

**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  проф. Ткачук В. М.

**Силабус**

**з навчальної дисципліни «Квантові алгоритми та квантова перевага»,  
(Quantum algorithms and quantum supremacy)**

**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>	Квантові алгоритми та квантова перевага (Quantum algorithms and quantum supremacy)
<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 – 104 Фізика та астрономія
<b>Викладач дисципліни</b>	Гнатенко Христина Павлівна, професор кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, д-р ф.-м.н.;
<b>Контактна інформація викладача</b>	<a href="mailto:Khrystyna.gnatenko@lnu.edu.ua">Khrystyna.gnatenko@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/hnatenko-h-p">https://physics.lnu.edu.ua/employee/hnatenko-h-p</a>
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних 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=43553&amp;preview=true">https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43553&amp;preview=true</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантові алгоритми та квантова перевага» є нормативною дисципліною для підготовки магістра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія», яка викладається в II семестрі в обсязі 4,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Дисципліна «Квантові алгоритми та квантова перевага» присвячена вивченню теоретичних основ відомих квантових алгоритмів, які дозволяють розв'язати задачі з використанням менших ресурсів та за менший час у порівнянні з класичними. Також під час вивчення дисципліни студенти будуть вміти реалізовувати алгоритми на квантових комп'ютерах.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою даної дисципліни є одержання студентами знань основних квантових алгоритмів, які дозволяють отримати квантову перевагу. Завданням курсу є формування в студентів знань та умінь створення алгоритмів з використанням квантових комп'ютерів для розв'язання задач з меншими затратами ресурсів у порівнянні з класичними обчисленнями, формування навичок реалізації таких алгоритмів на квантових комп'ютерах.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. Т. Є. Крохмальський, Вступ до квантових обчислень. Навч. пос. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. – 204 стор. 2. В. М. Ткачук, Фундаментальні проблеми квантової механіки. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 144 стор. 3. Qiskit Textbook Chapter 3 “Quantum protocols and quantum algorithms” <a href="https://qiskit.org/textbook/ch-algorithms/index.html">https://qiskit.org/textbook/ch-algorithms/index.html</a> <b>Допоміжна:</b> 4. Gnatenko Kh. P., Laba H. P., Tkachuk V. M. Detection of energy levels of a spin system on a quantum computer by probe spin evolution // Eur. Phys. J. Plus.— 2022.— Vol. 137, No. 4.— Art. 522.— 10 p. 5. Gnatenko Kh. P., Laba H. P., Tkachuk V. M. Geometric properties of evolutionary graph states and their detection on a quantum computer // Phys. Lett. A.— 2022.— Vol. 452.— Art. 128434. Додаткові матеріали також буде запропоновано для кожної теми окремо. <b>Інформаційні ресурси:</b>

	<p>6. <a href="https://quantum-computing.ibm.com/composer/files/new">https://quantum-computing.ibm.com/composer/files/new</a>  7. <a href="https://codebook.xanadu.ai/">https://codebook.xanadu.ai/</a></p>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	135 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 години лабораторних занять, та 87 годин самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>В результаті вивчення даного курсу студенти повинні</p> <p><b>знати:</b> основні квантові алгоритми та можливості досягнення квантової переваги</p> <p><b>вміти:</b> виводити аналітично основи квантових алгоритмів, реалізовувати алгоритми на квантових комп'ютерах</p> <p><i>Загальні компетентності</i></p> <p><b>ЗК01.</b> Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p><b>ЗК02.</b> Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p><i>Спеціальні компетентності</i></p> <p><b>СК05.</b> Здатність сприймати новоздобуті знання у галузі фізики та астрономії та інтегрувати їх з уже наявними, а також самостійно опанувати 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>СК08.</b> Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі у галузі фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси.</p> <p><b>СК11.</b> Здатність розв'язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень</p> <p><b>СК12.</b> Здатність моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп'ютерах</p> <p><i>Програмні результати навчання (ПРН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p><b>РН04.</b> Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.</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>РН16.</b> Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень у галузі фізики та астрономії.</p> <p><b>РН19.</b> Проводити наукові дослідження в області квантової інформації.</p> <p><b>РН20.</b> Розв'язувати прикладні задачі з використанням квантових алгоритмів.</p>
<b>Ключові слова</b>	Квантовий комп'ютер, квантова перевага, квантовий алгоритм Quantum computer, quantum advantage, quantum algorithm
<b>Формат курсу</b>	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять і консультації для кращого розуміння тем
<b>Теми</b>	Наведено у таблиці 1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Підсумковий контроль: іспит в кінці семестру. Форма: усна.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань квантової

	механіки та класичного програмування, а також дисциплін “Класичне програмування” та “Квантові комп’ютери та квантові логічні елементи”.
<b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b>	Презентації, лекції, робота за комп’ютером.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп’ютер, загальноживані комп’ютерні програми й операційні системи, проектор, доступ до квантових комп’ютерів через інтернет.
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням: • робота на лабораторних заняттях під час семестру: 10% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 10 відповідно до такої шкали: 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 за двома змістовими модулями (по 20 балів): 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.</p> <p>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.</p> <p><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.</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 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 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.</p> <p>Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.</p>
<b>Питання до екзамену (чи питання на контрольні роботи)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Суперпозиція квантових станів та квантовий паралелізм. Квантова заплутаність.</li> <li>2. Квантовий оракул.</li> </ol>

	<p>3. Структурні елементи алгоритму Дойча.  4. Алгоритм Дойча-Джозси  5. Теоретичні основи алгоритму Берштейна-Вазірані та квантова перевага  6. Оператор Гровера та його властивості.  7. Точність пошуку Гровера.  8. Алгоритм для реалізації квантового перетворення Фур'є за допомогою квантових обчислень.  9. Оцінка фази за допомогою квантових обчислень  10. Алгоритм підсилення амплітуди квантового стану.  11. Алгоритм Шора</p> <p>1. Quantum Superposition and Quantum Parallelism. Quantum Entanglement.  2. Quantum Oracle.  3. Structural Elements of the Deutsch Algorithm.  4. Deutsch-Jozsa Algorithm.  5. Theoretical Foundations of the Bernstein-Vazirani Algorithm and Quantum Advantage.  6. Grover's Operator and its Properties.  7. Grover's Search Accuracy.  8. Algorithm for Implementing Quantum Fourier Transform Using Quantum Computations.  9. Phase Estimation Using Quantum Computations.  10. Amplitude Amplification Algorithm for Quantum States.  11. Shor's Algorithm.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу «Квантові алгоритми та квантова перевага»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	Тема 1. Вступ. Особливості квантових обчислень, які дозволяють досягнути квантову перевагу. Суперпозиція квантових станів та квантовий паралелізм. Квантова запутаність. Introduction. Features of Quantum Computing Enabling Quantum Supremacy. Quantum Superposition and Quantum Parallelism. Quantum Entanglement. Література [Б1-Б3]	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 10 год.	2 тижні
3–4	Тема 2. Алгоритм Дойча-Джозси. Визначення типу функції (збалансована, стала) за допомогою класичного алгоритму. Квантовий оракул. Структурні елементи алгоритму Дойча. Задача Дойча-Джозси та її розв'язання на квантовому комп'ютері. Deutsch-Jozsa Algorithm. Determining the type of function (balanced or constant) using a classical algorithm. Quantum Oracle. Structural elements of the Deutsch algorithm. The Deutsch-Jozsa problem and its solution on a quantum computer.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	Література [Б1-Б3]		
5–6	Тема 3. Алгоритм Берштейна-Вазірані. Розв’язання задачі Берштейна-Вазірані за допомогою класичного програмування. Теоретичні основи алгоритму Берштейна-Вазірані та квантова перевага Bernstein-Vazirani Algorithm. Solving the Bernstein-Vazirani problem using classical programming. Theoretical foundations of the Bernstein-Vazirani algorithm and quantum advantage. Література [Б1-Б3]	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні
7–8	Тема 4. Алгоритм Гровера Формулювання задачі Гровера. Оператор Гровера та його властивості. Точність пошуку Гровера. Grover's Algorithm. Statement of Grover's problem. Grover's Operator and its properties. Accuracy of Grover's search. Література [Б1-Б3]	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. Контрольна робота – 2 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні
9–10	Тема 5. Квантове перетворення Фур’є. Теоретичні основи квантового перетворення Фур’є. Алгоритм для реалізації квантового перетворення Фур’є за допомогою квантових обчислень. Quantum Fourier Transform. Theoretical foundations of the quantum Fourier transform. Algorithm for implementing the quantum Fourier transform using quantum computations. Література [Б1-Б3, Д1, Д2]	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні
11–12	Тема 6. Квантовий алгоритм оцінки фази. Теоретичні основи алгоритму. Оцінка фази за допомогою квантових обчислень Quantum Phase Estimation Algorithm. Theoretical foundations of the algorithm. Phase estimation using quantum computations. [Б1-Б3, Д1, Д2]	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні
13–14	Тема 7. Алгоритм підсилення амплітуди квантового стану. Теоретичні основи та структура алгоритму. Реалізація алгоритму на квантовому ком’ютері. Amplitude Amplification Algorithm for Quantum States. Theoretical foundations and structure of the algorithm. Implementation of the algorithm on a quantum computer. [Б1-Б3, Д1, Д2]	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год., самостійна робота — 11 год.	2 тижні
15–16	Тема 8. Алгоритм Шора. Задача факторизації. Структура алгоритму та квантова перевага. Shor's Algorithm. Factorization problem. Structure	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. Контрольна робота – 2 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	of the algorithm and quantum advantage. [Б1-Б3]		