

УДК 52
ББК 22.6
3-36

Засов, Анатолий Владимирович.

3-36 Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. — 4-е изд., эл. — 1 файл pdf : 573 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-232-8

Книга основана на курсах лекций по общей астрофизике, которые на протяжении многих лет читаются авторами для студентов физического факультета МГУ.

Рассматриваются основные механизмы взаимодействия излучения с веществом, современные методы астрономических наблюдений, физика Солнца и Солнечной системы, физические процессы в межзвездной среде, формирование звезд и их строение, эволюция звезд и их превращение в компактные объекты, а также наблюдаемые процессы в галактиках и элементы современной космологии. В целом, авторы дают общую физическую картину строения и эволюции нашей Вселенной.

Книга может служить современным учебным пособием по общей астрофизике, в первую очередь, для студентов физических и астрономических специальностей университетов.

УДК 52
ББК 22.6

Электронное издание на основе печатного издания: Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. — 4-е изд. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — 572 с. — ISBN 978-5-89818-132-1. — Текст : непосредственный.

На обложке: Крабовидная туманность — остаток взрыва Сверхновой 1054 г. Источником энергии голубоватого диффузного излучения синхротронной природы в центральной области туманности является нейтронная звезда, вращающаяся с периодом 0.033 с. (NASA, космический телескоп «Хаббл»)

На задней обложке: Спиральная галактика NGC 1672. Расстояние — около 11 мегапарсек. Отчетливо выделяются спиральные ветви с областями звездообразования (светлые области HII) и прожилками более плотной холодной межзвездной среды, непрозрачной из-за присутствия пыли. (NASA, космический телескоп «Хаббл»)

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-232-8

© Век 2, 2015
© Переиздание. ДМК Пресс, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

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 коро- ны Солнца	198
5.9.3. Солнечные вспышки. Активность Солнца.	206
5.9.4. Гелиосейсмология	209
5.10. Задачи	212
Глава 6. Эволюция звезд	216
6.1. Эволюция звезд после выгорания водорода	216
6.2. Вырождение вещества	218
6.3. Предел Чандрасекара и фундаментальная масса звезды	222
6.4. Вырождение вещества в центре у звезд различных масс	223
6.5. Роль потери массы в эволюции звезды	228
6.5.1. Звездный ветер на главной последовательности	228
6.5.2. Звездный ветер после главной последовательности. Асимптотическая ветвь гигантов и образование планетарных туманностей	230
6.6. Эволюция одиночных звезд после главной последовательности: краткий итог	231
6.7. Пульсации звезд. Цефеиды	234
6.8. Процессы образования тяжелых элементов в природе .	239
Глава 7. Двойные звезды	242
7.1. Определение масс двойных звезд. Функция масс	242
7.2. Особенности эволюции звезд в ТДС	245
7.2.1. Приближение Роша и полость Роша	246
7.2.2. Перенос масс	248
7.3. Стадии эволюции двойных звезд	251
Глава 8. Планетные системы	257
8.1. Методы исследования и состав солнечной системы . . .	257
8.2. Методы обнаружения планет вокруг звезд	270
8.3. Статистические зависимости экзопланет	276
8.4. Образование планет и их систем	278
8.4.1. Протопланетные диски	278
8.4.2. Образование планет солнечной системы	279
Глава 9. Сверхновые и остатки сверхновых	283
9.1. Нейтронизация вещества	283
9.1.1. Фотодиссоциация	284
9.1.2. Нейтронизация вещества и УРКА-процессы . . .	284

9.1.3.	Захват нейтрино и остановка коллапса	286
9.2.	Вспышки сверхновых	289
9.2.1.	Сверхновые II типа	290
9.2.2.	Гиперновые и гамма-всплески	296
9.2.3.	Сверхновые типа Ia	297
9.2.4.	Ярчайшие сверхновые	298
9.2.5.	Остатки сверхновых и их взаимодействие с межзвездной средой	300
Глава 10. Компактные звезды		
	и их наблюдательные проявления	306
10.1.	Белые карлики	307
10.1.1.	Белые карлики в двойных системах. Катаклизмические переменные и новые звезды .	308
10.2.	Нейтронные звезды	310
10.2.1.	Внутреннее строение НЗ	312
10.2.2.	Оценки масс НЗ	315
10.3.	Свойства пульсаров	318
10.3.1.	Основные свойства	318
10.3.2.	Торможение вращения пульсаров	320
10.4.	Рентгеновские пульсары	325
10.5.	Черные дыры	326
10.6.	Эффективность аккреции на компактные звезды	328
10.7.	Эддингтоновский предел светимости при аккреции на компактные релятивистские объекты	332
10.8.	Задача	333
Глава 11. Галактики		335
11.1.	Звездные скопления и наша Галактика	335
11.2.	Основные характеристики галактик	339
11.3.	Структура галактик	345
11.4.	Движение газа и звезд	350
11.4.1.	Столкновение звезд и время релаксации	350
11.4.2.	Особенности движения звезд различных под- систем	355
11.4.3.	Принципы измерения скоростей вращения галактик	357
11.4.4.	Кривые вращения галактических дисков	361
11.4.5.	Скорость вращения и круговая скорость	363
11.4.6.	Связь распределения масс в галактике с кривой вращения	365

11.4.7. Проблема темного гало	368
11.4.8. О гравитационной устойчивости звездных дисков	373
11.4.9. Дисперсия скоростей и толщина галактических дисков	377
11.4.10. Бары галактик	381
11.4.11. Принципы оценки масс Е-галактик	384
11.5. Физическая природа спиральной структуры	385
11.5.1. Спиральные ветви: наблюдаемые свойства	385
11.5.2. Два типа спиральных ветвей	388
11.6. Межзвездный газ в галактиках	394
11.6.1. Холодный газ: нейтральный и молекулярный водород	395
11.6.2. Области НII в галактиках	402
11.6.3. Горячий газ и рентгеновское излучение галактик	404
11.6.4. Магнитные поля	407
11.7. Звездообразование в галактиках	408
11.7.1. Общие сведения	408
11.7.2. Физические процессы, управляющие звездообразованием	412
11.7.3. Волны сжатия	422
11.7.4. Гравитационная неустойчивость газового диска	424
11.8. Ядра галактик	427
11.8.1. Общие сведения	427
11.8.2. Структура активных ядер	433
11.8.3. Сверхмассивные черные дыры	434
11.8.4. Основные принципы определения масс СМЧД	437
11.9. Скопления галактик	442
11.9.1. Общие сведения	442
11.9.2. Газ в скоплениях галактик	445
11.9.3. Оценка массы богатых скоплений	447
11.9.4. Особенности эволюции галактик в скоплениях	449
11.10. Задачи	453
Глава 12. Элементы современной космологии	456
12.1. «Краткий курс» истории космологии XX века	458
12.2. Крупномасштабная структура Вселенной	461
12.3. Предельно далекие галактики и квазары	462
12.4. Космологические модели	466
12.4.1. Космологический принцип	466

12.5. Однородные и изотропные космологические модели . . .	466
12.5.1. Выбор системы координат	466
12.5.2. Метрика Фрийдмана–Робертсона–Уокера	469
12.6. Кинематика Вселенной	470
12.6.1. Закон Хаббла	470
12.6.2. Пекулярные скорости галактик	472
12.6.3. Распространение света. Красное смещение . . .	474
12.6.4. Угломерное и фотометрическое расстояния . . .	477
12.6.5. Хаббловские диаграммы	480
12.6.6. Горизонт частиц	481
12.6.7. Поверхностная яркость и парадокс Ольберса . .	483
12.7. Динамика Вселенной	484
12.7.1. Эволюция расширения. Критическая плотность	484
12.7.2. Влияние давления	487
12.8. Модели Фрийдмана с космологической постоянной . .	489
12.9. Горячая Вселенная	495
12.10. Первичный нуклеосинтез («первые три минуты») . .	499
12.11. Реликтовое излучение и эпоха рекомбинации	501
12.12. Эффект Сюняева–Зельдовича	503
12.13. Флуктуации реликтового излучения	507
12.14. Трудности классической космологии	509
12.14.1. Проблема горизонта (проблема причинности) .	509
12.15. Модель инфляционной Вселенной	511
12.16. Рост малых возмущений	514
12.16.1. Поляризация реликтового излучения	515
12.17. Образование крупномасштабной структуры Вселенной	517
12.18. Заключение	519
Приложение А. Гравитация	522
A.1. Гравитационная энергия	522
A.2. Время свободного падения	524
A.3. Теорема вириала	525
A.4. Квадрупольная формула для гравитационного излучения от двойной звезды	527
A.5. Вывод формулы для эпициклической частоты	530
Приложение В. Взаимодействие излучения и вещества	532
B.1. Элементарные процессы, ответственные за излучение и поглощение света	534
B.1.1. Свободно–свободные переходы (электрон в поле протона)	534

В.1.2. Свободно—связанные переходы	534
В.1.3. Переходы между энергетическими уровнями . .	534
В.1.4. Ионизация	535
В.1.5. Рекомбинация	535
В.2. ТДР и ЛТР	536
В.3. Ионизационное равновесие	538
В.3.1. Локальное термодинамическое равновесие. Формула Саха.	538
В.3.2. Корональное приближение	542
В.3.3. Фотоионизационное равновесие	545
Приложение С. Вопросы переноса	548
С.1. Влияние рассеяния на перенос излучения	548
С.1.1. Случай чистого рассеяния	548
С.1.2. Связь числа рассеяний с оптической толщиной . .	549
С.1.3. Случай рассеяния и поглощения	551
С.2. Диффузионное приближение и росселандово среднее .	553
Приложение D. Метрика однородного изотропного пространства	555
Приложение E. Системы единиц и безразмерные числа	557
Е.1. Физические константы	557
Е.2. Безразмерные числа	558
Приложение F. Звездные величины	560
Приложение G. Солнечное обилие химических элементов	565
Литература	569
Предметный указатель	571