

Глава 1. Введение	17
1.1. Пространственно-временные масштабы в астрофизике	20
1.1.1. Расстояния	20
1.1.2. Характерные времена	24
1.1.3. Характерные значения масс	24
1.1.4. Солнечные единицы	25
1.2. Состояние вещества во Вселенной	26
Глава 2. Излучение и поглощение ЭМ волн в среде	29
2.1. Основные понятия	30
2.1.1. «Температурная» шкала электромагнитных волн	30
2.1.2. Интенсивность излучения	30
2.1.3. Поток излучения. Связь с интенсивностью	32
2.1.4. Плотность энергии излучения	34
2.1.5. Понятие спектра	34
2.2. Излучение абсолютно черного тела	34
2.2.1. Тепловое излучение	34
2.2.2. Понятие термодинамического равновесия и локального термодинамического равновесия	35
2.2.3. Спектр абсолютно черного тела	36
2.3. Перенос излучения в среде и формирование спектра	40
2.3.1. Коэффициент излучения	40
2.3.2. Коэффициент поглощения и оптическая тол- щина	41
2.3.3. Уравнение переноса при наличии поглощения и излучения	43

2.3.4.	Решение уравнения переноса для простейших случаев	45
2.3.5.	Образование спектральных линий в условиях ЛТР	46
2.3.6.	Температура астрофизических источников, определяемая по их излучению	49
2.4.	Астрофизические примеры спектров	52
2.5.	Основные механизмы поляризации излучения	56
2.6.	Задачи	58
Глава 3.	Особенности астрономических наблюдений и физические ограничения их возможностей	63
3.1.	Основные задачи наблюдательной астрономии	63
3.2.	Пропускание света земной атмосферой	64
3.3.	«Точечные» и «протяженные» источники	66
3.4.	Оптические наблюдения	67
3.4.1.	Оптические телескопы	67
3.4.2.	Приемники излучения	73
3.4.3.	Видимый диапазон	74
3.4.4.	Проблема улучшения углового разрешения телескопа	75
3.4.5.	Звездные интерферометры	77
3.4.6.	Физические ограничения на точность фотометрических измерений	82
3.4.7.	Спектральные наблюдения	86
3.5.	Радиоастрономические наблюдения	89
3.5.1.	Радиотелескопы	89
3.5.2.	Радиоинтерферометры. Метод апертурного синтеза	92
3.6.	Рентгеновские телескопы и детекторы	95
3.7.	Поляризационные наблюдения	97
Глава 4.	Межзвездная среда	99
4.1.	Основные составляющие и проявления	99
4.2.	Пропускание излучения межзвездной средой	104
4.3.	Физические особенности разреженной космической среды	109
4.3.1.	Запрещенные линии	109
4.3.2.	Излучение нейтрального водорода	111
4.3.3.	Вмороженность магнитного поля	113
4.4.	Объемный нагрев и охлаждение МЗС	116

4.4.1.	Основные механизмы нагрева газа	116
4.4.2.	Основные механизмы охлаждения газа	118
4.5.	Тепловая неустойчивость МЗС	125
4.6.	Ионизованный водород и зоны НII	128
4.7.	Горячий, или «корональный» газ	130
4.8.	Молекулярные облака, звездообразование и мазеры	131
4.9.	Космические лучи и синхротронное излучение	134
4.9.1.	Проблема происхождения и ускорения КЛ сверхвысоких энергий	141
4.10.	Другие методы диагностики космической плазмы	144
4.11.	Задачи	147
Глава 5.	Звезды	149
5.1.	Общие характеристики	149
5.2.	Образование звезд	153
5.2.1.	Гравитационная неустойчивость	153
5.2.2.	Влияние вращения на сжатие	156
5.2.3.	Влияние магнитного поля на сжатие	157
5.3.	Стадии формирования звезды	158
5.4.	Стационарные звезды	161
5.4.1.	Гидростатическое равновесие	162
5.4.2.	Теорема вириала для звезды	163
5.4.3.	Тепловая устойчивость звезд. Отрицательная теплоемкость	165
5.5.	Ядерные реакции в звездах	166
5.5.1.	pp-цикл (Г. Бете, 1939)	169
5.5.2.	Проблема солнечных нейтрино	171
5.5.3.	CNO-цикл	174
5.5.4.	О характере движения квантов в недрах Солнца и звезд	175
5.5.5.	Происхождение химических элементов до элементов железного пика	178
5.5.6.	Уравнения внутреннего строения звезд и Солнца	179
5.6.	Роль давления излучения в массивных звездах	181
5.7.	Соотношения $M-L$ и $M-R$ для звезд ГП	184
5.8.	Атмосферы звезд	185
5.8.1.	Образование спектральных линий	186
5.8.2.	Спектральная классификация звезд	189
5.8.3.	Непрерывный спектр	191

5.9.	Солнце как ближайшая звезда	193
5.9.1.	Общие характеристики	193
5.9.2.	Особенности фотосферы, хромосферы и короны Солнца	198
5.9.3.	Солнечные вспышки. Активность Солнца.	206
5.9.4.	Гелиосейсмология	209
5.10.	Задачи	212
Глава 6.	Эволюция звезд	215
6.1.	Эволюция звезд после выгорания водорода	215
6.2.	Вырождение вещества	217
6.3.	Предел Чандрасекара и фундаментальная масса звезды	221
6.4.	Вырождение вещества в центре у звезд различных масс	222
6.5.	Роль потери массы в эволюции звезды	227
6.5.1.	Звездный ветер на главной последовательности	227
6.5.2.	Звездный ветер	
	после главной последовательности.	
	Асимптотическая ветвь гигантов	
	и образование планетарных туманностей	229
6.6.	Эволюция одиночных звезд после	
	главной последовательности; краткий итог	230
6.7.	Пульсации звезд. Цефеиды	233
6.8.	Процессы образования тяжелых элементов в природе	238
Глава 7.	Двойные звезды	241
7.1.	Определение масс двойных звезд. Функция масс	241
7.2.	Особенности эволюции звезд в ТДС	244
7.2.1.	Приближение Роша и полость Роша	245
7.2.2.	Перенос масс	247
7.3.	Стадии эволюции двойных звезд	250
Глава 8.	Планетные системы	256
8.1.	Методы исследования и состав солнечной системы	256
8.2.	Методы обнаружения планет вокруг звезд	269
8.3.	Статистические зависимости экзопланет	275
8.4.	Образование планет и их систем	277
8.4.1.	Протопланетные диски	277
8.4.2.	Образование планет солнечной системы	278
Глава 9.	Сверхновые и остатки сверхновых	281
9.1.	Нейтронизация вещества	281
9.1.1.	Фотодиссоциация	282
9.1.2.	Нейтронизация вещества и УРКА-процессы	282

9.1.3.	Захват нейтрино и остановка коллапса	284
9.2.	Вспышки сверхновых	287
9.2.1.	Сверхновые II типа	288
9.2.2.	Гиперновые и гамма-всплески	294
9.2.3.	Сверхновые типа Ia	295
9.2.4.	Ярчайшие сверхновые	296
9.2.5.	Остатки сверхновых и их взаимодействие с межзвездной средой	298
Глава 10. Компактные звезды		
	и их наблюдательные проявления	304
10.1.	Белые карлики	305
10.1.1.	Белые карлики в двойных системах. Катаклизмические переменные и новые звезды	306
10.2.	Нейтронные звезды	308
10.2.1.	Внутреннее строение НЗ	310
10.2.2.	Оценки масс НЗ	313
10.3.	Свойства пульсаров	316
10.3.1.	Основные свойства	316
10.3.2.	Торможение вращения пульсаров	318
10.4.	Рентгеновские пульсары	323
10.5.	Черные дыры	324
10.6.	Эффективность аккреции на компактные звезды	326
10.7.	Эддингтоновский предел светимости при аккреции на компактные релятивистские объекты	329
10.8.	Задача	331
Глава 11. Галактики		332
11.1.	Звездные скопления и наша Галактика	332
11.2.	Основные характеристики галактик	336
11.3.	Структура галактик	342
11.4.	Движение газа и звезд	347
11.4.1.	Столкновение звезд и время релаксации	347
11.4.2.	Особенности движения звезд различных под- систем	352
11.4.3.	Принципы измерения скоростей вращения галактик	354
11.4.4.	Кривые вращения галактических дисков	358
11.4.5.	Скорость вращения и круговая скорость	360
11.4.6.	Связь распределения масс в галактике с кривой вращения	362

11.4.7.	Проблема темного гало	365
11.4.8.	О гравитационной устойчивости звездных дисков	370
11.4.9.	Дисперсия скоростей и толщина галактических дисков	373
11.4.10.	Бары галактик	377
11.4.11.	Принципы оценки масс Е-галактик	380
11.5.	Физическая природа спиральной структуры	382
11.5.1.	Спиральные ветви: наблюдаемые свойства	382
11.5.2.	Два типа спиральных ветвей	384
11.6.	Межзвездный газ в галактиках	390
11.6.1.	Холодный газ: нейтральный и молекулярный водород	392
11.6.2.	Области НII в галактиках	398
11.6.3.	Горячий газ и рентгеновское излучение галактик	400
11.6.4.	Магнитные поля	403
11.7.	Звездообразование в галактиках	404
11.7.1.	Общие сведения	404
11.7.2.	Физические процессы, управляющие звездообразованием	408
11.7.3.	Волны сжатия	418
11.7.4.	Гравитационная неустойчивость газового диска	421
11.8.	Ядра галактик	423
11.8.1.	Общие сведения	423
11.8.2.	Структура активных ядер	429
11.8.3.	Сверхмассивные черные дыры	430
11.8.4.	Основные принципы определения масс СМЧД	433
11.9.	Скопления галактик	438
11.9.1.	Общие сведения	438
11.9.2.	Газ в скоплениях галактик	441
11.9.3.	Оценка массы богатых скоплений	443
11.9.4.	Особенности эволюции галактик в скоплениях	445
11.10.	Задачи	449
Глава 12.	Элементы современной космологии	452
12.1.	«Краткий курс» истории космологии XX века	454
12.2.	Крупномасштабная структура Вселенной	457
12.3.	Предельно далекие галактики и квазары	458
12.4.	Космологические модели	462
12.4.1.	Космологический принцип	462

12.5. Однородные и изотропные космологические модели . . .	462
12.5.1. Выбор системы координат	462
12.5.2. Метрика Фридмана–Робертсона–Уокера	465
12.6. Кинематика Вселенной	466
12.6.1. Закон Хаббла	466
12.6.2. Пекулярные скорости галактик	468
12.6.3. Распространение света. Красное смещение . . .	470
12.6.4. Угломерное и фотометрическое расстояния . . .	473
12.6.5. Хаббловские диаграммы	476
12.6.6. Горизонт частиц	477
12.6.7. Поверхностная яркость и парадокс Ольберса . .	479
12.7. Динамика Вселенной	480
12.7.1. Эволюция расширения. Критическая плотность	480
12.7.2. Влияние давления	483
12.8. Модели Фридмана с космологической постоянной . . .	485
12.9. Горячая Вселенная	491
12.10. Первичный нуклеосинтез («первые три минуты») . . .	495
12.11. Реликтовое излучение и эпоха рекомбинации	497
12.12. Эффект Сюняева–Зельдовича	499
12.13. Флуктуации реликтового излучения	503
12.14. Трудности классической космологии	505
12.14.1. Проблема горизонта (проблема причинности) .	505
12.15. Модель инфляционной Вселенной	507
12.16. Рост малых возмущений	510
12.16.1. Поляризация реликтового излучения	511
12.17. Образование крупномасштабной структуры Вселенной	513
12.18. Заключение	515
Приложение А. Гравитация	518
A.1. Гравитационная энергия	518
A.2. Время свободного падения	520
A.3. Теорема вириала	521
A.4. Квадрупольная формула для гравитационного излучения от двойной звезды	523
A.5. Вывод формулы для эпициклической частоты	526
Приложение В. Взаимодействие излучения и вещества	528
B.1. Элементарные процессы, ответственные за излучение и поглощение света	530
B.1.1. Свободно–свободные переходы (электрон в поле протона)	530

В.1.2.	Свободно-связанные переходы	530
В.1.3.	Переходы между энергетическими уровнями . .	530
В.1.4.	Ионизация	531
В.1.5.	Рекомбинация	531
В.2.	ТДР и ЛТР	532
В.3.	Ионизационное равновесие	534
В.3.1.	Локальное термодинамическое равновесие, Формула Саха.	534
В.3.2.	Корональное приближение	538
В.3.3.	Фотоионизационное равновесие	541
Приложение С.	Вопросы переноса	544
С.1.	Влияние рассеяния на перенос излучения	544
С.1.1.	Случай чистого рассеяния	544
С.1.2.	Связь числа рассеяний с оптической толщей . .	545
С.1.3.	Случай рассеяния и поглощения	547
С.2.	Диффузионное приближение и росселандово среднее .	549
Приложение D.	Метрика однородного изотропного пространства	551
Приложение E.	Системы единиц и безразмерные числа	553
E.1.	Физические константы	553
E.2.	Безразмерные числа	554
Приложение F.	Звездные величины	556
Приложение G.	Солнечное обилие химических элементов	561
Литература		565
Предметный указатель		567