

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. Ткачук В.М.

СИЛАБУС

**з навчальної дисципліни «Декогеренція квантових станів»,
що викладається в межах
ОПП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»
другого (магістерського) рівня вищої освіти
для здобувачів зі спеціальностей 104 «Фізика та астрономія»**

Львів 2023

Назва дисципліни	Декогеренція квантових станів
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	Лектор: Ігнатюк В.В., доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н., ст. наук. співр. Лабораторні заняття проводить: Ігнатюк В.В., доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к.ф.-м.н., ст. наук. співр.
Контактна інформація викладача	vasyl.ignatyuk@lnu.edu.ua , wignatyuk@gmail.com
Консультації з курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams, Telegram.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/dekoherentsiia-kvantovykh-staniv-104-fizyka-ta-astronomiia-op-kvantovi-komp-iutery-ta-kvantove-prohramuvannia
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Декогеренція квантових станів» є нормативною дисципліною для підготовки магістра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія», яка викладається в III семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Спеціальний курс «Декогеренція квантових станів» ознайомлює студентів з однойменним фізичним явищем, на яке слід звертати безумовну увагу як теоретикам, так і експериментаторам при моделюванні та розробці прототипів квантових комп'ютерів, проведенні квантових вимірювань, збереженні та передачі квантової інформації. Разом з процесами заплутування квантових станів явища декогеренції впливають на можливість детального опису квантових реєстрів та ефективність оптимізації втрат інформації. З цієї точки зору, навчальну дисципліну «Декогеренція квантових станів» слід розглядати як інтегральну складову решти спеціальних курсів, які викладаються магістрам в межах ОПП «Квантові комп'ютери та квантове програмування».
Мета та цілі дисципліни	Метою і завданням навчальної дисципліни «Декогеренція квантових станів» є ознайомлення студентів із різними можливостями теоретичного опису однойменного фізичного явища, а також з низкою експериментів з вивчення декогеренції (і зворотного ефекту – рекогеренції) для формування цілісної картини сприйняття фізичних явищ у мікросвіті та використання набутих знань у подальшій професійній діяльності.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. <i>І. О. Вакарчук</i> . Квантова механіка. — 4-те вид., доп. — Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. — 872 с. 2. <i>В. М. Ткачук</i> . Фундаментальні проблеми квантової механіки. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 144 с. 3. <i>Т. Є. Крохмальський</i> . Вступ до квантових обчислень. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2018. – 204 с. 4. <i>V. G. Morozov, S. Mathey and G. Röpke</i> . Decoherence in an exactly solvable qubit model with initial qubit-environment correlations. – Physical

	<p>Review A 85, 022101 (2012).</p> <p>5. V. V. <i>Ignatyuk</i>, V. G. <i>Morozov</i>. Enhancement of coherence in qubits due to interaction with the environment. – Physical Review A 91, 052102 (2015).</p> <p>Допоміжна:</p> <p>1. H.-P. <i>Breuer and F. Petruccione</i>. The theory of open quantum systems. – Oxford University Press, New York, 2003. – 625 p.</p> <p>2. E.-M. <i>Laine, H.-P. Breuer, J. Piilo, C.-F. Li, G.-C. Guo</i>. Nonlocal memory effects in the dynamics of open quantum systems. – Physical Review Letters 108, 210402 (2012).</p> <p>3. C.-F. <i>Li, G.-C. Guo, J. Piilo</i>. Non-Markovian quantum dynamics: What is it good for? – Europhysics Letters 128, 30001 (2019).</p> <p>4. A. Z. <i>Chaudhry, J. Gong</i>. Amplification and suppression of system-bath-correlation effects in an open many-body system. – Physical Review A 87, 012129 (2013).</p> <p>5. D. Y. <i>Tan, A. Z. Chaudhry and J. Gong</i>. Optimization of the environment for generating entanglement and spin squeezing. – Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 48, 115505 (2015).</p>
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	90 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин лабораторних занять, та 58 годин самостійної роботи
Очікувані результати навчання	<p>В результаті вивчення даного курсу студенти повинні знати: фізичні причини, які обумовлюють декогеренцію квантових станів та умови, при яких можливі зворотні процеси – квантова рекогеренція.</p> <p>вміти: розв'язувати задачі квантової кінетики, пов'язані з моделлю з розфазуванням (в т.ч. задачі про заплутаність квантових станів), та орієнтуватись у проблематиці селективних та неселективних квантових вимірювань.</p> <p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК03. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p>ЗК04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.</p> <p>ЗК06. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.</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>СК03. Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям.</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>СК12. Здатність моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп'ютерах</p>

	<p>Програмні <i>результати навчання (РН)</i>, на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</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>РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об’єктів і процесів.</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>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>РН15. Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки, за результатами дослідження.</p> <p>РН19. Моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп’ютерах</p>
Ключові слова	Квантові стани, матриці Паулі, сфера Блоха, квантові вимірювання, відстані між квантовими станами, чистота квантового стану, заплутаність квантових станів, декогеренція, рекогеренція, вакуумна, теплова та кореляційна складові декогеренції, початкові стани та їх приготування, термостат, модель з розфазуванням, модель Джейнса-Каммінгса.
Формат курсу	Лекції – онлайн, лабораторні заняття – очний формат
Теми	Наведено у таблиці 1
Підсумковий контроль, форма	Іспит в кінці 3-го семестру.
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують ґрунтовних знань із низки дисциплін теоретичної фізики та вищої математики. Насамперед з квантової механіки, статистичної фізики, квантової статистики, математичного аналізу, лінійної алгебри, диференціальних рівнянь. А також дисциплін “Фундаментальні проблеми квантової механіки” та “Заплутані квантові стани та міра заплутаності”.
Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу	Презентація, лекції, дискусія, розв’язок задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу рисунками, схемами, графіками та фрагментами наукових робіт.
Необхідне обладнання	Персональний комп’ютер, проєктор
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • робота на лабораторних заняттях під час семестру: 10% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 10 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> 9–10 — активна участь у 7–8 заняттях; 7–8 — активна участь у 5–6 заняттях; 5–6 — активна участь у 3–4 заняттях; 1–4 — активна участь у 1–2 заняттях; 0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях; • підсумкова контрольна робота за двома змістовими модулями (по 20 балів): 40% сумарної оцінки;

	<p>максимальна кількість балів — 40; Максимальна семестрова кількість балів — 50. • іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50: два розширених завдання по 25 балів кожне відповідно до такої шкали: 21–25 — студент повністю володіє матеріалом; 16–20 — рівень володіння матеріалом достатній; 11–15 — рівень володіння матеріалом частковий; 1–10 — студент майже не володіє матеріалом; 0 — відповідь відсутня. Підсумкова максимальна кількість балів — 100. 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 лабораторні заняття. 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 (у паперовому або електронному вигляді) 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>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані на лабораторних заняттях, контрольній роботі та підсумковому іспиті. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студентів під час лабораторного 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.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання до іспиту</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поняття про спінову матрицю густини. 2. Визначення чистоти двостанової квантової системи за даною матрицею густини. 3. Матриці Паулі, їх властивості та комутаційні співвідношення. 4. Означення відстаней між квантовими станами. Розрахунок відстаней для різних квантових станів. 5. Сфера Блоха. 6. Система «спін у бозонному термостаті». Гамільтоніан спін-бозонної системи в моделі з розфазуванням. 7. Рівняння руху для операторів у моделі з розфазуванням.

	<p>8. Тотожність Вейля та розрахунок середніх значень від бозонних операторів.</p> <p>9. Означення узагальненої функції декогерентності. Її складові.</p> <p>10. Повна та часткова декогеренція квантової системи.</p> <p>11. Поняття про нескорельовані та скорельовані початкові стани як наслідок приготування квантової системи при $t=0$. Динаміка скорельованих станів.</p> <p>12. Еволюція ентропії кубіта.</p> <p>13. Селективні та неселективні вимірювання.</p> <p>14. Дуальні та недуальні вимірювання як передумови можливої рекогеренції квантової системи (зростання когерентності, індуковане взаємодією кубіта з його оточенням).</p> <p>15. Модель Джейнса-Каммінгса як приклад ще однієї точно розв'язуваної моделі спін-бозонних систем.</p> <p>16. Поняття про марківську та немарківську динаміку відкритих квантових систем.</p> <p>17. Кількісні та якісні характеристики немарковості (на прикладах теоретичних та експериментальних робіт).</p> <p>18. Матриці Паулі для системи двох кубітів.</p> <p>19. Побудова «доповненої» матриці густини як передумови визначення заплутаності квантових станів.</p> <p>20. Розрахунок коефіцієнта узгодженості квантових станів для двокубітної моделі з розфазуванням. Аналіз впливу повної/часткової декогеренції системи на динаміку квантової узгодженості.</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Декогеренція квантових станів»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
Змістовий модуль 1			
1–2	Тема 1. Чисті та змішані ансамблі. Чистота квантової системи. Поняття декогеренції та природа її виникнення. Деякі найпростіші приклади декогеренції квантових систем. Література: Б1-Б2*.	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 8 год.	2 тижні
3–4	Тема 2. Двостанові квантові системи. Квантові стани спіну $s=1/2$. Спінова матриця густини та сфера Блоха. Геометрія простору квантових станів. Відстань між квантовими станами, метрика двовимірного квантового простору. Література: Б1-Б2.	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні
5–6	Тема 3. Гамільтоніан системи «спін у бозонному термостаті» на прикладі моделі з розфазуванням. Рівняння руху для операторів спіну та фононів, їх розв'язок. Усереднення за термостатом. Література: Б2, Б4	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні
7–8	Тема 4. Поняття про спектральні вагові функції як один із способів опису дисипації. Узагальнені функції декогерентності (УФД). Скорельовані та	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	нескорельовані початкові стани. Кореляційна складова УФД та її вплив на динаміку системи. Часова динаміка УФД в залежності від різновиду взаємодії «кубіт-термостат». Література: Б4		

Змістовий модуль 2

9–10	<u>Тема 5.</u> Селективні та неселективні вимірювання. Дуальні та недуальні схеми. Скорельований початковий стан кубіта як результат квантового вимірювання. Дуальні вимірювання як передумови можливої рекогеренції кубіта. Література: Б3, Б5	Лекції - 2 год, лаб. заняття Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні
11–12	<u>Тема 6.</u> Модель Джейнса-Каммінгса як ще одна точна модель у квантовій кінетиці. Порівняння динаміки відкритої квантової системи, що описується моделлю Джейнса-Каммінгса, з даними на основі моделі з розфазуванням. Література: Б4, Д1	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні
13–14	<u>Тема 7.</u> Поняття про марківську та немарківську динаміку відкритої квантової системи. Різні критерії немарковості. Кільнісні та якісні характеристики немарковості у відкритих квантових системах: теорія та експеримент. Література: Д1-Д3	Лекції - 2 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 7 год.	2 тижні
15–16	<u>Тема 8.</u> Двокубітна модель з розфазуванням. Декогеренція/рекогеренція, зміна чистоти системи та квантової узгодженості (заплутаності) станів. Аналіз впливу повної/часткової декогеренції системи на динаміку квантової узгодженості. Література: Б2, Д4-Д5	Лекції - 1 год, лаб. заняття - 2, самостійна робота - 8 год., контрольна робота - 1 год.	2 тижні

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