

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 телепортація
(Quantum teleportation)»,
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

Назва дисципліни	Квантова телепортація (Quantum teleportation)
Адреса викладання дисципліни	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань – 10 Природничі науки. Спеціальність – 104 Фізика та астрономія
Викладач дисципліни	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н, доц. Кузьмак Андрій Романович
Контактна інформація викладачів	andrij.kuzmak@lnu.edu.ua
Консультації з курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Zoom, Microsoft Teams.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/?post_type=course&p=43559&preview=true
Інформація про дисципліну	Курс «Квантова телепортація» («Quantum teleportation») належить до вибіркової навчальної дисципліни спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Його викладають студентам освітньо-наукової програми «Квантові комп'ютери та квантове програмування» у I та II семестрі із обсягом 3.5 кредити (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб ознайомити студентів із поняттям квантової нелокальності, квантовими кореляціями між частинками і їхнім використанням для реалізації квантових каналів у квантових комунікаціях.
Мета та цілі дисципліни	Метою і завданням навчальної дисципліни «Квантова телепортація» є ознайомлення студентів із ЕПР парадоксом, квантовою заплутаністю, нерівностями Белла, із використанням квантових кореляцій для реалізації квантових схем квантової телепортації.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. <i>Ch. H. Bennet, G. Brassard, C. Crepeau</i> . Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 70 , 1895 (1993). 2. <i>D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, S. Popescu</i> . Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 80 , 1121 (1998). 3. <i>3. X.-M. Hu et al.</i> Experimental High-Dimensional Quantum Teleportation. <i>Phys. Rev Lett.</i> 125 , 230501 (2020). Допоміжна: 4. <i>В. М. Ткачук</i> . Фундаментальні проблеми квантової механіки. Л.: «ЛНУ імені Івана Франка», 2011, 144 с. Інформаційні ресурси Wikipedia. http://www.wikipedia.org
Тривалість курсу	два семестри
Обсяг курсу	105 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 32 годин лекцій, та 73 години самостійної роботи. Тижневе навантаження складає 1 годин аудиторних занять та 2,3 години самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):

	<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>ЗК06. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></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>СК10. Здатність створювати квантові протоколи та реалізовувати їх на квантових комп'ютерах.</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>РН07. Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді.</p> <p>РН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись з колегами.</p> <p>РН12. 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>РН17. Розробляти та використовувати квантові алгоритми для дослідження властивостей фізичних систем.</p> <p>РН20. Розв'язувати прикладні задачі з використанням квантових алгоритмів.</p>
Ключові слова	Квантова запутаність, квантові кореляції, квантові комунікації, квантова телепортація. Quantum entanglement, quantum correlations, quantum communications, quantum teleportation.
Формат курсу	Очний
	проведення лекцій та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Наведено у таблиці 1
Підсумковий контроль, форма	Заліки в кінці 1-го і 2-го семестрів.
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують ґрунтовних знань із дисциплін загальної фізики та вищої математики. Насамперед з квантової механіки, математичного аналізу, лінійної алгебри, диференціальних рівнянь.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Презентація, лекції, дискусія, розв'язок задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та графіками.
Необхідне обладнання	Дошка і крейда, персональний комп'ютер, проєктор
Критерії оцінювання	В кінці кожного семестру є залік.

<p>(окремо для кожного виду навчальної діяльності)</p>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою вкінці семестру. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • підсумкова контрольна: 100% сумарної оцінки; <p>Контрольна містить 10 завдань. Кожне завдання оцінюється в 10 балів: 10 — відповідь розлога і правильна на завдання; 5 — відповідь частково правильна на завдання; 0 — неправильна відповідь на завдання; максимальна кількість балів — 100; 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>Академічна доброчесність: Очікується, що роботи студентів будуть їх оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p> <p>Відвідання занять 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 письмових робіт, передбачених курсом.</p> <p>Література. 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 такої й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані на практичних заняттях, самостійній роботі, поточному тестуванні та підсумковому іспиті. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студентів під час практичного 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. Підсумковий іспит відбувається у відкритій формі з вільним доступом до будь-яких джерел інформації під час письмової частини.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання на контрольні роботи</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. N-qubit systems. Singlet state. 2. EPR paradox. 3. Non-cloning theorem. 4. Scheme of teleportation of one qubit. 5. Methods of preparing the maximal entangled state two qubits. 6. Experimental implementation of teleportation of one qubit. 7. Definition of multipartate nonlocality. 8. Multi-particle correlations. 9. Quantum teleportation of multilevel quantum systems. <ol style="list-style-type: none"> 1. N-кубітні системи. Синглетний стан. 2. Парадокс ЕПР. 3. Теорема про неклонування. 4. Схема телепортації одного кубіта.

	<p>5. Способи приготування максимально заплутаного стану двох кубіта.</p> <p>6. Експериментальна реалізація телепортації одного кубіта.</p> <p>7. Означення багаточатинкової нелокальності.</p> <p>8. Багаточатинкові кореляції.</p> <p>9. Квантова телепортація багаторівневих квантових систем.</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Квантова телепортація»

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1 семестр			
1–2	Дворівневі квантові системи (кубіт). N-кубітні системи. Синглетний стан. Two-level quantum systems (qubit). N-qubit systems. Singlet state. [4]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 2 год	2 тижня
3–4	Історія виникнення парадоксу Ейнштейна-Подольського-Розена (ЕПР). Парадокс ЕПР. The history of the Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) paradox. EPR paradox. [4]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 9 год	2 тижня
5–8	Теорема про неклонування та неможливість миттєвої передачі інформації. Схема телепортації одного кубіта. Non-cloning theorem. Scheme of teleportation of one qubit. [1,4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 8 год	4 тижня
9–12	Способи приготування максимально заплутаного стану двох кубіта. Нелінійні кристали. Methods of preparing the maximally entangled state of two qubits. Nonlinear crystals. [4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 5 год	4 тижня
13–16	Експериментальна реалізація телепортації одного кубіта. Experimental implementation of teleportation of one qubit. [2]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 5 год	4 тижня
2 семестр			
1–2	Реалізація телепортації одного кубіта на квантовому комп'ютері. Implementation of teleportation of one qubit on a quantum computer. [2]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижня
3–4	Означення багаточатинкової нелокальності. Багаточатинкові кореляції. Definition of multipartite nonlocality. Multiparticle correlations. [4]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижня
5–8	Нелокальність багаточастинкових квантових станів. Стан Ґрінберга-Горне-Цайлінґера (GHZ стан). GHZ рівність. Nonlocality of multiparticle quantum states. Greenberg-Horne-Zeilinger state (GHZ state). GHZ equality. [4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 10 год	4 тижня

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
9–12	Нелокальність у стані Вернера. Нелокальність у графовому стані. Nonlocality in the Werner state. Nonlocality in the graph state. [4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 12 год	4 тижня
13–16	Квантова телепортація багаторівневих квантових систем. Квантова телепортація N-кубітів. Квантова телепортація багаточастинкових систем. Quantum teleportation of multilevel quantum systems. Quantum teleportation of N-qubits. Quantum teleportation of multiparticle systems. [3]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 10 год	4 тижня