

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

**Затверджено**

На засіданні кафедра теоретичної фізики  
імені професора Івана Вакарчука  
фізичного факультету  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол № 1 від 31.08.2023 р.)

Завідувач кафедри  проф. Ткачук В.М.

**Силабус**

**з навчальної дисципліни**

**«Квантові комп'ютери та квантові логічні елементи  
(Quantum computers and quantum gates)» ,**

**що викладається в межах**

**ОНП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
для здобувачів спеціальності 104 Фізика та астрономія**

**Львів 2023**

<b>Назва дисципліни</b>	Квантові комп'ютери та квантові логічні елементи
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 19, 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>	Галузь знань – 10 Природничі науки Спеціальність – 04 Фізика та астрономія
<b>Викладач дисципліни</b>	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н Самар Микола Іванович
<b>Контактна інформація викладача</b>	<a href="mailto:mykola.samar@lnu.edu.ua">mykola.samar@lnu.edu.ua</a> ; <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/samar-m-i">https://physics.lnu.edu.ua/employee/samar-m-i</a>
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams, Telegram.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43539&amp;preview=true">https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43539&amp;preview=true</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантові комп'ютери та квантові логічні елементи» є обов'язковою дисципліною для підготовки магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, яка викладається в I семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Дисципліна допоможе студентам зрозуміти принципи роботи квантового комп'ютера та ознайомить з квантовими логічними елементами, як базовими елемент квантового комп'ютера, що перетворює вхідні стани кубітів на вихідні.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	<b>Мета:</b> ознайомити студентів із теорією квантової інформації, квантових мереж та їх сучасної реалізації. <b>Завдання:</b> навчити студентів розуміти теоретичні та практичні принципи, на яких базується теорія квантових обчислень.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<p style="text-align: center;"><b>Базова</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Т. Є. Крохмальський, Вступ до квантових обчислень. — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. 204 с.</li> <li>2. І. О. Вакарчук, Квантова механіка (вид. 4-е, доп.). — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. (Розділ XII. Основи квантової інформації).</li> <li>3. В. М. Ткачук. Фундаментальні проблеми квантової механіки.— Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 144 с.</li> <li>4. Williams, C.P.: Quantum gates (chap. 2). In: Explorations in Quantum Computing. Texts in Computer Science, pp. 51–122. Springer (2011)</li> <li>5. Gavin E. Crooks. Gates, states, and circuits. <a href="https://threeplusone.com/pubs/on_gates.pdf">https://threeplusone.com/pubs/on_gates.pdf</a>, 2021.</li> </ol> <p style="text-align: center;"><b>Допоміжна</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hughes, C. Isaacson, J., et. al., Quantum Computing for the Quantum Curious, Springer, 2021.</li> <li>2. Adriano Barenco, Charles H. Bennett, et. al. , Elementary gates for quantum computation, Phys. Rev. A 52, 3457, 1995</li> </ol> <p style="text-align: center;"><b>Інформаційні ресурси</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>6. Eric Weisstein's World of Physics <a href="http://scienceworld.wolfram.com/physics/">http://scienceworld.wolfram.com/physics/</a></li> <li>7. Wikipedia. <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	90 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 години лекцій, 16 години практичних занять, та 58 годин самостійної роботи.

<p><b>Очікувані результати навчання</b></p>	<p><i>Курс формує такі загальні та спеціальні компетентності:</i></p> <p><b>ЗК03.</b> Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</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>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>СК10.</b> Здатність створювати квантові протоколи та реалізовувати їх на квантових комп’ютерах</p> <p><b>СК13.</b> Здатність застосовувати квантове програмування для розв’язання прикладних задач</p> <p><i>Програмні результати навчання (ПРН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p><b>РН02.</b> 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><b>РН11.</b> Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв’язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.</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> <p><b>РН20.</b> Застосовувати квантове програмування для розв’язання прикладних задач</p>
<p><b>Ключові слова</b></p>	<p>Квантовий комп’ютер, кубіт, квантові логічні елементи, унітарні оператори Quantum computer, qubit, quantum gates, unitary operators</p>
<p><b>Формат курсу</b></p>	<p>Очний</p>
<p></p>	<p>проведення лекцій, практичних занять і консультації для кращого розуміння тем</p>
<p><b>Теми</b></p>	<p>Наведено у таблиці 1</p>
<p><b>Підсумковий контроль, форма</b></p>	<p>Екзамен в кінці семестру</p>
<p><b>Пререквізити</b></p>	<p>Для слухачів курсу необхідними є знання з квантової механіки та лінійної алгебри.</p>
<p><b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b></p>	<p>Презентація, лекції, дискусія, розв’язок задач, підготовка доповідей. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками.</p>
<p><b>Необхідне обладнання</b></p>	<p>персональний комп’ютер, загальнонавчальні комп’ютерні програми й операційні системи, проєктор</p>
<p><b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b></p>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>робота на лабораторних заняттях під час семестру: 10% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 10 відповідно до такої шкали:</li> </ul>

	<p>9–10 — активна участь у 7–8 заняттях;  7–8 — активна участь у 5–6 заняттях;  5–6 — активна участь у 3–4 заняттях;  1–4 — активна участь у 1–2 заняттях;  0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;  • підсумкова контрольна робота: 40% сумарної оцінки;  максимальна кількість балів — 40;  Максимальна семестрова кількість балів — 50.  • іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50:  два розширених завдання по 25 балів кожне відповідно до такої шкали:  21–25 — студент повністю володіє матеріалом;  16–20 — рівень володіння матеріалом достатній;  11–15 — рівень володіння матеріалом частковий;  1–10 — студент майже не володіє матеріалом;  0 — відповідь відсутня.  Підсумкова максимальна кількість балів — 100.  Додаткові бали можна отримати за написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни 5/10 балів.  <b>Академічна доброчесність</b> 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.  <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 робіт, передбачених курсом.  <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.  <b>Політика виставлення балів.</b> 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 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.  Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Питання до екзамену (чи питання на контрольні роботи)</b></p>	<p><b>1. Principles of operation of a quantum computer.</b>  From classical bit to quantum. Quantum register. Scheme of operation of a quantum computer.  <b>2. Quantum logic elements as unitary matrices.</b>  Matrices. Hermitian and unitary matrices. Properties of unitary matrices  <b>3. One-qubit logic elements</b>  Pauli logical elements. Turn operators. Theorem on the representation of an arbitrary one-qubit logic element using a rotation operator around some axis.  Hadamard operator. Phase shift operator. Distribution of single-qubit logic</p>

	<p>elements by Euler angles. The Clifford group and other quantum logic elements.</p> <p><b>4. Two-qubit quantum logic elements</b> Standard two-qubit logic elements. Controlled negation operator and non-cloning theorem. A common controlled logic element. The SWAP operator. Logical elements of Ising. A canonical and magical logical element. Kraus-Tsirak canonical distribution.</p> <p><b>5. Three- and multi-cubic logic elements.</b> Logical elements of Toffoli and Fredkin. Universal set of logical elements.</p> <p><b>1. Принципи роботи квантового комп'ютера.</b> Від класичного біта до квантового. Квантовий регістр. Схема роботи квантового комп'ютера.</p> <p><b>2. Квантові логічні елементи як унітарні матриці.</b> Матриці. Ермітові та унітарні матриці. Властивості унітарних матриць</p> <p><b>3. Однокубітові логічні елементи</b> Логічні елементи Паулі. Оператори повороту. Теорема про представлення довільного однокубітового логічного елемента за допомогою оператора повороту навколо деякої осі. Оператор Адамара. Оператор зсуву фаз. Розклад однокубітових логічних елементів за кутами Ейлера. Група Кліфорда та інші квантові логічні елементи.</p> <p><b>4. Двокубітові квантові логічні елементи</b> Стандартні двокубітові логічні елементи. Оператор контрольованого заперечення і теорема про неклонування. Загальний контрольований логічний елемент. Оператор SWAP. Логічні елементи Ізінга. Канонічний та магічний логічний елемент. Канонічний розклад Крауса-Цірака.</p> <p><b>5. Три та мультикубітові логічні елементи.</b> Логічні елементи Тоффолі та Фредкіна. Універсальний набір логічних елементів.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Квантові комп'ютери та квантові логічні елементи»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	<p>Лк1. Від класичного біта до квантового. Квантовий регістр. Схема роботи квантового комп'ютера. Лб1. Квантовий біт</p> <p>[Lec1. From classical bit to quantum. Quantum register. Scheme of operation of a quantum computer. Lab1. A quantum bit]</p> <p><b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b></p>	<p>Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.</p>	2 тижні
3–4	<p>Лк2. Квантові логічні елементи як унітарні матриці. Ермітові та унітарні матриці. Властивості унітарних матриць. Лб2. Властивості унітарних матриць</p> <p>[Lec2. Quantum logic elements as unitary matrices. Hermitian and unitary matrices. Properties of unitary matrices. Lab2. Properties of unitary matrices]</p>	<p>Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.</p>	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	<b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>		
5–6	Лк3. Однокубітові логічні елементи. Логічні елементи Паулі. Оператори повороту. Лб3. Найпростіші логічні елементи [Лec3. One-qubit logic elements. Pauli logical elements. Rotation operators. Lab3. The simplest logical elements] <b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>	Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.	2 тижні
7–8	Лк4. Теорема про представлення довільного однокубітового логічного елемента за допомогою оператора повороту навколо деякої осі. Оператор Адамара. Оператор зсуву фаз. Лб4. Оператори повороту [Лec4. Theorem on the representation of an arbitrary one-qubit logic element using a rotation operator around some axis. Hadamard operator. Phase shift operator. Lab4. Rotation gates] <b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>	Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.	2 тижні
9–10	Лк5. Розклад однокубітових логічних елементів за кутами Ейлера. Група Кліфорда та інші квантові логічні елементи. Лб5. Група Кліфорда та інші квантові логічні елементи.  [Лec 5. Distribution of single-qubit logic elements by Euler angles. The Clifford group and other quantum logic elements. Lab5. The Clifford group and other quantum logic elements.] <b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>	Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.	2 тижні
11–12	Лк6. Стандартні двокубітові логічні елементи. Оператор контрольованого заперечення і теорема про неклонування. Загальний контрольований логічний елемент. Оператор SWAP. Лб6. Двокубітові квантові логічні елементи.  [Лec6. Standard two-qubit logic elements. CNOT operator and non-cloning theorem. A general controlled logic element. The SWAP operator. Lab6. Two-qubit quantum logic elements] <b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>	Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.	2 тижні
13–14	Лк7. Логічні елементи Ізінга. Канонічний та магічний логічний елемент. Канонічний розклад Крауса-Цірака. Лб7. Оператор SWAP  [Лec7. Logical elements of Ising. A canonical and magical logical element. Kraus-Tsirak canonical distribution. Lab7. SWAP operator.]	Лекції — 2 год. лабораторні— 2 год. самостійна робота — 7 год.	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	<b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b>		
15–16	<p>Лк8. Три та мультикубутові логічні елементи.  Логічні елементи Тоффолі та Фредкіна.  Універсальний набір логічних елементів.  Лб8. Логічні елементи Ізінга.</p> <p>[Lec8. Three and multicube logical elements. Logical elements of Toffoli and Fredkin. Universal set of logical elements.  Lab8. Logical elements of Ising]</p> <p><b>Література: Б1-Б5, Д1-Д2.</b></p>	<p>Лекції — 2 год.  лабораторні — 2 год.  самостійна робота — 7 год.</p>	2 тижні