Оглавление

От авторов **xiv**

1 Частицы и поля. Точное самосогласованное описание **1**
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

2 Движение заряженной частицы в заданных полях **16**
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

3 Адиабатические инварианты в астрофизической плазме 40
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

4 Кулоновские столкновения в астрофизической плазме 52
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 . . . 64
4.3.3 Динамическое трение в плазме . . . 67
4.3.4 Электрическое убегание . . . 68
4.3.5 Тепловое убегание в астрофизической плазме . . . 70
4.4 Упражнения: задачи и решения . . . 71

5 Статистическое описание системы взаимодействующих частиц 75
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

6 Слабосвязанные системы с парными столкновениями 91
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

7 Распространение быстрых частиц в астрофизической плазме 105
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

8 Взаимодействие частиц с волнами в астрофизической плазме 125
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

9 Макроскопическое описание астрофизической плазмы 142
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

10 Многожидкостные модели астрофизической плазмы 166
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

11 Обобщенный закон Ома в плазме 177
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

12 Одножидкостные модели астрофизической плазмы 192
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

13 МГД волны в астрофизической плазме 212
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

14 Разрывные течения в магнитной гидродинамике 235
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

15 Переходы между МГД разрывами и их эволюционность 260
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

16 Приближения слабого и сильного поля 290
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

17 Магнитное пересоединение 310
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

18 Ускорение частиц в астрофизической плазме 343
18.1 Ускорение частиц на ударных волнах . . . 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

19 Равновесие плазмы в магнитном поле 364
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 Бессиловые поля и теорема Шафранова . . . 370
19.2.1 Простейшие примеры бессиловых полей . . . 370
19.2.2 Энергия бессилового 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 . . . 382

Приложение 1. Обозначения 385

Приложение 2. Полезные формулы 389

Приложение 3. Константы 392

Литература 393

Предметный указатель 411