

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Кафедра теоретичної фізики

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
з навчальної дисципліни
«ТЕРМОДИНАМІКА І СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА»

для студентів IV курсу фізичного факультету

ЛЬВІВ–2011

Термодинаміка та статистична фізика. Методичні рекомендації з навчальної дисципліни для студентів за напрямом підготовки 6.040203 Фізика — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. — 14 с.

Розробник:

Мигаль В. М., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної фізики

1. Опис навчальної дисципліни

(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни

“Термодинаміка і статистична фізика”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		<i>денна форма навчання</i>	
Кількість кредитів, - 8	галузь знань 0402 Фізико-математичні науки	Нормативна	
Модулів – 2	Напрямок підготовки 6.040203 Фізика	<i>Рік підготовки:</i> 4-й	<i>Рік підготовки:</i> 4-й
Змістових модулів – 4	Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр	<i>Семестр</i> 7-й	<i>Семестр</i> 8-й
Загальна кількість годин - 296		<i>Лекції</i> 48 год.	<i>Лекції</i> 32 год.
Тижневих годин для денної форми навчання: <i>Аудиторних:</i> VII семестр – 5 VIII семестр – 4 <i>Самостійної роботи студента:</i> VII семестр – 5 VIII семестр – 4,5		<i>Практичні</i> 32год.	<i>Практичні</i> 32 год.
		<i>Лабораторні</i> год.	
		<i>Самостійна робота</i> 80 год.	<i>Самостійна робота</i> 72 год.
		<i>Вид контролю:</i> залік	<i>Вид контролю:</i> іспит

2. 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.

3. 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.

[4: §1-9, 5: §1-9, 9: Гл. 1]

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 температур*¹.

[4: §11-14, 5: §11-14]

¹Курсивом позначені теми, винесені на самостійне опрацювання.

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: §15-22, 5: §15-22]

4. *Метод циклів*. Метод термодинамічних потенціалів. Рівняння Гіббса-Гельмгольца. Термодинамічні потенціали систем зі змінною кількістю частинок. *Термодинаміка діелектриків і магнетиків*.

[4: §23-26, 51; 5: §23-26, 35, 7: §24]

Тема 2. Методи отримання низьких температур

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

[4: §50, 5: §34; 7: §18]

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*.

[4: §27-30, 53, 5: §27-30; 7: §21, 22; 13: §25]

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*.

[4: §56-63, 53; 5: §27-30, 39, 42-45; 13: §26-29, 7: §81-83, 142, 143]

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.

[1: §1-3]

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.

[1: §4-6, 5: §50-53]

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.
[1: §7-10, 5: §54]
4. Теорема про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності та теорема про віріал.
[5: §51]
5. *Класична система заряджених частинок, метод Дебая–Хюккеля*.
[1: §13, 7: §75]
6. Метод кореляційних функцій Боголюбова: означення, середні значення динамічних величин, рівняння для кореляційних функцій, рівняння стану в методі Боголюбова, застосування до розрідженого газу. [1: §12; 5: §73; 7: §76]

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.
[1: §17; 7: §52]
2. Ідеальний бозе–газ: властивості розподілу Бозе–Айнштайна, 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*.
[1: §18; 7: §53]
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.
[1: §19, 22; 12: Гл. IV, §11, Гл. VI, §2]

Тема 6. Теорія флюктуацій

1. Напівтермодинамічна теорія флюктуацій: флюктуації в мікροканонічному ансамблі, флюктуації в канонічному ансамблі. Розподіл Гауса для малих флюктуацій. Флюктуації основних термодинамічних величин. Розсіяння світла на флюктуаціях густини.
[1: § 27; 5: §80; 7: §112-114]
2. *Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флюктуацій. Флюктуації чисел заповнення для фермі–газу. Флюктуації чисел заповнення для бозе–газу*.
[5: §78]

МОДУЛЬ 2

Змістовий модуль 3. Термодинаміка необоротних процесів

Тема 7. Елементи теорії випадкових процесів

1. Випадкові процеси. *Рівняння Смолуховського. Рівняння Колмогорова. Кореляція флюктуацій у часі. Теорема Вінера-Хінчина. Теплові шуми. Формула Найквіста.* [1: §24, 25]
2. Фізичні характеристики броунівський руху. Середньоквадратичне зміщення броунівської частинки. Броунівський рух і дифузія. *Рівняння Айнштайна-Фоккера-Планка. Броунівський рух і молекулярно-кінетична теорія.*
[1: §26]

Тема 8. Термодинамічний опис необоротних процесів

1. Необоротні процеси: основні поняття, процес теплопровідності у твердому тілі, потоки, термодинамічні сили, кінетичні коефіцієнти. Рівняння балансу ентропії. Виробництво ентропії.
[1: §28]
2. Властивості кінетичних коефіцієнтів. *Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів. Термоелектричні явища. Кінетичні коефіцієнти для дифузії, теплопровідності, дифузійного переносу тепла та термодифузії.*
[1: §29]

Змістовий модуль 4. Елементи фізичної кінетики

Тема 9. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів

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.
[1: §30; 6: §26-27]
2. Виведення рівняння Больцмана з ланцюжка рівнянь для кінетичних функцій розподілу. Властивості інтеграла зіткнень. *Інваріанти зіткнень. Рівноважний розв'язок кінетичного рівняння Больцмана. Н-теорема Больцмана. Проблема Больцмана. Мікроскопічна оборотність та макроскопічна необоротність.*
[1: §30; 13: §26-27]

Тема 10. Кінетичні рівняння

1. Методи розв'язування кінетичного рівняння Больцмана. Кінетичне рівняння у наближенні часу релаксації.
[1: §30; 6: §40]

2. 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.*

[1: §30; 6: §43, 44]

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	26	8	4			14
Тема 2. Методи отримання низьких температур	27	6	6			15
Тема 3. Фазові переходи	34	8	10			16
Разом – зм. модуль 1	87	22	20			45
<i>Змістовий модуль 2. Статистична фізика рівноважних систем</i>						
Тема 4. Основні поняття та принципи статистичної механіки	20	6	4			10
Тема 5. Квантові гази	17	6	2			9
Тема 6. Теорія флюктуацій	36	14	6			16
Разом – зм. модуль 2	73	26	12			35
Усього годин за VII семестр	160	48	32			80
МОДУЛЬ 2						
<i>Змістовий модуль 3. Термодинаміка необоротних процесів</i>						
Тема 7. Елементи теорії випадкових процесів	32	8	6			18
Тема 8. Термодинамічний опис необоротних процесів	32	8	6			18
Разом – зм. модуль 3	64	16	12			36
<i>Змістовий модуль 4. Елементи фізичної кінетики.</i>						
Тема 9. Метод Боголюбова в теорії нерівноважних процесів	28	4	6			18
Тема 10. Кінетичні рівняння	44	12	14			18
Разом – зм. модуль 4	72	16	20			36
Усього годин за VIII семестр	136	32	32			72
Усього годин	296	80	64			152

5. Темы практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Розподіл Максвелла-Больцмана. Обчислення середніх. [2: задачі 1-7]	4
2	Розподіл Максвелла-Больцмана. Випадок ідеального газу. [2: задачі 8-13]	4
3	Поняття про характеристичні функції. Співвідношення Максвелла. Метод визначників. [2: задачі 14-20; 3: задачі 1-10]	4
4	Теплоємність у різних процесах. [2: задачі 21-27]	4
5	Доведення термодинамічних співвідношень. [2: задачі 28,29; 3: задачі 11-16]	4
6	Ентропія системи. [2: задачі 33, 34, 36]	4
7	Рівняння адіабати для різних рівнянь стану. [2: задачі 30-32, 37-39]	4
8	Політропний процес. [2: задачі 40, 41]	4
9	Фазові переходи. [2: задачі 42-45]	4
10	Статистичні ансамблі. [2: задачі 46-49]	4
11	Рівноважна статистика класичних систем. Класичний ідеальний газ. [2: задачі 54]	4
12	Релятивістський ідеальний газ. Система класичних гармонічних осциляторів. [2: задачі 52, 53]	4
13	Рівноважна статистика квантових систем. [2: задачі 50, 54-58]	4
14	Розподіли Гіббса. [2: задачі 59-66]	4
15	Квантова статистика. Фермі-системи. [2: задачі 70-78]	4
16	Квантова статистика. Бозе-системи. [2: задачі 70-78]	4
17	Термодинамічні флюктуації в ізольованих замкнених системах. [2: задачі 79-80]	4
18	Термодинамічні флюктуації у незамкнених системах. [2: задачі 80-87]	6
19	Елементи теорії необоротних процесів, Кінетичне рівняння Больцмана. [2: задачі 89-93]	6

6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	К-сть годин
VII семестр		
1	Математичне обґрунтування існування ентропії. Термодинамічна шкала температур. [4: §14; 5: §14]	8
2	Цикл Карно і теореми Карно. [4: §18; 5: §18]	4
3	Метод циклів. [4: §23; 5: §23]	4
4	Термодинаміка діелектриків і магнетиків. [5: §35]	4
5	Принцип Ле Шательє. [5: §29]	4
6	Напівфеноменологічна теорія Ландау фазових переходів другого роду. [7: §137, 138]	4
7	Поверхневі явища. [7: §142]	4
8	Критичні явища. [5: §45]	4
9	Вільна енергія класичного ідеального газу. [1: §5]	4
10	Класична система заряджених частинок, метод Дебая–Хюккеля. [1: §13, 7: §75]	4
11	Релятивістський вироджений електронний газ. [7: §58]	4
12	Термодинамічні функції сильно виродженого бозе-газу нижче температури конденсації. [1: §18(3)]	4
13	Термодинамічні функції рівноважного випромінювання. [1: §18(4)]	4
14	Термодинамічні функції двохатомних ідеальних газів: характеристичні температури, внесок в термодинамічні функції коливальних ступенів вільності, внесок в термодинамічні функції обертальних ступенів вільності. [1: §22]	4
15	Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флюктуацій. Флюктуації чисел заповнення для фермі-газу. Флюктуації чисел заповнення для бозе-газу. [5: §78]	4
	Разом за VII семестр	80
VIII семестр		
1	Теплові шуми. Формула Найквіста. [1: §25]	4
2	Рівняння Айнштейна-Фоккера–Планка. [1: §26]	6
3	Інваріанти зіткнень. [6: §31]	8
4	H-теорема Больцмана. [6: §33]	4
5	Рівняння Смолуховського. [1: §24]	8
6	Рівняння Колмогорова. [1: §24]	8
7	Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів. [1: §29]	6
8	Кінетичні рівняння для одночастинкової функції розподілу. [6: §30]	10
9	Кінетичне рівняння Власова. [1: §30]	8
10	Застосування кінетичного рівняння. [6: §38-42]	10
	Разом за VIII семестр	72
	Разом	152

10. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (контрольні роботи за чотирма змістовими модулями (два модулі за семестр) $20 \times 2 = 40$ балів), оцінку відповідей та роботи на практичних заняттях (10 балів) — разом за семестр 50 балів; залік — 50 балів (VI семестр); іспит — 50 балів (VII семестр). Сумарна оцінка за семестр, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою.

11. Розподіл балів, що присвоюється студентам

Приклад розподілу балів, які отримують студенти (для заліку) I семестр

Поточне тестування та самостійна робота						Робота на практичних	Підсумковий тест (залік)	Сума
Змістовий модуль 1			Змістовий модуль 2					
T1	T2	T3	T4	T5	T6			
7	7	6	7	7	6	10	50	100

Приклад розподілу балів, які отримують студенти (для екзамену) II семестр

Поточне тестування та самостійна робота				Робота на практичних	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 3		Змістовий модуль 4				
T7	T8	T9	T10			
10	10	10	10	10	50	100

Шкала оцінювання: Університету, національна та ECTS

Оцінка в балах	Оцінка ECTS	Визначення	За національною шкалою	
			Екзаменаційна оцінка, оцінка з диференційованого заліку	Залік
90–100	A	Відмінно	Відмінно	Зараховано
81-89	B	Дуже добре	Добре	
71-80	C	Добре		
61-70	D	Задовільно	Задовільно	
51-60	E	Достатньо		

12. Методичне забезпечення

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

13. Рекомендована література

Базова

4. *Базаров І. П.* Термодинамика, Москва, Высшая школа, 1991.
5. *Базаров І. П. . Геворкян Э. П, Николаев П. Н.* Термодинамика и статистическая физика. Москва, МГУ, 1986.
6. *Базаров І. П. . Геворкян Э. П, Николаев П. Н.* Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. Москва, МГУ, 1989.
7. *Ландау Л. Д. , Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. Т. 5, Ч. 1. Москва, Наука, 1995.
8. *Терлецкий Я. П.* Статистическая физика. Москва, Высшая школа, 1966.
9. *Квасников И.А.* Термодинамика и статистическая физика. Т. 1: Теория равновесных систем: Термодинамика. Москва, Едиториал УРСС, 2002.
10. *Квасников И. А.* Термодинамика и статистическая физика. Т. 2: Теория равновесных систем: Статистическая физика. Москва, Едиториал УРСС, 2002.
11. *Квасников И. А.* Термодинамика и статистическая физика. Т. 3: Теория неравновесных систем. Москва, Едиториал УРСС, 2003.
12. *Ансельм А. И.* Основы статистической физики и термодинамики. Москва, Наука, 1973.
13. *Румер Ю. Б., Рывкин М. С.* Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Москва, Наука, 1977.

Допоміжна

14. *Киттель Ч.* Статистическая термодинамика.- М.:Наука, 1977.
15. *Кубо Р.* Статистическая механика.- М.:Мир, 1967.
16. *Кубо Р.* Термодинамика.- М.:Мир, 1970.
17. *Леонтович М.А.* Введение в термодинамику. Статистическая физика. Москва, Наука, 1983.
18. *Самойлович А.Г.* Термодинамика и статическая физика. Москва, ГИТТЛ, 1953.
19. *Фейнман Р.* Статистическая механика. Москва, Мир, 1975.
20. *Боголюбов Проблемы динамической теории в статистической физике.* М-Л. ГТТЛ, 1946.

14. Приклад завдань, що виносяться на іспит

Білет № 1

1. Фазовий перехід у надпровідний стан у відсутності та наявності зовнішнього магнітного поля. (10 балів)
2. Термодинамічна еквівалентність ансамблів. (10 балів)
3. Співвідношення Онсагера. (10 балів)
4. При низьких температурах теплоємність кристалічної решітки пропорційна до куба температури $C_v \sim T^3$. Показати, що тоді $C_p - C_v \sim T^7$. (10 балів)
5. Знайти середню енергію та теплоємність системи N незалежних одновимірних квантових осциляторів. (10 балів)

15. Приклад тесту для контролю якості знань студентів

1. Який фундаментальний закон природи виражає I-е начало термодинаміки?
 - 1) закон збереження електричного заряду;
 - 2) закон збереження і перетворення механічної енергії;
 - 3) закон збереження і перетворення різних форм енергії.
2. Для системи з фіксованими температурою, об'ємом і кількістю частинок в стані рівноваги є мінімальною?
 - 1) внутрішня енергія;
 - 2) вільна енергія;
 - 3) термодинамічний потенціал Гіббса.
3. При фазовому переході I-го роду змінюється скачком.
 - 1) внутрішня енергія;
 - 2) ентропія;
 - 3) теплоємність.
4. Процес релаксації є
 - 1) перехід з одного рівноважного стану у інший рівноважний стан;
 - 2) перехід з нерівноважного стану у рівноважний;
 - 3) перехід з рівноважного стану у нерівноважний.
5. Канонічний ансамбль є сукупністю макросистем, які
 - 1) є замкнені і ізольовані;
 - 2) обмінюються з термостатом теплотою і частинками;
 - 3) обмінюються з термостатом тільки теплотою.

6. Вільна енергія у статистичній механіці безпосередньо визначається
- 1) ентропією системи;
 - 2) статистичною сумою (інтегралом) системи;
 - 3) статистичною вагою системи.
7. У системі нейтральних частинок потенціал взаємодії між частинками є
- 1) далекодіючим;
 - 2) незалежним від відстані між частинками;
 - 3) короткодіючим.
8. Для якого газу хімічний потенціал може бути додатнім?
- 1) газу Фермі;
 - 2) газу Бозе;
 - 3) класичного ідеального газу.
9. Хімічний потенціал сильно виродженого газу Фермі є
- 1) близький до нуля;
 - 2) приблизно рівний енергії Фермі;
 - 3) від'ємним і великим за модулем.
10. Імовірність флюктуації у замкненій ізольованій системі визначається відхиленням від рівноважного значення
- 1) ентропії;
 - 2) вільної енергії;
 - 3) термодинамічного потенціалу Гіббса.
11. Кінетичні коефіцієнти в термодинаміці необоротних процесів є коефіцієнтами пропорційності між
- 1) ентропією та параметрами, що визначають нерівноважний стан системи;
 - 2) термодинамічними потоками та силами;
 - 3) ентропією та термодинамічними силами.
12. Співвідношення Онсагера для кінетичних коефіцієнтів описують їх
- 1) властивості симетрії;
 - 2) залежність від величини флюктуацій густини частинок системи;
 - 3) залежність від температури та тиску в системі.