

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
«Термодинаміка і статистична фізика»,
що викладається в межах
ОПП «Комп'ютерні технології у прикладній фізиці»
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Львів 2023

Назва курсу	Термодинаміка і статистична фізика
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 – 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Викладач дисципліни	Лектор: доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, канд.ф.-м.н. Пастухов Володимир Степанович
Контактна інформація викладача	volodymyr.pastukhov@lnu.edu.ua ; volodyapastukhov@gmail.com https://physics.lnu.edu.ua/employee/pastukhov-v-s
Консультації з курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або онлайн засобами Zoom, Microsoft Teams, Skype.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/termodynamika-i-statystychna-fyzyka-napryam-fyzyka
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Термодинаміка і статистична фізика» є нормативною і розрахована на слухачів спеціальності «105 Прикладна фізика та наноматеріали» освітнього рівня бакалавра. Її викладають у VIII семестрі в обсязі 4,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб стисло подати основи термодинаміки рівноважних та необоротних процесів, статистичної механіки та елементів фізичної кінетики.
Мета та цілі дисципліни	Метою курсу є формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із тепловою формою руху матерії.
Література для вивчення дисципліни	<p>Базова:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Landau L.D. & Lifschitz E.M.</i> Statistical Physics. – Pergamon Press, 1980. – Vol. 5. 2. <i>Кобилянський В.Б.</i> Статистична фізика. – К.: Вища школа, 1972. 3. <i>Єрмолаєв О.М., Раба Г.І.</i> Вступ до статистичної фізики і термодинаміки. – Харків: ХНУ, 2004. 4. <i>Федорченко А. М.</i> Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика // Теоретична фізика. — К: Вища школа, 1993. — Т. 2. — 415 с. 5. <i>Pathria P. K., Beale Paul D.</i> Statistical Mechanics (4th ed.). United States: Elsevier/Academic Press. (2021). ISBN 978-0081026922. <p>Допоміжна:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Feynman R. P.</i> Statistical Mechanics: A Set Of Lectures. – CRC Press, 1998. 2. <i>Кобилянський В. Б.</i> Методичні вказівки до розв'язування задач з термодинаміки (метод характеристичних функцій). – Львів: ЛДУ, 1985. <p>Інформаційні ресурси:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Eric Weisstein's World of Physics http://scienceworld.wolfram.com/physics/ 2. Wikipedia. http://www.wikipedia.org

Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	135 годин, з яких 96 годин аудиторних занять, з них 48 години лекцій, 48 годин практичних занять, та 39 години самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>У результаті вивчення цього курсу студент буде знати: основні поняття та рівняння предмету викладені у програмі курсу</p> <p>вміти: застосовувати рівняння і співвідношення термодинаміки, рівноважної статистичної фізики та основ необоротних явищ і кінетики для розв'язування задач, що стосуються теплової форми руху матерії.</p> <p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i> ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. ЗК 9. Здатність працювати автономно.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i> СК 6. Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем. СК 7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.</p> <p><i>Програмні результати навчання, на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i> ПРН 01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики. ПРН 02. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.</p>
Ключові слова	термодинамічна системи; фазові переходи; статистичні ансамблі; ідеальні квантові гази; броунівський рух; кінетичні коефіцієнти; кінетичні функції розподілу
Формат курсу	Очний
	проведення лекцій, практичних занять та консультації для засвоєння предмету
Теми	<ol style="list-style-type: none"> 1. Основні положення та методи термодинаміки 2. Фазові переходи 3. Основні поняття та принципи статистичної механіки 4. Квантові гази 5. Теорія флюктуацій 6. Термодинамічний опис необоротних процесів 7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння
Підсумковий контроль, форма	Іспит у кінці семестру Форма: письмово-усний
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: математичний аналіз, класична та квантова механіка, електродинаміка.

Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Лекції, розв'язування задач на дошці. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.
Необхідне обладнання	персональний комп'ютер, загальнонавчальні комп'ютерні програми й операційні системи, проектор
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:</p> <p>Поточний контроль:</p> <ul style="list-style-type: none"> • дві контрольні роботи, (КР1 – 15 балів, КР2 – 15 балів, разом 30 балів): <ul style="list-style-type: none"> 15 — усі завдання виконано повністю правильно; 14–10 — завдання виконано, наявні незначні помилки; 9–6 — завдання виконано частково, наявні помилки; 5–1 — рівень виконання дуже низький; 0 — жодне завдання не виконане. • оцінка відповідей та роботи на практичних заняттях (20 балів): <ul style="list-style-type: none"> 20–15 — активна участь у 13–16 заняттях; 14–9 — активна участь у 9–12 заняттях; 8–5 — активна участь у 5–8 заняттях; 4–1 — активна участь у 1–4 заняттях; 0 — жодної активної участі на практичних заняттях. <p><i>Разом за семестр 50 балів.</i></p> <p>Іспит, на який виносяться 4 завдання: два теоретичні питання (по 15 балів за кожне) та дві задачі (по 10 балів за кожену) — 50 балів.</p> <ul style="list-style-type: none"> • теоретичні питання оцінюються так: <ul style="list-style-type: none"> 15 — студент повністю володіє матеріалом; 14–10 — рівень володіння матеріалом достатній; 9–5 — рівень володіння матеріалом частковий; 4–1 — студент майже не володіє матеріалом; 0 — відповідь відсутня. • задачі оцінюються так: <ul style="list-style-type: none"> 10 — задача розв'язана повністю правильно; 9–6 — розв'язок задачі неповний, не отримано кінцевого результату, наявні незначні помилки; 5–1 — рівень розв'язку задачі дуже низький, або ж низький; 0 — неправильно розв'язана задача, або зовсім не розв'язана. <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100.</p> <p>Письмові роботи: Очікується, що студенти виконають дві контрольні роботи.</p> <p>Академічна доброчесність: Очікується, що контрольні роботи студентів будуть оригінальними. 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 також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані за роботу на практичних заняттях, контрольних роботах та на іспиті. 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>Додаткові бали можна отримати за результатами неформального та/або інформального навчання по тематиці даного курсу. Визнання та зарахування результатів такого навчання відбувається у відповідності до наданих документів про неформальне та/або інформальне навчання.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Орієнтовний перелік питань на іспит</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Термодинамічні системи. Стан термодинамічної рівноваги. Рівноважні та нерівноважні процеси. 2. Внутрішня енергія термодинамічної системи, робота, теплота. Термічне і калоричне рівняння стану. 3. Перше начало термодинаміки. Теплоємності. 4. Вихідне формулювання другого начала термодинаміки. Оборотні та необоротні процеси. 5. Основне рівняння термодинаміки для рівноважних процесів. Зв'язок між термічним і калоричним рівнянням стану. 6. Третє начало термодинаміки. Недосяжність абсолютного нуля температури. 7. Умови рівноваги у багатофазній багатокомпонентній системі, правило фаз Гіббса. 8. Класифікація Еренфеста фазових переходів. Фазові переходи першого роду, рівняння Клапейрона–Клаузіуса. 9. Фазовий перехід у надпровідний стан у відсутності та при наявності магнітного поля. 10. Опис стану системи багатьох частинок в класичній і квантовій механіці, поняття мікростану системи багатьох частинок. 11. Статистичні ансамблі. Усреднення за часом і за статистичним ансамблем. 12. Мікроканонічний ансамбль, термодинамічні функції мікроканонічного ансамблю.

	<p>13. Канонічний ансамбль, термодинамічні функції канонічного ансамблю.</p> <p>14. Великий канонічний ансамбль, термодинамічні функції великого канонічного ансамблю.</p> <p>15. Термодинамічна еквівалентність ансамблів. Статистичний оператор.</p> <p>16. Умова класичності системи багатьох частинок, температура виродження. Типи систем і взаємодій.</p> <p>17. Термодинамічні функції сильно виродженого фермі-газу.</p> <p>18. Термодинамічні функції сильно виродженого бозе-газу нижче температури конденсації.</p> <p>19. Рівноважне випромінювання: формула Планка, закон зміщення Віна, закон Стефана–Больцмана.</p> <p>20. Напівтермодинамічна теорія флюктуацій: флюктуації в мікροканонічному ансамблі, флюктуації в канонічному ансамблі.</p> <p>21. Властивості кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів.</p>
<p>Опитування</p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

Схема курсу «Термодинаміка і статистична фізика»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
Змістовий модуль 1. Основи термодинаміки				
1	1. Основні положення та методи термодинаміки. Основні етапи розвитку термодинаміки і статистичної фізики. Термодинамічні системи. Стан термодинамічної рівноваги. Рівноважні та нерівноважні процеси. Внутрішня енергія термодинамічної системи, робота, теплота. Термічне і калоричне рівняння стану. Перше начало термодинаміки. Теплоємності. Основні термодинамічні процеси та їх рівняння.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 4, 5; Д: 2	1 тиждень
1-2	1. Основні положення та методи термодинаміки. Вихідне формулювання другого начала термодинаміки. Оборотні та необоротні процеси. Ентропія і термодинамічна температура. Основне рівняння термодинаміки для рівноважних процесів. Зв'язок між термічним і калоричним рівнянням стану.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1, 3, 5; Д: 2	2 тижні
2	1. Основні положення та методи термодинаміки. Парадокс Гіббса. Друге начало термодинаміки для нерівноважних процесів. Закон зростання ентропії. Нерівність Клаузіуса. Цикл Карно і теореми Карно. Третє начало термодинаміки. Недосяжність абсолютного нуля температури. Метод термодинамічних потенціалів. Рівняння Гіббса-Гельмгольца.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1,3, 5; Д: 2	1 тиждень
3	1. Основні положення та методи термодинаміки. Термодинамічні потенціали систем зі змінною кількістю частинок. Термодинаміка діелектриків і магнетиків. Умови рівноваги термодинамічних систем. Фази і компоненти.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1, 3, 5; Д: 2	1 тиждень
3-4	2. Фазові переходи. Умови рівноваги у багатофазній багатокомпонентній системі, правило фаз Гіббса. Термодинамічні нерівності. Принцип Ле Шательє. Класифікація Еренфеста фазових переходів. Фазові переходи першого роду, рівняння Клапейрона–Клаузіуса. Правило Максвела для фазових переходів першого роду.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 2-5; Д: 2	2 тижні

4	2. Фазові переходи. Фазові переходи другого роду, рівняння Еренфеста. Фазовий перехід у надпровідний стан у відсутності та при наявності магнітного поля. Напівфеноменологічна теорія Ландау фазових переходів другого роду. Поверхневі явища. Критичні явища.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 2–5; Д: 2	1 тиждень
Змістовий модуль 2. Статистична фізика рівноважних систем				
5	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Опис стану системи багатьох частинок в класичній і квантовій механіці, поняття мікростану системи багатьох частинок. Статистичні ансамблі. Усереднення за часом і за статистичним ансамблем. Ентропія в статистичній фізиці.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1–5; Д: 1	1 тиждень
5-6	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Мікроканонічний ансамбль, термодинамічні функції мікроканонічного ансамблю.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1–5; Д: 1	2 тижні
6	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Канонічний ансамбль, термодинамічні функції канонічного ансамблю. Великий канонічний ансамбль, термодинамічні функції великого канонічного ансамблю. <i>Розподіли Бозе–Айнштайна, Фермі–Дірака, Максвелла–Больцмана для ідеального газу.</i>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	Б: 1–5; Д: 1	1 тиждень
7	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Термодинамічна еквівалентність ансамблів. Статистичний оператор. Умова класичності системи багатьох частинок, температура виродження. Типи систем і взаємодій. <i>Вільна енергія класичного ідеального газу.</i> Теорема про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності та теорема про віріал. <i>Класична система заряджених частинок, метод Дебая–Хюккеля.</i>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1–5; Д: 1	1 тиждень
7-8	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Метод кореляційних функцій Боголюбова: означення, середні значення динамічних величин, рівняння для кореляційних функцій, рівняння стану в методі Боголюбова, застосування до розрідженого газу. Слабо неідеальний класичний газ з нейтральних частинок, віріальний розклад та рівняння Ван дер Ваальса.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 5;	2 тижні

8	3. Основні поняття та принципи статистичної механіки. Метод кореляційних функцій Боголюбова: означення, середні значення динамічних величин, рівняння для кореляційних функцій, рівняння стану в методі Боголюбова, застосування до розрідженого газу.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, (контрольна робота) самостійна робота — 2 год	Б: 5;	1 тиждень
Змістовий модуль 3. Статистична фізика рівноважних систем (продовження).				
9	4. Квантові гази. Ідеальний фермі-газ: властивості розподілу Фермі-Дірака, хімічний потенціал повністю виродженого фермі-газу, термодинамічні функції сильно виродженого фермі-газу. <i>Електронний газ в металах.</i> Ідеальний бозе-газ: властивості розподілу Бозе-Айнштейна, температура бозе-конденсації. Термодинамічні функції сильно виродженого бозе-газу нижче температури конденсації.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень
9-10	4. Квантові гази. Термодинамічні функції сильно виродженого бозе-газу нижче температури конденсації.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самост. роб.— 2 год	Б: 1-5; Д: 1	2 тижні
10	4. Квантові гази. Рівноважне випромінювання: формула Планка, закон зміщення Віна, закон Стефана-Больцмана. <i>Термодинамічні функції рівноважного випромінювання.</i> Теорія Дебая теплоємності твердих тіл, низькі та високі температури.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень
11	4. Квантові гази. Системи з обмеженим зверху енергетичним спектром і абсолютні від'ємні температури. <i>Термодинамічні функції двохатомних ідеальних газів: характеристичні температури, внесок в термодинамічні функції коливальних ступенів вільності, внесок в термодинамічні функції обертальних ступенів вільності.</i>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 5; Д: 1	1 тиждень
Змістовий модуль 4. Термодинаміка необоротних процесів та елементи фізичної кінетики				
11-12	5. Теорія флюктуацій. Напівфеноменологічна теорія флюктуацій: флюктуації в мікροканонічному ансамблі, флюктуації в канонічному ансамблі. Розподіл Гауса для малих флюктуацій. Флюктуації основних термодинамічних величин. Розсіяння світла на флюктуаціях густини. Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флюктуацій.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	2 тижні

	Флуктуації чисел заповнення для фермі-газу. Флуктуації чисел заповнення для бозе-газу.			
12	5. Теорія флуктуацій. Випадкові процеси. Рівняння Смолуховського. Рівняння Колмогорова. Кореляція флуктуацій у часі. Теорема Вінера-Хінчина. Теплові шуми. Формула Найквіста. Фізичні характеристики броунівський руху. Середньоквадратичне зміщення броунівської частинки. Броунівський рух і дифузія. Рівняння Айнштайна-Фоккера-Планка. Броунівський рух і молекулярно-кінетична теорія	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень
13	6. Термодинамічний опис необоротних процесів. Необоротні процеси: основні поняття, процес теплопровідності у твердому тілі, потоки, термодинамічні сили, кінетичні коефіцієнти. Рівняння балансу ентропії. Виробництво ентропії. Властивості кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онзагера для кінетичних коефіцієнтів. <i>Кінетичні коефіцієнти для дифузії, теплопровідності, дифузійного перносу тепла та термодифузії.</i>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень
13-14	7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння. Рівняння Ліувілля у статистичній теорії необоротних процесів. Ланцюжок рівнянь для кінетичних функцій розподілу Боголюбова та фізичні умови його аналізу. Ієрархія масштабів часів і принципи скороченого опису в динамічній теорії Боголюбова.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	2 тижні
14	7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння. Виведення рівняння Больцмана з ланцюжка рівнянь для кінетичних функцій розподілу.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень
15	7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння. Властивості інтеграла зіткнень. Інваріанти зіткнень. Рівноважний розв'язок кінетичного рівняння Больцмана. <i>Н-теорема Больцмана. Проблема Больцмана.</i> Мікроскопічна оборотність та макроскопічна необоротність.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 4 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень

15-16	7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння. Методи розв'язування кінетичного рівняння Больцмана. Кінетичне рівняння у наближенні часу релаксації.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	2 тижні
16	7. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння. Застосування кінетичного рівняння у наближенні часу релаксації до явищ електро- та теплопровідності. Електропровідність електронного газу в металах. Теплопровідність електронного газу в металах. Закон Відемана-Франца. Кінетичне рівняння Власова.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, (контрольна робота) самостійна робота — 2 год	Б: 1-5; Д: 1	1 тиждень