

**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 «Квантова статистична механіка»,  
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>	Квантова статистична механіка
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 19, 79005, м. 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>Викладач дисципліни</b>	Стецько Микола Миколайович, доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к. ф.-м.н.
<b>Контактна інформація викладача</b>	mykola.stetsko@lnu.edu.ua; mstetsko@gmail.com
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams, Telegram.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantova-statystychna-mekh...e-prohramuvannia">https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantova-statystychna-mekh...e-prohramuvannia</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантова статистична мехніка» є нормативною дисципліною для підготовки магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, яка викладається в I семестрі в обсязі 4 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою даної дисципліни є оволодіння студентами базовими концепціями та методами квантової статистичної механіки Завданням курсу є формування в студентів знань про властивості багаточастинкових квантових систем, основні методи, які використовуються для розв'язання задач у квантовій статистичній механіці.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. R. Dick, <i>Advanced Quantum Mechanics</i>, Springer Nature, Switzerland, 2020. – 811 p.</li> <li>2. P. Coleman, <i>Introduction to Many-Body Physics</i>, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2015. – 796 p.</li> <li>3. A. Zagoskin, <i>Quantum Theory of Many-Body Systems: Techniques and Applications</i>, Springer Verlag, N.Y., 1998. – 228 p.</li> </ol> <b>Допоміжна:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 A. Atland, B. Simons, <i>Condensed Matter Field Theory</i>, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2010. – 770 p.</li> <li>2 G. D. Mahan, <i>Many-Particle Physics</i>, Plenum Publishers, N.Y., 2000. – 785 p.</li> <li>3 A. L. Fetter, J. D. Walecka, <i>Quantum Theory of Many-Particle Systems</i>, Mc-Graw-Hill, N.Y., 1971. – 615 p.</li> <li>4 І. В. Стасюк, Функції Гріна у квантовій статистиці твердих тіл, ЛНУ ім. І. Франка, Львів, 2013. – 392 с.</li> </ol> <p>Додаткові матеріали також буде запропоновано для кожної теми окремо.</p> <b>Інформаційні ресурс</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. <a href="https://arxiv.org">https://arxiv.org</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	120 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 години лабораторних занять, та 88 годин самостійної роботи.
<b>Очікувані результати</b>	В результаті вивчення даного курсу студенти повинні

<p><b>навчання</b></p>	<p><b>знати:</b> основні концепції та методи квантової статистичної механіки, зокрема вторинне квантування, функціональний інтеграл, методи функцій Гріна.</p> <p><b>вміти:</b> володіти методами, розглянутими у курсі та застосовувати їх до розв'язування задач квантової статистики.</p> <p><i>Загальні компетентності</i></p> <p><b>ЗК02.</b> Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p><b>ЗК03.</b> Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</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>СК05.</b> 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><b>СК08.</b> Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі у галузі фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси.</p> <p><b>СК12.</b> Здатність моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп'ютерах</p> <p><i>Програмні результати навчання (ПРН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></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>РН05.</b> Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</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>РН09.</b> Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись з колегами.</p> <p><b>РН10.</b> 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><b>РН19.</b> Моделювати фізичні системи та досліджувати їх властивості на квантових комп'ютерах</p>
<p><b>Ключові слова</b></p>	<p>Хвильова функція системи тотожних частинок, вторинне квантування, польові оператори, рівняння руху для польових операторів, модель Габбарда, двочасові функції Гріна, діаграмна техніка, Мацубарівські функції Гріна, надпровідність, модель БКШ</p>

<b>Формат курсу</b>	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять і консультації для кращого розуміння тем
<b>Теми</b>	Наведено у таблиці 1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Підсумковий контроль: екзамен в кінці семестру. Форма: усна.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань квантової механіки, термодинаміки і статистичної фізики, методів математичної фізики.
<b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b>	Презентації, лекції, робота за комп'ютером.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, проектор
<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: 10% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 10 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — активна участь у 7–8 заняттях;</li> <li>7–8 — активна участь у 5–6 заняттях;</li> <li>5–6 — активна участь у 3–4 заняттях;</li> <li>1–4 — активна участь у 1–2 заняттях;</li> <li>0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</li> </ul> </li> <li>• підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 10 балів): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20;</li> <li>• розширена доповідь (або декілька доповідей) на лабораторних заняттях за тематикою курсу (усереднена оцінка): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>16–20 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>11–15 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>6–10 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–5 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — доповіді не було.</li> </ul> </li> </ul> <p>Максимальна семестрова кількість балів — 50.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50: <ul style="list-style-type: none"> <li>два розширених завдання по 25 балів кожне відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>21–25 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>16–20 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>11–15 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–10 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — відповідь відсутня.</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> <p>Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.</p> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</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 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 робіт, передбачених курсом.</p> <p><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 використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали, набрані на практичних 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 академічної недоброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Питання на залік (чи питання на контрольні роботи)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Хвильова функція системи тотожних частинок (бозонів, ферміони)</li> <li>2. Представлення вторинного квантування. Оператори у представленні вторинного квантування.</li> <li>3. Польові оператори. Комутаційні співвідношення для польових операторів.</li> <li>4. Рівняння руху для польових операторів.</li> <li>5. Вироджений електронний газ. Енергія виродженого електронного газу з парною взаємодією.</li> <li>6. Модель Габбарда.</li> <li>7. Представлення взаємодії.</li> <li>8. Оператор еволюції. T-впорядкування.</li> <li>9. Двочасові температурні функції Гріна. Запізнююча і випереджуюча функції.</li> <li>10. Рівняння руху для функцій Гріна.</li> <li>11. Представлення Лемана</li> <li>12. Функції Гріна при абсолютному нулі температури.</li> <li>13. Функції Гріна для ідельного Фермі-газу при абсолютному нулі температури.</li> <li>14. Система з парною взаємодією. Основні правила діаграмної техніки.</li> <li>15. Багаточастинкові функції Гріна.</li> <li>16. Рівняння Блоха.</li> <li>17. Мацубарівські функції Гріна.</li> <li>18. Куперівське спарювання. Модель БКШ.</li> </ol>
<p><b>Опитування</b></p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

## Схема курсу «Квантова статистична механіка»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	<b>Тема 1.</b> Вступ. Хвильова функція системи тотожних частинок. Бозони і ферміони. Представлення вторинного квантування. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 10 год.	2 тижні
3–4	<b>Тема 2.</b> Оператори фізичних систем у представленні вторинного квантування. Польові оператори. Рівняння руху для польових операторів. Тотожність вторинного квантування та методу польових операторів. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2, Д3.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 12 год.	2 тижні
5–6	<b>Тема 3.</b> Вироджений електронний газ із парною взаємодією. Енергія виродженого електронного газу, рівняння стану. Модель Габбарда. <b>Література:</b> Б2, Д2, Д3	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 12 год.	2 тижні
7–8	<b>Тема 4.</b> Представлення взаємодії. Хвильові функції та оператори у представленні взаємодії. Т-впорядкування. Оператор еволюції. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2, Д3.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 10 год.	2 тижні
9–10	<b>Тема 5.</b> Двочасові температурні функції Гріна. Рівняння руху для функцій Гріна. Представлення Лемана. Функції Гріна при абсолютному нулі температури. Функції Гріна для ідеального виродженого фермі-газу. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д2, Д3, Д4.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 12 год.	2 тижні
11–12	<b>Тема 6.</b> Функції Гріна для фермі-системи з парною взаємодією. Основи діаграмної техніки. Багаточастинкові функції Гріна. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д2, Д3, Д4.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 12 год.	2 тижні
13–14	<b>Тема 7.</b> Рівняння Блоха. Мацубарівські функції Гріна. Функції Гріна для ідеальних систем. Мацубарівські частоти. Теорія збурень при ненульовій температурі. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д2, Д3, Д4.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год., самостійна робота — 10 год.	2 тижні
15–16	<b>Тема 8.</b> Надпровідність. Електрон-фононна взаємодія. Куперівське спарювання. Модель БКШ. Основний стан та спектр одночастинкових збуджень в моделі БКШ. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д2, Д3.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 10 год.	2 тижні