

# Оглавление

От авторов	xiv
<b>1 Частицы и поля. Точное самосогласованное описание</b>	<b>1</b>
1.1 Взаимодействующие частицы. Теорема Лиувилля . . . . .	1
1.1.1 Непрерывность в фазовом пространстве . . . . .	1
1.1.2 Характер взаимодействия частиц . . . . .	3
1.1.3 Сила Лоренца, гравитационная сила . . . . .	5
1.1.4 Столкновительная сила трения в плазме . . . . .	5
1.1.5 Точная функция распределения . . . . .	6
1.2 Частицы в электромагнитном поле . . . . .	8
1.2.1 Общая постановка задачи . . . . .	8
1.2.2 Закон сохранения электрического заряда . . . . .	9
1.2.3 Начальные уравнения и начальные условия . . . . .	9
1.2.4 Приложения к плазменной астрофизике . . . . .	10
1.3 Гравитационные системы . . . . .	12
1.4 Упражнения: задачи и решения . . . . .	13
<b>2 Движение заряженной частицы в заданных полях</b>	<b>16</b>
2.1 Частица в постоянных однородных полях . . . . .	16
2.1.1 Релятивистское уравнение движения . . . . .	16
2.1.2 Постоянные однородные немагнитные силы . . . . .	17
2.1.3 Постоянные однородные магнитные поля . . . . .	18
2.1.4 Немагнитная сила в магнитном поле . . . . .	20
2.1.5 Электрический и гравитационный дрейфы . . . . .	22
2.2 Слабо неоднородные медленно меняющиеся поля . . . . .	23
2.2.1 Малые параметры в уравнении движения . . . . .	23
2.2.2 Разложение по степеням $m/e$ . . . . .	25
2.2.3 Усреднение по гиродвижению . . . . .	26
2.2.4 Спиральное движение ведущего центра . . . . .	29
2.3 Градиентный и инерционный дрейфы . . . . .	29
2.3.1 Основные формулы . . . . .	29
2.3.2 Центробежный дрейф . . . . .	30
2.3.3 Зависимый от кривизны магнитного поля дрейф . . . . .	31
2.3.4 Не зависящий от кривизны градиентный дрейф . . . . .	32
2.4 Упражнения: задачи и решения . . . . .	34

<b>3</b>	<b>Адиабатические инварианты в астрофизической плазме</b>	<b>40</b>
3.1	Общие определения . . . . .	40
3.2	Три главных инварианта . . . . .	41
3.2.1	Движение в ларморовской плоскости . . . . .	41
3.2.2	Магнитные зеркала и ловушки . . . . .	43
3.2.3	Колебательное движение между зеркалами . . . . .	45
3.2.4	Потоковый инвариант . . . . .	46
3.3	Ускорение Ферми . . . . .	47
3.3.1	Стохастический механизм второго порядка . . . . .	47
3.3.2	Регулярный механизм Ферми первого порядка . . . . .	48
3.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Кулоновские столкновения в астрофизической плазме</b>	<b>52</b>
4.1	Близкие и далекие столкновения . . . . .	52
4.1.1	Параметры столкновения . . . . .	52
4.1.2	Формула Резерфорда . . . . .	54
4.1.3	Метод пробных частиц . . . . .	54
4.1.4	Частицы в магнитной ловушке . . . . .	55
4.1.5	Роль далеких столкновений . . . . .	56
4.1.6	Некоторые точные решения . . . . .	58
4.2	Дебаевское экранирование . . . . .	59
4.2.1	Простые иллюстрации эффекта экранирования . . . . .	59
4.2.2	Реальный эффект экранирования . . . . .	61
4.2.3	Зарядовая нейтральность и колебания в плазме . . . . .	62
4.3	Динамическое трение в астрофизической плазме . . . . .	63
4.3.1	Формула Спитцера . . . . .	63
4.3.2	Потери энергии в плазме . . . . .	65
4.3.3	Динамическое трение в плазме . . . . .	67
4.3.4	Электрическое убежание . . . . .	68
4.3.5	Тепловое убежание в астрофизической плазме . . . . .	70
4.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Статистическое описание системы взаимодействующих частиц</b>	<b>75</b>
5.1	Усреднение уравнения Лиувилля . . . . .	75
5.1.1	Усреднение по фазовому пространству . . . . .	75
5.1.2	Два статистических постулата . . . . .	76
5.1.3	Статистический механизм перемешивания . . . . .	78
5.1.4	Вывод обобщенного кинетического уравнения . . . . .	81
5.2	Интеграл столкновений и корреляционные функции . . . . .	83
5.2.1	Парные взаимодействия . . . . .	83
5.2.2	Парные корреляции . . . . .	85
5.2.3	Интеграл столкновений и корреляционная функция . . . . .	86
5.3	Уравнения для корреляционных функций . . . . .	88
5.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	90

<b>6</b>	<b>Слабосвязанные системы с парными столкновениями</b>	<b>91</b>
6.1	Основные приближения для учета парных столкновений . . . . .	91
6.1.1	Малый параметр кинетической теории . . . . .	91
6.1.2	Функция распределения Максвелла . . . . .	93
6.1.3	Усредненная сила и электрическая нейтральность . . . . .	94
6.1.4	Парные корреляции и дебаевское экранирование . . . . .	95
6.1.5	Плазменный параметр и коллективные явления . . . . .	97
6.2	Уравнение Власова и интеграл столкновений Ландау . . . . .	98
6.2.1	Кинетическое уравнение Власова . . . . .	98
6.2.2	Интеграл столкновений Ландау . . . . .	99
6.2.3	Уравнение Фоккера-Планка . . . . .	100
6.3	Гравитационные системы . . . . .	101
6.3.1	Аналог уравнения Власова . . . . .	101
6.3.2	Аналог интеграла столкновений Ландау . . . . .	102
6.4	Замечания о численном моделировании . . . . .	102
6.5	Упражнения: задачи и решения . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Распространение быстрых частиц в астрофизической плазме</b>	<b>105</b>
7.1	Вывод основного кинетического уравнения . . . . .	105
7.1.1	Исходные приближения и уравнения . . . . .	105
7.1.2	Зависящее от энергии кинетическое уравнение . . . . .	107
7.1.3	Кинетическое уравнение при больших энергиях . . . . .	108
7.2	Классическая модель толстой мишени . . . . .	110
7.2.1	Простейшее точное решение для электронов . . . . .	110
7.2.2	Нормировка спектра инжекции . . . . .	111
7.2.3	Тонкая и толстая мишени . . . . .	112
7.3	Обратный ток в толстой мишени . . . . .	114
7.3.1	Необходимость обратного тока . . . . .	114
7.3.2	Постановка кинетической задачи . . . . .	115
7.3.3	Безразмерные параметры задачи . . . . .	117
7.3.4	Электрический ток в толстой мишени . . . . .	118
7.3.5	Двумерность в пространстве скоростей . . . . .	119
7.3.6	Нагрев плазмы обратным током . . . . .	121
7.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Взаимодействие частиц с волнами в астрофизической плазме</b>	<b>125</b>
8.1	Основы кинетической теории . . . . .	125
8.1.1	Линеаризованное уравнение Власова . . . . .	125
8.1.2	Резонанс Ландау и затухание Ландау . . . . .	127
8.1.3	Гирорезонанс . . . . .	129
8.2	Стохастическое ускорение частиц волнами . . . . .	131
8.2.1	Принципы ускорения частиц волнами . . . . .	131
8.2.2	Теория турбулентности Колмогорова-Обухова . . . . .	133
8.2.3	МГД турбулентный каскад . . . . .	135
8.2.4	МГД турбулентность в солнечном ветре . . . . .	137
8.3	Упражнения: задачи и решения . . . . .	138

<b>9</b>	<b>Макроскопическое описание астрофизической плазмы</b>	<b>142</b>
9.1	Сводка формул микроскопического описания . . . . .	142
9.2	Определения макроскопических величин . . . . .	143
9.3	Макроскопические уравнения переноса . . . . .	144
9.3.1	Уравнение для нулевого момента . . . . .	144
9.3.2	Закон сохранения импульса . . . . .	145
9.4	Закон сохранения энергии . . . . .	148
9.4.1	Уравнение для второго момента . . . . .	148
9.4.2	Случай термодинамического равновесия . . . . .	150
9.4.3	Общий случай неравновесной плазмы . . . . .	151
9.4.4	Источники и стоки энергии . . . . .	152
9.5	Общие свойства уравнений переноса . . . . .	153
9.5.1	Дивергентная и гидродинамическая формы . . . . .	153
9.5.2	Статус законов сохранения . . . . .	155
9.6	Уравнение состояния и коэффициенты переноса . . . . .	156
9.6.1	Общий подход к проблеме . . . . .	156
9.6.2	Классический тепловой поток . . . . .	157
9.7	Уравнения для моментов высших порядков . . . . .	159
9.8	Гравитационные системы . . . . .	160
9.9	Упражнения: задачи и решения . . . . .	162
<b>10</b>	<b>Многожидкостные модели астрофизической плазмы</b>	<b>166</b>
10.1	Многожидкостные модели в астрофизике . . . . .	166
10.2	Ленгмюровские волны . . . . .	167
10.2.1	Ленгмюровские волны в холодной плазме . . . . .	167
10.2.2	Ленгмюровские волны в теплой плазме . . . . .	169
10.2.3	Роль ионов в ленгмюровских волнах . . . . .	170
10.3	Электромагнитные волны в плазме . . . . .	172
10.4	Недостатки гидродинамического приближения . . . . .	174
10.5	Упражнения: задачи и решения . . . . .	174
<b>11</b>	<b>Обобщенный закон Ома в плазме</b>	<b>177</b>
11.1	Классический закон Ома . . . . .	177
11.2	Вывод основных уравнений . . . . .	178
11.3	Общее решение . . . . .	180
11.4	Проводимость замагниченной плазмы . . . . .	181
11.4.1	Два предельных случая . . . . .	181
11.4.2	Физическая интерпретация эффекта Холла . . . . .	182
11.4.3	Амбиполярная диффузия . . . . .	185
11.5	Токи и заряды в плазме . . . . .	186
11.5.1	Столкновительная и бесстолкновительная плазма . . . . .	186
11.5.2	Объемный заряд и квазинейтральность . . . . .	188
11.6	Упражнения: задачи и решения . . . . .	190
<b>12</b>	<b>Одножидкостные модели астрофизической плазмы</b>	<b>192</b>
12.1	Вывод одножидкостных уравнений . . . . .	192
12.1.1	Уравнение непрерывности . . . . .	192
12.1.2	Закон сохранения импульса в плазме . . . . .	193
12.1.3	Закон сохранения энергии . . . . .	195

12.2	Основы магнитной гидродинамики . . . . .	197
12.2.1	Общие упрощающие предположения . . . . .	197
12.2.2	Специфические для МГД упрощающие предположения . . . . .	198
12.2.3	Классическая нерелятивистская МГД . . . . .	200
12.2.4	Закон сохранения энергии . . . . .	202
12.2.5	Релятивистская магнитная гидродинамика . . . . .	203
12.3	Сохранение магнитного потока. Идеальная МГД . . . . .	204
12.3.1	Интегральная и дифференциальная формы закона . . . . .	204
12.3.2	Уравнения идеальной МГД . . . . .	207
12.3.3	Теорема «вмороженности» магнитного поля . . . . .	208
12.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	210
<b>13</b>	<b>МГД волны в астрофизической плазме</b>	<b>212</b>
13.1	Дисперсионное уравнение в идеальной МГД . . . . .	212
13.2	Волны малой амплитуды в идеальной МГД . . . . .	214
13.2.1	Энтропийные волны . . . . .	214
13.2.2	Альвеновские волны . . . . .	216
13.2.3	Магнитозвуковые волны . . . . .	217
13.2.4	Диаграмма фазовых скоростей . . . . .	218
13.3	Затухание МГД волн . . . . .	220
13.3.1	Слабое затухание МГД волн . . . . .	220
13.3.2	Диссипативные и недиссипативные волны . . . . .	221
13.4	Устойчивость сжимаемых волн . . . . .	222
13.4.1	Вывод дисперсионного уравнения . . . . .	222
13.4.2	Два типа МГД волн . . . . .	225
13.4.3	Волны в сильном магнитном поле . . . . .	226
13.4.4	Неустойчивость энтропийных волн . . . . .	227
13.4.5	Затухание магнитозвуковых волн . . . . .	229
13.5	МГД колебания в солнечной короне . . . . .	231
13.6	Упражнения: задачи и решения . . . . .	233
<b>14</b>	<b>Разрывные течения в магнитной гидродинамике</b>	<b>235</b>
14.1	Разрывные течения в обычной гидродинамике . . . . .	235
14.1.1	Происхождение ударных волн в гидродинамике . . . . .	235
14.1.2	Граничные условия и классификация разрывов . . . . .	236
14.1.3	Диссипативные процессы и энтропия . . . . .	238
14.2	Разрывные решения в магнитной гидродинамике . . . . .	239
14.2.1	Граничные условия на поверхности разрыва . . . . .	239
14.2.2	МГД разрывы без перетекания плазмы . . . . .	241
14.2.3	Перпендикулярная ударная волна . . . . .	244
14.2.4	Наклонные ударные волны . . . . .	246
14.2.5	Трансальвеновские ударные волны . . . . .	251
14.2.6	Особые МГД ударные волны . . . . .	251
14.2.7	Альвеновский разрыв . . . . .	252
14.3	Ударные волны в бесстолкновительной плазме . . . . .	254
14.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	256

<b>15</b>	<b>Переходы между МГД разрывами и их эволюционность</b>	<b>260</b>
15.1	Непрерывные переходы между МГД разрывами . . . . .	260
15.1.1	Возможность переходов . . . . .	260
15.1.2	Наклон линий магнитного поля . . . . .	262
15.1.3	Условия для непрерывных переходов . . . . .	266
15.1.4	Переходы между разрывами . . . . .	268
15.1.5	Схема непрерывных переходов . . . . .	270
15.2	Эволюционность МГД разрывов . . . . .	272
15.2.1	Физический смысл и определение . . . . .	272
15.2.2	Линеаризованные граничные условия . . . . .	274
15.2.3	Число волн малой амплитуды . . . . .	276
15.2.4	Области эволюционности . . . . .	278
15.2.5	Порядок следования ударных волн . . . . .	280
15.2.6	Диссипация и эволюционность . . . . .	281
15.2.7	Структура разрыва и его эволюционность . . . . .	283
15.3	Упражнения: задачи и решения . . . . .	286
<b>16</b>	<b>Приближения слабого и сильного поля</b>	<b>290</b>
16.1	Основные приближения в идеальной МГД . . . . .	290
16.1.1	Безразмерные уравнения . . . . .	290
16.1.2	Слабые магнитные поля в астрофизической плазме . . . . .	292
16.1.3	Сильные магнитные поля в плазме . . . . .	293
16.2	Течения плазмы в сильном магнитном поле . . . . .	296
16.2.1	Общая постановка задачи . . . . .	296
16.2.2	Формализм двумерных задач . . . . .	298
16.2.3	О существовании непрерывных течений плазмы . . . . .	304
16.3	Упражнения: задачи и решения . . . . .	305
<b>17</b>	<b>Магнитное пересоединение</b>	<b>310</b>
17.1	Что такое магнитное пересоединение? . . . . .	310
17.1.1	Нулевые точки магнитного поля . . . . .	310
17.1.2	Пересоединение в вакууме . . . . .	311
17.1.3	Пересоединение в плазме . . . . .	313
17.1.4	Три стадии процесса пересоединения . . . . .	315
17.2	МГД возмущения в окрестности нулевой линии . . . . .	317
17.2.1	Классическая постановка задачи . . . . .	317
17.2.2	Линеаризованная задача для малых возмущений . . . . .	318
17.2.3	Сходящиеся волны и кумулятивный эффект . . . . .	320
17.2.4	Большие возмущения вблизи нулевой точки . . . . .	321
17.2.5	Изменения плотности плазмы . . . . .	324
17.2.6	Динамическая диссипация магнитного поля . . . . .	325
17.3	Аналитические модели пересоединения . . . . .	328
17.3.1	Две классические модели пересоединения . . . . .	328
17.3.2	Нейтральный токовый слой . . . . .	330
17.3.3	Токовый слой Сыроватского . . . . .	332
17.3.4	Простые законы подобия . . . . .	334
17.3.5	Поперечное магнитное поле . . . . .	336
17.3.6	Продольное магнитное поле . . . . .	337
17.4	Упражнения: задачи и решения . . . . .	339

<b>18 Ускорение частиц в астрофизической плазме</b>	<b>343</b>
18.1 Два основных механизма ускорения частиц . . . . .	343
18.2 Диффузионное ускорение на ударных волнах . . . . .	344
18.2.1 Каноническая модель диффузионного механизма . . . . .	344
18.2.2 Некоторые свойства диффузионного механизма . . . . .	347
18.2.3 Нелинейные эффекты при диффузионном ускорении . . . . .	348
18.3 Дрейфовое ускорение на ударных волнах . . . . .	349
18.3.1 Перпендикулярные ударные волны . . . . .	349
18.3.2 Квазиперпендикулярные ударные волны . . . . .	351
18.3.3 Наклонные ударные волны . . . . .	355
18.4 Ускорение в токовых слоях, почему и как? . . . . .	356
18.4.1 Упрощенное рассмотрение . . . . .	356
18.4.2 Происхождение ускорения частиц . . . . .	357
18.4.3 Ускорение в нейтральном токовом слое . . . . .	358
18.5 Упражнения: задачи и решения . . . . .	362
<b>19 Равновесие плазмы в магнитном поле</b>	<b>364</b>
19.1 Теорема вириала в МГД . . . . .	364
19.1.1 Краткая предыстория . . . . .	364
19.1.2 Вывод скалярной теоремы вириала . . . . .	364
19.1.3 Некоторые астрофизические приложения . . . . .	367
19.2 Бессилловые поля и теорема Шафранова . . . . .	370
19.2.1 Простейшие примеры бессилловых полей . . . . .	370
19.2.2 Энергия бессиллового поля . . . . .	372
19.3 Свойства равновесных конфигураций . . . . .	373
19.3.1 Магнитные поверхности . . . . .	373
19.3.2 Удельный объем магнитной трубки . . . . .	375
19.3.3 Желобковая, или конвективная неустойчивость . . . . .	377
19.4 Архимедова сила в МГД . . . . .	378
19.4.1 Общая постановка задачи . . . . .	378
19.4.2 Упрощенное рассмотрение эффекта . . . . .	379
19.5 Стационарные МГД течения . . . . .	380
19.5.1 Несжимаемая среда . . . . .	381
19.5.2 Дифференциальное вращение . . . . .	381
19.6 Упражнения: задачи и решения . . . . .	383
<b>Приложение 1. Обозначения</b>	<b>385</b>
<b>Приложение 2. Полезные формулы</b>	<b>389</b>
<b>Приложение 3. Константы</b>	<b>392</b>
<b>Литература</b>	<b>393</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>411</b>