

Львівський національний університет імені Івана Франка

Кафедра теоретичної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан
фізичного факультету

_____ Якібчук П. М.

“ _____ ” _____ 20__ р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**ТЕРМОДИНАМІКА
І СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА**

галузь знань — **10 Природничі науки**
спеціальність — **104 Фізика та астрономія**
фізичний факультет

2020–2021 навчальний рік

Робоча програма навчальної дисципліни «**Термодинаміка і статистична фізика**» для студентів за галуззю знань **10** Природничі науки спеціальності **104 Фізика та астрономія** фізичного факультету, 2020 року. — 10 с.

Розробник:

Пастухов Володимир Степанович, канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної фізики

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри теоретичної фізики

Протокол № _____ від “____” _____ 20__ р.

Завідувач кафедри теоретичної фізики

_____ (Ткачук В. М.)

“____” _____ 20__ р

Схвалено Вченою радою фізичного факультету

Протокол № _____ від “____” _____ 20__ р.

“____” _____ 20__ р. Голова _____ (Якібчук П. М.)

© Львівський національний
університет імені Івана Франка,
2020

© Пастухов В. С., 2020

Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		<i>денна форма навчання</i>	
Кількість кредитів – 6	Галузь знань 10 Природничі науки	Нормативна	
Модулів – 2	Спеціальність 104 Фізика та астрономія	<i>Рік підготовки:</i> 4-й	<i>Рік підготовки:</i> 4-й
Змістових модулів – 4	Освітньо-кваліфікаційний рівень: <i>бакалавр</i>	<i>Семестр</i> 7-й	<i>Семестр</i> 8-й
Загальна кількість годин – 180		<i>Лекції</i> 48 год.	<i>Лекції</i> 16 год.
Тижневих годин для денної форми навчання: <i>Аудиторних:</i> VII семестр – 5 VIII семестр – 3 <i>Самостійної роботи студента:</i> VII семестр – 0,625 VIII семестр – 2,625		<i>Практичні</i> 32 год.	<i>Практичні</i> 32 год.
		<i>Лабораторні</i> год.	
		<i>Самостійна робота</i> 10 год.	<i>Самостійна робота</i> 42 год.
		<i>Вид контролю:</i> —	<i>Вид контролю:</i> іспит

1. Мета та завдання навчальної дисципліни

Курс термодинаміка і статистична фізика є фундаментальним розділом основного курсу теоретичної фізики і є базовим для ряду спеціальних курсів.

Мета: формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із тепловою формою руху матерії.

Завдання: навчити студентів самостійно виконувати розрахунки, необхідні для розв'язування задач термодинаміки і статистичної фізики і застосовувати в процесі виконання курсових, бакалаврських та магістерських робіт.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати основні поняття та рівняння предмету викладені у програмі курсу

вміти: застосовувати рівняння і співвідношення термодинаміки і статистичної фізики для розв'язування задач, що стосуються теплової форми руху матерії, використовувати начала термодинаміки та основні принципи статистичної механіки у самостійній науковій роботі.

Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких розділів диференціальні рівняння, варіаційне числення, класична та квантова механіка, електродинаміка.

2. Програма навчальної дисципліни

МОДУЛЬ 1

Вступ

Термодинаміка і статистична фізика як макроскопічна та мікроскопічна теорії теплової форми руху матерії відповідно. Феноменологічний метод термодинаміки і мікроскопічний метод статистичної механіки.

Змістовий модуль 1. Основи термодинаміки

Тема 1. Основні положення та методи термодинаміки

1. 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.
2. Вихідне формулювання другого начала термодинаміки. Оборотні та необоротні процеси. Принцип адіабатної недосяжності Каратеодорі і друге начало термодинаміки для рівноважних процесів. Ентропія і термодинамічна температура. *Математичне обґрунтування існування ентропії. Термодинамічна шкала температур¹.*
3. Основне рівняння термодинаміки для рівноважних процесів. Зв'язок між термічним і калоричним рівнянням стану. Парадокс Гіббла. Друге начало термодинаміки для нерівноважних процесів. Закон зростання ентропії. Нерівність Клаузіуса. *Цикл Карно і теореми Карно.* Третє начало термодинаміки. Недосяжність абсолютного нуля температури.
4. *Метод циклів.* Метод термодинамічних потенціалів. Рівняння Гіббса-Гельмгольца. Термодинамічні потенціали систем зі змінною кількістю частинок. *Термодинаміка діелектриків і магнетиків.*

Тема 2. Методи отримання низьких температур

1. Процес необоротного адіабатного розширення (процес Джоуля–Томсона).
2. Процес оборотного адіабатного розширення.
3. Процес оборотного розмагнічення парамагнетика.

Тема 3. Фазові переходи

1. Умови рівноваги термодинамічних систем. Фази і компоненти. Умови рівноваги у багатофазній багатокомпонентній системі, правило фаз Гіббса. Термодинамічні нерівності. *Принцип Ле Шательє.*
2. Класифікація Еренфеста фазових переходів. Фазові переходи першого роду, рівняння Клапейрона–Клаузіуса. Правило Максвелла для фазових переходів першого роду. 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.*

Змістовий модуль 2. Статистична фізика рівноважних систем

Тема 4. Основні поняття та принципи статистичної механіки

1. 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.
2. Мікроканонічний ансамбль, термодинамічні функції мікроканонічного ансамблю. Канонічний ансамбль, термодинамічні функції канонічного ансамблю. Великий канонічний ансамбль, термодинамічні функції великого канонічного ансамблю. Розподіли Бозе–Айнштейна, Фермі–Дірака, Максвелла–Больцмана для ідеального газу.
3. Термодинамічна еквівалентність ансамблів. Статистичний оператор. Умова класичності системи багатьох частинок, температура виродження. Типи систем і взаємодій. *Вільна енергія класичного ідеального газу.* Слабо неідеальний класичний газ з нейтральних частинок, віріальний розклад та рівняння Ван дер Ваальса.
4. Теорема про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності та теорема про віріал.
5. *Класична система заряджених частинок, метод Дебая–Гюккеля.*
6. Метод кореляційних функцій Боголюбова: означення, середні значення динамічних величин, рівняння для кореляційних функцій, рівняння стану в методі Боголюбова, застосування до розрідженого газу

МОДУЛЬ 2

Змістовий модуль 3. Статистична фізика рівноважних систем (продовження).

Тема 5. Квантові гази

1. Ідеальний фермі–газ: властивості розподілу Фермі–Дірака, хімічний потенціал повністю виродженого фермі–газу, термодинамічні функції сильно виродженого фермі–газу. *Релятивістський вироджений електронний газ.* Електронний газ в металах.
2. Ідеальний бозе–газ: властивості розподілу Бозе–Айнштейна, температура бозе–конденсації. *Термодинамічні функції сильно виродженого бозе–газу нижче температури конденсації.* Рівноважне випромінювання: формула Планка, закон зміщення Віна, закон Стефана–Больцмана. *Термодинамічні функції рівноважного випромінювання.*
3. Теорія Дебая теплоємності твердих тіл, низькі та високі температури. *Термодинамічні функції двохатомних ідеальних газів: характеристичні температури, внесок в термодинамічні функції коливальних ступенів вільності, внесок в термодинамічні функції обертальних ступенів вільності.* Системи з обмеженим зверху енергетичним спектром і абсолютні від'ємні температури.

Змістовий модуль 4. Термодинаміка необоротних процесів та елементи фізичної кінетики

Тема 6. Теорія флюктуацій

1. Напівтермодинамічна теорія флюктуацій: флюктуації в мікроканонічному ансамблі, флюктуації в канонічному ансамблі. Розподіл Гауса для малих флюктуацій. Флюктуації основних термодинамічних величин. Розсіяння світла на флюктуаціях густини.

2. Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флюктуацій. Флюктуації чисел заповнення для фермі-газу. Флюктуації чисел заповнення для бозе-газу.
3. Випадкові процеси. Рівняння Смолуховського. Рівняння Колмогорова. Кореляція флюктуацій у часі. Теорема Вінера-Хінчина. Теплові шуми. Формула Найквіста.
4. Фізичні характеристики броунівський руху. Середньоквадратичне зміщення броунівської частинки. Броунівський рух і дифузія. Рівняння Айнштайна-Фоккера-Планка. Броунівський рух і молекулярно-кінетична теорія.

Тема 7. Термодинамічний опис необоротних процесів

1. Необоротні процеси: основні поняття, процес теплопровідності у твердому тілі, потоки, термодинамічні сили, кінетичні коефіцієнти. Рівняння балансу ентропії. Виробництво ентропії.
2. Властивості кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів. Термоелектричні явища. Кінетичні коефіцієнти для дифузії, теплопровідності, дифузійного переносу тепла та термодифузії.

Тема 8. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння

1. 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.
2. Виведення рівняння Больцмана з ланцюжка рівнянь для кінетичних функцій розподілу. Властивості інтеграла зіткнень. Інваріанти зіткнень. Рівноважний розв'язок кінетичного рівняння Больцмана. *H-теорема* Больцмана. Проблема Больцмана. Мікроскопічна оборотність та макроскопічна необоротність.
3. Методи розв'язування кінетичного рівняння Больцмана. *Кінетичне рівняння у наближенні часу релаксації*.
4. 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*.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	ср
1	2	3	4	5	6	7
МОДУЛЬ 1						
<i>Змістовий модуль 1. Основи термодинаміки</i>						
Тема 1. Основні положення та методи термодинаміки	39	20	16			3
Тема 2. Методи отримання низьких температур	5	2	2			1
Тема 3. Фазові переходи	13	6	4			3
<i>Змістовий модуль 2. Статистична фізика рівноважних систем</i>						
Тема 4. Основні поняття та принципи статистичної механіки	33	20	10			3
Усього годин за VII семестр	90	48	32			10
МОДУЛЬ 2						
<i>Змістовий модуль 3. Статистична фізика рівноважних систем (продовження). Термодинаміка необоротних процесів та елементи фізичної кінетики</i>						
Тема 5. Квантові гази	24	4	8			12
<i>Змістовий модуль 4. Статистична фізика рівноважних систем (продовження). Термодинаміка необоротних процесів та елементи фізичної кінетики</i>						
Тема 6. Теорія флюктуацій	22	4	8			10
Тема 7. Термодинамічний опис необоротних процесів	22	4	8			10
Тема 8. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів. Кінетичні рівняння	22	4	8			10
Усього годин за VIII семестр	90	16	32			42
Усього годин	180	64	64			52

6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	К-сть годин
1	Розподіл Максвелла-Больцмана. Обчислення середніх	4
2	Розподіл Максвелла-Больцмана. Випадок ідеального газу	4
3	Поняття про характеристичні функції. Співвідношення Максвелла. Метод визначників	4
4	Теплоємність у різних процесах	4
5	Доведення термодинамічних співвідношень	4
7	Рівняння адіабати для різних рівнянь стану	4
8	Політропний процес	4
9	Фазові переходи	4
10	Рівноважна статистика класичних систем. Класичний ідеальний газ	6
11	Релятивістський ідеальний газ. Система класичних гармонічних осциляторів	4
12	Квантова статистика. Фермі-системи	6
13	Квантова статистика. Бозе-системи	6
14	Теорія флуктуацій	6
15	Елементи теорії необоротних процесів. Кінетичне рівняння Больцмана	4
	Разом	64

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	К-сть годин
VII семестр		
1	Математичне обґрунтування існування ентропії. Термодинамічна шкала температур	1
2	Цикл Карно і теореми Карно	1
3	Метод циклів	1
4	Термодинаміка діелектриків і магнетиків	1
5	Принцип Ле Шательє	1
6	Напівфеноменологічна теорія Ландау фазових переходів другого роду	1
7	Поверхневі явища	1
8	Критичні явища	1
9	Вільна енергія класичного ідеального газу	1
10	Класична система заряджених частинок, метод Дебая–Хюккеля	1
	Разом за VII семестр	10
VIII семестр		
1	Релятивістський вироджений електронний газ	2
2	Термодинамічні функції сильно виродженого бозе-газу нижче температури конденсації	4
3	Термодинамічні функції рівноважного випромінювання	2
4	Термодинамічні функції двохатомних ідеальних газів: характеристичні температури, внесок в термодинамічні функції коливальних ступенів вільності, внесок в термо-динамічні функції обертальних ступенів вільності	2
5	Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флуктуацій. Флуктуації чисел заповнення для фермі-газу.	4

	Флюктуації чисел заповнення для бозе-газу	
6	Теплові шуми. Формула Найквіста	2
7	Рівняння Айнштейна-Фоккера-Планка	4
8	Інваріанти зіткнень	2
9	H-теорема Больцмана	2
10	Рівняння Смолуховського	2
11	Рівняння Колмогорова	2
12	Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів	4
13	Кінетичні рівняння для одночастинкової функції розподілу	2
14	Кінетичне рівняння у наближенні часу релаксації	4
15	Кінетичне рівняння Власова	4
	Разом за VIII семестр	42
	Разом	52

10. Методи навчання

Під час вивчення навчальної дисципліни «Термодинаміка і статистична фізика» застосовують такі методи навчання:

- *Наочні*: виведення на дошці основних співвідношень на лекціях і практичних заняттях;
- *Практичні*: задачі для практичних занять.

11. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (контрольні роботи за чотирма змістовими модулями, по два в кожному семестрі — $2 \times 15 = 30$ балів за семестр), оцінку відповідей та роботи на практичних заняттях (20 балів за семестр) — разом за семестр 50 балів (S_1 — оцінка за осінній семестр, S_2 — оцінка за весняний семестр). Оцінка поточного контролю (ПК) визначається як середнє оцінок за два семестри за формулою: $ПК = (S_1 + S_2)/2$. Іспит складається з тестової частини (30 балів) і перевірки теоретичних та практичних знань за допомогою завдань більшого обсягу ($2 \times 10 = 20$ балів) — разом 50 балів. Сумарна оцінка, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою у кожному семестрі.

12. Розподіл балів, які отримують студенти

Розподіл балів, які отримують студенти, V семестр

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на практичних	Сума
Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2		
T1-3	T4		
15	15	20	50

Розподіл балів, які отримують студенти (для екзамену), VI семестр

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на практичних	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 3	Змістовий модуль 4			
T5	T6-8			
15	15	20	50	100

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою (для екзамену)
90–100	A	відмінно
81–89	B	добре
71–80	C	
61–70	D	задовільно
51–60	E	
25–50	FX	незадовільно з можливістю повторного складання
0–24	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

13. Методичне забезпечення

1. *Кобилянський В.Б.* Статистична фізика. – К.: Вища школа, 1972.
2. *Вакарчук І. О., Кнігініцький О. В., Попель О.М., Кулій Т. В.* Збірник задач з термодинаміки і статистичної фізики. – Львів: ЛНУ, 1998.
3. *Кобилянський В. Б.* Методичні вказівки до розв'язування задач з термодинаміки (метод характеристичних функцій). – Львів: ЛДУ, 1985.

14. Рекомендована література

Базова

1. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. Ч.1. – М.: “Наука”, 1995.
2. *Терлецкий Я. П.* Статистическая физика. – М.: “Высшая школа”, 1966.
3. *Квасников И. К.* Термодинамика и статистическая физика. – М.: МГУ, 1991. –Т.1; 1987. – Т.2.
4. *Базаров И. П.* Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1991.
5. *Базаров И. П., Геворкян Э. П., Николаев П. Н.* Термодинамика и статическая физика. Теория равновесных систем. М.: МГУ, 1986.
6. *Базаров И. П., Геворкян Э. П., Николаев П. Н.* Неравновесная термодинамика и физиическая кинетика. М.: МГУ, 1989.
7. *Ансельм А. И.* Основы статистической физики и термодинамики. – М.: “Наука”, 1973.
8. *Єрмолаєв О.М., Раба Г.І.* Вступ до статистичної фізики і термодинаміки. – Харків: ХНУ, 2004.

Допоміжна

1. *Киттель Ч.* Статистическая термодинаміка. – М.: Наука, 1977.
2. *Кубо Р.* Статистическая механіка. – М.: Мир, 1967.
3. *Кубо Р.* Термодинамика. – М.: Мир, 1970.
4. *Леонтович М.А.* Введение в термодинаміку. Статистическая физика. – М.: Наука, 1983.
5. *Самойлович А.Г.* Термодинамика и статическая физика. – М.: ГИТТЛ, 1953.
6. *Фейнман Р.* Статистическая механіка. – М.: Мир, 1975.

15. Інформаційні ресурси

1. Eric Weisstein's World of Physics <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>
2. Wikipedia. <http://www.wikipedia.org>