

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  професор В. М. Ткачук

Силабус
з навчальної дисципліни «Нерівності Белла (Bell inequalities)»,
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	Нерівності Белла (Bell inequalities)
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/course/nerivnosti-bella...e-prohramuvannia
Інформація про дисципліну	Курс «Нерівності Белла» («Bell inequalities») 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 «Нерівності Белла» («Bell inequalities») є ознайомлення студентів із ЕПР парадоксом, квантовою заплутаністю, нерівностями Белла.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. N. Brunner, D. Cavalcanti, S. Pironio, V. Scarani, S. Wehner. Bell nonlocality. Rev. Mod. Phys. 86 , 419 (2014). 2. Rau, Jochen, Quantum theory: an information processing approach. Oxford University Press (2020). Допоміжна: 3. 7. M. Żukowski, Č. Brukner. Bell's Theorem for General N-Qubit States. Phys. Rev Lett. 88 , 210401 (2002). 4. В. М. Ткачук. 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): <i>Загальні компетентності:</i> ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

	<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	ЕПР парадокс, нерівності Белла, квантова запутаність, квантові кореляції, квантова нелокальність. EPR paradoxes, Bell's inequalities, quantum entanglement, quantum correlations, quantum nonlocality.
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, проектор
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	В кінці кожного семестру є залік. Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою в кінці семестру. Бали нараховуються за таким співвідношенням: • 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. Bell's inequalities. 5. Configurations of vectors for Bell's inequalities. 6. Verification of Bell's inequalities on a quantum computer. 7. Definition of multipartite nonlocality. 8. Multi-particle correlations. 9. Svetlychny's inequality. 10. Greenberg-Horne-Zeilinger state (GHZ state). <ol style="list-style-type: none"> 1. N-кубітні системи. Синглетний стан. 2. Парадокс ЕПР. 3. Теорема про неклонування. 4. Нерівності Белла. 5. Конфігурації векторів, при яких нерівності Белла порушуються максимально.

	6. Перевірка нерівностей Белла на квантовому комп'ютері. 7. Означення багаточатинкової нелокальності. 8. Багаточатинкові кореляції. 9. Нерівність Світличного. 10. Стан Грінберга-Горне-Цайлінгера (GHZ стан).
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Нерівності Белла»

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	Класичні та квантові кореляції. Сховані параметри. Нерівності Белла. Classical and quantum correlations. Hidden parameters. Bell's inequalities. [1,4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 8 год	4 тижня
9–12	Конфігурації векторів, при яких нерівності Белла порушуються максимально. Експерименти Аспекта. Configurations of vectors in which inequalities Bella is violated. Aspect experiments. [1,4]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 5 год	4 тижня
13–16	Перевірка нерівностей Белла на квантовому комп'ютері. Verification of Bell's inequalities on quantum computer [2]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 5 год	4 тижня
2 семестр			
1–2	Означення багаточатинкової нелокальності. Багаточатинкові кореляції. Definition of multicell nonlocality. Multiparticle correlations. [2]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижня
3–4	Означення багаточатинкової нелокальності. Багаточатинкові кореляції. Definition of multipartite nonlocality. Multiparticle correlations. [2]	Лекції — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижня
5–8	Нерівність Белла для загального стану N-кубітів. Bell's inequality for the general state of N- qubits. [3]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 10 год	4 тижня
9–12	Нерівність Світличного. Svitlychny's inequality. [2]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 12 год	4 тижня

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
13–16	Перевірка нерівностей Белла на різних багаточастинкових фізичних квантових системах. Verification of Bell's inequalities on different multiparticle physical quantum systems. [3]	Лекції — 4 год, самостійна робота — 10 год	4 тижня