

**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 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри  проф. В. М. Ткачук

**Силабус**  
**з навчальної дисципліни «Класична та квантова інформація**  
**(Classical and quantum information)»,**  
**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>	Класична та квантова інформація (Classical and quantum information)
<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/course/klasychna-ta-kva...e-prohramuvannia">https://physics.lnu.edu.ua/course/klasychna-ta-kva...e-prohramuvannia</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Класична та квантова інформація» («Classical and quantum information») є нормативною навчальною дисципліною, яка розрахована студентів I курсу (магістр), що навчаються за спеціальністю – 104 Фізика та астрономія. Її викладають у I семестрі загальним обсягом 4 кредити (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	В курсі представлені основи класичної та квантової інформації. Дано означення ентропії Шенона, які міри класичної інформації. Представлено властивості ентропії Шенона. Уведено поняття ентропій фон Неймана, що є аналогом ентропії Шенона на квантовий випадок. Розглянуто властивості ентропій фон Неймана та її зв'язок з ентропією Шенона. Встановлено зв'язок ентропії та міри заплутаності квантових станів. Також робочою програмою курсу передбачено лабораторні заняття, які включають всі основні розділи курсу.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою цієї дисципліни є вивчення основ класичної та квантової інформації. Навчити студентів самостійно виконувати розрахунки, необхідні для розв'язування задач, пов'язаних з інформаційними процесами в класичному та квантовому випадках.
<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. E. Witten. La Rivista del Nuovo Cimento <b>43</b> , 187–227 (2020). Інші наукові статті за тематикою спецкурсу. <b>Допоміжна</b> 3. І. О. Вакарчук, Квантова механіка (вид. 4-е, доп.). Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с. (Розділ XII. Основи квантової інформації.) Інші наукові статті за тематикою спецкурсу. <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>	120 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 год лекційних занять, 16 год лабораторних занять та 88 год самостійної роботи.

<p><b>Очікувані результати навчання</b></p>	<p>Після завершення цього курсу студент буде :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>знати</b> основні поняття та рівняння предмету викладені у програмі курсу.</li> <li>- <b>вміти</b> застосовувати отримані знання для розв'язування задач, пов'язаних з інформаційними процесами в класичному і квантовому випадках.</li> </ul> <p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p><b>ЗК03.</b> Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p><b>ЗК04.</b> Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.</p> <p><b>ЗК05.</b> Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.</p> <p><b>ЗК06.</b> Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p><b>СК04.</b> Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень у галузі фізики та/або астрономії.</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>РН01.</b> 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><b>РН04.</b> Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.</p> <p><b>РН05.</b> Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</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>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> Розв'язувати задачі квантової інформації аналітично та за допомогою квантових обчислень</p>
<p><b>Ключові слова</b></p>	<p>класичний біт, квантовий біт, ентропія Шенона, ентропія фон Неймана, чисті стани, змішані стани, заплутаність квантових станів.  classical bit, quantum bit, Shannon entropy, von Neumann entropy, pure states, mixed states, entanglement of quantum states.</p>

<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 знання з таких розділів математики і фізики: математичний аналіз, лінійна алгебра, векторний аналіз, квантова механіка, теорія імовірностей і математична статистика.
<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 вмій 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>	<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: 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;</li> <li>• 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).</li> </ul> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p><b>Письмові роботи:</b> Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (тестування, письмова частина іспиту).</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 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.</p> <p><b>Література.</b> Усю література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без</p>

	<p>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>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Питання на контрольні роботи</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Classic bit. Shannon entropy.</li> <li>2. Shannon entropy properties.</li> <li>3. Information measure of a classic message, which consists of bits.</li> <li>4. Amount of information per one bit.</li> <li>5. Quantum bit. A quantum message.</li> <li>6. A mixed ensemble of states that describes a quantum message.</li> <li>7. Von Neumann entropy.</li> <li>8. Von Neumann entropy for one bit.</li> <li>9. The relationship between the Shannon entropy and the von Neumann entropy.</li> <li>10. Invariance of von Neumann entropy with respect to unitary transformations.</li> <li>11. Evolution as an example of unitary transformation. Time-independence of the von Neumann entropy for time-independent Hamiltonians.</li> <li>12. Von Neumann entropy of subsystems of a pure ensemble of states.</li> <li>13. Entropy as a measure of entanglement of two subsystems of a pure quantum state.</li> <li>14. Schmidt decomposition.</li> <li>15. Comparison of various measures of entanglement of quantum states.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Класичний біт. Ентропія Шенона.</li> <li>2. Властивості ентропії Шенона.</li> <li>3. Міра інформації класичного повідомлення, яке складається з бітів.</li> <li>4. Кількість інформації на один біт.</li> <li>5. Квантовий біт. Квантове повідомлення.</li> <li>6. Змішаний ансамбль станів, який описує квантове повідомлення.</li> <li>7. Ентропія фон Неймана.</li> <li>8. Ентропія фон Неймана на один біт.</li> <li>9. Зв'язок ентропії Шенона і ентропії фон Неймана.</li> <li>10. Інваріантність ентропії фон Неймана відносно унітарних перетворень.</li> <li>11. Еволюція, як приклад унітарного перетворення. Незалежність ентропії фон Неймана від часу для гамільтоніанів, що не залежать від часу.</li> <li>12. Ентропія фон Неймана підсистем чистого ансамблю станів.</li> </ol>

	<p>13. Ентропія як міра заплутаності двох підсистем чистого квантового стану.</p> <p>14. Розклад Шмідта.</p> <p>15. Порівняння різних мір заплутаностей квантових станів.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу “Класична та квантова інформація”

Тиждень	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	Тема 1. Вступ. Класичний біт. Ентропія Шенона. Introduction. Classic bit. Shannon entropy. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
3–4	Тема 2. Властивості ентропії Шенона. Shannon entropy properties. [2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
5–6	Тема 3. Квантовий біт. Ентропія фон Неймана. Quantum bit. Von Neumann entropy. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
7–8	Тема 4. Зв’язок ентропії Шенона і ентропії фон Неймана. The relationship between the Shannon entropy and the von Neumann entropy. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
9–10	Тема 5. Властивості ентропії фон Неймана. Properties of von Neumann entropy [2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
11–12	Тема 6. Ентропія фон Неймана і заплутаність квантових станів. Von Neumann entropy and entanglement of quantum states. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
13–14	Тема 7. Порівняння різних мір означень заплутаностей квантових станів. Comparison of different measures of quantum state entanglement. [1]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня
15–16	Тема 8. Зв’язок інформаційної ентропії з термодинамічною ентропією. The relationship between information entropy and thermodynamic entropy. [1,2]	лекції – 2 год, лаб. заняття – 2 год, самостійна робота – 11 год	2 тижня