

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І.МЕЧНИКОВА  
Кафедра фізики та астрономії

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Проректор з науково-педагогічної роботи  
Олександр ЗАПОРОЖЧЕНКО  
“ \_\_\_\_\_ ” 2022 р.



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ОК 24 «Термодинаміка і статистична фізика»**

|                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| Рівень вищої освіти          | перший (освітньо-професійний) |
| Галузь знань                 | 10 – Природничі науки         |
| Спеціальність                | 104 - Фізика та астрономія    |
| Освітньо-професійна програма | Фізика та астрономія          |

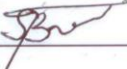
ОНУ  
Одеса  
2022


Робоча програма навчальної дисципліни «Термодинаміка і статистична фізика». – Одеса: ОНУ, 2022. – 24 с.

Розробник: Сушко Мирослав Ярославович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та астрономії;

Робочу програму затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії ФМФІТ


Протокол № 1 від «5» вересня 2022 р.

Завідувач кафедри  Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Погоджено із гарантом ОПІ «Фізика та астрономія»  Юрій НІЦУК

Схвалено навчально-методичною комісією (НМК) факультету математики, фізики та інформаційних технологій

Протокол № 1 від «6» вересня 2022 р.

Голова НМК  Наталя МАСЛІЄВА

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № 1 від «1» 02 2023р.

Завідувач кафедри  Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № 1 від «29» 08 2023р.

Завідувач кафедри  Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

## 1. Опис навчальної дисципліни

| Найменування показників   | Галузь знань,<br>Спеціальність, спеціалізація,<br>рівень вищої освіти  | Характеристика навчальної дисципліни         |
|---|--|--|
|   |  | Очна (денна) форма навчання                  |
| Загальна кількість кредитів – 8<br>годин – 240<br>змістових модулів – 7 | Галузь знань<br>10 – Природничі науки<br>Спеціальність:<br>104 – Фізика та астрономія<br>Рівень вищої освіти:<br>Перший (освітньо-професійний) | Обов'язкова дисципліна                       |
|   |  | Рік підготовки:                              |
|   |  | 4-й  |
|   |  | Семестр                                      |
|   |  | 7-й, 8-й                                     |
|   |  | Лекції                                       |
|   |  | 60 год.                                      |
|   |  | Практичні, семінарські                       |
|   |  | 60 год.                                      |
|   |  | Лабораторні                                  |
|   |  | 0 год.                                       |
|   |  | Самостійна робота                            |
|   |  | 120 год.                                     |
|   |  | Форма підсумкового контролю:<br>залік, іспит |

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Метою** викладання навчальної дисципліни є підготовка фахівців, здатних розв'язувати складні спеціалізовані задачі і практичні проблеми, пов'язані з дослідженням фізичних об'єктів і систем, процесів і явищ у макроскопічних системах та їх технічними застосуваннями у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що характеризуються комплексністю і невизначеністю умов та передбачають застосування певних статистичних теорій і методів фізики та/або астрономії, а також формування у здобувачів здатності розв'язувати складні спеціалізовані задачі з організації освітнього процесу, які зумовлені закономірностями й особливостями сучасної теорії і методики навчання.

Основними **завданнями** вивчення дисципліни є формування у студентів наступної системи компетентностей, що включають знання, розуміння, уміння та навички кількісного аналізу природних явищ та фізичних процесів у макроскопічних системах з використанням термодинамічних та статистичних методів сучасної фізики:

**Інтегральна компетентність** – здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

### **Загальні компетентності:**

- K02. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- K04. Здатність бути критичним і самокритичним.
- K05. Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- K08. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт.

### **Спеціальні (фахові) компетентності:**

- K16. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.
- K21. Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси.
- K22. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.
- K24. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.
- K25. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.
- K26. Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.
- K27. Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень.

### **Програмні результати навчання.**

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач вищої освіти повинен досягнути таких результатів:

- ПР01. Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.
- ПР08. Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

4 рік, 7 семестр

### **Змістовий модуль 1. Начала і методи термодинаміки**

*Тема 1. Базові поняття і закони термодинаміки.* Макроскопічний опис речовини, термодинамічні змінні. Постулат про існування стану термодинамічної рівноваги. Поняття температури та її основні властивості. Внутрішня енергія, кількість теплоти та робота. Закон збереження енергії (перше начало термодинаміки). Ентропія та друге начало термодинаміки. Постулат Нернста (третє начало термодинаміки).

*Тема 2. Аксиоматичний підхід до термодинамічного опису системи.* Екстенсивні змінні. Система аксіом Каллена та їх застосування до простої термодинамічної системи. Умови теплової, механічної та матеріальної рівноваги між частинами замкненої системи. Інтенсивні (польові) змінні. Рівняння стану.

*Тема 3. Метод термодинамічних потенціалів.* Термодинамічні потенціали: внутрішня енергія, вільна енергія, тепла функція (ентальпія), термодинамічний потенціал

Гіббса. Їх фізичний зміст та основні властивості. Знаходження термодинамічних величин за термодинамічними потенціалами. Співвідношення Максвелла, приклади їх застосування. Узагальнення на системи зі змінною кількістю частинок. Термодинамічні потенціали як однорідні функції першого порядку від екстенсивних змінних, рівняння Ейлера. Зв'язок хімічного потенціалу та термодинамічного потенціалу Гіббса. Співвідношення Дюгема–Гіббса.

**Тема 4. Термодинамічні коефіцієнти.** Означення коефіцієнтів теплового розширення та термічного тиску, ізотермічної та адіабатичної стисливостей, ізотермічного та адіабатичного модулів всебічного стиснення, теплоємностей при сталих об'ємі, тиску чи інших параметрах. Деякі співвідношення між похідними диференційовної функції, приклади їх застосування: зв'язок між коефіцієнтами теплового розширення, термічного тиску та ізотермічної стисливості; зв'язок між теплоємностями при сталих об'ємі і тиску; формула Майера. Метод яacobіанів: означення та основні властивості яacobіанів, умова калібрування, приклади застосування: зв'язок між адіабатичною та ізотермічною стисливостями; кількість незалежних термодинамічних коефіцієнтів простої системи.

**Тема 5. Умови стійкості рівноваги однорідної системи та рівноваги в зовнішніх полях.** Термодинамічні нерівності, їх фізичний зміст. Термодинамічний опис систем, поміщених у зовнішні поля, умови їх рівноваги. Гідростатичний тиск та барометрична формула. Умови хімічної рівноваги. Закон діючих мас.

## **Змістовий модуль 2. Основні положення статистичної фізики рівноважних систем**

**Тема 1. Статистичні ансамблі та статистичні розподіли. Мікросканонічний розподіл і канонічний розподіл Гіббса.** Мікроскопічний підхід до опису конденсованого стану. Динамічний стан механічної системи. Формалізм та рівняння руху Гамільтона. Фазовий простір. Зображення станів системи за допомогою точок фазового простору. Теорема Ліувілля. Поняття про статистичний ансамбль. Статистична функція розподілу, її фізичний зміст. Умова статистичної незалежності. Відшукання статистичних середніх за допомогою функції розподілу. Флуктуації. Рівняння руху для статистичної функції розподілу. Рівноважні стани. Зв'язок функції розподілу з адитивними інтегралами руху. Роль енергії в статистичній фізиці. Мікросканонічний розподіл. Побудова канонічного розподілу Гіббса для системи в термостаті.

**Тема 2. Розподіли Максвелла і Больцмана.** Застосування канонічного розподілу Гіббса до ідеальних класичних газів у зовнішньому полі. Розподіли Максвелла для імпульсу, швидкості, їх компонент і модулів, напряду та кінетичної енергії поступального руху молекул. Обчислення найімовірніших значень та середніх значень відповідних величин та середніх значень функцій цих величин. Тиск ідеального газу на пружну стінку. Доплерівське розширення спектральних ліній. Розподіл для повної енергії одноатомного ідеального газу. Розподіл Больцмана та його застосування: барометрична формула; дослід Перрена; розподіл частинок у центрифугі; газ неполярних молекул в електричному полі.

**Тема 3. Побудова статистичної термодинаміки.** Статистичний інтеграл. Вирази для внутрішньої енергії та тиску через статистичний інтеграл. Статистична вага. Ентропія, її статистичне тлумачення та основні властивості. Рівноважні процеси та перше начало термодинаміки. Вільна енергія системи, її зв'язок зі статистичним інтегралом. Нерівноважні системи та друге начало термодинаміки. Ентропія як міра неупорядкованості системи. Поняття про інформаційну ентропію Шеннона. Парадокс Гіббса, спосіб його розв'язання в класичній статистиці, пояснення за допомогою принципу тотожності частинок. Квазікласична оцінка об'єму фазового простору, що

припадає на один квантових стан. Остаточна форма канонічного розподілу Гіббса в класичній статистиці.

**Тема 4. Матриця густини.** Чисті та змішані стани квантовомеханічної системи. Матриця густини: означення, рівняння руху. Стаціонарні стани, властивості матриці густини для них. Статистичний розподіл для квантових систем, статистична матриця. Основне кінетичне рівняння і принцип зростання ентропії. Статистична сума, її зв'язок із вільною енергією. Правила переходу до квазікласичного випадку.

### **Змістовий модуль 3. Статистична термодинаміка ідеальних та слабко-неідеальних систем**

**Тема 1. Класичні ідеальні одноатомні та молекулярні гази.** Термічне та калориметричне рівняння стану. Внески різних типів ступенів вільності молекули в теплоємність класичного ідеального молекулярного газу. Класична теорія теплоємності твердого тіла. Термодинамічна теорія збурень. Вплив ангармонічності коливань атомів молекули на формування теплоємності системи.

**Тема 2. Ідеальні молекулярні гази з квантованими внутрішніми ступенями вільності.** Квантова теорія обертальної та коливальної частин теплоємності, характеристичні температури. Поведінка теплоємності молекулярних газів у широкому інтервалі температур.

**Тема 3. Ідеальний парамагнітний газ жорстких магнітних моментів у зовнішньому магнітному полі.** Повний магнітний момент та намагніченість газу: функція Ланжевена, її асимптотики, магнітна сприйнятливість, закон Кюрі, магнітна проникність. Ідеальний газ жорстких електричних диполів у зовнішньому електричному полі. Повний дипольний момент, поляризованість та діелектрична проникність такого газу.

**Тема 4. Слабконеідеальні гази з короткосяжним парним потенціалом взаємодії.** Функції Майєра, обчислення статистичного інтеграла у вигляді віріального розкладу, віріальне рівняння стану, зв'язок другого віріального коефіцієнта з міжмолекулярним потенціалом. Рівняння стану Ван-дер-Ваальса, обчислення коефіцієнтів рівняння через параметри міжмолекулярного потенціалу. Термодинамічні функції газу Ван-дер-Ваальса: внутрішня енергія, ентропія.

**Тема 5. Методи охолодження газів.** Процес Джоуля–Томсона: коефіцієнт процесу, його обчислення для різних рівнянь стану, інверсія коефіцієнта Джоуля–Томсона, залежність точки інверсії від тиску. Охолодження методом адіабатичного розмагнічування.

**Тема 6. Ідеальна класична плазма.** Непридатність віріального розкладу для опису плазми. Наближення Дебая–Хюккеля: рівняння Пуассона–Больцмана, випадок розрідженої плазми, екранування, радіус Дебая. Термодинамічні функції плазми: внутрішня енергія, вільна енергія, термічне рівняння стану, ентропія, теплоємність.

4 рік, 8 семестр

### **Змістовий модуль 4. Фазові переходи та критичні явища**

**Тема 1. Фази. Умови рівноваги фаз. Фазові переходи першого роду.** Системи зі змінною кількістю частинок, хімічний потенціал, його основні властивості. Поняття про фази речовини. Умови рівноваги фаз. Правило Гіббса. Приклади фазових діаграм для різних систем. Формула Клапейрона–Клаузіуса. Тиск насиченої пари вздовж кривих співіснування рідина–пара, рідина–тверде тіло. Двофазна область, правило важеля. Поверхневі явища, їх роль у зародженні нової фази. Критичний розмір

зародкової краплі. Метастабільні стани. Вплив електричного поля на процес конденсації. Бульбашкова камера Вільсона

**Тема 2. Критична точка. Модель Ван-дер-Ваальса критичної точки.** Умови стійкості критичного стану. Параметри критичної точки. Модель Ван-дер-Ваальса: критичні параметри, закон відповідних станів, поведінка фактору стисливості, правило Максвелла і форма кривої співіснування, правило важеля і стрибок теплоємності при переході через критичну точку, критичні індекси та амплітуди.

**Тема 3. Фазові переходи другого роду.** Модель Вейса для феромагнетика поблизу точки Кюрі: поняття про молекулярне поле, рівняння стану, структура розв'язку при нульовому та ненульовому зовнішньому полі, критична температура. Модель Ізінга в наближенні Брега–Вільямса: основні наближення, обчислення ентропії, енергії та конфігураційної енергії, параметр дальнього порядку, вільна енергія, рівняння стану, поведінка намагніченості та теплоємності. Термодинаміка надпровідників: хімічні потенціали надпровідної та нормальної фаз, особливості поведінки ентропії, питомого об'єму та теплоємності при переході між фазами, вплив зовнішнього поля.

**Тема 4. Теорія Ландау.** Поняття параметра порядку, структура термодинамічних потенціалів в околі точки фазового переходу, умови рівноваги та стійкості, рівняння стану, симетрична та несиметрична фази, поведінка термодинамічних функцій системи в обох фазах, критичні індекси та амплітуди, вплив зовнішнього поля. Термодинамічні функції ізотропного магнетика поблизу точки Кюрі. Фазові переходи в сегнетоелектриках і системах зі скалярним параметром порядку.

**Тема 5. Гіпотеза подібності.** Радіус кореляції, процедура великомасштабного усереднення, структура термодинамічного потенціалу в околі критичної точки, зв'язок між полями ефективної та вихідної систем. Критичні індекси, співвідношення між ними. Гамільтоніан Гінзбурга–Ландау–Вільсона. Парна кореляційна функція Орнштейна–Церніке.

## **Змістовий модуль 5. Флуктуації в макроскопічних системах**

**Тема 1. Флуктуаційні ефекти та їх характеристики.** Приклади флуктуаційних ефектів: межа чутливості вимірвальних приладів, флуктуаційна  $e. p. c.$ , молекулярне розсіяння світла, броунівський рух і стохастичні рівняння руху. Дисперсія та відносна величина флуктуацій. Обчислення флуктуацій екстенсивних величин за допомогою канонічних ансамблів. Канонічний ансамбль Гіббса та флуктуації енергії. Великий канонічний ансамбль та флуктуації кількості частинок, густини.

**Тема 2. Квазітермодинамічна теорія флуктуацій Ейнштейна.** Принцип Больцмана, функція розподілу квазітермодинамічних флуктуацій. Розподіл Гаусса, його властивості. Обчислення флуктуацій основних термодинамічних величин.

## **Змістовий модуль 6. Квантові статистики**

**Тема 1. Розподіли Фермі–Дірака та Бозе–Ейнштейна.** Основи квантової статистики. Принцип тотожності частинок. Ідеальні квантові гази та опис їх станів. Виведення розподілів Бозе–Ейнштейна та Фермі–Дірака з допомогою великого канонічного ансамблю, відповідні термодинамічні потенціали  $\Omega$ . Статистична вага та ентропія нерівноважних фермі- та бозе-газів. Виведення розподілів Бозе–Ейнштейна та Фермі–Дірака з умови максимуму ентропії.

**Тема 2. Рівноважне електромагнітне випромінювання.** Фотони, властивості газу фотонів, оцінка спектрального розподілу кількості коливальних мод, спектральний і  $\lambda$ -розподіли Планка. Закони Релея–Джинса, Віна, Планка. Термодинамічні функції рівноважного електромагнітного випромінювання.

**Тема 3. Гази елементарних частинок. Статистичне виродження.** Розподіли частинок за імпульсами, умови статистичного виродження та застосовності розподілу Максвелла–Больцмана, термодинамічний потенціал  $\Omega$ , рівняння стану та інші термодинамічні функції. Слабко вироджені газы, квантові поправки до рівняння стану Менделєєва–Клапейрона.

**Тема 4. Вироджений фермі-газ.** Енергія та температура Фермі, швидкість біля поверхні Фермі. Термодинамічні функції електронного газу в металах при нульовому та ненульових значеннях абсолютної температури: хімічний потенціал, внутрішня енергія, теплоємність, тиск, ізотермічна стисливість, відповідні оцінки. Парамагнетизм і діаманетизм газу вільних електронів.

**Тема 5. Електрони в напівпровідниках.** Поняття про дірки. Сферична модель: енергетичні спектри, ефективні параметри, концентрації електронів провідності і дірок. Положення рівня Фермі в напівпровідниках. Внески електронів і дірок у теплові властивості напівпровідників.

**Тема 6. Вироджений бозе-газ.** Конденсація Бозе–Ейнштейна, бозе-ейнштейнівський конденсат. Термодинамічні функції виродженого бозе-газу, поведінка в околі точки конденсації Бозе–Ейнштейна. Спостереження конденсації Бозе–Ейнштейна в різних системах. Проблема надплинності.

## **Змістовий модуль 7. Статистична термодинаміка конденсованих систем**

**Тема 1. Модель Дебая теплоємності кристала. Фонони та інші квазічастинки.** Тепловий рух атомів у кристалі, закон Дюлонга–Пті та проблема низькотемпературної поведінки теплоємності. Модель Ейнштейна твердого тіла. Наближення Дебая: колювання кристалічної ґратки, рівняння руху, власні колювання і власні частоти, функція розподілу для колювань, гранична частота колювань, характеристична температура Дебая, внутрішня енергія та теплоємність кристала, їх поведінка при високих та низьких температурах. Роль оптичних мод колювань і вплив домішок. Переваги та недоліки моделі Дебая. Рівняння стану Мі–Грюнаїзена. Поняття про вторинне квантування колювань кристала і фонони. Властивості газу фононів. Квазічастинки в теорії конденсованих середовищ. Рідкий He4: ротиони та фонони, їх кількість та внески в термодинамічні функції.

**Тема 2. Метод кореляційних функцій.** Означення та властивості молекулярних функцій розподілу: їх фізичний зміст, умова нормування, умова послаблення кореляцій, властивості симетрії для просторово однорідних та ізотропних систем. Знаходження середніх значень величин адитивного типу через кореляційні функції. Рівняння стану та стисливість у термінах парної кореляційної функції, можливості її експериментального вимірювання. Ланцюжок рівнянь БГКІ для знаходження кореляційних функцій. Поведінка парної кореляційної функції для різних середовищ. Окремий випадок системи твердих куль.



#### 4. Структура навчальної дисципліни

| Назви тем   | Кількість годин  |          |          |          |          |
|---|------------------|----------|----------|----------|----------|
|   | Очна денна форма |          |          |          |          |
|   | Усього           | Лек.     | Пр.      | Лаб.     | СР       |
| <b>1</b>  | <b>2</b>         | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>7</b> |
| <b>Змістовий модуль 1. Начала і методи термодинаміки</b>  |                  |          |          |          |          |
| Тема 1. Базові поняття і закони термодинаміки.  | 2                | 2        |          |          |          |
| Тема 2. Аксиоматичний підхід до термодинамічного опису системи.   | 8                | 2        |          |          | 6        |
| Тема 3. Метод термодинамічних потенціалів.  | 8                | 2        | 2        |          | 4        |
| Тема 4. Термодинамічні коефіцієнти.   | 8                | 2        | 2        |          | 4        |
| Тема 5. Термодинаміка ідеального газу та газу Ван-дер-Ваальса. Методи охолодження газів.                      | 8                | 2        | 4        |          | 2        |
| Тема 6. Умови стійкості рівноваги однорідної системи та рівноваги в зовнішніх полях.                          | 8                | 2        |          |          | 6        |
| <b>Змістовий модуль 2. Основні положення статистичної фізики рівноважних систем</b>                           |                  |          |          |          |          |
| Тема 1. Статистичні ансамблі та статистичні розподіли. Мікроканонічний розподіл і канонічний розподіл Гіббса. | 9                | 3        |          |          | 6        |
| Тема 2. Розподіли Максвелла і Больцмана.  | 13               | 1        | 6        |          | 6        |
| Тема 3. Побудова статистичної термодинаміки.  | 9                | 3        |          |          | 6        |
| Тема 4. Матриця густини.  | 10               | 2        |          |          | 8        |
| <b>Змістовий модуль 3. Статистична термодинаміка ідеальних та слабко-неідеальних систем</b>                   |                  |          |          |          |          |
| Тема 1. Класичні ідеальні одноатомні та молекулярні гази  | 9                | 1        | 6        |          | 2        |
| Тема 2. Ідеальні молекулярні гази з квантованими внутрішніми ступенями вільності.                             | 10               | 2        | 4        |          | 4        |
| Тема 3. Ідеальний парамагнітний газ жорстких магнітних моментів у зовнішньому магнітному полі.                | 4                | 2        | 2        |          |          |
| Тема 4. Слабконеідеальні гази з короткосяжним парним потенціалом взаємодії.                                   | 8                | 2        | 2        |          | 4        |

|   |            |           |           |  |            |
|---|------------|-----------|-----------|--|------------|
| Тема 5. Ідеальна класична плазма.   | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| <b>Змістовий модуль 4. Фазові переходи та критичні явища</b>              |            |           |           |  |            |
| Тема 1. Фази. Умови рівноваги фаз. Фазові переходи першого роду.          | 12         | 2         | 4         |  | 6          |
| Тема 2. Критична точка. Модель Ван- дер-Вальса критичної точки.           | 8          | 2         | 2         |  | 4          |
| Тема 3. Фазові переходи другого роду.                                     | 8          | 2         |           |  | 6          |
| Тема 4. Теорія Ландау.  | 10         | 2         | 2         |  | 6          |
| Тема 5. Гіпотеза подібності.  | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| <b>Змістовий модуль 5. Флуктуації в макроскопічних системах</b>           |            |           |           |  |            |
| Тема 1. Флуктуаційні ефекти та їх характеристики.                         | 12         | 2         | 2         |  | 8          |
| Тема 2. Квазітермодинамічна теорія флуктуацій Ейнштейна.                  | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| <b>Змістовий модуль 6. Квантові статистики</b>                            |            |           |           |  |            |
| Тема 1. Розподіли Фермі–Дірака та Бозе–Ейнштейна.                         | 6          | 2         |           |  | 4          |
| Тема 2. Рівноважне електромагнітне випромінювання.                        | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| Тема 3. Гази елементарних частинок. Статистичне виродження.               | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| Тема 4. Вироджений фермі-газ.   | 10         | 2         | 2         |  | 6          |
| Тема 5. Електрони в напівпровідниках.                                     | 4          |           | 2         |  | 2          |
| Тема 6. Вироджений бозе-газ.  | 6          | 2         | 2         |  | 2          |
| <b>Змістовий модуль 7. Статистична термодинаміка конденсованих систем</b> |            |           |           |  |            |
| Тема 1. Модель Дебая теплоємності кристала. Фонони та інші квазічастинки. | 11         | 3         | 4         |  | 4          |
| Тема 2. Метод кореляційних функцій.                                       | 9          | 3         | 2         |  | 4          |
| Усього годин  | <b>240</b> | <b>60</b> | <b>60</b> |  | <b>120</b> |

### 5. Теми семінарських занять

Семінарські заняття не передбачені навчальним планом

### 6. Теми практичних занять

| № з/п | Назва теми  | Кількість годин |
|-------|---|-----------------|
| 1     | Побудова термодинамічних потенціалів: внутрішня енергія, вільна | 2               |

|    |   |   |
|----|---|---|
|    | енергія, теплова функція (ентальпія), термодинамічний потенціал Гіббса. Знаходження за ними термодинамічних величин. Співвідношення Максвелла, рівняння Ейлера, Дюгема–Гіббса. Властивості хімічного потенціалу.  |   |
| 2  | Термодинамічні співвідношення та перетворення: калоричні рівняння, співвідношення між термодинамічними похідними, метод якобіанів. Їх застосування: термодинаміка електромагнітного випромінювання, співвідношеннями між термодинамічними коефіцієнтами.  | 2 |
| 3  | Термодинаміка ідеальних класичних газів: ентропія, робота та кількість переданого тепла для різних процесів, хімічний потенціал.  | 2 |
| 4  | Термодинаміка газу Ван-дер-Ваальса. Процес Джоуля–Томсона.  | 2 |
| 5  | Поступальний рух молекул та нормовані розподіли Максвелла для імпульсу, швидкості, компонент імпульсу та швидкості, модуля імпульсу та швидкості, напрямку руху та кінетичної енергії молекул. Найімовірніші значення цих величин. Обчислення середніх значень цих величин та функцій від них.  | 2 |
| 6  | Тиск ідеального газу на пружну стінку. Доплерівське розширення спектральних ліній.  | 2 |
| 7  | Розподіл Больцмана для частинок ідеального газу в зовнішніх полях та його застосування: барометрична формула, дослід Перрена, розподіл частинок у центрифuzі.   | 2 |
| 8  | Статистична термодинаміка ідеального класичного одноатомного газу: статистичний інтеграл; вільна енергія; внутрішня енергія; тиск, термічне рівняння стану, рівняння ізотермічного, ізохоричного та ізобаричного процесів; ізотермічна стисливість; коефіцієнт теплового розширення; ентропія; питомі теплоємності при сталих об'ємі та тиску; рівняння адіабатичного процесу. Змішування ідеальних класичних газів, парадокс Гіббса, урахування тотожності частинок. | 2 |
| 9  | Статистична термодинаміка ідеальних класичних двоатомних газів: поступальна, обертальна та коливальна частини статистичного інтеграла, урахування симетрії молекул, внески різних ступенів вільності в термодинамічні функції газу.   | 2 |
| 10 | Статистична термодинаміка ідеальних класичних багатоатомних газів. Обчислення класичних значень теплоємності для газів молекул різних типів (лінійних, нелінійних, жорстких, пружних). Суміші ідеальних газів. Закон Дальтона. Термодинаміка ультра релятивістського газу.  | 2 |
| 11 | Статистична термодинаміка системи незалежних квантових осциляторів: статистична сума, вільна та внутрішня енергії, теплоємність, їх високотемпературні та низькотемпературні асимптотики.   | 2 |
| 12 | Статистична термодинаміка системи незалежних квантових ротаторів: статистична сума, статистична сума, вільна та внутрішня енергії, теплоємність, їх високотемпературні та низькотемпературні асимптотики. Характеристичні температури та поведінка ідеальних газів двоатомних молекул у широких температурних інтервалах  | 2 |
| 13 | Газ неполярних молекул в електричному полі. Дипольний газ у зовнішньому полі: розподіл за орієнтаціями диполів, дипольний момент та діелектрична проникність газу.  | 2 |
| 14 | Віріальне рівняння стану. Рівняння стану Ван-дер Ваальса. Обчислення параметрів цих рівнянь через парний потенціал міжмолекулярної взаємодії.   | 2 |
| 15 | Екранування зарядів у плазмі: потенціал поля зарядженої частинки,   | 2 |

|    |   |   |
|----|---|---|
|    | радіус Дебая, розподіл заряду в околі виділеної частинки. Екранування йонів у розчинах електролітів.  |   |
| 16 | Криві співіснування. Температурна залежність тиску насиченої пари вздовж кривих співіснування рідина–пара та тверде тіло–пара. Критична точка. Обчислення параметрів критичної точки для двопараметричних рівнянь стану.  | 2 |
| 17 | Модель зародження нової фази: термодинамічний потенціал з урахуванням енергії поверхневого натягу, форма зародкової краплі, стрибок тиску на її поверхні, тиск над нею та його залежність від радіуса краплі, критичний розмір краплі, вплив розміру крапель на процес конденсації.   | 2 |
| 18 | Модель Ван-дер-Вальса критичної точки: положення критичної точки, зведені координати, рівняння критичної ізохори і критичної ізотерми, поведінка стисливості, двофазна область, правила важеля і Максвелла, крива співіснування фаз, стрибок теплоємності. Відповідні критичні індекси та критичні амплітуди.   | 2 |
| 19 | Термодинамічні функції ізотропного магнетика поблизу точки Кюрі в теорії Ландау: термодинамічний потенціал, спонтанна намагніченість, ентропія, питомий об'єм, теплоємність, стисливість, магнітна сприйнятливості.   | 2 |
| 20 | Гіпотеза подібності: обчислення критичних індексів, рівності Відома, Рашбрука–Куперсмита, Гріффітса.  | 2 |
| 21 | Квазітермодинамічна теорія флуктуацій Ейнштейна: вибір незалежних змінних, статистичні розподіли для флуктуацій температури та об'єму, тиску та ентропії, обчислення за їх допомогою других моментів флуктуацій термодинамічних величин. Обчислення моментів флуктуацій термодинамічних величин за допомогою статистичних ансамблів.  | 2 |
| 22 | Броунівський рух: рівняння Ланжевена, стохастичні умови та результат його інтегрування, співвідношення Ейнштейна між коефіцієнтами дифузії та рухливості частинки.  | 2 |
| 23 | Спектральний розподіл Планка для чорного випромінювання. Закони Релея–Джинса та Віна, закон зміщення Віна. Закон Стефана–Больцмана: виведення за допомогою спектрального розподілу Планка, термодинамічне виведення Больцмана. Енергія, тиск, термодинамічний потенціал $\Omega$ , хімічний потенціал та інші термодинамічні функції рівноважного електромагнітного випромінювання. | 2 |
| 24 | Гази елементарних частинок. Статистичне виродження. Рівняння стану ідеальних нерелятивістських і релятивістських квантових газів. Перша квантова поправка до рівняння Менделєєва–Клапейрона.  | 2 |
| 25 | Повністю вироджений фермі-газ, енергія та температура Фермі, швидкість біля поверхні Фермі, відповідні числові оцінки. Термодинамічні функції виродженого електронного газу: хімічний потенціал, внутрішня енергія, теплоємність, тиск, ізотермічна стисливість.  | 2 |
| 26 | Електрони і дірки в напівпровідниках. Сферична модель: енергетичні спектри, ефективні параметри і концентрації електронів провідності і дірок. Положення рівня Фермі в напівпровідниках.  | 2 |
| 27 | Вироджений бозе-газ. Конденсація Бозе–Ейнштейна. Поведінка термодинамічних функцій виродженого бозе-газу в околі температури конденсації.   | 2 |
| 28 | Модель Дебая для дво- та одновимірного кристалів: відшукування  | 2 |

|    |   |           |
|----|---|-----------|
|    | функцій розподілу, обчислення внутрішньої енергії та теплоємності, аналіз їх високо- і низькотемпературної поведінки. Рівняння стану Мі–Грюнайзена. |           |
| 29 | Квазічастинки в He4: ротони та фонони, їх кількість та внески у вільну енергію, ентропію та теплоємність He4.                                       | 2         |
| 30 | Обчислення середніх значень величин адитивного типу через кореляційні функції. Рівняння стану і стисливість у термінах парної кореляційної функції  | 2         |
|    | <b>РАЗОМ</b>  | <b>60</b> |

### 7. Теми лабораторних занять

Лабораторні заняття не передбачені навчальним планом

### 8. Самостійна робота

| № з/п | Назва теми/Питання для підготовки, завдання   | Кількість годин |
|-------|---|-----------------|
| 1     | Системи аксіом термодинаміки.   | 6               |
| 2     | Розширення термодинаміки на непрості системи, включаючи діелектрики і магнетики.  | 4               |
| 3     | Виведення термодинамічних співвідношень за допомогою методу якобіанів.  | 4               |
| 4     | Інверсія коефіцієнта Джоуля–Томсона. Залежність точки інверсії від тиску.   | 2               |
| 5     | Розподіл температури в атмосфері.   | 2               |
| 6     | Умови хімічної рівноваги. Закон діючих мас.   | 4               |
| 7     | Розподіл для повної енергії одноатомного ідеального газу та мікромеханічний розподіл.   | 2               |
| 8     | Великий канонічний розподіл Гіббса та $T$ – $P$ – $N$ розподіл.   | 4               |
| 9     | Виведення розподілу Максвелла на основі припущень про ізотропність простору та статистичну незалежність компонент швидкості, визначення змісту його параметрів. | 2               |
| 10    | Розподіл Максвелла за кутовими швидкостями молекули.  | 4               |
| 11    | Ентропія та інформація. Інформаційна ентропія Шеннона. Обмеження Шеннона–фон Неймана–Ландауера.   | 6               |
| 12    | Чисті та змішані ансамблі.  | 2               |
| 13    | Закон зростання ентропії в рамках статистичної фізики. Поняття про основне кінетичне рівняння.  | 6               |
| 14    | Термодинамічна теорія збурень. Вплив ангармонізму коливань молекул газу на його теплоємність.   | 2               |
| 15    | Роль електронної та електронно-коливальної частин спектра молекул газу у формуванні його теплоємності. Урахування спіну ядра.                                   | 4               |
| 16    | Віріальне рівняння стану для суміші газів.  | 4               |
| 17    | Термодинамічні функції класичної розрідженої плазми: внутрішня енергія, вільна енергія, тиск, ентропія, теплоємність.   | 2               |
| 18    | Крива співіснування та прихована теплота переходу в моделі тверде тіло як набір одновимірних гармонічних осциляторів–пара як ідеальний газ.                     | 2               |
| 19    | Вплив електричного поля на процес конденсації. Бульбашкова камера Вільсона.   | 4               |
| 20    | Модель Ван-дер-Ваальса: правило Максвелла і форма кривої  | 4               |

|    |   |     |
|----|---|-----|
|    | співіснування, правило важеля і стрибок теплоємності при переході через критичну точку.   |     |
| 21 | Модель Ізінга в наближенні Брега–Вільямса: обчислення ентропії, енергії та конфігураційного інтеграла, рівняння стану, намагніченості, критичної температури, теплоємності.   | 4   |
| 22 | Термодинаміка надпровідників: хімічні потенціали надпровідної та нормальної фаз, особливості поведінки ентропії, питомого об'єму та теплоємності при переході між фазами, вплив зовнішнього поля.   | 2   |
| 23 | Фазові переходи в сегнетоелектрика в рамках моделі Ландау.  | 4   |
| 24 | Модель Ландау для систем зі скалярним параметром порядку.   | 2   |
| 25 | Гамільтоніан Гінзбурга–Ландау–Вільсона. Парна кореляційна функція Орнштейна–Церніке.  | 2   |
| 26 | Молекулярне розсіяння світла. Спектр розсіяння в рідинах і газах.   | 4   |
| 27 | Броунівські частинки і стохастичні рівняння руху. Рівняння Фоккера—Планка.  | 2   |
| 28 | Флуктуації у великому канонічному ансамблі Гіббса.  | 2   |
| 29 | Квазітермодинамічна теорія флуктуацій: обчислення дисперсій флуктуацій з використанням різних пар незалежних змінних.   | 2   |
| 30 | Статистична вага та ентропія нерівноважних фермі- та бозе-газів. Виведення розподілів Бозе–Ейнштейна та Фермі–Дірака з умови максимуму ентропії. З'ясування фізичного змісту параметрів у цих розподілах за допомогою першого начала термодинаміки. | 4   |
| 31 | $\lambda$ -Розподіл Планка. Закон зміщення Віна в термінах довжини хвилі чорного випромінювання, температура поверхні Сонця.  | 2   |
| 32 | Квантові поправки до термодинамічних функцій і рівнянь стану невідроджених ідеальних газів.   | 2   |
| 33 | Парамагнетизм газу вільних електронів.  | 3   |
| 34 | Діамагнетизм газу вільних електронів.   | 3   |
| 35 | Внески електронів та дірок у внутрішню енергію й теплоємність напівпровідників.   | 2   |
| 36 | Обчислення термодинамічних функцій виродженого бозе-газу.   | 2   |
| 37 | Коливання в одновимірному ланцюжку однакових атомів. Закон дисперсії коливальних мод, функція розподілу коливань  | 2   |
| 38 | Коливання ізотропного кристала: рівняння руху, власні коливання і власні частоти. Вторинне квантування коливань і поняття про фонони. Властивості газу фононів.   | 2   |
| 39 | Парна кореляційна функція для різних середовищ. Окремий випадок системи твердих куль.   | 4   |
|    | РАЗОМ   | 120 |

## 9. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються словесні інтерактивні та наочні методи навчання. Головними словесними методами навчання є лекції і практичні заняття. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання: пояснювально-ілюстративний метод; метод проблемного викладу; частково-пошуковий або евристичний метод. Під час практичних занять використовуються наступні методи навчання: частково-пошуковий, або евристичний метод; дискусійний метод; дослідницький метод. Під час самостійної роботи використовується дослідницький метод.

## **10. Форми контролю та методи оцінювання**

Поточний контроль здійснюється за результатами аудиторного опитування і аудиторної активності студентів, виконання ними домашніх завдань, що включають теми практичних занять і теми для самостійної роботи, модульних контрольних робіт. Підсумковий семестровий контроль (іспит) додатково враховує результати підсумкової екзаменаційної роботи.

### **Критерії оцінювання виконання практичних занять і самостійної роботи**

Теми практичних занять і теми для самостійної роботи оцінюються через виконання домашніх завдань. Кожне завдання включає кілька завдань та/чи запитань, відповіді на які кожний студент подає у письмовій формі. Відповіді перевіряються викладачем та обговорюються зі студентом і його однокурсниками. Оцінка за виконання визначається повнотою, правильністю і якістю наданих студентом відповідей. Вона включається в оцінку поточного контролю за алгоритмом, наведеним у пункті **12. Розподіл балів, отримуваних студентами.**

### **Критерії оцінювання контрольних робіт за модулями**

Контрольні роботи за модулями проводиться в письмовій формі. Кожна робота складається з 10 теоретичних питань, кожне з яких може включати кілька пов'язаних підпитань, на які треба відповісти у стислій формі. Відповідь на кожне питання оцінюється за десятибальною шкалою наступним чином:

- повна правильна відповідь – 10 балів;
- повна відповідь, що містить незначну неточність – 9 балів;
- повна відповідь, що містить дві неточності – 8 балів;
- повна відповідь, що містить помилку, або неповна відповідь, де відсутнє певне пояснення – 7 балів;
- повна відповідь з двома помилками, або неповна відповідь з помилкою – 6 балів;
- за кожну наступну помилку чи відсутнє пояснення знімається 1 бал;
- повністю неправильна або відсутня відповідь – 0 балів.

### **Критерії оцінювання підсумкового контролю**

Підсумковий семестровий контроль (іспит) проводиться в письмовій формі у вигляді письмової контрольної роботи, що оцінюється за 100-бальною шкалою. Вона складається з таких чотирьох розділів, що оцінюються наступним чином:

А. Математичні означення та базові співвідношення. Тестові запитання (загальною кількістю до 10) з наведеними відповідями у вигляді певних формул, одна з яких правильна. Оцінювання відповіді на кожне запитання:

- правильна відповідь – 2 бали, неправильна відповідь – 0 балів.

В. Аналіз правильності тверджень Тестові запитання (загальною кількістю до 12) з наведеними відповідями у вигляді певних тверджень, одне з яких правильне. Оцінювання відповіді на кожне запитання:

- правильна відповідь – 3 бали, неправильна відповідь – 0 балів.

С. Формулювання законів, означень, понять. Короткі теоретичні питання (загальною кількістю до 8), на які треба дати власні відповіді. Оцінювання відповіді на кожне питання:

- повна розгорнута відповідь – 4 бали;
- повна розгорнута відповідь, що містить неточності чи суперечності, або повна, але не розгорнута відповідь – 3 бали;
- повна розгорнута відповідь, що містить помилку, або повна, але не розгорнута відповідь, що містить неточності чи суперечності, або неповна відповідь – 2 бали

- повна розгорнута відповідь, що містить дві помилки, або повна, але не розгорнута відповідь, що містить помилку, або неповна відповідь, що містить помилку, неточності чи суперечності – 1 бал
- повна розгорнута відповідь, що містить три і більше помилок, або повна, але не розгорнута відповідь, що містить дві і більше помилок, або неповна відповідь, що містить дві і більше помилок, або відсутність відповіді – 0 балів.

D. Практичне завдання. Дві типові задачі середнього рівня складності. Оцінювання відповіді на кожну задачу:

- повний розв'язок з усіма поясненнями – 10 балів;
- повний розв'язок з усіма поясненнями, що містить незначну неточність – 9 балів;
- повний розв'язок з усіма поясненнями, що містить дрібну обчислювальну помилку, або повний розв'язок, де окремі пояснення відсутні чи містять неточності – 8 балів;
- повний розв'язок з усіма поясненнями, що містить помилку, або повний розв'язок, де відсутні пояснення, або неповний розв'язок – 7 балів;
- повний розв'язок з двома помилками, або неповний розв'язок з помилкою – 6 балів;
- за кожну наступну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- при наявності правильного пояснення ходу розв'язання, правильних вихідних співвідношень та часткових обчислень – 5 балів;
- за відсутність одного з цих пунктів, або за кожну наступну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- відповідь, що є повністю помилковою, або за відсутність відповіді – 0 балів.

Кількість балів, що студент отримує за письмову контрольну роботу, є сумою балів, отриманих ним за кожне завдання з екзаменаційного білету.

Підсумкова семестрова оцінка виставляється за шкалами, наведеними в пункті **12. Розподіл балів, отримуваних студентами.**

### **11. Питання для підготовки до періодичного й підсумкового контролів**

1. Поясніть, у чому полягає термодинамічний опис речовини. За яких умов він можливий і чому важливий?
2. Які змінні відносять до термодинамічних? Наведіть приклади. Як вони визначаються? Що таке інтенсивні та екстенсивні змінні, чим вони відрізняються? Наведіть приклади.
3. Що розуміється під термодинамічною системою, стінками системи та внутрішніми обмеженнями? Які типи стінок і обмежень Ви знаєте?
4. У чому полягає основна задача термодинаміки?
5. Сформулюйте постулат про існування стану термодинамічної рівноваги. Яку фундаментальну властивість процесів у термодинамічних системах він відображає? Як ця властивість використовується при побудові статистичної фізики?
6. Запишіть нерівність Клаузіуса та поясніть зміст усіх величин у ній. На основі яких результатів і як вона виводиться?
7. Існування якої фундаментальної функції впливає з нерівності Клаузіуса? Як означається ця функція і які має властивості?
8. Що розуміють під основною термодинамічною рівністю? Який її фізичний зміст?
9. Який вигляд основна термодинамічна має для довільних та рівноважних процесів? Чим ці процеси відрізняються?
10. Що розуміють під простою термодинамічною системою?
11. Сформулюйте систему постулатів Каллена для простої термодинамічної системи, поясніть їх зміст.
12. Який вигляд мають умови теплової, механічної та матеріальної рівноваги між



- частинами замкненої системи? Як вони виводяться?
13. За яких умов теплова, механічна та матеріальна рівноваги є стійкими? Які обмеження на параметри системи випливають з цих умов?
  14. У чому полягає метод термодинамічних потенціалів? Наведіть приклади цих потенціалів, поясніть як вони вводяться та який мають фізичний зміст.
  15. Які основні властивості термодинамічних потенціалів? Якими перетвореннями вони пов'язані між собою?
  16. Що розуміють під функцією стану і функцією процесу? Наведіть приклади таких функцій.
  17. Які математичні властивості мають функції стану? Що таке співвідношення Максвелла? Як їх отримують? Наведіть приклади їх застосувань.
  18. Як із співвідношень Максвелла випливають умови калібрування в методі якобіанів?
  19. Які функції називають однорідними функціями першого порядку? Які функції в термодинаміці мають такі властивості?
  20. Що називають рівнянням Ейлера? Як воно виводиться?
  21. Який зміст має і як виводиться співвідношення Дюгема–Гіббса? Як з нього знайти вираз для приросту хімічного потенціалу в (квазі)рівноважному процесі?
  22. Поясніть, як описується структура і поведінка речовини в рамках класичної статистичної фізики. Чому при цьому перевага віддається гамільтоновому формалізму?
  23. Дайте означення фазового простору. Як за його допомогою описується стан системи в рамках класичної статистичної фізики? Що таке фазова траєкторія, які особливості її поведінки?
  24. Сформулюйте теорему Ліувілля. Яке її значення для класичної статистичної фізики?
  25. Дайте означення функції розподілу, опишіть її основні властивості.
  26. Запишіть умову нормування для функції розподілу та поясніть її фізичний зміст.
  27. Запишіть і поясніть умову статистичної незалежності двох систем.
  28. Що розуміється під статистичним середнім? Який його зв'язок з результатами експериментальних вимірювань термодинамічних параметрів речовини? Що розуміється під ергодичною гіпотезою?
  29. У чому полягає метод канонічних ансамблів Гіббса? Як за його допомогою досліджуються властивості функції розподілу системи?
  30. Як веде себе функція розподілу системи вдовж фазової траєкторії? Яке рівняння руху воно задовольняє? Які наслідки випливають з цього рівняння?
  31. Який зв'язок функції розподілу з адитивними інтегралами руху? Яка роль енергії в статистичній фізиці?
  32. Що розуміють під мікροканонічним розподілом? До яких систем він застосовний? Запишіть вираз для мікροканонічного розподілу, поясніть його структуру та зміст усіх величин у ньому.
  33. Як за допомогою мікροканонічного розподілу можна отримати інші типи розподілів, зокрема, канонічний розподіл Гіббса?
  34. Що розуміється під канонічним розподілом Гіббса? До яких систем він застосовний? Запишіть його явний вираз для систем точкових частинок та поясніть зміст усіх величин у ньому.
  35. Які величини в канонічному розподілі Гіббса враховують квантову природу речовини? Поясніть структуру явних виразів для цих величин. Які схожі величини треба додатково ввести при аналізі молекулярних газів?
  36. Як за допомогою канонічного розподілу Гіббса для класичних систем точкових частинок отримати одночастинковий розподіл Максвелла?
  37. Запишіть у явному вигляді розподіли для компонент імпульсу та величини імпульсу частинки, відповідні умови нормування. Сформулюйте фізичний зміст цих розподілів та зобразіть їх графічно.

38. Як від розподілів для компонент імпульсу та величини імпульсу частинки перейти до розподілів за компонентами і величиною швидкості? За кінетичною енергією частинки?
39. Як за допомогою канонічного розподілу Гіббса для класичних систем точкових частинок отримати розподіл Больцмана? Сформулюйте його фізичний зміст, запишіть його у явному вигляді.
40. Опишіть способи вибору нормувального множника в розподілі Больцмана. Як за його допомогою знайти густину частинок у заданому силовому полі, зокрема, у полі тяжіння?
41. Як за допомогою розподілу Больцмана знайти густину частинок у системі частинок, що рівномірно обертається?
42. Запишіть співвідношення, які встановлюють зв'язок статистичного інтеграла для канонічного ансамблю Гіббса з вільною енергією, внутрішньою енергією та тиском системи. Покажіть, що два останні можна подати через вільну енергію системи й узгоджуються з термодинамічними формулами.
43. Запишіть співвідношення, які використовуються для побудови статистичної термодинаміки систем, що описуються великим канонічним ансамблем Гіббса.
44. Що розуміють під чистими та змішаними станами квантовомеханічної системи? Дайте означення матриці густини, опишіть її властивості.
45. Який вигляд має статистичний розподіл для квантової системи, що має фіксовану кількість частинок і перебуває в термостаті? Який його фізичний зміст? Як за його допомогою знайти статистичне середнє спостережувальної величини системи?
46. Що називають статистичною сумою? Як вона пов'язана з вільною енергією системи? Який вигляд мають правила переходу до квазікласичного випадку?
47. Що розуміється під статистичною вагою?
48. Дайте статистичне означення ентропії. Які основні властивості ентропії з нього випливають?
49. Який статистичний зміст має друге начало термодинаміки? Який зміст вкладається в твердження, що ентропія – це міра неупорядкованості системи? З цього погляду, ентропія якого тіла – кристалічного чи газоподібного – повинна бути більшою (за умови, що інші параметри обох тіл однакові)?
50. Опишіть найпростішу модель енергетичного спектра двоатомної молекули. Які основні параметри його поступальної, обертальної, коливальної і електронної частин?
51. Який фізичний зміст мають поступальна, обертальна і коливальна характеристичні температури двоатомного ідеального газу? Які їх типові значення?
52. Що називають функцією Майєра? Які її властивості і яке рівняння стану будується в її термінах?
53. Як фізична ідея лежить в основі побудови віріального рівняння стану?
54. Які типи взаємодії враховує рівняння Ван-дер-Ваальса?
55. Сформулюйте закон відповідних станів для систем із двопараметричним парним потенціалом взаємодії.
56. Що називають процесом Джоуля-Томсона? Як визначається температура інверсії?
57. Дайте означення ідеальної класичної плазми. Запишіть умову електронейтральності для неї.
58. У чому суть наближення Дебая–Хюккеля для плазми?
59. Що розуміється під екрануванням зарядів в плазмі? Який зміст радіуса Дебая?
60. Який фізичний зміст має і як обчислюється кореляційна енергія плазми?
61. Що розуміється під фазою речовини? Запишіть умови співіснування фаз. Скільки фаз однокомпонентної речовини можуть співіснувати одночасно?
62. У чому полягає правило фаз Гіббса?
63. Що розуміють під фазовими переходами? У чому полягає класифікація фазових переходів Еренфеста? Наведіть приклади фазових переходів і вкажіть їх типи.

64. Наведіть типові фазові діаграми однокомпонентної речовини в координатах тиск–температура і тиск–об’єм. Охарактеризуйте типові лінії і точки на обох типах діаграм. Що таке дво- та трифазні області? Вкажіть їх на діаграмах та сформулюйте правило для знаходження кількостей фаз у заданому об’ємі системи.
65. Опишіть основні характеристики фазових переходів першого роду.
66. Випишіть диференціальне рівняння для кривих співіснування фаз, поясніть фізичний зміст параметрів у ньому. Як це рівняння можна наближено зінтегрувати для кривих співіснування твердої (рідкої) і газової фаз?
67. Яку роль відіграють поверхневі явища при фазових переходах першого роду? Що розуміють під зародком нової фази? Як розмір зародку впливає на фазовий перехід?
68. Що таке метастабільні стани і чому вони виникають? Покажіть області існування цих станів на фазових діаграмах.
69. Що розуміється під критичною точкою рідина–пара? Покажіть її на фазових діаграмах. Яка фізична природа появи цієї точки?
70. Запишіть математичні умови для визначення положення критичної точки на фазовій діаграмі. Звідки вони випливають?
71. Якими закономірностями описуються термодинамічні величини рідини і газу в околі критичної точки? Дайте означення критичних амплітуд і критичних індексів для критичної ізотерми, бінодалі, ізотермічної стисливості та ізохоричної теплоємності в околі критичної точки рідина–пара. Які значення критичних індексів для цих величин дає експеримент?
72. У чому полягає модель Ван-дер-Ваальса критичної точки? Що таке правило Максвелла, чому і як воно використовується для знаходження кривої співіснування?
73. Наведіть значення критичних амплітуд і критичних індексів для критичної ізотерми, бінодалі, ізотермічної стисливості та ізохоричної теплоємності в околі критичної точки рідина–пара, які дає модель Ван-дер-Ваальса.
74. Наведіть приклади фазових переходів другого роду. Опишіть їх відмінності від фазових переходів першого роду.
75. Що таке молекулярне поле Вейса, яка його фізична природа? Опишіть основні положення і результати моделі Вейса.
76. Що розуміється під параметром порядку? Як він веде себе при наближенні до критичної точки? Для опису фазових переходів якого типу він використовується? Наведіть приклади.
77. Сформулюйте основні положення і результати теорії Ландау фазових переходів на прикладі ізотропного магнетика.
78. Опишіть модель Ізінга для магнетика.
79. Опишіть суть наближення Брегга–Вільямса для моделі Ізінга. Як у його рамках обчислюються конфігураційна енергія, ентропія та вільна енергія магнетика?
80. Які результати дає наближення Брегга–Вільямса для рівняння стану, намагніченості та теплоємності магнетика?
81. Дайте означення критичних амплітуд і критичних індексів для параметра порядку, теплоємності і магнітної сприйнятливості ізотропного магнетика в околі точки Кюрі. Наведіть значення критичних індексів у моделях Вейса, Ландау, Ізінга в наближенні Брегга–Вільямса, двовимірної моделі Онсагера.
82. Опишіть якісну картину формування намагніченого стану магнетика Ізінга при наближенні до критичної точки. Що розуміється під радіусом кореляції? Як він веде себе при наближенні до критичної точки?
83. В чому суть гіпотези подібності в теорії фазових переходів? Наведіть якісні аргументи на її користь. опишіть структуру термодинамічного потенціалу в околі критичної точки та зв’язок між полями блокової і вузольної систем.
84. Які співвідношення між критичними індексами випливають з гіпотези подібності? Як вони виконуються для моделей Ван-дер-Ваальса, Ландау, Ізінга в наближенні Брегга–

Вільямса, двовимірної моделі Онсагера та для експериментальних значень критичних індексів?

85. Що називається флуктуацією? Які основні характеристики флуктуацій?
86. Чому дорівнює середнє значення флуктуацій?
87. Що називають дисперсією флуктуацій?
88. Що називають відносною флуктуацією?
89. Як відносні флуктуації екстенсивної величини залежать від розмірів системи?
90. Чи є відмінність між поведінкою флуктуацій на великій відстані від критичної точки та в її безпосередньому околі?
91. Яке явище називається броунівським рухом? Яка його природа?
92. Запишіть фундаментальне співвідношення, на базі якого будується термодинамічна теорія флуктуацій. Який його зміст? Як воно використовується для побудови цієї теорії?
93. Що таке гауссові флуктуації? Із якого фундаментального принципу випливає ця властивість флуктуацій?
94. Яке основне співвідношення квазітермодинамічної теорії флуктуацій? Як воно використовується для обчислення параметрів флуктуацій? Яких саме?
95. Якими змінними зручно користуватися при обчисленнях в рамках квазітермодинамічної теорії флуктуацій? Чому?
96. Покажіть, як в рамках термодинамічної теорії флуктуацій обчислити другий момент флуктуацій густини? Зробіть це. Чи можна спостерігати його поведінку експериментально?
97. У чому полягає явище молекулярного розсіювання світла?
98. Які параметри речовини можна отримати із спектрів молекулярного розсіювання світла?
99. Що називається критичною опалесценцією? Яка природа цього явища?
100. Як скористатися канонічними ансамблями для обчислення флуктуацій?
101. Чи відрізняються результати обчислень флуктуацій в рамках квазітермодинамічної теорії та за допомогою канонічних ансамблів? Поясніть відповідь.
102. У чому принципова відмінність між звичайними та стохастичними рівняннями руху?
103. Що називають рівнянням Ланжевена?
104. Які основні властивості постулюються для випадкової сили? Які фізичні аргументи при цьому висувуються?
105. Які системи називають ідеальними квантовими газами? Чим вони відрізняються від ідеальних класичних газів?
106. Що таке числа заповнення? Що розуміється під середніми числами заповнення квантових станів?
107. Який фізичний зміст мають розподіли Фермі–Дірака і Бозе–Ейнштейна?
108. Що називають температурою статистичного виродження? Який вона має зміст для електронного газу в металах?
109. Які базові формули використовуються для побудови термодинамічних функцій ідеальних квантових газів? Поясніть зміст кожної величини в цих формулах. Як виконуються за ними обчислення?
110. Яких значень набуває хімічний потенціал невиродженого ідеального газу? Звідки можна це побачити?
111. У яких межах може лежати значення хімічного потенціалу бозе-газу? Як можна це показати?
112. Що розуміють під температурою теплового випромінювання?
113. Що називають фотонами? Які властивості вони мають?
114. Який зміст має розподіл Планка для рівноважного електромагнітного випромінювання? Якими способами його можна вивести?
115. Сформулюйте закони Релея–Джинса, Віна, зміщення Віна і Стефана–Больцмана для рівноважного електромагнітного випромінювання.

116. Який вигляд має рівняння стану рівноважного електромагнітного поля?
117. Як оцінити кількість фотонів в  $1 \text{ см}^3$  при кімнатній температурі? Як вона співвідноситься з кількістю атомів при нормальних умовах?
118. Який вигляд має рівняння стану нерелятивістського бозе-газу? Рівняння стану релятивістського фермі-газу?
119. Як змінюють тиск невиродженого ідеального газу перші квантові поправки до рівняння стану, пов'язані з тотожністю частинок?
120. Які типові значення температури виродження для газу вільних електронів у металах? Як вона називається? Як швидко рухаються електрони при абсолютному нулі температури?
121. Натрій має атомне число 11 та належить до першої групи періодичної таблиці Менделєєва. Який процент від усіх електронів деякого макроскопічного зразка натрію бере участь у формуванні його теплоємності при кімнатній температурі? Як залежить від температури їх внесок?
122. Яке явище називається конденсацією Бозе–Ейнштейна? При яких температурах вона відбувається?
123. Як ведуть себе хімічний потенціал та теплоємність ідеального бозе-газу в околі температури конденсації Бозе–Ейнштейна?
124. Правильним чи хибним є твердження, що надплинність рідкого  $\text{He}_4$  – це прояв явища конденсації Бозе–Ейнштейна в системі?
125. Сформулюйте закон Дюлонга–Пті для кристалічних тіл. Наведіть аргументи на його користь.
126. У чому полягала проблеми теплоємності, з якою зіткнулася класична фізика на початку минулого століття?
127. Сформулюйте основні положення та результати теорії Ейнштейна для теплоємності твердих тіл.
128. Дайте означення функції розподілу коливань системи за частотами. Якою умовою вона нормується?
129. Як знайти внутрішню енергію та теплоємність системи осциляторів через функцію розподілу коливань за частотами?
130. Побудуйте функцію розподілу коливань за частотами для рівноважного електромагнітного випромінювання. Як за її допомогою отримати закон Релея–Джинса та спектральний розподіл Планка?
131. Який вигляд має функція розподілу частот коливань кристала за частотами в моделі Ейнштейна?
132. Сформулюйте ключові положення моделі Дебая для теплоємності кристалічних тіл. У чому її принципова відмінність від моделі Ейнштейна?
133. Які типи звукових хвиль можуть поширюватися в кристалічних тілах? Які їх властивості використовуються для побудови функції розподілу коливань у моделі Дебая тривимірного кристала? Зобразіть цю функцію графічно.
134. Як обчислюються внутрішня енергія та теплоємність кристалічної ґратки в рамках моделі Дебая? Побудуйте графіки їх температурної залежності. Які асимптотики вони мають для одно-, дво- та тривимірних кристалів?
135. Що називають частотою та температурою Дебая? Які типові значення цієї температури? Якими двома способами її зазвичай оцінюють?
136. Які фактори спричиняють розбіжності між експериментальними значеннями теплоємності реальних кристалічних тіл та теоретичними передбаченнями моделі Дебая?
137. Як змінюється поведінка теплоємності метала з температурою при пониженні останньої до дуже низьких значень? Поясніть.
138. Запишіть рівняння Грюнайзена та Мі–Грюнайзена. Який кожне з них має зміст?
139. Що називають квазічастинками? Як це поняття використовується для опису

- термодинамічних функцій конденсованих середовищ? Наведіть приклади квазічастинок.
140. Що називають явищем надплинності? У яких системах та за яких умов його спостерігають?
  141. Як веде себе з температурою теплоємність рідкого He4 в околі  $\lambda$ -лінії? Побудуйте графік цієї залежності. До якого типу належить відповідний фазовий перехід?
  142. Який вигляд має залежність енергії квазічастинок у рідкому He4 від квазіімпульсу? Що описують окремі її частини?
  143. За допомогою якого співвідношення можна оцінити кількість фононів у He4? Поясніть зміст усіх величин, що до нього входять.
  144. За допомогою якого співвідношення можна оцінити внесок ротонів в енергію He4? Поясніть зміст усіх величин, що до нього входять.
  145. Дайте математичне означення молекулярних функцій розподілу та поясніть їх фізичний зміст.
  146. Випишіть умови нормування для молекулярних функцій розподілу. Який фізичний зміст вони мають?
  147. Поясніть фізичні умови послаблення кореляцій для молекулярних функцій розподілу.
  148. Яку систему рівнянь задовольняють молекулярні функції розподілу?
  149. Дайте означення парної кореляційної функції. Який її фізичний зміст? Яку математичну структуру вона має для однорідних та ізотропних систем?
  150. Як за допомогою парної кореляційної функції можна обчислити внутрішню енергію і теплоємність рідини?
  151. Опишіть поведінку парної кореляційної функції для газів, рідин і кристалів.

## 12. Розподіл балів, отримуваних студентами

У ході поточного контролю студент може отримати за кожну тему до 10 балів, які нараховуються таким чином:

| № з/п | Вид роботи   | Форма контролю                                 | Максимальне число балів |
|-------|--|--|-------------------------|
| 1     | Відвідування занять                                      | Конспект занять                                | 1                       |
| 2     | Аудиторна активність студента                            | Спостереження за аудиторною роботою студента   | 1                       |
| 3     | Виконання класних і домашніх завдань, самостійної роботи | Письмові розв'язки, письмові та усні відповіді | 8                       |
|       | Сума   |  | 10                      |

Максимальна кількість балів, яку студент може отримати за кожну контрольну роботу за змістовним модулем, складає 100 балів.

Підсумковий бал за кожний змістовний модуль обчислюється за такою схемою: знаходиться відсоток, який загальна сума балів, набраних студентом у ході поточного контролю, складає від максимально можливої за всі теми у цьому модулі; обчислюється відсоток, який загальна сума балів, набраних студентом у ході виконання контрольної роботи за змістовним модулем, складає від максимально можливої; знаходиться середнє значення для цих двох відсотків; від цього середнього береться певний ваговий відсоток (який чисельно дорівнює максимальній сумі балів за цей змістовний модуль і вказано нижче).

Підсумкова семестрова оцінка визначається за результатами поточного, періодичного та (при наявності) підсумкового контролю за такими алгоритмами:

### 7 семестр

| Поточний та періодичний контроль |                    |                    | Підсумковий бал* |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Змістовий модуль 1               | Змістовий модуль 2 | Змістовий модуль 3 |                  |
| 35                               | 30                 | 35                 | 100              |

\* Обчислюється як сума балів поточного та періодичного контролів.

Дані для обчислення балів поточного і періодичного контролю:

| Поточний та періодичний контроль     |    |    |    |    |    |                                      |    |    |    |                                      |    |    |    |    | Підсумковий бал* |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|--------------------------------------|----|----|----|--------------------------------------|----|----|----|----|------------------|
| Змістовий модуль 1                   |    |    |    |    |    | Змістовий модуль 2                   |    |    |    | Змістовий модуль 3                   |    |    |    |    |                  |
| T1                                   | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T1                                   | T2 | T3 | T4 | T1                                   | T2 | T3 | T4 | T5 |                  |
| 10                                   | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10                                   | 10 | 10 | 10 | 10                                   | 10 | 10 | 10 | 10 |                  |
| Контрольна робота за модулем 1 – 100 |    |    |    |    |    | Контрольна робота за модулем 2 – 100 |    |    |    | Контрольна робота за модулем 3 – 100 |    |    |    |    |                  |
| 100                                  |    |    |    |    |    |                                      |    |    |    |                                      |    |    |    |    |                  |

### 8 семестр

| Поточний та періодичний контроль |                    |                    |                    | Підсумковий контроль (іспит) | Підсумковий бал** |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|
| Змістовий модуль 4               | Змістовий модуль 5 | Змістовий модуль 6 | Змістовий модуль 7 |                              |                   |
| 35                               | 15                 | 30                 | 20                 | 100                          | 100               |

\*\* Обчислюється як сума балів поточного та періодичного контролів, помножена на коефіцієнт 0,6, та балу за підсумкову контрольну роботу, помноженого на 0,4.

Дані для обчислення балів поточного і періодичного контролю:

| Поточний та періодичний контроль     |    |    |    |    |                                      |    |                                      |    |    |    |    |    | Підсумковий контроль (іспит)         | Підсумковий бал** |                    |     |
|--------------------------------------|----|----|----|----|--------------------------------------|----|--------------------------------------|----|----|----|----|----|--------------------------------------|-------------------|--------------------|-----|
| Змістовий модуль 4                   |    |    |    |    | Змістовий модуль 5                   |    | Змістовий модуль 6                   |    |    |    |    |    |                                      |                   | Змістовий модуль 7 |     |
| T1                                   | T2 | T3 | T4 | T5 | T1                                   | T2 | T1                                   | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T1                                   | T2                |                    |     |
| 10                                   | 10 | 10 | 10 | 10 | 10                                   | 10 | 10                                   | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10                                   | 10                |                    |     |
| Контрольна робота за модулем 4 – 100 |    |    |    |    | Контрольна робота за модулем 5 – 100 |    | Контрольна робота за модулем 6 – 100 |    |    |    |    |    | Контрольна робота за модулем 7 – 100 |                   | 100                | 100 |

### Шкала оцінювання: національна та ECTS

| Сума балів за всі види навчальної діяльності | За шкалою ECTS | За національною шкалою |            |
|--|----------------|------------------------|------------|
|  |                | Для екзамену           | Для заліку |
| 90 – 100                                     | <b>A</b>       | Відмінно               | Зараховано |
| 85 – 89                                      | <b>B</b>       | Добре                  |            |
| 75 – 84                                      | <b>C</b>       |                        |            |

|         |           |              |               |
|---------|-----------|--------------|---------------|
| 70 – 74 | <b>D</b>  | Задовільно   |               |
| 60 – 69 | <b>E</b>  |              |               |
| 35 – 59 | <b>FX</b> | Незадовільно | Не зараховано |
| 0 – 34  | <b>F</b>  |              |               |

### 13. Навчально-методичне забезпечення

Навчально-методичне забезпечення включає такі матеріали: робоча програма навчальної дисципліни; силабус; посібники, конспекти і нотатки лекцій; завдання і методичні вказівки до практичних занять; завдання і контрольні питання для поточного, періодичного і підсумкового контролів.

### 14. Рекомендована література

#### Основна

1. Адамян В. М., Сушко М. Я. Основи квантової статистичної фізики. – Одеса: ОНУ, 2020. – 74 с.
2. Затовський О. В., Сушко М. Я. Статистична фізика і термодинаміка в задачах. – Одеса: ОНУ, 2014. – 244 с.
3. Затовський О. В., Бобров Р. О. Термодинаміка і статистична фізика. Методичні вказівки до практичних занять. – Одеса: Астропринт, 2005. – 36 с.
4. Єрмолаєв О. М., Рашба Г. І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки. – Харків: ХНУ, 2004. – 516 с.
5. Дацюк В. В. Термодинаміка і статистична фізика. Задачі та програма курсу. – Київ: КНУ, 2009. – 27 с.
6. Федорченко А. М. Вступ до курсу статистичної фізики та термодинаміки. – К.: Вища школа, 1973. – 188 с.
7. Callen H. B. Thermodynamics and an introduction to thermostatistics. – New York: Wiley, 1985. – 495 p.
8. Landau, L. D., Lifshitz, E. M. Statistical physics. Part 1. – Oxford: Elsevier Science, 2001. – 544 p.

#### Додаткова

1. Balescu, R. Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics. – New York: Wiley, 1975. – 576 p.
2. Feynman, R. P. Statistical mechanics: a set of lectures. – Boulder: Chapman and Hall, 2018. – 371 p.
3. Mayer, J. E. Statistical mechanics. – New York: Furnas Press, 2007. – 495 p.
4. Landsberg, P.T. (ed.). Problems in thermodynamics and statistical physics. – London: Pion, 1989. – 587 p.

### 13. Електронні інформаційні ресурси

1. <http://phys.onu.edu.ua>
2. <http://theorphys.onu.edu.ua/uk/textbooks>
3. <http://en.wikipedia.org/>
4. [http://www.researchgate.net/profile/Miroslav\\_Sushko1/publications](http://www.researchgate.net/profile/Miroslav_Sushko1/publications)