

**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. В. М. Ткачук

**Силабус**  
**з навчальної дисципліни «Квантові графи та мережі**  
**(Quantum graphs and networks)»,**  
**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 графи та мережі (Quantum graphs and networks)
<b>Адреса викладання курсу</b>	вул. Драгоманова, 12, 79005, 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>Викладачі курсу</b>	Завідувач кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука д.фіз.-мат. н., проф. Ткачук Володимир Михайлович
<b>Контактна інформація викладачів</b>	volodymyr.tkachuk@lnu.edu.ua <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/tkachuk-volodymyr-myhajlovych">https://physics.lnu.edu.ua/employee/tkachuk-volodymyr-myhajlovych</a>
<b>Консультації по 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 Microsoft Teams.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43549&amp;preview=true">https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&amp;p=43549&amp;preview=true</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантові графи та мережі» («Quantum graphs and networks») є нормативною навчальною дисципліною, яка розрахована студентів I курсу (магістр), що навчаються за спеціальністю – 104 Фізика та астрономія. Її викладають у II семестрі загальним обсягом 3 кредити (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	В курсі представлені основи квантових графів та мереж. Також робочою програмою курсу передбачено лабораторні заняття, які включають всі основні положення курсу. У курсі подано основні означення класичних та квантових графів та мереж. Розглянуто поведінку квантових частинок на графах. Досліджено енергетичні рівні частинки на графі та розглянуто задачу тунелювання та розсіяння на графі. Уведено поняття квантових графових станів та встановлено зв'язок їх властивостей з властивостями класичних графів.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою цієї дисципліни є вивчення основ квантових графів та мереж. Навчити студентів самостійно виконувати дослідження, пов'язані з класичними та квантовими графами та мережами.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова</b> 1. В. М. Ткачук. Фундаментальні проблеми квантової механіки. Текст лекцій. ЛНУ. імені Івана Франка, 2010. 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.— Art. 128434.— 6 p.  Допоміжна 3. Gnatenko Kh. P., Tkachuk V. M. Entanglement of graph states of spin system with Ising interaction and its quantifying on IBM's quantum computer // Phys. Lett. A.— 2021.— Vol. 396.— Art. 127248. Наукові статті за тематикою спецкурсу. Інформаційні ресурси 4. Wikipedia. <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр

<b>Обсяг курсу</b>	90 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 год лекційних занять, 16 год лабораторних занять та 58 год самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Після завершення цього курсу студент буде :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>знати</b> основні поняття та методи, викладені у програмі курсу.</li> <li>- <b>вміти</b> застосовувати знання квантової механіки та квантової інформації для дослідження квантових графів і мереж.</li> </ul> <p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p><b>ЗК02.</b> Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p><b>ЗК05.</b> Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.</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>СК10.</b> Здатність створювати квантові протоколи та реалізовувати їх на квантових комп'ютерах.</p> <p><b>СК11.</b> Здатність розв'язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень</p> <p>Програмні <i>результати навчання</i> (РН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</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>РН07.</b> Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді.</p> <p><b>РН09.</b> Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись з колегами.</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>РН13.</b> Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.</p> <p><b>РН18.</b> Застосовувати теоретичні знання в області квантової інформації для розв'язання задач на квантових комп'ютерах.</p>
<b>Ключові слова</b>	квантові графи, мережі, квантові графові стани, рівняння Шредингера, гіперграфові стани. quantum graphs, networks, quantum graph states, Schrödinger equation, hypergraph states.
<b>Формат курсу</b>	очний
	проведення лекцій, лабораторних занять та консультацій для кращого розуміння тем

<b>Теми</b>	наведено у табл.1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	залік в кінці семестру
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення дисципліни необхідні ґрунтовні знання математичного аналізу, векторного аналізу, диференціальних рівняння, квантової механіки, зокрема з дисциплін “Фундаментальні проблеми квантової механіки” та “Класична та квантова інформація”.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	а) <i>словесні</i> – лекція, пояснення, бесіда; б) <i>наочні</i> – ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками; в) <i>практичні</i> – виконання лабораторних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань, перевірки певних наукових гіпотез на рівні досліджень, узагальнень та аналізу та формування вмінь і навичок інтерпретації результатів досліджень різноманітних об’єктів.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп’ютер, доступ до Інтернету
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	У графі оцінювання для заліків можна писати так Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням: • робота на лабораторних заняттях під час семестру: 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40 відповідно до такої шкали: 31–40 — активна участь у 7–8 заняттях; 21–30 — активна участь у 5–6 заняттях; 11–20 — активна участь у 3–4 заняттях; 1–10 — активна участь у 1–2 заняттях; 0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях; • підсумкова контрольна робота: 60% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 60; (10 завдань по 6 балів, де 6 балів — завдання зроблене повністю, 4-5 --рівень виконання завдання достатній, 3 — рівень виконання завдання задовільний, 1-2 — зроблено перші кроки розв'язання завдання, 0 — нічого не зроблено). Підсумкова максимальна кількість балів — 100. <b>Письмові роботи:</b> Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (тестування, письмова частина іспиту). <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 лабораторні 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

	<p>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 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>1. Basic definitions of graphs and networks.</li> <li>2. Adjacency matrix. Node degree. Complete graph.</li> <li>3. Graph dimensionality.</li> <li>4. Definition of quantum graphs. A quantum particle on a graph.</li> <li>5. Boundary conditions for wave function of a particle on a graph.</li> <li>6. Energy levels of particles on the graph. The simplest examples.</li> <li>7. The problem of tunneling on a graph. Tunneling and reflection coefficient from a graph node.</li> <li>8. Quantum graph states with discrete degrees of freedom (spin, quantum bit).</li> <li>9. Generation of graph quantum states using the evolution operator.</li> <li>10. Geometric characteristics of classical graphs (number of connections, number of triangles and quadrilaterals in the graph).</li> <li>11. The relationship between the geometric characteristics of classical graphs and the properties of quantum graph states.</li> <li>12. Entanglement in quantum graph states.</li> <li>13. Entanglement of one quantum bit with others in a quantum graph state.</li> <li>14. Hypergraph quantum states.</li> <li>15. Generation of hypergraph quantum states with the high order interactions.</li> <li>16. Entanglement in hypergraph states.</li> <li>17. Hypergraph states with continuous degrees of freedom. A system of oscillators as an example of hypergraph quantum states.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Основні означення графів та мереж.</li> <li>2. Матриця суміжності. Ступінь вузла. Повний граф.</li> <li>3. Вимірність графа.</li> <li>4. Означення квантових графів. Квантова частинка на графі.</li> <li>5. Умови зшивання хвильової функції частинки на графі.</li> <li>6. Енергетичні рівні частинки на графі. Найпростіші приклади.</li> <li>7. Задача тунелювання на графі. Коефіцієнт тунелювання та відбивання від вузла графа.</li> <li>8. Квантові графові стани з дискретними ступенями вільності (спін, квантовий біт).</li> <li>9. Генерування графових квантових станів за допомогою оператора еволюції.</li> <li>10. Геометричні характеристики класичних графів (кількість зв'язків, кількість трикутників та чотирикутників у графі).</li> </ol>

	<p>11. Зв'язок геометричних характеристик класичних графів з властивостями квантових графових станів.</p> <p>12. Заплутаність у квантових графових станах.</p> <p>13. Заплутаність одного квантового біту з іншими у квантовому графовому стані.</p> <p>14. Гіперграфові квантові стани.</p> <p>15. Генерування гіперграфових квантових станів з допомогою <math>n</math>-частинкових взаємодій.</p> <p>16. Заплутаність у гіперграфових станах.</p> <p>17. Гіперграфові стани з неперервними ступенями вільності. Система осциляторів як приклад гіперграфових квантових станів.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу “Квантові графи та мережі”

Тиждень	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	Тема 1. Вступ. Історія. Основні означення графів та мереж. Introduction. History. Basic definitions of graphs and networks. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год	2 тижня
3–4	Тема 2. Квантові графи. Квантова частинка на графі. Quantum graphs. A quantum particle on a graph. [2,4]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
5–6	Тема 3. Енергетичні рівні частинки на графі. Energy levels of particles on the graph. [4]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
7–8	Тема 4. Задача розсіяння і тунелювання на графі. The problem of scattering and tunneling on a graph. [2,4].	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
9–10	Тема 5. Квантові графові стани з дискретними ступенями вільності. Гіперграфові квантові стани. Quantum graph states with discrete degrees of freedom. Hypergraph quantum states [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
11–12	Тема 6. Заплутаність квантових графових станів. Entanglement in quantum graph states. [1,3]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 7 год	2 тижня
13–14	Тема 7. Зв'язок геометричних	лекції – 2 год,	2 тижня

	<p>характеристик класичних графів з властивостями квантових графових станів.          Connection of geometric characteristics of classical graphs with properties of quantum graph states. [1,2]</p>	<p>лаб. заняття – 2 год,          самостійна робота – 7 год</p>	
15–16	<p>Тема 8. Квантові графові стани з неперервним ступенями вільності.          Quantum graph states with continuous degrees of freedom. [1,2]</p>	<p>лекції – 2 год,          лаб. заняття – 2 год,          самостійна робота – 8 год</p>	2 тижня