсягом 4,5 кредити (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб ознайомити студентів зі способами приготування, контролю і вимірювання станів на квантових комп'ютерах із різною архітектурою.
Мета та цілі дисципліни	Метою і завданням навчальної дисципліни «Архітектура квантових комп'ютерів» є ознайомлення студентів із реалізацією квантових комп'ютерів на різних фізичних системах, таких як, поляризовані фотони, спіни ядер і електронів атомів, надпровідних кубітах і т. д.; із способами контролю і проведення вимірювань квантових станів на квантових комп'ютерах; реалізацією квантових логічних елементів і квантових обчислень на квантових комп'ютерах.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. <i>J. D. Hidary</i> . Quantum Computing: An Applied Approach. Springer Nature Switzerland AG, 2019, 379 p. 2. <i>Т. Є. Крохмальський</i> . Вступ до квантових обчислень. Л.: «Львівський національний університет імені Івана Франка», 2018, 204 с. 3. <i>E. Desurvire</i> . Classical and Quantum Information Theory. An Introduction for the Telecom Scientist. «Cambridge University Press», 2002, 691 p. Допоміжна: 4. <i>В. М. Ткачук</i> . Фундаментальні проблеми квантової механіки. Л.: «ЛНУ імені Івана Франка», 2011, 144 с. 5. <i>B.-G. Englert, Ch. Kurtsiefer, H. Weinfurter</i> . Universal unitary gate for single-photon two-qubit states. Phys. Rev. A 63 , 032303 (2001). Інформаційні ресурси Wikipedia. http://www.wikipedia.org
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	135 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 87 години самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК): <i>Загальні компетентності:</i>

	<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>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>СК11. Здатність розв’язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень.</p> <p><i>Програмні результати навчання (РН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></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>РН10. Відшукувати інформацію і дані, необхідні розв’язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отриману інформацію та дані.</p> <p>РН12. Розробляти та застосовувати ефективні алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для дослідження моделей фізичних та/або астрономічних об’єктів і процесів, обробки результатів експериментів і спостережень.</p> <p>РН18. Розв’язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень.</p> <p>РН19. Моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп’ютерах.</p>
Ключові слова	квантовий комп’ютер, квантовий біт (кубіт), квантовий комп’ютер на поляризованих фотонах, квантовий комп’ютер на спінах ядер і спінах електронів атомів, надпровідні кубіти.
Формат курсу	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Наведено в Таблиці 1
Підсумковий контроль, форма	Залік в кінці 1-го семестру.
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують ґрунтовних знань із дисциплін загальної фізики та вищої математики. Насамперед з квантової механіки, математичного аналізу, аналітичної геометрії, диференціальних рівнянь.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Презентація, лекції, дискусія, розв’язок задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками.
Необхідне обладнання	Дошка і крейда, персональний комп’ютер, проектор
Критерії оцінювання	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються

<p>(окремо для кожного виду навчальної діяльності)</p>	<p>за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> робота на лабораторних заняттях під час семестру: 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40 відповідно до такої шкали: 36–40 — активна участь у 13–16 заняттях; 28–35 — активна участь у 9–12 заняттях; 20–27 — активна участь у 5–8 заняттях; 1–19 — активна участь у 1–4 заняттях; 0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях; підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 30 балів): 60% сумарної оцінки; <p>Кожен тест містить по 10 завдань. Кожне завдання оцінюється в 3 бали: 3 — правильна відповідь на завдання у тесті; 0 — неправильна відповідь на завдання у тесті; максимальна кількість балів — 60; Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p>Додаткові бали можна отримати: Написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни 5/10 балів.</p> <p>Письмові роботи: Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (тестування).</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 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, самостійній роботі, поточному тестуванні. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студентів під час лабораторного заняття; недопустимість пропусків та запізень 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 на контрольні роботи</p>	<ol style="list-style-type: none"> Фізична реалізація однокубітних логічних елементів на фотонах. Реалізація оператор корінь з NOT на фотонах.

	<p>3. Реалізація операторів NOT і Адамара на фотонах.</p> <p>4. Однокубітна реалізація задачі Дойча-Йозса.</p> <p>5. HV і FS розділювач променів.</p> <p>6. Схема створення CNOT оператора.</p> <p>7. Фізична реалізація CNOT оператора на поляризованих фотонах.</p> <p>8. Однокубітні квантові логічні елементи побудовані на системі спіну $1/2$ в магнітному полі.</p> <p>9. Оператори NOT, Адамара, зсуву фази, повороту на кут навколо осей координат, які побудовані на спіні $1/2$ в магнітному полі.</p> <p>10. Еволюція стану двох спінів $1/2$, які описуються моделлю Ізінга.</p> <p>11. Реалізація операторів CNOT і контрольованого зсуву фази на двох спинах $1/2$.</p> <p>12. Еволюція двох спінів $1/2$, що описуються моделлю Гайзенберга.</p> <p>13. Приготування заплутаних станів на системі двох спінів $1/2$.</p> <p>14. Керування йонами в пастках і оптичних ґратках.</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Архітектура квантових комп'ютерів»

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	Напівпрозорий бар'єр. Фізична реалізація однокубітних логічних елементів. Розділювач поляризованих променів. Оператор корінь з NOT. [4]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 10 год	2 тижня
3–4	Оператор NOT. Оператор Адамара. Однокубітна реалізація задачі Дойча-Йозса. [4]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 10 год	2 тижня
5–6	HV розділювач променів. FS розділювач променів. Джерело заплутаних променів. Схема створення CNOT оператора. Фізична реалізація CNOT оператора на поляризованих фотонах. [2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 20 год	2 тижня
7–8	Спін $1/2$ в магнітному полі. Гамільтоніан спіну $1/2$ в магнітному полі. Еволюція спіну $1/2$ в магнітному полі. [1,2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 5 год	2 тижня
9–10	Однокубітні квантові логічні елементи побудовані на системі спіну $1/2$ в магнітному полі. Оператор NOT. Оператор Адамара. Оператор зсуву фази. Оператори повороту на кут навколо осей координат. [1,2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 5 год	2 тижня
11–12	Модель Ізінга. Еволюція стану двох спінів $1/2$, які описуються моделлю Ізінга. Реалізація операторів CNOT і контрольованого зсуву фази на двох кубітах. [1,2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 10 год	2 тижня
13–14	Модель Гайзенберга. Еволюція двох спінів $1/2$, що описуються моделлю Гайзенберга. Приготування заплутаних станів на системі двох спінів $1/2$. [1,2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 10 год	2 тижня

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
15–16	Реалізація квантових обчислень на йонах в пастках і на оптичних ґратках. [2]	Лекції — 2 год, лаб. заняття — 4 год самостійна робота — 17 год	2 тижня