

УДК 52
ББК 22.6
3-36

Засов, Анатолий Владимирович.

3-36 **Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. — 4-е изд. — 572 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Текст : непосредственный.**

ISBN 978-5-89818-132-1

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

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 мегалпарсек. 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»)

ISBN 978-5-89818-132-1

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

Предисловие к первому изданию

Эта книга написана на основе курса лекций по общей астрофизике, читаемых авторами студентам физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Особенность астрофизики как предмета состоит прежде всего в ее многосторонности и в большой широте охвата изучаемых явлений — от разреженной межпланетной и межзвездной среды до сверхплотного состояния вещества в недрах белых карликов и нейтронных звезд, от тел солнечной системы и ближайшего космоса до всей Вселенной, рассматриваемой как целое. Вторая особенность — бурное развитие астрофизики, непрерывное появление новых данных наблюдений, разработка и проверка теоретических схем и гипотез. Это усложняет отбор материала, который может быть включен в учебное пособие. Авторы не стремились рассказать обо всем важном, известном к моменту написания книги, стараясь акцентировать внимание на ключевых вопросах. Каждое астрофизическое явление или объект обладает рядом специфических черт и особенностей, которые часто требуют индивидуального рассмотрения и описания. Одно только изложение феноменологических фактов о звездах или компонентах межзвездной среды может составить предмет отдельной книги.

Предлагаемая книга несколько шире по содержанию, чем традиционные курсы общей астрофизики. В ней делается упор на объяснение основных физических процессов, происходящих в космических объектах и средах. При этом факты, необходимые для понимания того или иного явления, приводятся лишь в минимальном объ-

еме. Книга готовилась в первую очередь для читателей, овладевших знаниями в рамках общего университетского курса физики, и не требует специальных знаний по астрономии. Часть вспомогательного материала из курса общей физики и выводы некоторых формул вынесено в Приложение. При подготовке рукописи мы использовали специализированные издания и монографии, большая часть которых отражена в списке литературы. Мы надеемся, что данная книга послужит введением в современные проблемы астрофизики и поможет читателю ознакомиться с астрофизической картиной мира — в объеме достаточном для дальнейшего углубленного изучения конкретных направлений этой быстроразвивающейся области знания.

Мы приносим искреннюю благодарность нашим коллегам В. А. Батурину, В. К. Конниковой, В. Г. Корнилову, С. А. Ламзину, М. А. Лившицу, А. Д. Чернину и особенно академику А. М. Черепашуку, которые взяли на себя нелегкий труд чтения отдельных глав рукописи и сделали много ценных замечаний. Мы также глубоко признательны В. Н. Семенцову и А. Ю. Кочетковой за помощь при оформлении рукописи, а также другим коллегам, замечания которых мы старались учесть.

Так получилось, что работа над книгой завершилась в 2006 году, в котором исполняется 100 лет со дня рождения замечательного ученого и педагога, нашего учителя, многолетнего заведующего кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ профессора Дмитрия Яковлевича Мартынова. Наша книга продолжает и развивает его замечательный учебник по общей астрофизике, последнее издание которого вышло в 1988 году, и на котором воспитано не одно поколение студентов.

Пусть это будет нашей данью его светлой памяти.

Москва, 2006.

Предисловие ко второму изданию

За несколько лет, прошедших после первого издания этой книги, новые эксперименты и всеволновые наблюдения привели к важным открытиям в наблюдательной космологии, звездной астрофизике, астрофизике высоких энергий, планетной астрономии. Так, за точные измерения и открытие анизотропии реликтового излучения в 2006 году американским астрофизикам Дж. Мазеру и Дж. Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике, а в 2011 году Нобелевской премии удостоено открытие ускоренного расширения Вселенной по измерениям далеких сверхновых (С. Перлмуттер, Б. Шмидт и А. Рисс). С бортов космических телескопов и специализированных спутников получена бесценная информация в различных диапазонах длин волн от далекого ИК (космический телескоп «Спитцер») до сверхжесткого гамма (космический телескоп «Ферми»). Наземной установкой «Оже» измерены энергии частиц космических лучей до значений свыше 10^{20} эВ. Черенковские телескопы установки H.E.S.S. в Намибии регистрируют ТэВ-ные фотоны из центра Галактики, от активных ядер галактик и квазаров и тесных двойных систем с нейтронными звездами. Спутниками «Свифт», «ИНТЕГРАЛ» и «Конус-Винд» зарегистрированы десятки далеких космических гамма-всплесков (вплоть до рекордного для астрофизических объектов красного смещения 8.3 от гамма-всплеска 090423) и мощнейшее мягкое гамма-излучение от магнитаров — нейтронных звезд со сверхсильным магнитным полем напряженностью свыше 10^{14} Гс. Открыты новые типы сверхновых — от рекордно ярких, связанных с коллапсом ядер самых массивных звезд, до чрезвычайно слабых, возможно связанных с термоядерными взрывами на поверхности белого карлика (промежуточные объекты между вспышками новых звезд и термоядерными сверхновыми типа Ia). Обнаружены сотни новых экзопланет вокруг звезд, некоторые из которых имеют параметры, близкие к планетам земной группы. Проведены уникальные обзоры всего неба, в первую очередь — обзор SDSS (Sloan Digital Sky Survey), давшие фотометрическую и спектральную информацию о миллионах галактик и звезд. Все теснее становятся рамки допустимых моделей темной материи, и появилась надежда на регистрацию гипотетических частиц темной материи в новейших экспериментальных установках (Линейный Адронный Коллайдер в ЦЕРНе). Запущены и планируются новые космические миссии к телам Солнечной системы.

Список достижений астрофизики за последние годы можно продолжать долго. Однако, оставаясь в рамках учебного пособия, мы не ставили целью дать обзор последних открытий — они не изменили общую астрофизическую картину мира. Тем не менее, мы отразили во втором издании книги часть наиболее важных новых достижений астрофизики, без упоминания которых уже нельзя обойтись.

После благожелательной критики многих коллег из различных астрономических учреждений и университетов, мы постарались исправить замеченные опечатки и неточности формулировок, допущенные в первом издании. Мы благодарим всех, кто помог нам в этом деле. Во втором издании значительной переработке подверглись главы 2, 3, 5, 8, 9, 11. В Приложения добавлено несколько новых разделов. Особую благодарность мы приносим коллегам из Санкт-Петербургского университета и лично В. В. Иванову, а также А. С. Расторгуеву, М. В. Сажину, Г. В. Якуниной и другим коллегам из ГАИШ МГУ за замечания к первому изданию. Существенные изменения в главе 3 были внесены после ее внимательного прочтения В. Г. Корниловым и Б. С. Сафоновым, за что мы им приносим глубокую благодарность. Мы также признательны В. С. Бескину, Я. Н. Истомину, С. И. Блинникову, Н. Н. Чугаю за обсуждение физических аспектов многих астрофизических явлений.

Москва, 2011

Авторы благодарят Морченко Е. С. за внимательное прочтение 2-го издания книги и полезные замечания.

Издание 2022 года является 3-м изданием книги, вышедшим в 2015 году, скорректированным с учетом наиболее важных астрофизических достижений за прошедший период времени. Более подробно важнейшие аспекты современной астрономии освещены в монографии «Многоканальная астрономия» под ред. А. М. Черепашука (М.: ДМК Пресс, 2022), которая может быть важным дополнением к данному учебному пособию.

Москва, 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 НП | 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 | 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 E-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 Фридмана–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 Фридмана 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 |
| А.1. Гравитационная энергия | 522 |
| А.2. Время свободного падения | 524 |
| А.3. Теорема вириала | 525 |
| А.4. Квадрупольная формула для гравитационного излучения от двойной звезды | 527 |
| А.5. Вывод формулы для эциклической частоты | 530 |
| Приложение В. Взаимодействие излучения и вещества | 532 |
| В.1. Элементарные процессы, ответственные за излучение и поглощение света | 534 |
| В.1.1. Свободно–свободные переходы (электрон в поле протона) | 534 |

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

В необычных астрофизических явлениях законы физики предстают перед исследователями в ином ракурсе, более глубоко раскрывая свое содержание.

С. Б. Пикельнер

Астрофизика — наука, занимающаяся исследованием далеких космических объектов и явлений физическими методами. Астрофизика нацелена на создание физической картины окружающего мира, объясняющей наблюдаемые явления, на изучение происхождения и эволюции как отдельных классов астрономических объектов, так и Вселенной как единого целого в рамках известных физических законов.

Поскольку прямые контакты научных приборов с изучаемыми объектами практически исключены, основу астрофизики, как и астрономии в целом, составляют наблюдения, то есть прием (детектирование) и анализ излучения далеких источников. Непосредственные результаты наблюдений, как правило, сводятся к относительным или абсолютным измерениям энергии, приходящей от источника или его отдельных частей, в определенных интервалах спектра. Интерпретация результатов наблюдений базируется на знании механизмов излучения электромагнитных волн и их взаимодействия с веществом.

Исторически астрофизика выделилась в самостоятельное научное направление с появлением в конце XIX века спектрального ана-

лиза, который открыл возможность дистанционного исследования химического состава и физического состояния не только лабораторных, но и астрономических источников света. Наблюдения спектров звезд окончательно доказали, что астрономические тела состоят из атомов известных на Земле элементов, подчиняющихся тем же физическим законам. Химическое «единство» природы особенно наглядно было подтверждено открытием гелия — сначала (по спектру) в атмосфере Солнца, а только затем — в некоторых минералах на Земле.

Современные методы исследования позволяют по спектральным особенностям излучения не только узнать состав, температуру и плотность среды, но и измерить лучевые скорости источников и скорости внутренних движений в них, оценить расстояние до них, и на базе физических теорий выяснить механизм излучения, определить индукцию магнитных полей и многие другие характеристики.

Бурное развитие астрофизики за более чем столетний период ее существования было связано как с быстрым развитием различных направлений классической, квантовой и релятивистской физики — с одной стороны, так и со строительством крупных телескопов, появлением принципиально новых приемников излучения и компьютерных методов обработки наблюдений — с другой. Очень важный, революционный скачок в астрофизических исследованиях произошел с началом изучения объектов за пределами оптического диапазона спектра, сначала в радио (конец 30-х годов XX века), а затем, уже с помощью космической техники (60–80-е годы XX века), в далеком инфракрасном, далеком УФ, рентгеновском и гамма-диапазонах. «Многокрасочность» Вселенной привела к более глубокому пониманию природы давно известных космических тел, а также открытию новых типов астрономических объектов; природа некоторых из них до сих пор остается малопонятной. Позднее началось развитие и нейтринной астрономии, основанной на регистрации и анализе нейтринного излучения из космоса. С 2015 года началась гравитационно-волновая астрономия.

Важной особенностью астрофизики является то, что она исследует процессы, как правило, не воспроизводимые в лабораториях. К примеру, термоядерные реакции в плазме, удерживаемой от расширения собственным гравитационным полем, — это не экзотический, а самый распространенный источник энергии наблюдаемых звезд. Только в астрофизике исследуются среды с экстремально низ-

кой плотностью — менее 10^{-27} г/см³ (разреженный межгалактический газ), излучение которых, тем не менее, может приниматься благодаря большим объемам, занимаемым ими. Можно отметить также экстремально высокие плотности вещества (от нескольких тысяч г/см³ в звездах из вырожденного газа до 10^{14} — 10^{15} г/см³ в нейтронных звездах), температуры в миллиарды градусов (внутренние области аккреционных дисков), едва обнаружимые и, наоборот, предельно сильные гравитационные поля, наблюдаемые ультравысокие энергии элементарных частиц, не достижимые даже для строящихся коллайдеров, и даже не излучающую электромагнитных волн и потому невидимую «темную» материю. Все это делает астрофизические исследования неоценимыми для решения фундаментальных физических проблем. Не удивительно, что почти все фундаментальные физические теории — от классической механики и ньютоновской гравитации до теории относительности и физики элементарных частиц — прошли или проходят астрономическую (астрофизическую) проверку.

Очевидно, что астрофизика неотделима от физики, так что резкой границы между ними не существует. Однако она обладает важной особенностью, заключающейся не столько в специфичности космических объектов или в необычных пространственных масштабах изучаемых явлений, сколько в исследовании формирования и эволюции астрономических тел и систем. По словам крупнейшего отечественного астрофизика И. С. Шкловского, «едва ли не основным результатом многолетних исследований астрономических объектов является утверждение о том, что все они эволюционируют».

Основной силой, определяющей характер эволюции астрономических объектов, является гравитация (что связано с их большими массами), которая в физике «земных» явлений, как правило, не имеет решающего значения или воспринимается только как наличие у тел веса. Поэтому в астрофизике очень большое внимание уделяется изучению гравитационного взаимодействия и самогравитации космических тел и сред и той роли, которую они играют в их формировании и эволюции.

Таким образом, физические свойства космических объектов, определяемые по характеру излучения, а также их происхождение и эволюция, связанная прежде всего с гравитацией, — это два основных и взаимосвязанных аспекта современной астрофизики. Именно на их изучение, в первую очередь, нацелен настоящий курс.

1.1. Пространственно-временные масштабы в астрофизике

1.1.1. Расстояния

Расстояние до объекта является одной из основных характеристик, определяемых из астрономических наблюдений. Для измерения расстояний в современной астрофизике в зависимости от рассматриваемой ситуации или задачи используется ряд внесистемных единиц. Это связано с тем, что рассматриваемый диапазон величин различается на десятки порядков. Кратко перечислим основные единицы для измерения расстояний.

Естественной мерой расстояний в Солнечной системе служит *астрономическая единица* (а. е.); $1 \text{ а. е.} \simeq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см} \approx 500$ световых секунд — это большая полуось земной орбиты. Она была впервые измерена по суточному параллаксу *планет*. Можно предложить другой способ определения расстояния до Солнца, основанный только на астрономических измерениях — по наблюдению годичной аберрации звезд: из-за конечности скорости света положение любого источника (звезды), измеряемое наблюдателем, движущимся со скоростью v , смещается на угол $\text{tg } \theta \simeq v/c$ в направлении движения. (Этот эффект был открыт астрономом Дж. Брэдли в 1729 г.). Следовательно, за время одного оборота Земли вокруг Солнца (год) любая звезда на небе описывает эллипс, большая полуось которого, выраженная в радианах, есть $\theta = v/c$. Наблюдения дают $\theta = 20.5''$. Отсюда, зная скорость света, находим $v \approx 30 \text{ км/с}$ и, полагая орбиту Земли круговой (на самом деле ее эксцентриситет $e \approx 0.017$), определяем астрономическую единицу. Ввиду малости v/c релятивистские поправки несущественны. Весь вопрос в том, с какой точностью мы измеряем астрономическую единицу. Современный способ оценки а. е. основан на радиолокации астероидов с известными орбитами, близко подходящими к Солнцу, или на точном измерении траекторий космических аппаратов, с последующим использованием закона всемирного тяготения, связывающего ускорение тел с расстоянием до Солнца.

Характерный размер планетной системы — около 40 а. е. Это расстояние примерно соответствует большой полуоси орбит Нептуна и Плутона. Мелкие ледяные тела существуют и на значительно больших расстояниях от Солнца — вплоть до десятков тысяч а. е. Современные крупные телескопы (например, космический телескоп

«Хаббл» или 10-метровый телескоп им. У. Кека) позволяют регистрировать на расстоянии Плутона свет Солнца, отраженный от тел с размерами в несколько десятков километров.

При определении расстояний до звезд Галактики, становится удобнее пользоваться другой единицей — парсеком (пк). *Парсек — расстояние, с которого отрезок, равный большой полуоси земной орбиты и расположенный перпендикулярно лучу зрения, виден под углом 1''*. Из-за годичного движения Земли положение светила, находящегося на расстоянии 1 парсек, будет описывать на небепараллактический эллипс с большой полуосью, равной 1 угловой секунде; например, для светила, расположенного в направлении, нормальном плоскости земной орбиты, т. е. в полюсе эклиптики, это будет окружность с радиусом в 1 секунду дуги. В астрономии это явление называют *годовым параллаксом*, отсюда и название единицы расстояния — *парсек*, т. е. параллакс-в-секунду. Поскольку в радианной мере $1'' \approx 1/206265$, находим: 1 парсек = 206265 а. е. $\approx 3 \cdot 10^{18}$ см. При измерении годичного параллакса светила в секундах дуги, расстояние в парсеках до него определяется по очевидной формуле

$$d(\text{пк}) = \frac{1}{\pi''}. \quad (1.1)$$

Расстояния до ближайших звезд — несколько парсек (например, для α Центавра $\pi = 0.745''$, т. е. $d = 1/0.745 \approx 1.34$ ПК). Поскольку 1 ПК ≈ 3.26 светового года, свет от α Центавра идет к нам около 4 лет. Прямое определение расстояний до звезд, основанное на измерении их годичного параллакса, ограничивается астрометрической точностью определения положения звезд на небесной сфере. В космическом эксперименте Gaia (2013-) для 1.3 миллиарда звезд до 21 звездной величины достигнута точность измерения параллаксов и собственных движений от микро- до миллисекунд дуги (каталог Gaia DR2).

Для определения расстояний до более далеких объектов используются различные косвенные методы, получившие совокупное название методов установления *шкалы расстояний* во Вселенной. В основе многих методов лежит определение фотометрического расстояния от светящегося объекта (например, звезды) по принимаемому потоку излучения F , если светимость (количество энергии, излучаемой за секунду) объекта L известна из других соображений.

Предполагая сферическую симметрию излучающего источника, получаем

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}. \quad (1.2)$$

Не вдаваясь в детали, отметим один из важнейших методов определения расстояний до звезд и звездных систем — по цефеидам. Цефеиды — переменные звезды старого населения Галактики с массами 3–12 M_{\odot} , переменность блеска которых связана с их радиальными пульсациями, возникающими на определенных этапах эволюции (см. подробнее в главе 6). Для цефеид эмпирически установлена и теоретически обоснована зависимость период–светимость, из которой по наблюдаемому периоду переменности блеска можно определить их абсолютную светимость, и по измеряемому потоку — расстояние в соответствии с формулой (1.2). Цефеиды — довольно яркие звезды, поэтому с их помощью определяют расстояния вплоть до 10–15 миллионов парсек (Мпк), до ближайших галактик.

Расстояние от Солнца до центра Галактики оценивается разными методами примерно в 8 тысяч парсек (кпк). Размер типичной галактики (точнее, той области галактики, в которой наблюдается светящееся вещество — звезды, газ) — 10–20 кпк.

Расстояния до ближайших галактик определяются из наблюдений находящихся в них цефеид и ярчайших звезд некоторых других типов, светимости которых считаются известными. Спутники нашей Галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака — расположены на расстоянии 55 кпк; туманность Андромеды (М31) — 780 кпк. Расстояние до центра скопления галактик в Деве, на краю которого располагается наша Галактика, около 16 Мпк. Другое близкое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники (т.н. *Coma Cluster*) расположено на расстоянии около 80 Мпк.

Расстояния l до далеких галактик обычно определяют по красному смещению линий в их спектрах $z = (\lambda_o - \lambda_e)/\lambda_e$ (здесь λ_e — лабораторная длина волны света, испущенного далеким космическим источником, λ_o — длина волны света, зарегистрированного земным наблюдателем) с использованием закона Хаббла

$$v = H_0 l, \quad (1.3)$$

где $H_0 \approx 70$ км/(с·Мпк) — современное значение постоянной Хаббла, v — скорость удаления галактики. В пределе малых скоростей ($v \ll c$) $v \approx cz$. Для близких галактик закон Хаббла нарушается

из-за их пекулярных скоростей, а для очень далеких ($\Delta\lambda/\lambda \gtrsim 1$) — понятие расстояния теряет однозначность и зависит от предполагаемой модели расширения Вселенной.

Важный наблюдательный факт, лежащий в основе современной космологии, состоит в однородности Вселенной на больших масштабах. Вселенная становится в среднем однородной и изотропной на характерных расстояниях $\Delta l \gtrsim 100\text{--}200$ Мпк. Однородность на масштабах порядка Δl означает, что средняя плотность вещества в ячейках с размером Δl (в объеме Δl^3) одинакова с точностью до случайных флуктуаций для любой выбранной наугад области. Изотропия означает отсутствие выделенных направлений во Вселенной. По современным измерениям, относительные неоднородности температуры реликтового фона не превосходят 10^{-5} .

Если выражать расстояние через промежуток времени, потребовавшийся свету для его преодоления, то объекты с максимальным известным красным смещением ($\Delta\lambda/\lambda \approx 5\text{--}10$) удалены на расстояние 12–13 миллиардов световых лет. Степень удаленности очень далеких объектов принято характеризовать их красными смещениями без перевода в единицы расстояний, который зависит от принимаемой модели расширения Вселенной и момента времени, к которому эти расстояния должны быть отнесены. Но вплоть до расстояний порядка миллиарда св. лет можно считать выполняющимся условие $z \ll 1$, и проблем с неоднозначностью определения физического расстояния не возникает.

В расширяющейся Вселенной расстояние до наиболее удаленных объектов, доступных наблюдениям, часто характеризуют величиной, называемой хаббловским радиусом. Он определяется как произведение современного возраста Вселенной на скорость света и равен ≈ 4000 Мпк. Иногда эту величину условно называют радиусом Вселенной, но по смыслу это лишь размер ее наблюдаемой части.

В астрофизике приходится иметь дело и с весьма малыми расстояниями. Это связано с тем, что основная информация об астрофизических источниках извлекается из измерения потока электромагнитного излучения от различных объектов (кроме электромагнитного излучения в современной астрофизике исследуется также излучение нейтрино и гравитационных волн). Электромагнитное излучение рождается на микроскопическом уровне при квантовых переходах в атомах (связанно–связанные переходы и свободно–связанные переходы), а также при ускоренном движении заряженных частиц в вакууме (тормозное, или свободно–свободное излу-

чение) или в магнитном поле (циклотронное или, в случае релятивистских частиц, синхротронное излучение). Некоторые характерные размеры микрообъектов, известные из курса атомной физики, к которым мы иногда будем в дальнейшем обращаться, приведены в Приложении.

1.1.2. Характерные времена

Приведем примеры некоторых характерных времен, возникающих в различных астрофизических задачах.

Время жизни атома в возбужденном состоянии $\sim 10^{-8}$ с.

Сутки (период обращения Земли вокруг оси) — $24 \text{ ч} \sim 9 \cdot 10^4$ с.

Период обращения Земли вокруг Солнца — $1 \text{ год} \simeq 3.16 \cdot 10^7$ с.

Период обращения Солнца вокруг центра Галактики $\simeq 230$ млн. лет.

Время жизни звезды типа Солнца порядка $\eta \Delta M c^2 / L_{\odot} \sim 10^{10}$ лет. В этой оценке $\eta \approx 0.007$ — эффективность ядерных реакций превращения водорода в гелий в центре Солнца, $\Delta M \approx 0.4 M_{\odot}$ — доля массы Солнца, перерабатываемой из водорода в гелий, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г и $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с — масса и светимость (количество излучаемой энергии) Солнца.

Современный возраст Вселенной (хаббловский возраст), по порядку величины равный обратному значению постоянной Хаббла, $t_H \simeq 1/H_0 \approx 1.4 \cdot 10^{10}$ лет.

1.1.3. Характерные значения масс

Массы, с которыми имеют дело в астрофизике, также различаются на много порядков.

Массы основных элементарных частиц:

$m_e \approx 10^{-27}$ г ≈ 511 кэВ — масса электрона,

$m_p \approx 5/3 \cdot 10^{-24}$ г ≈ 1 ГэВ — масса протона.

$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c / G} \simeq 10^{-5}$ г $\approx 10^{19}$ ГэВ — планковская масса — максимально возможная масса элементарной частицы в рамках стандартной теории частиц.

Массы звезд: $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца (типичной звезды). Массы стационарных звезд лежат в пределах от ~ 0.1 до $\sim 100 M_{\odot}$. Массы самых больших планет-гигантов типа Юпитера не превышают нескольких тысячных долей M_{\odot} .

Массы галактик: $M_{MW} \approx 10^{11} M_{\odot}$ — совокупная масса звезд и газа Млечного Пути (типичной галактики). Массы барионного ве-

щества других галактик (включая звезды, пыль и газ) лежат в широких пределах от $10^6-10^7 M_{\odot}$ до $10^{12} M_{\odot}$. Кроме барионной составляющей в полную массу галактик входит темная материя неизвестной природы, масса которой может в несколько раз превышать массу видимого барионного вещества.

Важным астрофизическим методом оценки массы гравитационно-связанных систем является использование теоремы вириала (см. Приложение А.3), которая устанавливает зависимость между усредненной по времени полной кинетической энергией и потенциальной энергией системы. Например, по наблюдениям скоростей движений отдельных звезд (или галактик) в скоплении звезд (галактик) и наблюдаемым размерам скопления можно сделать вывод о полной массе (включая невидимую) этого скопления. Этот прием широко используется также при оценке масс сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик и квазаров (см. главу 11).

1.1.4. Солнечные единицы

Обычно при изучении звезд и их систем пользуются солнечными единицами массы, радиуса и светимости:

масса Солнца $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33}$ г;

видимый радиус Солнца $R_{\odot} \approx 7 \cdot 10^{10}$ см;

болометрическая светимость Солнца (мощность излучения во всем диапазоне электромагнитного спектра) $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с.

Эти единицы удобны для звезд, однако, только когда мы рассматриваем нормальные (невырожденные) звезды, источником энергии которых являются ядерные реакции синтеза тяжелых элементов. Когда речь заходит о компактных остатках звездной эволюции (белых карликах, нейтронных звездах или, особенно, черных дырах) для оценки характерных размеров часто используют *гравитационный радиус* тела, который зависит только от его полной массы, $R_g = 2GM/c^2$.

Например, радиус нейтронной звезды $R_{NS} \sim 10-20$ км, что составляет в гравитационных радиусах $\simeq 3-4 R_g$. Другой пример: радиус последней устойчивой¹ круговой орбиты пробной частицы вокруг невращающейся (шварцшильдовской) черной дыры, от которого зависит эффективность энерговыделения при падении (аккреции) газа на черную дыру, равен $3R_g$.

¹ В том смысле, что бесконечно малое возмущение приводит к падению частицы в черную дыру.

1.2. Состояние вещества во Вселенной

Основная форма существования вещества в природе — это газ с самыми различными значениями концентрации частиц и температуры. Газ при любой плотности и температуре, на любых расстояниях от нас (за исключением некоторых планет) состоит из водорода и гелия с небольшим включением более тяжелых элементов. Различают плотный горячий газ, непрозрачный для излучения, с температурой от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов градусов, и диффузную разреженную среду. Плотный газ содержится в звездах. Благодаря наличию термоядерной плазмы в центральной области звезд, энергия, образующаяся при синтезе атомных ядер, поддерживает температуру звезд и их устойчивость в течение миллионов (для наиболее массивных звезд) и миллиардов (для большинства звезд) лет. Доля вещества, приходящегося на планеты, рождающиеся вместе со звездами, ничтожно мала. Планеты состоят из плотного холодного газа или твердого вещества и его расплавов, и только на планетах при определенных условиях возможно зарождение и существование сложных органических соединений и жизни.

И планеты, и звезды, и галактики существуют не в абсолютной пустоте, а в разреженной среде, сложным образом взаимодействуя с ней. Принято разделять эту среду на межпланетную, межзвездную и межгалактическую. Межпланетная среда в солнечной системе — это прежде всего расширяющийся ионизованный газ внешней атмосферы (короны) Солнца. Его температура порядка миллиона градусов, а концентрация протонов — несколько атомов на см^3 (на расстоянии Земли). Эта среда прозрачна для света. Как и газ, образующий атмосферу Солнца и звезд, межпланетная среда хорошо проводит ток и замагничена, что рождает сложные плазменные эффекты при ее взаимодействии с ионизованным газом комет или магнитосферами планет.

Наиболее разрежен межгалактический газ. Он наблюдается в скоплениях галактик, в которых удерживается суммарным гравитационным полем галактик и так называемой темной (или «скрытой») массой, состав которой неизвестен. Температура межгалактического газа достигает 10^7 – 10^8 К, поэтому его излучение принимается лишь в рентгеновском диапазоне (длина волны излучения $\lesssim 1 \text{ \AA}$). При такой температуре газ представляет собой высокоионизованную плазму практически прозрачную для видимого света, поскольку концентрация частиц в ней очень мала — 10^{-4} – 10^{-3} см^{-3} , что позволяет

видеть сквозь газ далекие галактики (теоретически — с точностью до небольшого размытия, связанного с рассеянием фотонов на свободных электронах). При этом полная масса межгалактического газа в скоплении галактик может превышать суммарную массу всех галактик скопления.²

Наиболее сложная по своим свойствам среда — межзвездная. Она крайне неоднородна на самых различных масштабах и содержит газ с очень сильно различающимися плотностями и температурами — от нескольких К (молекулярные облака) до величины порядка миллиона К (горячие пузыри разреженной плазмы, связанные со взрывом сверхновых звезд). В молекулярных облаках наблюдаются (по радио- и инфракрасному излучению) достаточно сложные молекулы, вплоть до простых органических соединений. В качестве небольшой примеси (порядка 1 % по массе) в межзвездном газе присутствует мелкая пыль, поглощающая и рассеивающая свет. Поэтому в некоторых направлениях межзвездное пространство оказывается непрозрачным для света. Непрозрачными являются, например, молекулярные облака.

Защищенный от воздействия нагревающего излучения газ внутри молекулярных облаков остывает до очень низких температур, и в нем создаются условия, приводящие к гравитационной неустойчивости и сжатию газа в звезды. Межзвездная среда пронизывается потоками высокоэнергичных частиц — космическими лучами, распространяющимися по всем направлениям. Она при этом замагничена, причем плотности энергии магнитного поля, теплового и турбулентного движения газа и энергии космических лучей сопоставимы между собой. Поскольку в межзвездной среде при любой температуре всегда присутствуют свободные электроны, среда электропроводна, и магнитное поле оказывает большое влияние на характер ее движения.

Межзвездная среда находится в состоянии непрерывного изменения и движения, как упорядоченного, так и турбулентного. В зависимости от того, как происходят процессы нагрева и охлаждения газа, какую роль играет собственная гравитация межзвездной среды и ее замагниченность, отдельные участки межзвездной среды могут охлаждаться или нагреваться, сжиматься или расширяться. Анализ

²Разреженная газовая среда должна существовать и между скоплениями, где она, по-видимому, образует систему струй, связанную с крупномасштабным распределением вещества.

наблюдений позволяет изучать, как по ним прокатываются фронты ударных волн, как возникают и испаряются облака газа и пыли, как из межзвездной среды рождаются звезды, передающие ей впоследствии часть своей массы и энергии. Весь этот сложный комплекс явлений исследуется в астрофизике.

Процессы, от которых зависит образование и эволюция звезд и галактик, свойства и поведение разреженного газа — это прежде всего взаимодействие вещества с излучением, магнитными полями и энергичными частицами, а также гравитационное взаимодействие. Большая часть книги посвящена именно их изучению.