

**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**

<b>Назва дисципліни</b>	Архітектура квантових комп'ютерів
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	10 Природничі науки. 104 Фізика та астрономія
<b>Викладач дисципліни</b>	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н, доц. Кузьмак Андрій Романович
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:andrij.kuzmak@lnu.edu.ua">andrij.kuzmak@lnu.edu.ua</a>
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	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.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43535&amp;preview=true">https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43535&amp;preview=true</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	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).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Курс розроблено таким чином, щоб ознайомити студентів зі способами приготування, контролю і вимірювання станів на квантових комп'ютерах із різною архітектурою.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	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.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 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. <b>Допоміжна:</b> 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 <b>63</b> , 032303 (2001). <b>Інформаційні ресурси</b> Wikipedia. <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	135 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 87 години самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК): <i>Загальні компетентності:</i>

	<p><b>ЗК04.</b> Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p><b>СК01.</b> Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.</p> <p><b>СК02.</b> Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p><b>СК05.</b> 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><b>СК11.</b> 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><b>РН06.</b> Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p><b>РН10.</b> 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><b>РН12.</b> 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><b>РН18.</b> Розв'язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень.</p> <p><b>РН19.</b> Моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп'ютерах.</p>
<b>Ключові слова</b>	квантовий комп'ютер, квантовий біт (кубіт), квантовий комп'ютер на поляризованих фотонах, квантовий комп'ютер на спінах ядер і спінах електронів атомів, надпровідні кубіти.
<b>Формат курсу</b>	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять та консультації для кращого розуміння тем
<b>Теми</b>	Наведено в Таблиці 1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Залік в кінці 1-го семестру.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують ґрунтовних знань із дисциплін загальної фізики та вищої математики. Насамперед з квантової механіки, математичного аналізу, аналітичної геометрії, диференціальних рівнянь.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, дискусія, розв'язок задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками.
<b>Необхідне обладнання</b>	Дошка і крейда, персональний комп'ютер, проектор
<b>Критерії оцінювання</b>	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються

<p><b>(окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b></p>	<p>за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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;</li> <li>підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 30 балів): 60% сумарної оцінки;</li> </ul> <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><b>Письмові роботи:</b> Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (тестування).</p> <p><b>Академічна доброчесність:</b> 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><b>Відвідання занять</b> 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><b>Література.</b> 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><b>Політика виставлення балів.</b> 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><b>Питання на контрольні роботи</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Фізична реалізація однокубітних логічних елементів на фотонах.</li> <li>Реалізація оператор корінь з NOT на фотонах.</li> </ol>

	<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 <math>1/2</math> в магнітному полі.</p> <p>9. Оператори NOT, Адамара, зсуву фази, повороту на кут навколо осей координат, які побудовані на спіні <math>1/2</math> в магнітному полі.</p> <p>10. Еволюція стану двох спінів <math>1/2</math>, які описуються моделлю Ізінга.</p> <p>11. Реалізація операторів CNOT і контрольованого зсуву фази на двох спінах <math>1/2</math>.</p> <p>12. Еволюція двох спінів <math>1/2</math>, що описуються моделлю Гайзенберга.</p> <p>13. Приготування заплутаних станів на системі двох спінів <math>1/2</math>.</p> <p>14. Керування йонами в пастках і оптичних ґратках.</p>
<b>Опитування</b>	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	Моделю 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	Моделю 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