

Институт Естественных Наук и Экологии  
Физико-Математический Колледж

Программа по курсу  
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА  
3 курс, 6 семестр

Программу составил профессор Вакс Валентин Григорьевич

I. Основы статистической термодинамики.

1. Основные понятия статистической физики.

Статистическое распределение, средние и флуктуации, квазинезависимые подсистемы. Теорема Лиувилля. Статистическая матрица. Статистическое определение энтропии. Полное и неполное равновесие, энтропия неравновесной системы. Возрастание энтропии при самопроизвольных процессах.

2. Элементы термодинамики.

Основные термодинамические величины - температура, давление, теплоемкость, сжимаемость. Законы термодинамики. Термодинамические потенциалы, их экстремальность в состоянии равновесия. Соотношения между термодинамическими производными. Зависимость термодинамических потенциалов от числа частиц, термодинамические соотношения при переменном числе частиц. Термодинамика в электрическом и магнитном поле.

3. Распределение Гиббса.

Распределение Гиббса с постоянным и переменным числом частиц. Статистические суммы, их связь с термодинамическими потенциалами.

II. Идеальные газы.

1. Больцмановский идеальный газ.

Распределение Больцмана, условия его применимости. Свободная энергия больцмановского газа, уравнение состояния, выражения для энергии и теплоемкости. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью, закон равнораспределения. Термодинамика одноатомного идеального газа. Структура уровней и термодинамика двухатомных и многоатомных молекул.

## 2. Идеальные Ферми- и Бозе-газы.

Распределения Ферми и Бозе. Термодинамика вырожденного Ферми-газа. Вырожденный Бозе-газ, Бозе-конденсация. Термодинамика черного излучения, закон Стефана-Больцмана.

### III. Элементы термодинамики твердых тел.

Термодинамика колебаний кристаллической решетки: общие выражения для свободной энергии и теплоёмкости, случаи низких и высоких температур. Интерполяционная формула Дебая. Тепловое расширение: общее выражение и случаи низких и высоких температур. Теплоемкость и тепловое расширение металлов и диэлектриков.

### IV. Неидеальные газы.

Разложение по степеням плотности. Свободная энергия и уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Термодинамика разреженной плазмы, метод самосогласованного поля Дебая-Хюккеля.

### V. Равновесие фаз.

Условия равновесия фаз, правило рычага, теплота перехода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовые диаграммы в переменных  $(p, T)$ ,  $(T, V)$  и  $(p, V)$ . Критическая точка, бинадаль и спинодаль, правило площадей Максвелла. Фазовая диаграмма  $(p, V)$  и критические параметры для системы, описываемой уравнением Ван дер Ваальса.

### VI. Многокомпонентные системы и химические реакции.

Термодинамический потенциал смеси. Термодинамика смеси идеальных газов. Правило фаз Гиббса. Условия химического равновесия. Закон действующих масс. Ионизационное равновесие.

## ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

- [1.] Л.Д. Ландау и Е. Лифшиц, "Статистическая физика", "Наука", 1995.
- [2.] А.И. Ансельм, "Основы статистической физики и термодинамики", "Наука", 1973.

Дополнительная литература:

- [1.] К. Хуанг, "Статистическая механика", Мир, 1966.
- [2.] А. Исихара, "Статистическая физика", Мир, 1973.
- [3.] Г. Уленбек, "Фундаментальные проблемы статистической механики", журнал Усп. Физ. Наук, т. 103, вып. 2, с. 275-304, "Наука", 1971.

## ЗАДАНИЕ

### I. Основы статистической термодинамики.

1.  $N$  молекул идеального газа находятся в объеме  $V$ . Найти вероятность  $w_n$  того, что в объеме  $v < V$  находится  $n$  молекул. Получить приближенное выражение для  $w_n$  в случае  $v \ll V$  (распределение Пуассона); найти в этом случае среднее число частиц  $\bar{n}$  в объеме  $v$  и его среднюю абсолютную и относительную флуктуацию. Найти вид распределения  $w_n$  в случае  $v \ll V$ ,  $\bar{n} \gg 1$  (распределение Гаусса).
2. Найти энтропию  $S(E)$ , температуру  $T(E)$  и энергию  $E(T)$  для системы из  $N$  атомов Больцмановского идеального газа.
3. Для системы из  $N$  гармонических осцилляторов с различными частотами  $\omega_i$  ( $i = 1, 2 \dots N$ ) в случае высоких температур  $T \gg \hbar\omega_i$  найти энтропию  $S(E)$ , температуру  $T(E)$ , а также зависимость  $S(T)$  и теплоемкость  $C(T) = T\partial S/\partial T$ .
4. Найти разность теплоемкостей  $C_p - C_v$  и модулей сжатия  $B_S - B_T$  (где  $B = -V\partial p/\partial V$ ) для Больцмановского газа и газа Ван-дер-Ваальса.
5. Найти изменение температуры газа Ван-дер-Ваальса при его расширении в пустоту от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ .

### II. Идеальные газы.

6. Покоящиеся атомы идеального газа излучают свет частоты  $\omega_0$ . Найти распределение интенсивности излучаемого света по частотам  $\omega$  и ширину линии, если температура газа равна  $T$ .
7. Классический идеальный газ магнитных диполей  $\mu$ , имеющий плотность  $n$  и температуру  $T$ , находится в магнитном поле  $H$ . Найти намагниченность  $M(T)$  и магнитную восприимчивость  $\chi(T) = \partial M/\partial H$ . Исследовать  $\chi(T)$  в случаях  $T \gg \mu H$  и  $T \ll \mu H$ .
8. Газ атомов с полным моментом  $J$ , спином  $S$  и орбитальным моментом  $L$  помещен в магнитное поле  $H$ ; температура  $T$  и магнитное расщепление уровней  $\Delta E$  малы по сравнению с интервалом тонкой структуры. Найти магнитную часть свободной энергии; исследовать восприимчивость  $\chi(T)$  в случае (а) слабых полей,  $\Delta E \ll T$ , и (б) сильных полей,  $\Delta E \gg T$ . Для случая  $\Delta E \ll T$  найти изменение температуры  $\delta T$  при адиабатическом выключении поля от  $H = H_0$  до нуля.
9. Найти спиновую магнитную восприимчивость вырожденного электронного газа (парамагнетизм Паули свободных электронов в металле) для случая, когда магнитная энергия электрона  $\mu_0 H$  (где  $\mu_0$  - магнетон Бора) много меньше температуры  $T$ .

10. Исследовать уравнение состояния  $P = P(V, T)$  идеального Ферми газа в предельных случаях высоких и низких температур, включая первые поправочные члены к результатам нулевых приближений.
11. Считая  $\text{He}^4$  идеальным Бозе-газом, найти для него величину  $\exp(\mu/T)$  при нормальных условиях ( $T = 273 \text{ К}$ ,  $p = 1 \text{ атм.}$ ), когда плотность  $n = p/T$  равна числу Лошмидта  $n_L = 2.69 \times 10^{19} \text{ 1/см}^3$ . Для плотности, соответствующей жидкому  $\text{He}^4$ :  $n = 0.022 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$ , оценить температуру  $T = T_q$ , при которой становятся существенными квантовые эффекты.

### III. Элементы термодинамики твердых тел.

12. Найти свободную энергию и теплоемкость твердого тела в модели, предполагающей, что все нормальные колебания имеют одну и ту же частоту  $\omega_0$  (модель Эйнштейна независимых колебаний атомов в каждой из элементарных ячеек). Сравнить результаты с моделью Дебая при высоких и низких  $T$ .

### IV. Неидеальные газы и равновесие фаз.

13. В переменных  $T, v$  (где  $v = V/N$  - объем на один атом) найти уравнения спинодали и бинодали для газа Ван-дер-Ваальса вблизи его критической точки  $T_c, v_c$ . Для упрощения выкладок считать кривую бинодали  $T(v)$  в данной области четной функцией разности  $x = v - v_c$  (для доказательства чего уравнения равновесия нужно было бы разлагать до членов четвертой степени по  $x$ ).

### V. Многокомпонентные системы и химические реакции.

14. Найти равновесную концентрацию электронов в парах натрия при температуре  $T = 5000 \text{ К}$  и давлении  $P = 10 \text{ мм рт. ст.}$ , где  $P$  - суммарное давление атомов, ионов и электронов. Потенциал ионизации натрия  $I = 5.14 \text{ эВ}$ .