

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	11
Лекция I. ТЕОРИЯ БОЛЬЦМАНА	14
§ 1. Уравнение Больцмана	15
Задача № 1. Число столкновений молекулы	19
§ 2. <i>H</i>-теорема Больцмана	20
§ 3. Законы сохранения	23
Задача № 2. Локально-равновесная функция распределения	24
§ 4. τ-приближение	25
Задача № 3. Коэффициент теплопроводности в τ -приближении.	26
Задача № 4. Коэффициент вязкости в τ -приближении.	28
Список литературы	29
Лекция II. УРАВНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ...	30
§ 1. Общие соотношения	31
§ 1.1. Закон сохранения массы	31
§ 1.2. Закон сохранения импульса	32
§ 1.3. Закон сохранения энергии	33
§ 2. Замкнутая система уравнений	36
§ 3. Линеаризованные уравнения гидродинамики ...	39
§ 4. Гидродинамические возбуждения	40
§ 5. Возбуждения в заряженной системе	42
Список литературы	44
Лекция III. ТЕОРИЯ ЭНСКОГА	45
§ 1. Уравнение Энскогога	46
§ 2. Законы сохранения	49

§ 3. Линеаризация оператора столкновений	53
§ 4. Поправки к кинетическим коэффициентам	55
З а д а ч а. Первая поправка к коэффициенту вязкости	59
§ 5. Вторая вязкость	61
Список литературы	64

Лекция IV. КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ		65
§ 1. Случай малой передачи импульса		66
§ 2. Интеграл столкновений в форме Ландау		69
З а д а ч а № 1. Кинетические коэффициенты в τ -приближении		73
З а д а ч а № 2. Скорость остывания горячих электронов ..		76
§ 3 H -теорема для интеграла столкновений Ландау		78
§ 4. Интеграл столкновений в форме Фоккера–Планка		80
§ 4.1. Уравнение Фоккера–Планка для заряженной частицы		82
§ 4.2. Уравнение Фоккера–Планка для тяжёлой частицы		85
З а д а ч а № 3. Подвижность тяжёлой частицы		86
§ 4.3. Заключение		87
Список литературы		88

Лекция V. ЭЛЕКТРОНЫ В МЕТАЛЛЕ ($T \ll \Theta$)		89
§ 1. Уравнение для функции распределения		90
З а д а ч а № 1. Остаточное сопротивление		95
З а д а ч а № 2. Электронная теплопроводность		96
З а д а ч а № 3. Термоэлектрический эффект		98
З а д а ч а № 4. Закон возрастания энтропии		99
§ 2. Эффект Кондо		100
§ 2.1 Теория возмущений		100
§ 2.2 Вычисление температурной поправки		108

§ 2.3 Сведение проблемы к одномерной задаче	110
§ 3. Нестационарные явления	112
§ 3.1 Продольные поля	112
§ 3.2 Поперечные поля	116
Список литературы	119

Лекция VI. ЭЛЕКТРОНЫ И ФОНОНЫ

В МЕТАЛЛЕ	120
§ 1. Электрон-фононное взаимодействие	121
§ 2. Кинетическое уравнение в металлах	123
§ 2.1. <i>H</i> -теорема о возрастании энтропии	125
§ 3. Кинетическое уравнение при равновесных фононах	128
§ 3.1. Интегрирование по импульсу виртуального электрона	133
§ 3.2. Интегрирование по углу рассеяния	133
§ 3.3. Подстановка пробной функции первого приближения	134
§ 3.4. Уравнение Блоха–Грюнайзена	135
§ 4. Определение температурного хода сопротивления	136
§ 5. Определение температурного хода теплопроводности	139
§ 5.1. Низкие температуры $T \ll \Theta$	139
§ 5.2. Преобразование ядра интегрального уравнения	143
§ 5.3. Высокие температуры $T \gg \Theta$	144
З а д а ч а № 1. Качественное рассмотрение	145
З а д а ч а № 2. Скорость релаксации фононов	147
З а д а ч а № 3. Скорость релаксации электронов	149
§ 6. Проводимость полупроводников	151
§ 7. Роль процессов переброса	153
Список литературы	157

Лекция VII. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ	158
§ 1. Теория Швингера–Миллса–Келдыша	159
§ 1.1. Переход к представлению взаимодействия	160
§ 1.2. Переход к усреднению по состояниям идеального газа	161
§ 1.3. Диаграммная техника	164
§ 2. Теория туннелирования через плоский контакт	166
§ 3. Формула Кубо	169
§ 4. Продольное внешнее поле	170
§ 4.1. Вычисление продольной нестационарной поправки ..	171
§ 4.2. Продольная диэлектрическая проницаемость	173
§ 5. Поперечное внешнее поле	176
§ 5.1. Вычисление поперечной нестационарной поправки ..	177
§ 5.2. Поперечная диэлектрическая проницаемость	181
§ 5.3. Вычисление глубины проникновения	183
§ 6. Скорость релаксации ядерных спинов	184
Список литературы	188
Лекция VIII. ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА	189
Введение	189
§ 1. Стационарный сверхпроводящий ток	191
§ 1.1. Туннельный гамильтониан и средний ток	191
§ 1.2. $(u-v)$ -преобразование с фазовым множителем	193
§ 1.3. Вычисление амплитуды тока Джозефсона	195
§ 2. Туннелирование при заданной разности потенциалов	201
§ 3. Нестационарный эффект Джозефсона	207
§ 3.1. Температура $T \ll T_c$	210
Приложение Вычисление эллиптических интегралов	217
Список литературы	222

Лекция IX. КВАНТОВЫЕ КИНЕТИЧЕСКИЕ	
ЯВЛЕНИЯ	223
§ 1. Уравнение для матрицы плотности	224
§ 2. Квантовое кинетическое уравнение	227
§ 3. Уравнение Дайсона	231
§ 4. Интегралы столкновений	236
§ 4.1. Рассеяние на примесях	238
§ 4.2. Рассеяние на равновесных фонах	240
§ 4.3. Электрон-электронное взаимодействие	243
§ 4.4. Интеграл столкновений в форме Ландау	246
§ 5. Учёт экранирования и поляризации	250
§ 5.1. Обмен плазмонами	252
§ 6. Диффузоры и купероны	254
§ 6.1. ”Длинные хвосты” корреляционных функций	257
Список литературы	259

Лекция X. ШУМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ	
ЦЕПЯХ	260
§ 1. Флуктуационно-диссипационная теорема	261
§ 1.1. Формула Кубо	262
§ 1.2. Белый шум	263
§ 2. $1/f$-шумы в электрических цепях	266
§ 2.1. $1/f$-шум. Экспериментальные данные	266
§ 2.2. $1/f$-шум. Схема вычислений	267
§ 2.3. Постановка задачи	271
§ 3. Вывод уравнений ренорм-группы	274
§ 3.1. Уравнения для скалярных вершин	274
§ 3.2. Уравнения для двухтоковых вершин	278
§ 3.3. Уравнения для четырёхтоковых вершин	280
§ 4. Вычисление показателя α	280
§ 5. Вычисление параметра φ	283
§ 5.1. Низкие температуры ($T \ll \Theta$)	286
§ 5.2. Высокие температуры ($T \gg \Theta$)	287
§ 5.3. Качественное сравнение с экспериментом	288
§ 6. Шумы при ультранизких температурах	289

§ 6.1. Уравнения для четырёхтоковых вершин	289
§ 6.2. Уравнения для двухтоковых вершин	293
§ 6.3. Уравнения для скалярных вершин	294
§ 6.4. Вычисление показателя α	295
Список литературы	296

Лекция XI. КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ФОНОНОВ		297
§ 1. Общий вид кинетического уравнения		298
§ 2. Фонон-фононное взаимодействие		298
§ 3. Трёхфононный интеграл столкновений		300
§ 4. H-теорема о возрастании энтропии		302
§ 5. Теплопроводность диэлектриков		306
§ 5.1. Уравнение при заданном градиенте температуры ...		306
§ 5.2. Теплопроводность при высокой температуре		308
§ 5.3. Теплопроводность при низкой температуре		309
§ 6. Уравнения фононной гидродинамики		313
§ 7. Поглощение звука. Короткие волны		316
§ 8. Поглощение звука. Длинные волны		322
§ 8.1. Длинные волны. Высокие температуры $T \gg \Theta$		325
§ 8.2. Длинные волны. Низкие температуры $T \ll \Theta$		325
Задача. Поглощение звука в τ-приближении		327
Список литературы		332

Лекция XII. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРМИ-ЖИДКОСТИ		333
§ 1. Уравнение для функции распределения		334
§ 2. Температурная зависимость времени релаксации		336
§ 3. Законы сохранения		337
§ 3.1. Закон сохранения массы		337
§ 3.2. Закон сохранения импульса		338
§ 3.3. Закон сохранения энергии		339
§ 4. Линеаризация кинетического уравнения		340

§ 5. Построение точного решения	348
§ 6. Распространение звука в ферми-жидкости	351
§ 6.1. Нулевой звук в ферми-жидкости	352
§ 6.2. Скорость гидродинамического звука	355
§ 6.3. Поглощение звука в ферми-жидкости	360
§ 7. <i>H</i> -теорема Больцмана	364
Приложение А. Эффективная масса	368
Приложение В. Вычисление интегралов	370
Список литературы	373

Лекция XIII. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В СВЕРХПРОВОДНИКАХ	374
§ 1. Нестационарный эффект Мейсснера	375
§ 1.1. Пипшардовский случай	381
§ 1.2. Лондоновский случай	385
§ 2. Поглощение ультразвука	387
§ 3. Скорость релаксации ядерных спинов	390
§ 4. Теплопроводность сверхпроводника	394
§ 5. Нестационарные уравнения Гинзбурга– Ландау	398
Список литературы	406

Лекция XIV. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В ДИЭЛЕКТРИКАХ	407
§ 1. Определение диэлектрической проница- емости	408
§ 2. Однопетлевое приближение	410
§ 3. Лестничное уравнение для Π -оператора	415
§ 4. Влияние теплопроводности на $\epsilon^{\alpha,\beta}(\omega, \vec{q})$	420
З а д а ч а. Адиабатическая и изотермическая поляризуемость	423
§ 5. Второй звук	425
§ 6. Влияние теплопроводности на звук	426
§ 7. Затухание критических колебаний	428
§ 7.1. Трёхфононные процессы	428

§ 7.2. Четырёхфононные процессы	431
§ 8. Затухание звука в сегнетоэлектриках	433
Список литературы	435

Лекция XV. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ	
ВБЛИЗИ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА	436
§ 1. Диаграммная техника для критических колебаний	437
§ 1.1. Динамический критический индекс	440
§ 1.2. Вычисление параметра Фишера η	444
§ 2. Паркетные и непаркетные диаграммы	446
§ 3. Суммирование паркетных диаграмм	452
§ 3.1. Уравнения Судакова	454
§ 3.2. Решение уравнений Судакова	457
§ 3.3. Определение угловой вершинной части	458
§ 3.4. Паркетное уравнение для угловой вершины	459
§ 3.5. Нахождение одночастичной функции Грина	460
§ 3.6. Паркетное уравнение для поляризационного оператора	460
§ 4. Эффекты медленной теплопроводности	461
§ 4.1. Поправка к коэффициенту теплопроводности	463
§ 4.2. Вычисление аномальных поправок	465
З а д а ч а. Дисперсия коэффициента теплопроводности ...	465
§ 5. Динамические явления вблизи критической точки	467
§ 5.1. Эквивалентная модель	468
§ 5.2. Вычисление поправки к вязкости	469
§ 5.3. Вычисление поправки к теплопроводности	471
§ 6. Заключение	472
Список литературы	475

ОБЩИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	476
--------------------------------------	------------

Учебники и монографии	482
------------------------------------	------------

ВВЕДЕНИЕ

Значительные успехи в теоретической и экспериментальной физике, достигнутые во второй половине XX века, привели к необходимости существенной перестройки курса физической кинетики, читаемого в Московском физико-техническом институте. Основные задачи классической кинетической теории, относящиеся к первой половине XX века, давно стали предметом изучения в курсах общей физики. В соответствии с этим в программе курса теоретической физики появились разделы, отражающие новые идеи и методы. Отсюда и возникла необходимость написания расширенного курса классической и квантовой кинетики.

Что же касается предлагаемых лекций, то здесь была поставлена задача дополнить их содержание, соответствующее классическому курсу Ландау–Лифшица, некоторыми новыми разделами, без которых невозможно решать задачи, стоящие перед современной теоретической физикой.

Курс лекций состоит из пятнадцати лекций. Четыре первых лекции посвящены классической теории. Остальные одиннадцать лекций посвящены квантовой кинетике.

В первой лекции выводится уравнение Больцмана и доказывается H -теорема. Коэффициенты теплопроводности и вязкости вычисляются в τ -приближении.

Во второй лекции произведен переход к уравнениям гидродинамики. Линеаризация уравнений гидродинамики позволяет определить длинноволновые и низкочастотные моды, затухание которых выражается через коэффициенты теплопроводности и вязкости.

В третьей лекции изучается пространственно-нелокальный вариант интеграла столкновений, предложенный Энскогом. Вычислены два первых поправочных члена разложения коэффициентов сдвиговой вязкости и теплопроводности. Рассмотрен простейший метод вычисления второй вязкости.

В четвертой лекции вычисляется интеграл столкновений в форме Ландау, из которого выводится уравнение Фоккера–Планка. Определена температурная зависимость теплопровод-

ности, проводимости и вязкости, а также скорости остывания горячих электронов.

В пятой лекции рассмотрено кинетическое уравнение электронов в неидеальной решётке. Вычисляются коэффициенты теплопроводности и электропроводности термоЭДС. Эффект Кондо изучается на основании нестационарной теории возмущений. Получен закон дисперсии плазменных колебаний, определена частотная зависимость глубины проникновения в условиях нормального и аномального скин-эффекта.

Шестая лекция посвящена вычислению коэффициентов электропроводности и теплопроводности в широкой области температур, определяющихся электрон-фононным взаимодействием.

В седьмой лекции на основе нестационарной теории возмущений получена формула Кубо. Рассмотрена теория туннелирования через плоский контакт, вычислена продольная и поперечная диэлектрическая проницаемость металла, а также скорость релаксации ядерных спинов.

В восьмой лекции изучается стационарный и нестационарный эффект Джозефсона. Вычисляются амплитуды квазичастичного, джозефсоновского и интерференционного токов.

В девятой лекции излагается теория Каданова–Бейма. Получено обобщенное кинетическое уравнение для квазичастиц, соответствующее парному электрон-электронному взаимодействию. Рассмотрен квантовый интеграл столкновений Ландау с учётом экранирования и возможности обмена низкочастотными электрон-ионными плазменными колебаниями.

В десятой лекции изучается линейная и нелинейная теория шумов в электрических цепях. Установлена связь между линейным откликом и спектральной характеристикой среднеквадратичных флуктуаций – ФДТ-теорема. Получены уравнения, позволяющие определить низкочастотную асимптотику нелинейного четырёхтокового коррелятора – так называемый $1/f$ -шум.

В одиннадцатой лекции рассмотрено кинетическое уравнение для диэлектриков. Определена температурная зависимость коэффициента теплопроводности, а также частотная и темпе-

ратурная зависимость поглощения звука. Установлены условия существования второго звука.

В двенадцатой лекции выводятся кинетические уравнения в ферми-жидкости. Определена температурная зависимость скорости релаксации, коэффициентов теплопроводности и вязкости. Вычислена скорость нулевого и гидродинамического звуков.

В тринадцатой лекции изучаются кинетические явления в сверхпроводниках. Вычислена температурная и частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитных волн. Определены коэффициенты теплопроводности и поглощения ультразвука, а также температурная зависимость скорости релаксации ядерных спинов в области температур ниже температуры сверхпроводящего перехода. Получено нестационарное уравнение скорости релаксации сверхпроводящего параметра порядка.

В четырнадцатой лекции получены уравнения для диэлектриков, помещённых во внешнее переменное электрическое поле. Рассмотрен специальный вопрос о влиянии теплопроводности на диэлектрическую проницаемость. Разработанный метод позволяет вычислить изотермические поправки к модулям упругости, а также вычислить коэффициенты затухания первого и второго звука.

В пятнадцатой лекции рассмотрены нестационарные явления, происходящие вблизи точки фазового перехода второго рода. Сначала изучена однокомпонентная система с несохраняющимся (релаксирующим) параметром порядка. Вычисления, проделанные в первом приближении по параметру $\epsilon = 4 - d$, показывают, что в этом случае скорость релаксации не меняется так же, как не меняются термодинамические критические индексы. При этом коэффициент теплопроводности обращается в бесконечность по тому же закону, что и теплоёмкость C_v/N , в то время как вязкость вообще не имеет особенности.