

## **Программа лекций**

### **“Физика конденсированного состояния вещества 2”**

#### **Раздел 1. Основные понятия термодинамики (3 часа)**

*Температура и энтропия, второе начало термодинамики. Термодинамические потенциалы при разных внешних условиях. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Условия термодинамического равновесия. Демон Максвелла, роль термодинамики в анализе работы компьютеров. Диссипация тепла при стирании информации и предел Ландауэра.*

#### **Раздел 2. Статистический подход к описанию макроскопических сред (3 часа).**

*Плотность энергетических уровней макросистем, статистическая энтропия. Вывод термодинамических соотношений из микроканонического, канонического, и большого канонического распределений.*

#### **Раздел 3. Статистическая механика классического идеального газа (3 часа).**

*Критерий классического описания идеального газа. Статистическая сумма и вычисление термодинамических функций одно-, двух- и многоатомных идеальных газов. Системы с переменным числом частиц, реакции и химические равновесия. Ионизационное равновесие и формула Саха.*

#### **Раздел 4. Идеальный ферми-газ (3 часа).**

*Характеристики одночастичных состояний в макроскопическом объеме. Функция распределения Ферми-Дирака при нулевой и конечной температуре. Теплоемкость ферми-газа с произвольным законом дисперсии. Роль поверхности Ферми.*

#### **Раздел 5. Зонная структура спектра кристаллов. (5 часов).**

*Зонная структура спектра кристаллических твердых тел в приближении слабой связи. Подсчет числа квантовых состояний. Металлы, полупроводники и изоляторы. Энергетический спектр и функции распределения электронов и дырок для полупроводников без примесей. Полупроводники с примесями. Оценка энергии ионизации донорных уровней, концентрация носителей, качественный анализ p-n перехода.*

#### **Раздел 6. Идеальный бозе-газ. (3 часа).**

*Статистические и термодинамические свойства фотонного газа. Формула Планка для спектральной плотности. Бозе-газ частиц, число которых сохраняется, термодинамические функции газа. Конденсация Бозе-Эйнштейна для частиц идеального газа. Бозе-конденсация в реальных системах разреженных газов из щелочных металлов.*

#### **Раздел 7. Базовые понятия теории кристаллических структур (3 часа).**

*Базовые понятия теории кристаллических структур на примере кубических решеток. Прямая и обратная решетки, их базисные векторы. Рассеяние частиц на периодических структурах, формула Вульфа-Брэггов. Структурные факторы решетки, индексы Миллера.*

#### **Раздел 8. Колебания атомов в кристаллах. Фононы. Модель Дебая . (3 часа).**

*Классическое рассмотрение колебаний атомов в цепочке в случае одного и двух атомов в элементарной ячейке. Квантование этих колебаний, фононы. Модель Дебая для решеточной теплоемкости кристаллов.*

### **Раздел 9. Термодинамические флуктуации. (3 часа).**

*Формула Эйнштейна для плотности вероятности термодинамических флуктуаций макросистем. Гауссово распределение и его применение для расчетов флуктуаций и корреляционных функций термодинамических и механических величин. Пределы чувствительности измерительных приборов.*

### **Раздел 10. Спектральное разложение флуктуаций (3 часа).**

*Стационарные случайные процессы на примере броуновского движения. Случайные блуждания, диффузия и уравнение Ланжевена. Спектральное разложение и корреляционные функции случайных величин в разные моменты времени. Формула Найквиста и флуктуации в электрических цепях.*

### **Раздел 11. Неидеальные газы. (3 часа).**

*Вириальное разложение и вириальное уравнение состояния. Уравнение Ван-дер-Ваальса, критическая точка. Условие равновесия фаз и фазовые переходы первого рода.*

### **Раздел 12. Магнетизм вещества. (6 часов).**

*Эффект Зеемана и магнитные моменты атомов. Парамагнетизм Паули. Диамагнетизм Ландау. Квантовый целочисленный эффект Холла. Обменное взаимодействие и физическая природа ферромагнетизма. Гамильтониан Гейзенберга, спиновые волны. Описание ферромагнитного перехода в теории среднего поля.*

### **Раздел 13. Элементы теории фазовых переходов второго рода (3 часа).**

*Теория Ландау фазовых переходов второго рода как переходов с изменением симметрии системы. Параметр порядка. Скачок теплоемкости. Неоднородное упорядочивание и пространственный профиль доменной стенки.*

### **Раздел 14. Кинетическое уравнение Больцмана. (4 часа).**

*Теорема Лиувилля. Уравнение Больцмана с интегралом столкновения. Вывод равновесных бозе- и ферми-распределений из условия обращения в ноль интеграла столкновений. Интеграл столкновений в случае рассеяния на примесях,  $\tau$ -приближение и электропроводность электронного газа. Теплопроводность электронного газа и закон Видемана-Франца.*

Основная литература:

1. Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1977.

2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика, часть 1. М.: Наука, 1976.

3. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979.

4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

Дополнительная литература:

4. Коткин Г. Л. Лекции по статистической физике. Новосибирск: НГУ, 2003.

5. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970.

6. Кубо Р. Статистическая механика. М.: Мир, 1967.

7. Кожевников А. А. Введение в физику твердого тела для студентов отделения информатики. Часть II. Основы статистической физики. Новосибирск: НГУ, 2012.

8. Коткин Г. Л., Образовский Е. Г. Задачи по статистической физике. Новосибирск: НГУ, 2007.

## **Программа семинаров**

### **Тема 1. Термодинамика (4 часа)**

*Вычисление термодинамических функций газа с уравнением состояния Ван дер Ваальса с произвольной температурной зависимостью теплоемкости. (???) Вычисление разности теплоемкостей диэлектрика в конденсаторе при заданном потенциале и заданном заряде.*

### **Тема 2. Микроканоническое распределение (4 часа)**

*Микроканоническое распределение на примере осциллятора и одномерной модели резины. Система спинов в магнитном поле в рамках микроканонического распределения.*

### **Тема 3-4. Каноническое распределение (4 часа)**

*Каноническое распределение. Применение к осциллятору, газу дипольных молекул и спиновому парамагнетизму газа с малой плотностью. Двухуровневая система с большой кратностью вырождения верхнего уровня. Распределение Максвелла.*

### **Тема 5. Химические реакции (4 часа)**

*Вычисление температурной зависимости числа актов реакции. Вычисление констант равновесия химических реакций.*

### **Тема 6. Идеальный вырожденный ферми-газ (4 часа)**

*Идеальный вырожденный ферми-газ. Оценки характерных размеров белых карликов и нейтронных звезд. Термодинамика и парамагнитная восприимчивость. Эффекты внешнего поля на примере однородного поля тяжести и осцилляторного потенциала.*

### **Тема 7. Полупроводники (3 часа)**

*Полупроводники без примесей. Вычисление теплоемкости. Полупроводники с примесями n-типа. Вычисление химического потенциала.*

### **Тема 8. Бозоны (2 часа)**

*Термодинамические функции газа фотонов, уравнение адиабаты. Бозе-газ сохраняющихся частиц. Изотермы в широком интервале температур. Бозе-конденсация во внешнем поле (на примере осцилляторного потенциала).*

### **Тема 9. Кристаллические решетки (3 часа)**

*Кубические кристаллические решетки. Построение обратных решеток и зон Бриллюэна. Получение закона дисперсии и вычисление эффективных масс электрона.*

### **Тема 10. Фононы (2 часа)**

*Фононы. Вычисление флуктуаций положения атомов в кристаллической решетке в модели Дебая. Критерий плавления. Вычисление коэффициента линейного расширения в простой модели.*

### **Тема 11. Флуктуации (2 часа)**

*Вычисление флуктуаций и корреляций в термодинамических и механических системах (упругая струна) с гауссовым распределением вероятностей.*

### **Тема 12. Уравнение Ланжевена (3 часа)**

*Корреляция флуктуаций во времени. Уравнение Ланжевена. Примеры вычисления для конкретных систем (частица в среде с трением, осциллятор с трением, электрические цепи). Оценка чувствительности гальванометра.*

**Тема 13. Неидеальные газы (3 часа)**

*Вычисление вириальных коэффициентов в простых моделях. Процесс Джоуля-Томсона. Применение уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Критический радиус капли в насыщенном паре.*

**Тема 14. Фазовые переходы II рода (3 часа)**

*Вычисление температурной зависимости магнитной восприимчивости в модели Кюри-Вейса. Упорядочивание бинарного сплава, вычисление скачка теплоемкости.*

**Тема 15. Кинетические явления (3 часа)**

*Вычисление коэффициента электропроводности в магнитном поле, классический эффект Холла. Расчет коэффициентов теплопроводности и вязкости максвелловского газа.*

## ЗАДАНИЕ 1 (сдать до 17 марта)

### Задача 1 (5 баллов)

Уравнение состояния имеет вид:

$$P = \frac{RT}{b} \ln \left( \frac{V}{V-b} \right) - \frac{a}{V^2},$$

где  $a, b$  некоторые постоянные.

1) Показать, что

$$\left( \frac{\partial C_v}{\partial V} \right)_T = 0.$$

2) Найти энтропию  $S$ , если  $C_v = \text{const}$ .

3) Найти внутреннюю энергию  $U$ .

### Задача 2 (5 баллов)

В термостате находится система, состоящая из  $N$  невзаимодействующих частиц. Каждая частица может находиться только на одном из трех энергетических уровней с энергией  $-\epsilon$ ,  $0$ ,  $+\epsilon$ . уровень с энергией  $0$  двукратно вырожден. Найти теплоемкость системы.

### Задача 3 (5 баллов)

Плоский конденсатор с площадью пластин  $\Sigma$  и расстоянием между ними  $L$  заполнен газом нейтральных двухатомных молекул, обладающих электрическим дипольным моментом  $p$ . Число молекул  $N$ , температура  $T$ . Сколько тепла выделится при изотермической зарядке конденсатора до разности потенциалов  $U$ ? найти изменение температуры газа, если при включении электрического поля газ был теплоизолирован. Считать, что  $pU/LT \ll 1$ .

## ЗАДАНИЕ 2 (сдать до 21 апреля)

### Задача 4 (5 баллов)

Сильно вырожденный идеальный газ из  $N$  нейтронов помещен в прямоугольный сосуд с площадью основания  $S$ , находящийся в однородном поле тяжести. Вычислить теплоемкость системы и распределение нейтронов по высоте. Вещество сосуда непроницаемо для нейтронов, температура равна  $T$

### Задача 5 (5 баллов)

Графен является двумерной кристаллической модификацией углерода. Электронно-дырочный спектр графена такой же, как у беспримесного полупроводника с нулевой щелью и линейным законом дисперсии  $\epsilon_{e,h} = \pm v_F \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ , где верхний (нижний) знак относится к электронам  $e$  (дыркам  $h$ ),  $v_F \approx 10^8$  см/с – скорость Ферми. Вычислить зависимость от температуры концентрации носителей и теплоемкости. Ответ довести до числа при  $T = 1$  K и  $300$  K. Учесть, что кроме вырождения по проекции спина у электронов в графене есть дополнительное двукратное вырождение.

### Задача 6 (5 баллов)

$N = 10^6$  атомов  $^{37}\text{Rb}_{87}$  находится в ловушке, действие которой можно представить потенциалом анизотропного гармонического осциллятора

$$U(x, y, z) = \frac{m_{\text{Rb}}}{2} [\omega_{\perp}^2 (x^2 + y^2) + \omega_z^2 z^2].$$

Поперечная и продольная частоты равны  $\omega_{\perp}/2\pi = 10^2$  Гц,  $\omega_z/2\pi = 10$  Гц. Вычислить температуру бозе-эйнштейновской конденсации  $T_0$ . Найти теплоемкость системы ниже этой точки и характер ее особенности в окрестности  $T_0$ .

### ЗАДАНИЕ 3 (сдать до 30 мая)

#### Задача 7 (5 баллов)

Рассчитать геометрический структурный фактор  $S(\vec{q})$  для гранецентрированной и объемно-центрированной кубической структур. Зная, что при дифракции на кристалле рентгеновских лучей с длиной волны  $1.542 \text{ \AA}$  наблюдались брэгговские углы  $12.3^\circ$ ,  $14.1^\circ$ ,  $20.2^\circ$ ,  $24.0^\circ$ ,  $25.1^\circ$ ,  $29.3^\circ$ ,  $32.2^\circ$  и  $33.1^\circ$ , определить соответствующие индексы Миллера. Какой из двух указанных кубических решеток принадлежит исследуемый кристалл? Найти из экспериментальных данных размер элементарной ячейки.

#### Задача 8 (5 баллов)

Оценить среднеквадратичное смещение  $\langle x^2 \rangle$  атома углерода (атомная масса  $12 \text{ г/моль}$ ) из положения равновесия в решетке алмаза при комнатной температуре. Температура Дебая  $\Theta_D \approx 2000^\circ \text{K}$ . Сравнить  $\sqrt{\langle x^2 \rangle}$  с постоянной решетки  $d_o = 3.6 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

#### Задача 9 (5 баллов)

Заряженная частица движется в газе, испытывая действие однородного магнитного поля напряженностью  $B_0$ , направленного вдоль оси  $z$ . Сила трения, действующая на частицу со стороны газа, пропорциональна скорости:  $\vec{f} = -\gamma \vec{v}$ . Температура среды  $T$ . Вычислить спектральные плотности величин  $(v_{x,y,z}^2)_\omega$ ,  $(v_x v_y)_\omega$ ,  $(v_{x,y} v_z)_\omega$ . Найти коэффициенты диффузии  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  частицы вдоль трех декартовых координат.

## **Критерии оценивания по курсу Физика КСВ-2**

### *Текущий контроль успеваемости*

Обязательное посещение и активная работа на занятиях. Выполнение проверочных контрольных работ. В течение семестра студенты решают задачи трех семестровых заданий (всего 9 задач). Задачи заданий защищаются устно на сдачах заданий. За сданные вовремя задачи из заданий начисляются баллы (5 баллов за каждую задачу). Прием заданий заканчивается 30-го мая.

В течение семестра проводятся две контрольные работы. К баллам за задания прибавляются баллы, полученные при выполнении двух контрольных работ (максимум 40 баллов). В конце семестра проводится экзамен. Претендовать на оценку соответственно "5" "4" "3" могут студенты, у которых сумма набранных баллов попадает в интервал [65, 85], [45, 64], [26, 44]. Итоговая оценка "2" выставляется в случае, если сумма набранных баллов < 26, либо при неудовлетворительной сдаче экзамена.

### *Промежуточная аттестация*

Итоги промежуточной аттестации (экзамен) оцениваются по пятибалльной системе:

"отлично за работу в семестре и при промежуточной аттестации набрано "65-85"баллов, в том числе сдано не менее 9 задач в течение семестра, контрольные работы выполнены на положительную оценку, дан развернутый ответ на вопросы билета, задача решена без ошибок, даны правильные ответы на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.

"хорошо за работу в семестре и при промежуточной аттестации набрано "45-64"баллов, в том числе сдано не менее 9 задач в течение семестра, контрольные работы выполнены на положительную оценку, дан развернутый ответ на вопросы билета (допускаются небольшие погрешности), задача решена без ошибок, даны правильные ответы (допускаются небольшие погрешности) на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.

"удовлетворительно за работу в семестре и при промежуточной аттестации набрано "26-44"баллов, в том числе сдано не менее 9 задач в течение семестра, контрольные работы выполнены на положительную оценку, дан развернутый ответ на вопросы билета (допускаются недочеты в ответе), задача решена без ошибок, даны правильные ответы (допускаются недочеты в ответе) на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.

"неудовлетворительно за работу в семестре и при промежуточной аттестации набрано < 26 баллов или незнание правильного ответа на любой из вопросов билета.