

**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 «Квантова інформація»,**  
**що викладається в межах**  
**ОНП «Теоретична фізика та астрофізика»**  
**другого (магістерського) рівня вищої освіти**  
**для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія**

**Львів 2023**

<b>Назва дисципліни</b>	Квантова інформація
<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>	Галузь знань — 10 Природничі науки Спеціальність — 104 Фізика та астрономія
<b>Викладач дисципліни</b>	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н., доц. Стецко Микола Миколайович
<b>Контактна інформація викладача</b>	<a href="mailto:mykola.stetsko@lnu.edu.ua">mykola.stetsko@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/stetsko-m-m">https://physics.lnu.edu.ua/employee/stetsko-m-m</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/course/kvantova-informatsija-104-tfa">https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantova-informatsija-104-tfa</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантова інформація» належить до обов'язкового компонента освітньо-наукової програми «Теоретична фізика та астрофізика» спеціальності 104 Фізика та астрономія другого (магістерського) рівня вищої освіти. Її викладають у II семестрі в обсязі 4,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Дисципліна «Квантова інформація» присвячена вивченню сучасних проблем та задач квантової інформації та квантового програмування. Розглядаються міра квантової інформації, її зв'язок з заплутаністю квантових станів, особливості квантових обчислень.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою даної дисципліни є одержання студентами знань основ квантової інформації та квантових обчислень. Завданням курсу є формування в студентів знань та умінь розв'язання основних задач квантової інформації (обчислення міри інформації, заплутаності квантових станів, приготування квантових станів на квантовому комп'ютері).
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. Крохмальський Т. Є., <i>Вступ до квантових обчислень</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. 204 с. 2. Ткачук В. М., <i>Фундаментальні проблеми квантової механіки</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 144 с. 3. Rieffel E., Polak W., <i>Quantum Computing: A Gentle Introduction</i> . The MIT Press, Cambridge, MA, 2011. 372 p. 4. Barnett S. M., <i>Quantum Information</i> . Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 2009. 300 p. 5. Nielsen M. A., Chuang I. L., <i>Quantum Computation and Quantum Information</i> . Cambridge Univ. Press, UK, 2010. 710 p. <b>Допоміжна:</b> 1 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. Article 522. 2 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. Article 128434.  Додаткові матеріали також буде запропоновано для кожної теми окремо.

	<p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><a href="https://scholar.google.com/scholar?hl=en&amp;as_sdt=0%2C5&amp;q=quantum+in+formation+computation&amp;btnG=">https://scholar.google.com/scholar?hl=en&amp;as_sdt=0%2C5&amp;q=quantum+in+formation+computation&amp;btnG=</a></li> <li><a href="https://arxiv.org/">https://arxiv.org/</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	135 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 години лабораторних занять, та 103 години самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>В результаті вивчення даного курсу студенти повинні <b>знати:</b> основні сучасні задачі квантової інформації <b>вміти:</b> розв'язувати задачі квантової інформації та квантового програмування.</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <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><i>Програмні результати навчання (РН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p>РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної та експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.</p> <p>РН02. 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>РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</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. Відшуковувати 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>РН13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природ-</p>

	них об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.
<b>Ключові слова</b>	Квантовий комп'ютер, ентропія Шенона, ентропія фон Неймана, заплутаність квантових станів
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Наведено у таблиці 1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Підсумковий контроль: екзамен в кінці семестру. Форма: усна.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань квантової механіки та дисципліни «Фундаментальні проблеми квантової механіки»
<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:</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: <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — активна участь у 7–8 заняттях;</li> <li>7–8 — активна участь у 5–6 заняттях;</li> <li>5–6 — активна участь у 3–4 заняттях;</li> <li>1–4 — активна участь у 1–2 заняттях;</li> <li>0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</li> </ul> </li> <li>• підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 10 балів): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20;</li> <li>• розширена доповідь (або декілька доповідей) на лабораторних заняттях за тематикою курсу (усереднена оцінка): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>16–20 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>11–15 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>6–10 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–5 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — доповіді не було.</li> </ul> </li> </ul> <p>Максимальна семестрова кількість балів — 50.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50: два розширених завдання по 25 балів кожне відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>21–25 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>16–20 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>11–15 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–10 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — відповідь відсутня.</li> </ul> </li> </ul> <p>Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.</p> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p><b>Академічна доброчесність</b> здобувачами вищої освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання. Списування, втручання в</p>

	<p>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 лабораторних 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><b>Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.</b></p>
<p><b>Питання до екзамену</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Міра класичної інформації. Ентропія Шенона.</li> <li>2. Властивості ентропії Шенона.</li> <li>3. Міра квантової інформації. Ентропія фон Неймана.</li> <li>4. Властивості ентропії фон Неймана.</li> <li>5. Квантовий біт. Стани квантового біта. Сфера Блоха.</li> <li>6. Операції над станом квантового біта.</li> <li>7. Основні гейти, які використовуються у квантовому програмуванні.</li> <li>8. Стани систем кубітів. Двокубітні оператори.</li> <li>9. Приготування квантових станів.</li> <li>10. Вимірювання в стандартному базисі. Обробка результатів квантових обчислень.</li> <li>11. Заплутаність квантових станів та її використання у квантових обчисленнях.</li> <li>12. Геометрична міра заплутаності.</li> <li>13. Задача Дойча–Джозси. Квантова перевага.</li> <li>14. Розв'язання задачі аналітично та за допомогою квантових обчислень</li> </ol>
<p><b>Опитування</b></p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

## Схема курсу «Квантова інформація» \*

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Змістовий модуль 1</b>			
1–2	<b>Тема 1. Вступ. Міра класичної інформації.</b> Ентропія Шенона. Властивості ентропії Шенона. <b>Література:</b> Б3, Б4, Б5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 12 год.	2 тижні
3–4	<b>Тема 2. Міра квантової інформації.</b> Ентропія фон Неймана. Властивості ентропії фон Неймана. <b>Література:</b> Б3, Б4, Б5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 14 год.	2 тижні
5–6	<b>Тема 3. Квантовий біт.</b> Стани квантового біта. Сфера Блоха. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 год.	2 тижні
7–8	<b>Тема 4. Операції над станом квантового біта.</b> Основні гейти, які використовуються у квантовому програмуванні. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 14 год.	2 тижні
<b>Змістовий модуль 2</b>			
9–10	<b>Тема 5. Стани систем кубітів.</b> Двокубітні оператори. Приготування квантових станів <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 14 год.	2 тижні
11–12	<b>Тема 6. Вимірювання в стандартному базисі.</b> Обробка результатів квантових обчислень. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5, Д1	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 12 год.	2 тижні
13–14	<b>Тема 7. Заплутаність квантових станів.</b> Використання заплутаності у квантових обчисленнях. Геометрична міра заплутаності. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5, Д1, Д2	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
15–16	<b>Тема 8. Квантова перевага.</b> Задача Дойча–Джозси. Розв’язання задачі аналітично та за допомогою квантових обчислень. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4, Б5, Д1, Д2	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 14 год.	2 тижні

\* Поклики на літературу подано відповідно до переліку базової (Б) та допоміжної (Д) літератури.