

Министерство образования и науки Украины
Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина

В. Б. Казанский, В. В. Хардигов

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное пособие

Харьков – 2013

УДК 536(075.8)
ББК 22.317я73
К14

Рецензенты: доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной электродинамики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина **Н. Н. Горобец**;
доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики Харьковского национального университета радиозлектроники **А. Г. Нерух**.

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 9 от 30 сентября 2013 года)*

Казанский В. Б.

К14 Статистическая физика и термодинамика : учебное пособие / В. Б. Казанский, В. В. Хардигов. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 292 с.

ISBN 978-966-285-010-9

Предлагаемое учебное пособие содержит лекционный курс по статистической физике и термодинамике, который является заключительным в курсе теоретической физики. Особое внимание уделено классической и квантовой статистикам равновесных состояний и взаимосвязи термодинамики и статистической физики. Материалы, которые вошли в пособие, систематизированы по уровню образования в классических университетах и по их значимости для прикладных разделов физики, включая радиофизику, электронику, спектроскопию, биофизику и т.п. Пособие содержит необходимую вспомогательную информацию и вопросы для самоконтроля в приложениях.

Учебное пособие предназначено для студентов и преподавателей физических и радиофизических специальностей.

**УДК 536(075.8)
ББК 22.317я73**

ISBN 978-966-285-010-9

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2013
© Казанский В. Б., Хардигов В. В., 2013
© Антофеева М. С., макет обложки, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ЗАДАЧИ И ПРЕДМЕТ ТЕРМОДИНАМИКИ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ	10
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ	18
1.1. Понятия и начала феноменологической термодинамики.....	18
1.2. Микроскопическое (механическое) описание классических систем	24
1.2.1. Уравнения движения точечных масс (материальных точек).....	24
1.2.2. Фазовое пространство	28
1.3. Особенности представления квантовых систем	33
1.4. Вероятность нахождения системы в элементе фазового пространства. Метод ансамблей Гиббса	39
1.5. Макроскопические величины как фазовые средние	44
1.6. Распределение в системах с постоянным числом частиц	46
1.6.1. Квазинезависимые системы. Основная задача статистики	46
1.6.2. Распределения Гиббса.....	49
1.6.3. Квазиклассическое приближение	53
1.7. Свойства распределения Гиббса	54
1.8. Большое каноническое распределение Гиббса.....	56
2. СТАТИСТИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	62
2.1. Идеальный газ как модель статистической системы	62
2.2. Распределение Максвелла	65
2.3. Столкновения молекул со стенкой сосуда. Давление.....	67

2.4. Характерные величины идеального газа	69
2.4.1. Свойства распределения Максвелла	69
2.4.2. Опыт Штерна	70
2.4.3. Средние скорости и энергия молекул	71
2.5. Столкновение молекул между собой	74
2.6. Длина свободного пробега	77
2.7. Идеальный газ во внешнем поле	80
2.7.1. Распределение Больцмана	80
2.7.2. Идеальный газ в гравитационном поле	81
2.7.3. Вес и потенциальная энергия	83
2.8. Число и функция состояний идеального газа	85
2.8.1. Число состояний и критерий невырожденности	85
2.8.2. Функция распределения идеального газа	86
2.8.3. Функция (интеграл) состояний	87
2.9. Классическая теория теплоемкости газа двухатомных молекул	89
2.10. Квантовая теория теплоемкости газа двухатомных молекул	93
2.10.1. Базовые положения	93
2.10.2. Функция состояний и энергия колебаний	95
2.10.3. Функция состояний и энергия вращений	98
2.11. Распределения в квантовых системах	101
2.11.1. Метод ячеек в фазовом пространстве	101
2.11.2. Квантовые распределения для идеального газа	106
2.11.3. Функция распределения фермионов. Параметры электронного газа	112

2.11.4. Статистика фотонного газа	118
3. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	121
3.1. Статистическое обоснование первого начала термодинамики	121
3.1.1. Статистическое определение внутренней энергии	121
3.1.2. Первое начало термодинамики	122
3.1.3. Основное термодинамическое равенство	124
3.2. Второе начало термодинамики	127
3.2.1. Статистический смысл энтропии	127
3.2.2. Формула Больцмана	127
3.2.3. Закон возрастания энтропии	128
3.3. Вечный двигатель второго рода. Максимальная работа процессов	131
3.4. Полезная работа тепловых машин	133
3.4.1. Тепловые машины периодического действия	133
3.4.2. Тепловые машины однократного действия	135
3.5. Метод термодинамических потенциалов	138
3.5.1. Определение и физический смысл потенциалов	138
3.5.2. Дифференциальные соотношения термодинамики. Уравнения Гиббса – Гельмгольца	141
3.5.3. Потенциалы систем с переменным числом частиц	143
3.6. Термодинамические коэффициенты. Критерии устойчивости равновесия	145
3.6.1. Теплоемкости	145
3.6.2. Термические и упругие коэффициенты	147
3.6.3. Критерии устойчивости равновесия однородной системы	148

3.7. Статистическое вычисление термодинамических величин.....	149
3.8. Третье начало термодинамики (теорема Нернста).....	153
3.9. Применения термодинамики.....	156
3.9.1. Охлаждение газа при необратимом адиабатическом расширении.....	156
3.9.2. Термодинамика диэлектриков и магнетиков	159
4. СТАТИСТИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	165
4.1. Модель кристаллического твердого тела. Уравнение движения атомов	165
4.2. Дисперсионное уравнение нормальных колебаний кристалла	168
4.3. Кристалл как система линейных гармонических осцилляторов.....	171
4.4. Статистическая сумма и энергия кристалла (в гармоническом приближении)	174
4.5. Теория теплоемкости Дебая.....	177
4.5.1. Спектральная плотность нормальных колебаний	177
4.5.2. Потенциал, энтропия и теплоемкость кристалла.....	180
4.5.3. Теплоемкость электронного газа.....	185
4.6. Электронный газ в металлах	186
4.6.1. Модель свободных электронов.....	186
4.6.2. Обобществление электронов	186
4.6.3. Обоснование модели свободных электронов.....	187
4.6.4. Энергетические зоны и статистика электронного газа	188
4.7. Зависимость энергии электрона от волнового вектора. Эффективная масса	190
4.7.1. Дисперсионное уравнение электрона в металле.....	190

4.7.2. Эффективная масса электрона.....	192
4.8. Теория парамагнетизма	195
4.8.1. Вектор магнитной поляризации. Классификация магнетиков.....	195
4.8.2. Классическая теория парамагнетизма Ланжевена.....	197
4.8.3. Понятие о квантовой теории парамагнетизма	198
4.8.4. Парамагнетизм электронного газа	199
4.9. Равновесное излучение.....	201
4.9.1. Теория излучения Планка	201
4.9.2. Термодинамические потенциалы и параметры равновесного излучения	205
4.10. Системы с кулоновским взаимодействием частиц.....	207
4.10.1. Метод самосогласованного поля. Распределение электронов в МОП-транзисторах	207
4.10.2. Внутренняя энергия плазмы	211
4.10.3. Термодинамические потенциалы и параметры	213
4.10.4. Собственные продольные колебания.....	215
5. ТЕОРИЯ МАЛЫХ ФЛУКТУАЦИЙ	217
5.1. Определение и значение флуктуаций	217
5.2. Мера вероятности и масштаб флуктуаций	218
5.2.1. Флуктуации в замкнутых системах.....	218
5.2.2. Флуктуации в квазизамкнутых системах	220
5.3. Флуктуации термодинамических величин в однородной среде	223
5.3.1. Базовые соотношения. Критерии устойчивости равновесия.....	223
5.3.2. Флуктуации объема и температуры	225

5.3.3. Флуктуации давления и энтропии.....	226
5.3.4. Флуктуации числа частиц и плотности. Радиус корреляции	227
5.4. Предельная чувствительность измерительных приборов.....	229
5.4.1. Флуктуации в бестоковых измерительных приборах	230
5.4.2. Электрические флуктуации	232
5.4.3. Предельная чувствительность токовых приборов.....	234
5.5. Рассеяния света флуктуациями.....	239
6. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ	243
6.1. Определения и характеристики необратимых процессов.....	243
6.1.1. Релаксация	243
6.1.2. Явления переноса. Линейные диссипативные уравнения	244
6.1.3. Потоки физических величин.....	246
6.1.4. Уравнение непрерывности	248
6.2. Теория стационарных процессов в газе свободных электронов	249
6.2.1. Дрейфовая скорость электрона. Время релаксации	249
6.2.2. Электропроводность невырожденного и вырожденного электронных газов	250
6.2.3. Зависимость электропроводности проводника от температуры .	253
6.2.4. Теплопроводность электронного газа. Закон Видемана-Франца.	256
6.3. Газокинетическое уравнение Больцмана.....	258
6.3.1. Приближение Больцмана	258
6.3.2. Уравнение непрерывности в отсутствие столкновений.....	261
6.3.3. Учет столкновительных процессов	262
6.4. Приближение времени релаксации	265

6.4.1. Упрощенное уравнение Больцмана.....	265
6.4.2. Электропроводность электронного газа	266
6.4.3. Изотермический эффект Холла	270
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	274
П. 1. Элементы теории вероятностей.....	274
П. 1.1. Определения и понятия теории вероятностей (ТВ).....	274
П. 1.2. Свойства вероятностей	275
П. 1.3. Основные характеристики случайной величины.....	277
П. 1.4. Функции распределения	278
П. 2. Специальные функции и интегралы.....	280
П. 2.1. Гамма-функция.....	280
П. 2.2. Функции Гаусса и вероятности ошибок (error function)	280
П. 2.3. Интеграл Ферми	281
П. 3. Теорема Лиувилля	283
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.....	286
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	289