

Ю. Л. Климонтович

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



URSS

Ю. Л. Климонтович

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов физических специальностей
высших учебных заведений

Издание второе



URSS

МОСКВА

ББК 22.317 22.318 22.333 22.3я73 24.53

Климонтович Юрий Львович

Статистическая физика: Учебное пособие. Изд. 2-е. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 608 с.

Данный курс отличается от существующих как по содержанию, так и по характеру изложения. Весь материал излагается на основе единого метода — теория неравновесного состояния служит стержнем всего курса. Это позволяет выявить внутреннюю связь явлений в простейших и самых сложных системах. Наряду с традиционным материалом излагается ряд проблем, служащих основой общих и специальных курсов, а именно: теория неравновесных флуктуаций в нелинейных системах, кинетическая теория электромагнитных процессов, неравновесные фазовые переходы, кинетическая теория химически реагирующих систем.

Для студентов старших курсов физических и радиофизических специальностей университетов, физико-технических и инженерно-физических институтов, а также аспирантов соответствующих специальностей.

ООО «ЛЕНАНД».

117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.
Формат 60×90/16. Печ. л. 38. Зак. № 1211.

Отпечатано в ООО «Полиграфический комбинат «Зауралье».
640022, Курган, ул. К. Маркса, 106.

ISBN 978-5-9710-0643-5

© ЛЕНАНД, 2013

14571 ID 174529



НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете: http://URSS.ru
	Тел./факс (многоканальный): + 7 (499) 724 25 45
	URSS

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (к первому изданию)	9
Введение	11
§ 1. Основные задачи курса (11). § 2. Основные этапы развития статистической физики (12).	
Глава 1. Основы классической статистической физики	13
§ 1. Статистическая физика (18). § 2. Уравнения движения частиц макроскопической системы (19). § 3. Функция Гамильтона макроскопической системы (20). § 4. Потенциальная энергия взаимодействия частиц (20). § 5. Функция Гамильтона для системы осцилляторов (21). § 6. Функции динамических переменных (22). § 7. Микроскопическая фазовая плотность (23). § 8. Уравнение для микроскопической фазовой плотности. Микроскопические уравнения переноса (24). § 9. Ансамбль одинаковых макроскопических систем — ансамбль Гиббса (26). § 10. Уравнение Лиувилля (28). § 11. Теорема Лиувилля (30). § 12. Средние значения функций динамических переменных (30).	
Глава 2. Основы квантовой статистической физики	32
§ 1. Уравнение Шредингера (32). § 2. Средние значения (33). § 3. Сложение и умножение операторов (33). § 4. Представление Гейзенберга (34). § 5. Различные представления уравнения Шредингера (35). § 6. Матрица плотности (36).	
Глава 3. Термодинамическая теория равновесного состояния	39
§ 1. Статистический и термодинамический методы описания тепловых явлений (39). § 2. Статистическое равновесие (40). § 3. Термодинамическое равновесие (41). § 4. Функции состояния. Уравнения состояния (42). § 5. Внутренняя энергия электромагнитного поля (44). § 6. Квазистатические процессы (45). § 7. Температура (46). § 8. Первый закон (первое начало) термодинамики (46). § 9. Некоторые применения первого закона термодинамики (47). § 10. Второй закон термодинамики (48). § 11. Математическая формулировка второго закона термодинамики для квазистатических процессов (49). § 12. Термодинамические потенциалы (51). § 13. Системы с переменным числом частиц (53). § 14. Зависимость термодинамических функций от числа частиц (54). § 15. Второй закон термодинамики для нестатистических процессов (55). § 16. Математическая формулировка второго закона термодинамики для необратимых процессов (56). § 17. Изменение свободной энергии при необратимых процессах (57).	

Глава 4. Статистическая теория равновесного состояния . . .	58
§ 1. Функция распределения микросостояний изолированной системы — микроканоническое распределение Гиббса (58). § 2. Функция распределения микросостояний системы в термостате — каноническое распределение Гиббса (60). § 3. Статистическое обоснование второго закона термодинамики для квазистатических процессов (65). § 4. Энтропия — мера неопределенности при статистическом описании. Свойства функций $S[X]$, $S[n]$ (67). § 5. Возрастание энтропии в процессе эволюции. Теорема Гиббса (72). § 6. Распределения Гиббса для квантовых систем (76). § 7. Связь квантовых и классических распределений Гиббса (78). § 8. Распределение Гиббса для системы с переменным числом частиц (81). § 9. Распределение Максвелла (84). § 10. Распределение Больцмана для классического идеального газа (88). § 11. Термодинамические функции классического идеального газа (91). § 12. Свободная энергия и энтропия классического идеального газа. Парадокс Гиббса (92). § 13. Теорема Нернста — третье начало термодинамики (95).	
Глава 5. Идеальный газ	98
§ 1. Распределение атомов в пространстве квантовых состояний (98). § 2. Распределения Бозе и Ферми (101). § 3. Распределение Больцмана (104). § 4. Распределения Ферми и Бозе для газа бесструктурных частиц (107).	
Глава 6. Флуктуации термодинамических параметров	114
§ 1. Функции распределения внутренних параметров (114). § 2. Функции распределения внутренних параметров в равновесном состоянии (116). § 3. Условная свободная энергия. Условная энтропия. Принцип Больцмана (117). § 4. Флуктуации внутренней энергии (120). § 5. Флуктуации термодинамических сил (121). § 6. Средние и наиболее вероятные значения термодинамических функций (123). § 7. Распределение Гаусса для флуктуаций внутренних параметров (124).	
Глава 7. Временные и фазовые средние	131
§ 1. Два способа определения средних значений (131). § 2. Стохастизация движения в динамических системах. Перемешивание. Энтропия Крылова — Колмогорова (133). § 3. Стационарные и нестационарные случайные процессы (136). § 4. Оценка близости временных и фазовых средних (138). § 5. Усреднение по времени локальных функций динамических переменных (140). § 6. Физически бесконечно малые интервалы времени и длины (144).	
Глава 8. Методы функций распределения и микроскопической фазовой плотности	151
§ 1. Последовательность функций распределения (151). § 2. Связь газодинамических и термодинамических функций с одно- и двухчастичными функциями распределения (153). § 3. Уравнения для последовательности равновесных функций распределения (158). § 4. Уравнения БЕГКИ для последовательности неравновесных функций распределения (160). § 5. Корреляционные функции (162). § 6. Метод микроскопической фазовой плотности (164).	
Глава 9. Кинетическая теория разреженного газа	168
§ 1. Приближение парных столкновений (168). § 2. Кинетическое уравнение Больцмана. Модель твердых шаров (170). § 3. Интеграл столкновений Больцмана (175). § 4. Вывод уравнения Больцмана	

из уравнений ББГКИ (177). § 5. Свойства интеграла столкновений Больцмана (181). § 6. Закон возрастания энтропии. *H*-теорема Больцмана (184). § 7. Два предельных случая уравнения Больцмана. Свободномолекулярное течение газа (185). § 8. Термодинамические функции разреженного газа (189).

Глава 10. Статистическое обоснование уравнений газовой динамики 194

§ 1. Газодинамические функции (194). § 2. Уравнения переноса для плотностей массы, импульса и кинетической энергии (195). § 3. Нулевое приближение по газодинамическому параметру. Локальное распределение Максвелла (196). § 4. Метод Грэда. Уравнения газовой динамики в первом приближении по газодинамическому параметру (198). § 5. Уравнение баланса плотности энтропии (207). § 6. Уравнения газовой динамики для неидеального газа (209).

Глава 11. Броуновское движение. Кинетические и гидродинамические флуктуации 215

§ 1. Уравнение Ланжевена (215). § 2. Уравнение Фоккера — Планка (220). § 3. Диффузия броуновских частиц. Уравнение Эйнштейна — Смолуховского (223). § 4. Броуновское движение гармонического осциллятора (225). § 5. Тепловые колебания в электрическом контуре. Формула Найквиста (228). § 6. Выделение медленных процессов при броуновском движении осциллятора (230). § 7. Распределение средней энергии колебаний по спектру. Спектр флуктуаций энергии (232). § 8. Флуктуации амплитуды и фазы. Диффузия фазы (233). § 9. Броуновское движение осциллятора при действии резонансной внешней силы (235). § 10. Кинетические флуктуации в газе (флуктуации одночастичной функции распределения) (237). § 11. Ланжевенковский источник в уравнении Больцмана (243). § 12. Ланжевенковские источники в уравнениях газовой динамики (247). § 13. Флуктуации газодинамических функций в равновесном состоянии (252). § 14. Броуновское движение. Статистическое обоснование уравнения Ланжевена (260). § 15. Кинетические флуктуации при броуновском движении (262). § 16. «Хвосты» временных корреляций флуктуаций газодинамических функций (265). § 17. Остаточные временные корреляции и спектр $1/\omega$ (естественный фликкер-шум) при броуновском движении (271). § 18. Фликкер-шум в пленках и нитях (277). § 19. Броуновское движение. *H*-теорема (278).

Глава 12. Броуновское движение в автоколебательных системах 281

§ 1. Уравнения Ланжевена и Фоккера — Планка (281). § 2. Стационарное состояние. Распределение энергии колебаний (283). § 3. Флуктуации энергии и амплитуды. Диффузия фазы (284). § 4. Распределение средней энергии автоколебаний по спектру (286). § 5. Отклики автоколебательной системы на резонансное воздействие (292). § 6. Броуновское движение автоколебательной системы. *H*-теорема (296).

Глава 13. Основы термодинамики неравновесных (необратимых) процессов 299

§ 1. Термодинамическое описание обратимых и необратимых процессов (299). § 2. Уравнения переноса. Гипотеза о локальном равновесии (301). § 3. Уравнения гидродинамики (303). § 4. Уравнение баланса энтропии. Производство энтропии (305). § 5. Термодинамика линейных диссипативных систем. Принцип Онзагера (308). § 6. Соотношения Онзагера (311). § 7. Уравнение баланса энтро-

пия в термодинамике неравновесных процессов (314). § 8. Ланжевенковский источник в кинетическом уравнении Больцмана при больших отклонениях от равновесия (316). § 9. Влияние гидродинамического (осредненного) движения на интенсивности ланжевенковских источников в уравнениях гидродинамики (319). § 10. Два способа определения кинетических коэффициентов в гидродинамике (322). § 11. Естественная и эффективная регуляризации уравнений гидродинамики (324). § 12. Эффективная нелинейная диссипация в уравнениях гидродинамики (326). § 13. Неравновесные фазовые переходы. Диссипативные структуры (330).

Глава 14. Статистическое описание электромагнитных процессов 334

§ 1. Уравнения Максвелла. Материальные уравнения (334). § 2. Микроскопические уравнения электромагнитного поля — уравнения Лоренца. Уравнения баланса плотности импульса и плотности энергии поля (338). § 3. Тепловые (равновесные) флуктуации электромагнитного поля (340). § 4. Формулы Рэлея — Дживса и Планка (343).

Глава 15. Полностью ионизованная плазма 348

§ 1. Микроскопические уравнения для заряженных частиц и поля (346). § 2. Основные параметры кулоновской плазмы (348). § 3. Уравнения переноса для микроскопических функций (352). § 4. Усреднение микроскопических уравнений. Поляризационное приближение (354). § 5. Спектральные плотности мелкомасштабных флуктуаций источника (358). § 6. Спектральные плотности флуктуаций в кулоновской плазме (361). § 7. Спектральные плотности флуктуаций в равновесной плазме. Термодинамические функции плазмы (363). § 8. Интегралы столкновений для кулоновской плазмы. Интеграл столкновений Балеску — Ленарда (367). § 9. Эффективный потенциал. Интеграл столкновений Ландау (369). § 10. Свойства интегралов столкновений Балеску — Ленарда и Ландау (372). § 11. Флуктуации электромагнитного поля в релятивистской плазме (373). § 12. Кинетические уравнения для релятивистской плазмы (378). § 13. Времена релаксации (частоты столкновений) (379). § 14. Волновые свойства плазмы (380). § 15. Приближение «бесстолкновительной» плазмы. Уравнения Власова (383). § 16. Волны в «бесстолкновительной» плазме. Затухание Ландау (385). § 17. Уравнения газовой динамики для плазмы (392). § 18. Релаксация температур в плазме (395). § 19. Электрическая проводимость плазмы (397). § 20. Кинетическая теория флуктуаций в плазме (399). § 21. Влияние мелкомасштабных плазмонов на кинетические процессы. Аномальное сопротивление (403). § 22. Влияние крупномасштабных плазмонов на кинетические процессы (405). § 23. Модельные интегралы столкновений. Интеграл столкновений Бхатнагара — Гросса — Крука (БГК) (410). § 24. Основы кинетической теории неидеальной плазмы (412).

Глава 16. Система атомов и поля. Классическая теория . . . 415

§ 1. Микроскопические уравнения для системы атомов и поля (415). § 2. Усреднение микроскопических уравнений. Уравнения для флуктуаций в поляризационном приближении (418). § 3. Релаксация по внутренним степеням свободы за счет радиационного трения (421). § 4. Давление электромагнитного излучения на атомы. Фокусировка пучков атомов и света (427). § 5. Крупномасштабные (кинетические) флуктуации поляризации и поля (430). § 6. Нагревание и охлаждение атомов электромагнитным полем (433). § 7. Кинетическое уравнение для функций распределения координат и импульсов атомов (435). § 8. Рассеяние электромаг-

- нитного излучения атомами (437). § 9. Распределение интенсивности рассеянного излучения по спектру (442). § 10. Уравнение для вектора поляризации с учетом корреляции положений атомов (443). § 11. Влияние корреляций положений атомов на коэффициент радиационного трения и сдвиг частоты (446). § 12. Показатель преломления. Коэффициент экстинкции (449).
- Глава 17. Квантовая кинетическая теория газа и плазмы 452**
- § 1. Матрица плотности. Квантовая функция распределения (452). § 2. Две формы записи квантового интеграла столкновений Больцмана (456). § 3. Квантовое кинетическое уравнение Больцмана для неидеального газа (460). § 4. Оператор фазовой плотности (461). § 5. Метод моментов. Поляризационное приближение (463). § 6. Спектры флуктуаций. Интеграл столкновений (467).
- Глава 18. Кинетическая теория химически реагирующих систем. Частично ионизованная плазма 469**
- § 1. Частично ионизованная кулоновская плазма. Свободные и связанные состояния заряженных частиц (469). § 2. Система атомов и поля. Операторные уравнения (473). § 3. Кинетические уравнения для кулоновской частично ионизованной плазмы (474). § 4. Равновесное состояние. Ионизационное равновесие (476). § 5. Интегралы столкновений в частично ионизованной плазме (478). § 6. Уравнения для плотностей электронов, ионов и атомов (483). § 7. Кинетические флуктуации. Лапчевские источники в уравнениях для плотностей электронов, ионов и атомов (485).
- Глава 19. Система атомов и поля. Квантовая теория 488**
- § 1. Кинетическое уравнение для атомов (488). § 2. Индуцированное и спонтанное излучение. Коэффициенты Эйнштейна (492). § 3. Поляризуемость системы атомов (494). § 4. Уширение спектральных линий излучения атомов (496). § 5. Сдвиг частот переходов под действием флуктуаций поля (497). § 6. Влияние когерентного поля на диссипативные процессы (498). § 7. Охлаждение атомов резонансным полем (501).
- Глава 20. Плотные газы и жидкости 502**
- § 1. Кинетические уравнения для плотных газов (502). § 2. Равновесное состояние. Суперпозиционное приближение (505). § 3. Прямая корреляционная функция. Гиперцепное приближение. Уравнение Перкуса — Йевики. Эффективный потенциал (508). § 4. Фазовые переходы первого и второго рода (511). § 5. Фазовый переход газ — жидкость (513). § 6. Теория Ван-дер-Ваальса (514). § 7. Критическая область (515). § 8. Флуктуации в критической области. Модель Ван-дер-Ваальса (517). § 9. Пространственные корреляции. Формула Орнштейна — Цернике (519).
- Глава 21. Фазовые переходы второго рода 521**
- § 1. Броуновское движение при фазовых переходах (521). § 2. Теория Ландау (524). § 3. Флуктуации параметра порядка. Приближение Гаусса (526). § 4. Приближения среднего поля и вторых корреляций (527). § 5. Распределение средней энергии по спектру. Когерентные флуктуации (531). § 6. Уравнение Гинзбурга — Ландау. Пространственные корреляции (532). § 7. Критические индексы. Гипотеза масштабной инвариантности (535). § 8. Согласование двух предельных переходов: $T \rightarrow T_c$; $N \rightarrow \infty$, $V \rightarrow \infty$ (537).

Глава 22. Неравновесные фазовые переходы в квантовых системах	542
§ 1. Квантовые генераторы (542). § 2. Режим генерации без учета флуктуаций (543). § 3. Источники флуктуаций поляризации в квантовом генераторе (545). § 4. Уравнения поля с учетом флуктуаций (547). § 5. Спектр излучения квантового генератора. Флуктуации амплитуды и фазы (549). § 6. Влияние критических флуктуаций на процесс генерации (551). § 7. О некоторых проблемах теории неравновесных фазовых переходов (553).	
Глава 23. Турбулентность	554
§ 1. Турбулентное движение (554). § 2. Исходные уравнения. Напряжения Рейнольдса (559). § 3. Возникновение турбулентности (562). § 4. Развитая турбулентность (565). § 5. Турбулентная вязкость (569). § 6. Осредненное турбулентное течение (573).	
Глава 24. Флуктуационно-диссипационная теорема. Кинетические уравнения для многочастичных функций распределения	577
§ 1. Флуктуационно-диссипационная теорема (ФДТ) (577). § 2. Кинетическая и термодинамическая формы ФДТ (581). § 3. Квантовое кинетическое уравнение для многочастичной функции распределения (590). § 4. Уравнение Леонтовича. Модель Больцмана (595). § 5. Мера неполноты статистического описания (597). § 6. Флуктуационное представление интеграла столкновений Больцмана (599). § 7. Одновременный учет сильных и слабых взаимодействий (601).	
Заключение	602
Литература	604
Предметный указатель	607