

А. В. Засов
Э. В. Кононович

АСТРОНОМИЯ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2011

УДК 520.523.524

ББК 22.6

3 36

Засов А.В., Кононович Э.В. **Астрономия:** Учеб. пособие. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 256 с. — ISBN 978-5-9221-0952-9.

Книга знакомит читателя с основами астрономии и современными представлениями о строении окружающей нас Вселенной. Особое внимание уделяется описанию физической картины мира и его эволюции. Пособие в первую очередь рассчитано на учащихся старших классов и может быть использовано как для занятий по астрономии или смежным разделам физики, так и для самообразования. Обобщающие выводы, контрольные вопросы и упражнения нацелены на то, чтобы помочь читателю в изучении предмета.

Книга будет также интересна многочисленным любителям астрономии, начинающим свое знакомство с этой наукой.

© ФИЗМАТЛИТ, 2008, 2011

© А. В. Засов, Э. В. Кононович, 2008,
2011

ISBN 978-5-9221-0952-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

К читателю	8
Глава 1. Предмет астрономии	10
1.1. Что изучает астрономия. (10). 1.2. Особенности астрономии. (13). 1.3. Связь астрономии с другими науками. (16). 1.4. Развитие астрономии. (17). 1.5. Значение астрономии. (23). 1.6. Вопросы (24). 1.7. Упражнения (25).	
Основные выводы	25
Глава 2. Видимые движения небесных тел	26
§ 2. Суточное движение звезд	26
2.1. Созвездия и звездные карты. (26). 2.2. Суточное движение небесных тел. (27). 2.3. Небесная сфера. (29). 2.4. Важнейшие точки и линии на небесной сфере. (30). 2.5. Вопросы (32). 2.6. Упражнения (32).	
§ 3. Система небесных координат	32
3.1. Небесные координаты. (32). 3.2. Зависимость суточного движения светил от положения наблюдателя на Земле. (34). 3.3. Высота полюса мира над горизонтом. (36). 3.4. Типовая задача. Найти максимальную высоту над горизонтом звезды, которая кульминирует в южной части неба. (36). 3.5. Видимость светил в данном месте Земли. (37). 3.6. Вопросы (38). 3.7. Упражнения (38).	
§ 4. Особенности видимых движений Луны и Солнца.	39
4.1. Видимое движение и фазы Луны. (39). 4.2. Годичное движение Солнца. (41). 4.3. Изменение суточного пути Солнца и Луны в течение года. (42). 4.4. Типовая задача. Определение высоты Солнца в кульминациях. (44). 4.5. Вопросы (45). 4.6. Упражнения (45).	
§ 5. Солнечные и лунные затмения	46
5.1. Условия наступления затмений. (46). 5.2. Виды затмений. (47). 5.3. Вопросы (49).	
§ 6. Время и календарь	50
6.1. Измерение времени. (50). 6.2. Типовая задача. Нахождение среднего солнечного времени. (53). 6.3. Календарь. (53). 6.4. Типовая задача. Переход от дат старого к датам нового стиля. (54). 6.5. Вопросы (54). 6.6. Упражнения (54).	
Основные выводы	55

Глава 3. Законы движения небесных тел	56
§ 7. Движение планет	56
7.1. Видимые движения планет. (56). 7.2. Система Коперника. (59). 7.3. Вопросы (61).	
§ 8. Взаимное расположение планет	61
8.1. Конфигурация светил. (61). 8.2. Синодический и сидерический периоды обращений. (62). 8.3. Типовая задача. Соотношение между сидерическим и синодическим периодами обращений. (64). 8.4. Расстояния до планет. (64). 8.5. Определение расстояний до тел Солнечной системы. (65). 8.6. Вопросы (67). 8.7. Упражнения (68).	
§ 9. Законы движения планет.	68
9.1. Законы Кеплера. (68). 9.2. Закон всемирного тяготения. (70). 9.3. Вопросы (71). 9.4. Упражнения (71).	
§ 10. Движение тел под действием гравитации.	71
10.1. Задача двух тел. (71). 10.2. Небесная механика. (75). 10.3. Вопросы (76). 10.4. Упражнения (76).	
§ 11. Орбиты космических аппаратов. Космические исследования	77
11.1. Движение искусственных небесных тел. (77). 11.2. Практическое значение космических исследований. (77). 11.3. Вопросы (80). 11.4. Упражнения (81).	
Основные выводы	81
Глава 4. Методы астрофизических исследований	83
§ 12. Исследования электромагнитного излучения небесных тел	83
12.1. Шкала электромагнитных волн. (83). 12.2. Всеволновая астрономия. (84). 12.3. Вопросы (86).	
§ 13. Телескопы в астрономии	86
13.1. Назначение телескопов. (86). 13.2. Оптические телескопы. (87). 13.3. Угловое разрешение телескопов. (91). 13.4. Радиотелескопы. (93). 13.5. Типовая задача. Определение параметра телескопа (94). 13.6. Вопросы (94). 13.7. Упражнения (94).	
§ 14. Спектральный анализ излучения. Определение физических свойств, химического состава и скоростей движения небесных тел.	95
14.1. Спектры небесных тел. (95). 14.2. Эффект Доплера. (99). 14.3. Типовая задача. Использование эффекта Доплера. (101). 14.4. Вопросы (101). 14.5. Упражнения (101).	
§ 15. Массы небесных тел	102
15.1. Определение масс небесных тел. (102). 15.2. Типовая задача. Определение массы планеты. (103). 15.3. Упражнения (103).	
Основные выводы	103

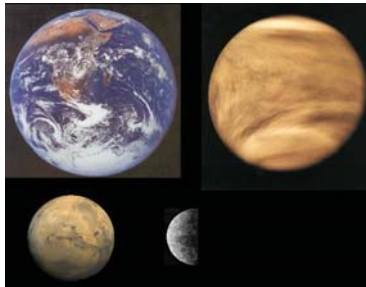
Глава 5. Солнечная система	105
§ 16. Состав и происхождение Солнечной системы.	105
16.1. Вопросы (108).	
§ 17. Планета Земля	108
17.1. Общее строение Земли. (108). 17.2. Вопросы (112).	
§ 18. Система Земля–Луна	113
18.1. Движение Луны относительно Земли. (113). 18.2. Приливы. (114). 18.3. Луна. (116). 18.4. Вопросы (120). 18.5. Упражнения (120).	
§ 19. Физические свойства больших планет	120
19.1. Меркурий. (120). 19.2. Венера. (122). 19.3. Марс. (125). 19.4. Юпитер. (127). 19.5. Сатурн, Уран, Нептун. (129). 19.6. Система Плутон–Харон. (131). 19.7. Основные причины различий физических свойств планет. (132). 19.8. Вопросы (134). 19.9. Упражнения (134).	
§ 20. Малые тела Солнечной системы и межпланетная среда . .	134
20.1. Астероиды. (134). 20.2. Кометы. (136). 20.3. Откуда приходят кометы (138). 20.4. Метеоры и метеориты. (139). 20.5. Вопросы (141). 20.6. Упражнения (141).	
Основные выводы	141
Глава 6. Звезды и Солнце	143
§ 21. Звездные величины.	143
21.1. Шкала звездных величин. (143). 21.2. Типовая задача. Суммарная звездная величина объектов. (146). 21.3. Упражнения (146).	
§ 22. Основные свойства звезд.	147
22.1. Звезды — важнейшие объекты Вселенной. (147). 22.2. Расстояния до звезд. (148). 22.3. Температуры звезд. (151). 22.4. Светимость звезд. (152). 22.5. Размеры звезд. (154). 22.6. Типовая задача. Определение радиуса звезды. (156). 22.7. Масса и плотность звезд. (156). 22.8. Диаграмма температура–светимость (Герцшпрунга–Рассела)(158). 22.9. Вопросы (159). 22.10. Упражнения (159).	
§ 23. Физическая природа звезд.	160
23.1. Физическое состояние и химический состав звездного вещества. (160). 23.2. Равновесие звезд. (162). 23.3. Источники энергии звезд. (164). 23.4. Вопросы (166). 23.5. Упражнения (166).	
§ 24. Необычные звезды	167
24.1. Белые карлики. (167). 24.2. Нейтронные звезды. (168). 24.3. Вопросы (172). 24.4. Упражнения (172).	
§ 25. Звезды, меняющие светимость.	172
25.1. Переменные звезды. (172). 25.2. Типовая задача. Определение расстояния до цефеиды. (176). 25.3. Вспыхивающие	

звезды и новые звезды. (176). 25.4. Сверхновые звезды. (177). 25.5. Вопросы (180). 25.6. Упражнения (180).	
§ 26. Солнце — ближайшая к нам звезда	181
26.1. Общие сведения. (181). 26.2. Внешняя атмосфера Солнца: хромосфера и корона. (185). 26.3. Гелиосейсмология. (188). 26.4. Активность Солнца и ее влияние на Землю. (189). 26.5. Вопросы (191). 26.6. Упражнения (191).	
§ 27. Эволюция звезд	191
27.1. “Старение” звезд. (191). 27.2. Конечные стадии эволюции звезд. (193). 27.3. Вопросы (195). 27.4. Упражнения (195).	
Основные выводы	196
Глава 7. Наша Галактика	198
§ 28. Состав и структура Галактики.	198
28.1. Млечный Путь и структура Галактики. (198). 28.2. Звездные скопления. (199). 28.3. Вопросы (202). 28.4. Упражнения (202).	
§ 29. Движение звезд	202
29.1. Тангенциальные и лучевые скорости звезд. (202). 29.2. Вращение Галактики. (204). 29.3. Вопросы (205). 29.4. Упражнения (205).	
§ 30. Межзвездная среда	206
30.1. Межзвездный газ. (206). 30.2. Межзвездная пыль. (209). 30.3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле. (212). 30.4. Вопросы (213). 30.5. Упражнения (213).	
§ 31. Образование звезд. Проблема возникновения жизни	214
31.1. Образование звезд и планетных систем. (214). 31.2. Проблема жизни во Вселенной. (217). 31.3. Вопросы (217).	
Основные выводы	218
Глава 8. За пределами нашей Галактики	219
§ 32. Галактики	219
32.1. Открытие галактик. (219). 32.2. Расстояния до галактик. (221). 32.3. Типовая задача. Определение расстояния до галактики и ее размера. (223). 32.4. Типы галактик. (223). 32.5. Состав и структура галактик. (224). 32.6. Вопросы (227). 32.7. Упражнения (227).	
§ 33. Необычные галактики	228
33.1. Взаимодействующие галактики. (228). 33.2. Галактики с активными ядрами. (230). 33.3. Квазары. (231). 33.4. Вопросы (233). 33.5. Упражнения (234).	
Основные выводы	234
Глава 9. Строение и эволюция Вселенной	235
§ 34. Расширяющаяся Вселенная	235

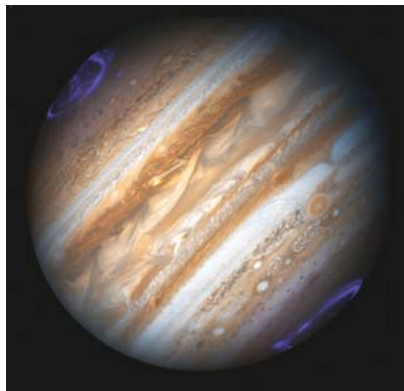
34.1. Красное смещение и расширение Вселенной. (235).	
34.2. Необратимые изменения во Вселенной. (236).	
34.3. Модели расширяющейся Вселенной. (239).	
34.4. Фоновое реликтовое излучение. (242).	
34.5. Вопросы (245).	
34.6. Упражнения (245).	
Основные выводы	246
Ответы к упражнениям	247
Приложение.	249



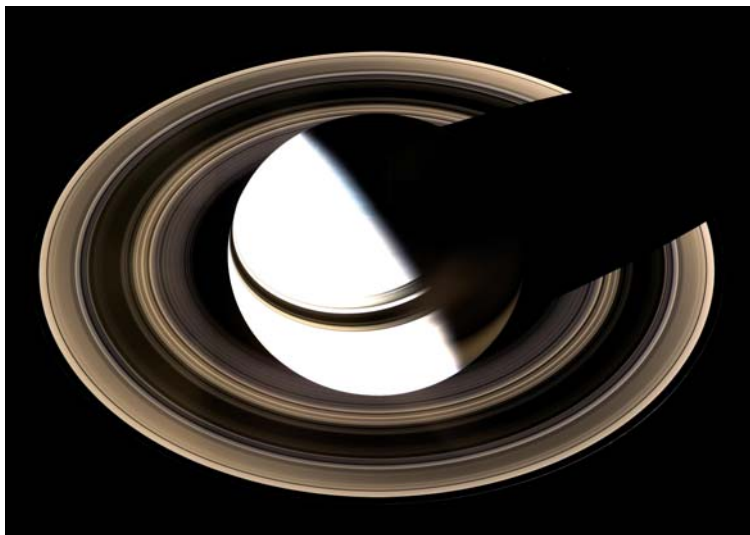
3. Метеоритный кратер в штате Аризона (США). Его размеры по периметру – около 4 км. Падение метеорита произошло около 50 тыс. лет назад



4. Фотографии планет земной группы (в одном масштабе): Земля, Венера (вверху), Марс и Меркурий (внизу)



5. Юпитер. В ультрафиолетовых лучах хорошо видны полярные сияния у полюсов. Космический телескоп “Хаббл” (NASA, ESA, группа HERITAGE)



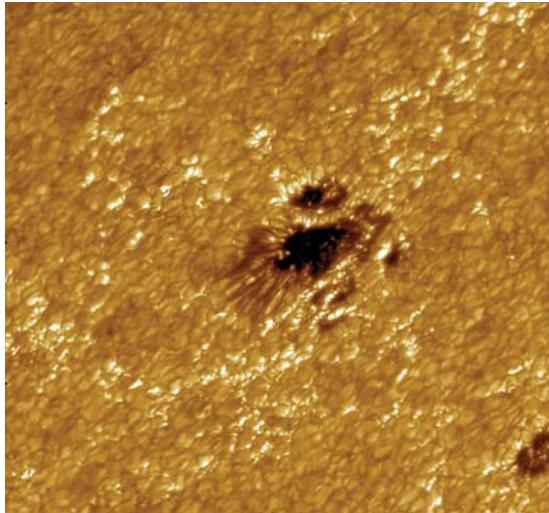
6. Сатурн и его система колец. Отчетливо видна тень от колец на Сатурне и тень планеты на кольцах. КА “КАССИНИ” (NASA, ESA, группа HERITAGE)



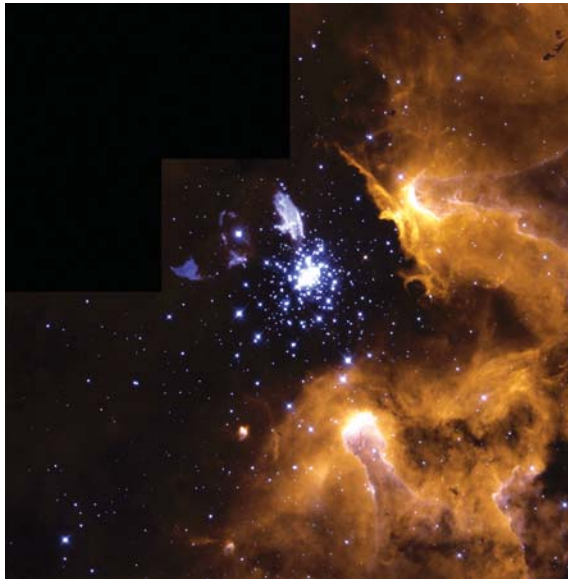
7. Астронавты США на Луне: экспедиция Апполон-17 (NASA).
Черный цвет дневного неба – результат отсутствия атмосферы



8. Панорама Марса. Самоходный аппарат SPIRIT (NASA/JPL)



9. Небольшая часть видимой поверхности Солнца. Размеры отдельных гранул — около 1000 км. Различная яркость деталей отражает различие их температур (Астрофизическая станция Королевской академии наук Швеции)



10. Молодое звездное скопление в окрестности молекулярного облака сложной формы. Космический телескоп "Хаббл" (NASA/STScI)



11. Планетарная туманность NGC 2440. Газ сброшен центральной звездой. Размер туманности – около 1 св. года, расстояние – 3600 св. лет. Космический телескоп “Хаббл” (NASA/STScI, группа HERITAGE)



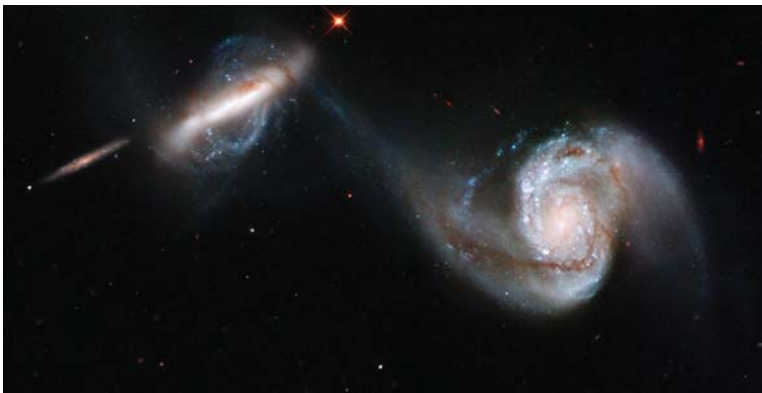
12. Крабовидная туманность – остаток сверхновой звезды, взрыв которой наблюдался в 1054 г. Расстояние до нее – 6,5 тыс. св. лет. Волокна туманности представляют собой нагретый газ. Природа голубоватого свечения внутри туманности иная, чем у газа: она связана с движением высокоэнергетичных электронов в слабом магнитном поле туманности. Космический телескоп “Хаббл” (NASA, группа HERITAGE)



13. Галактика “Сомbrero”, диск которой виден почти с ребра. Темная полоса выдает присутствие пыли в межзвездной среде диска. Изображение охватывает область около 80 тыс. св. лет. Космический телескоп “Хаббл” (NASA, группа HERITAGE)



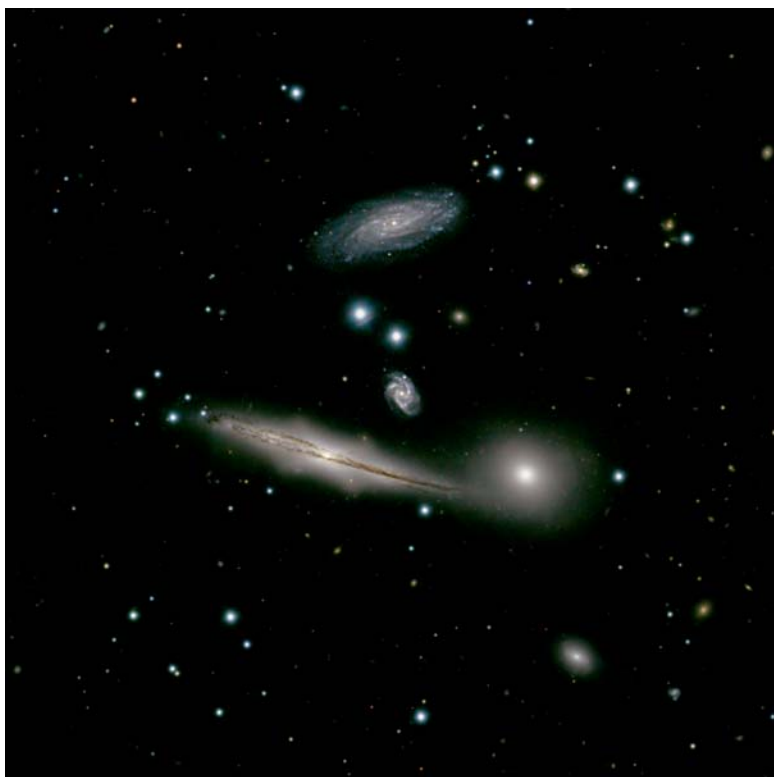
14. Туманность Андромеды – ближайшая к нам спиральная галактика



15. Две взаимодействующие галактики (система Арп 87). Звезды, газ и пыль образуют поток, “перетекая” от одной галактики к другой. Космический телескоп “Хаббл” (NASA/STScI, группа HERITAGE)



16. Развернутое изображение Млечного пути – звездного диска нашей Галактики.
Космическая обсерватория КОБЕ (NASA)



17. Группа из нескольких галактик. Космический телескоп “Хаббл” (NASA/STScI, группа HERITAGE)

К читателю

Цель авторов — в сжатой форме рассказать о том, какой исторический путь прошла астрономия и как, базируясь на физических методах исследования, современная астрономия изучает окружающий безграничный мир, частью которого мы являемся.

Первые издания этой книги представляли собой учебник по астрономии для старшекласников. Ее общая структура сохранилась и в настоящем издании, хотя текст и иллюстративный материал подверглись значительной переработке. Книга знакомит с элементами астрономии — науки, которая сыграла столь значительную роль в развитии нашей цивилизации. Существуют издания, где те или иные вопросы астрономии освещаются глубже, либо более популярно, здесь же материал представлен в достаточно сжатом виде. Небольшой объем книги позволяет работать с ней в школе, при дефиците учебного времени, но она пригодна и для самообразования.

Как любой учебник или учебное пособие, книга не предполагает легкого чтения. Для облегчения работы с ней в тексте выделены наиболее важные определения, есть вопросы для самопроверки и задачи, требующие несложных вычислений (наиболее трудные отмечены звездочками), а также краткое резюме отдельных разделов. Внимательно прочитав книгу, Вы найдете ответы на многие вопросы, например на те, что перечислены ниже.

- Почему период вращения Земли вокруг оси не равен 24 часам?
- Откуда стали известными расстояния до Луны, Солнца, звезд и галактик?
- Как «устроено» Солнце и надолго ли хватит его энергии?
- Как удастся исследовать далекие звезды и галактики, даже если их невозможно увидеть глазом в телескоп?
- Откуда известен химический состав звезд?

- Чем заполнено пространство между планетами и между звездами?
- Как удалось найти планеты у других звезд?
- Что дают науке космические исследования?
- Откуда приходит и о чем свидетельствует невидимое излучение космических тел?
- Одновременно ли возникли звезды, как долго оно «живут» и во что в конце концов превращаются?
- Могут ли влиять космические тела на Землю и на жизнь на ней?
- Что понимается под расширением Вселенной, и давно ли оно началось?
- Почему ночью небо темное несмотря на бесчисленное количество звезд во Вселенной?

Мы желаем читателю успеха в знакомстве с очень древней и одновременно очень современной и быстро развивающейся наукой, какой является астрономия.

Авторы

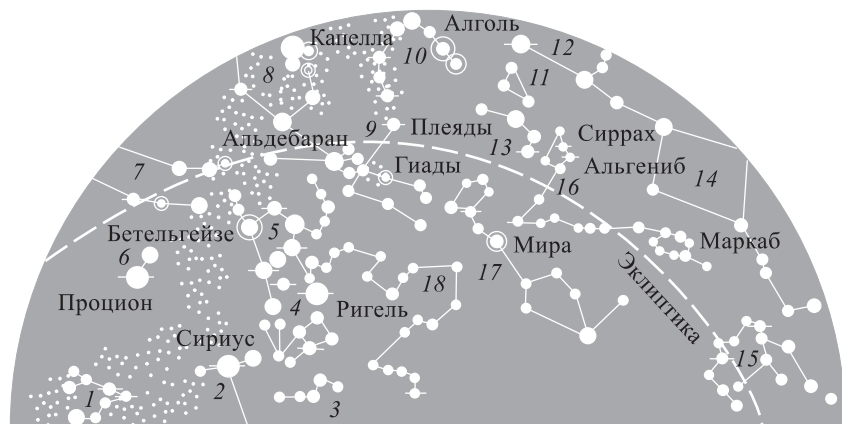
Глава 1

ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

1.1. Что изучает астрономия. Наша Земля — сравнительно небольшая *планета*, принадлежащая безграничному миру, называемому *Вселенной* или *космосом* (от греч. *κοσμος*). Для нас Земля — особая планета. Других подобных мы не знаем. На Земле возникла жизнь, появился Человек с его пытливым умом и духовной культурой, создавший цивилизацию, науки, искусство. Если бы атмосфера, окружающая Землю, была непрозрачной для света, люди бы значительно дольше считали, что Земля — центр Вселенной, даже не догадываясь о многообразии окружающего мира. Прозрачность атмосферы позволила проводить регулярные наблюдения за небесными телами, а пытливость человеческого ума на основании этих наблюдений постепенно привела к выводу о движении Земли и других планет вокруг Солнца и Солнца относительно звезд. Что важнее всего, история науки продемонстрировала принципиальную возможность познания окружающего Землю мира и объяснения происходящих в нем явлений.

Вспомним, какие космические тела можно увидеть на небе невооруженным глазом. Наиболее ярким и крупным светилом является центральное тело нашей планетной системы — Солнце. Звезды, видимые только ночью, — очень далекие объекты. Ближе всех к нам спутник Земли — *Луна*. Вокруг Солнца обращаются *большие планеты* в следующем порядке от него: *Меркурий*, *Венера*, *Марс*, *Юпитер*, *Сатурн*, *Уран* и *Нептун*. Вместе с твердыми телами меньшего размера, а также *межпланетной средой* все они образуют *Солнечную систему*.

В ясную безлунную ночь невооруженным глазом можно наблюдать несколько тысяч далеких звезд, по своей природе подобных нашему Солнцу. Вдали от городских огней хорошо видна проходящая через все небо широкая бледная полоса *Млечного Пути* (рис. 1.1, 1.2). Она образована огромным числом неразличимых простым глазом слабых звезд. Все эти звезды, как те, которые видны невооруженным глазом, так и самые слабые, входят в состав гигантской звездной системы — *Галактики*



Ю

Звездные величины						—○—	двойные звезды
○	○	○	○	○	○	◎	переменные звезды
0	1	2	3	4	5	⋯	Млечный Путь

Цифрами обозначены созвездия:

1 — Корма	7 — Близнецы	13 — Овен
2 — Большой Пес	8 — Возничий	14 — Пегас
3 — Голубь	9 — Телец	15 — Водолей
4 — Заяц	10 — Персей	16 — Рыбы
5 — Орион	11 — Треугольник	17 — Кит
6 — Малый Пес	12 — Андромеда	18 — Эридан

Рис. 1.1. Осенне-зимнее ночное звездное небо и Млечный Путь. Южная часть

(рис. 1.3). К ней принадлежит и наша Солнечная система. При помощи телескопов на небе можно также наблюдать множество других подобных ей звездных систем, называемых *галактиками* или *внегалактическими туманностями*. Все они находятся на очень больших расстояниях от нас.

Всевозможные космические объекты, начиная с наиболее близких и кончая самыми удаленными, которые только можно наблюдать, а также всю безграничную Вселенную как целое исследует наука *астрономия* (от греч. “*αστρον*” — небесное светило, “*νομος*” — закон).

Астрономия изучает движение, физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел и образованных ими систем, а также строение и эволюцию Вселенной как целого.

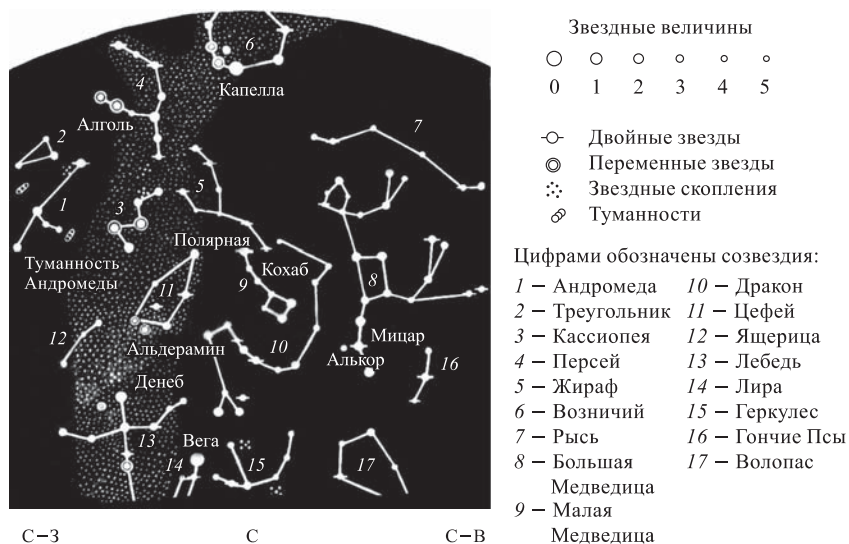


Рис. 1.2. Созвездия северной части осенне-зимнего неба

Исследование природы звезд, планет, галактик и происходящих в них явлений — важнейшая задача астрономии. Важно, что эта наука изучает не только отдельные объекты и явления, но и, вместе с физикой, определяет фундаментальные законы природы. Только знание физических законов дает возможность понять, почему мир вокруг нас именно такой, какой он есть.

Объяснение любого явления может иметь различные уровни сложности, в зависимости от глубины понимания природы. Приведем один пример взаимосвязи простого и сложного. Казалось бы, элементарный вопрос: почему ночью темно? Очевидно, потому, что источник света — Солнце — находится в это время под горизонтом. Такой ответ будет правильным, но далеко не полным. Ведь кроме Солнца есть звезды и звездные системы. Хотя они чрезвычайно далеки от нас, но чем дальше они находятся, тем их больше. Если звездная Вселенная существует бесконечно долго и содержит бесчисленное количество звезд, то все небо сплошь должно быть “усыпано” слабыми звездами и поэтому одинаково ярко должно светиться как днем, так и ночью, причем никакое поглощение света не изменит ситуации (это положение можно доказать математически строго). В таком случае не только жизнь, но и сама Земля не могли бы существовать. Мы приходим к тому, что называется фотометрическим парадоксом. Его объяснение потребовало использования весьма сложных физических представлений об эволюции Вселенной, учета того, что

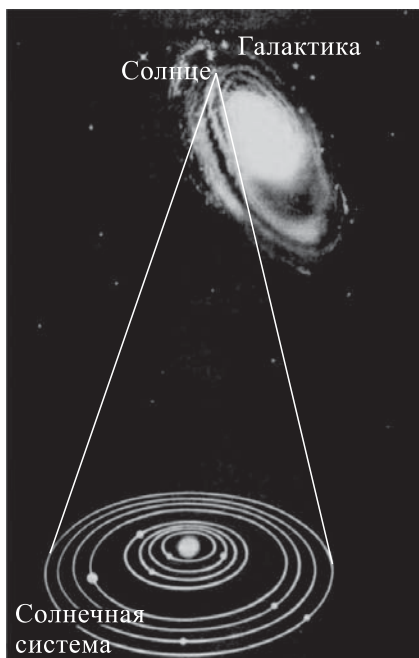


Рис. 1.3. Расположение Солнечной системы в Галактике

не только отдельные объекты, но и весь мир звезд и галактик подвержен медленным изменениям. Самое грандиозное из них — это расширение Вселенной (его мы рассмотрим в конце книги). Оказалось, что именно оно ослабляет свет, приходящий от далеких объектов, уменьшая тем самым их вклад в наблюдаемую яркость неба. Есть и вторая причина, которая заключается в том, что, как выяснилось, весь мир звезд и галактик существует многие миллиарды лет, но все же не бесконечно долго.

1.2. Особенности астрономии. Основу астрономии составляет не лабораторный эксперимент, а пассивное наблюдение космических объектов с использованием различных методов регистрации приходящего от них излучения. Это важнейшая особенность астрономии.

Астрономы, в отличие от физиков, ведущих экспериментальные исследования в лабораториях, практически лишены возможности экспериментировать с изучаемыми объектами. Основную информацию о небесных телах приносят световые лучи, радиоволны и другие виды электромагнитного излучения. Направление на источник определяет его положение на небе, а количество энергии и спектральный состав излучения дают возможность

судить о физических свойствах источника, его движении, а также о расстоянии до него. Таким образом, все астрономические наблюдения можно условно разделить на два типа: угломерные (определение координат, размеров, угловых расстояний между источниками, или относительного перемещения источников) и фотометрические, или спектральные (измерение приходящей энергии на тех или иных длинах волн).

Только в последние десятилетия XX столетия, благодаря приборам, установленным на космических аппаратах, некоторые тела Солнечной системы начали изучать с близкого расстояния и даже с их поверхности. Появилась возможность применять методы других наук, например геологии, геофизики, биологии и т. п. С помощью космической техники были изучены поверхность и грунт Луны, лабораторному анализу были подвергнуты образцы пород Луны и Марса, некоторых комет и астероидов, определены состав и свойства межпланетной среды, а также химический состав и физические свойства атмосфер планет.

Значительная часть электромагнитного излучения, приходящего из космоса, поглощается в земной атмосфере и недоступна для регистрации с поверхности Земли. Космические обсерватории, работающие за пределами атмосферы, открыли возможность исследования невидимого излучения небесных тел.

Кроме видимых и невидимых глазом электромагнитных излучений, со всех сторон к Земле приходят из глубин космоса потоки быстро летящих ядер атомов различных химических элементов, называемые *космическими лучами*. Скорость этих частиц превышает 200 тысяч км/с. Их изучение также позволяет многое узнать о сложных процессах, происходящих во Вселенной.

Вспомните, в каком еще случае можно подвергнуть лабораторным исследованиям вещество из космоса.

Другой особенностью астрономии является ее эволюционный характер: она изучает не только наблюдаемое состояние объектов, но и их происхождение и эволюцию. Современная астрономия рассматривает, например, звезды, газовые туманности, галактики не как неизменные образования, а как непрерывно изменяющиеся, эволюционирующие тела и системы тел.

Изучение эволюции небесных тел облегчается тем обстоятельством, что одновременно можно наблюдать множество объектов одинаковой природы, но различного возраста. Рассматривая небесные тела на разных стадиях их эволюции, удастся восстановить отдельные этапы “жизни” звезд, галактик и других объектов.

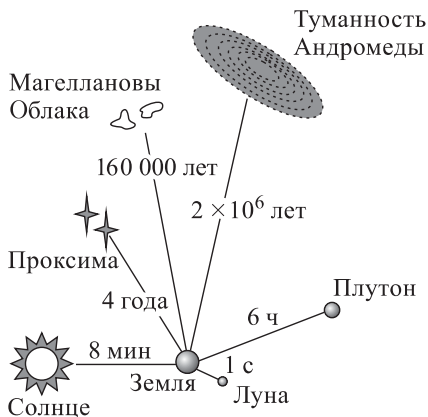


Рис. 1.4. Время, за которое свет доходит до Земли от различных объектов

Масштабы наблюдаемой части Вселенной огромны. Для измерения больших расстояний в астрономии обычно используют специальные, достаточно крупные единицы длины, например *световой год*.

Световым годом (св. г.) называется расстояние, которое свет проходит за один год. В году примерно $3,2 \cdot 10^7$ секунд. Умножая на это число скорость света ($300\,000$ км/с), получим, что 1 св. г. $\approx 9,5 \cdot 10^{15}$ м или почти 10^{13} км.

От Луны до Земли свет идет $1,3$ с, от Солнца — около 500 с ($8\frac{1}{3}$ мин), от самых далеких планет Солнечной системы — более 4 часов, от ближайшей звезды Проксима Центавра — $4,4$ года, от ближайших к нам галактик — сотни тысяч и миллионы лет (рис. 1.4). Расстояние до самых далеких наблюдаемых галактик — более 10 млрд световых лет.

Очень далекие объекты из-за большого времени распространения света наблюдаются такими, какими они были в далеком прошлом. Поэтому то, что происходит на них сейчас, можно будет узнать только спустя очень много лет. И наоборот, то, что наблюдается сейчас, в действительности имело место в прошлом. Но если вспышки на Солнце происходят лишь на 8 минут раньше, чем их обнаруживают на Земле, то, например, взрывы звезд в далеких галактиках наблюдаются с запозданием от сотен тысяч до миллиардов лет.

Приведем пример. В 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке (это одна из ближайших к нам галактик) наблюдалась *вспышка* (взрыв) звезды. Такое явление называется *сверхновой*. Однако в действительности событие произошло около 150 тысяч лет тому назад, т. е. еще в эпоху первобытного человека. Поскольку

расстояния до далеких объектов не всегда известны с достаточной точностью, датировка астрономических явлений не всегда соответствует реальному времени их возникновения, и ее принято производить по времени их наблюдения с Земли. Поэтому говорят, например, что вспышка звезды произошла в таком-то году. Сравнивая объекты одинаковой природы, расположенные на различных расстояниях, можно исследовать те эволюционные изменения, которые происходят во Вселенной за большие промежутки времени.

1.3. Связь астрономии с другими науками. Астрономия тесно связана со многими науками. Прежде всего это касается физики, с которой современная астрономия взаимодействует теснее всего, и математики, язык которой астрономия широко использует. В свою очередь астрономия оказывает большую помощь этим наукам. Ряд важных методов математики был разработан в связи с проблемами астрономии. Большинство фундаментальных физических идей и теорий прошли или проходят астрономическую проверку или даже возникли в связи с результатами астрономических исследований. Это относится, например, к законам классической механики и теории относительности, к теории элементарных частиц и строения атомов или к теориям, описывающим поведение вещества в необычных физических условиях.

Для современной физики космическое пространство представляет собой природную лабораторию, в которой вещество находится в самых разнообразных, подчас экстремальных, условиях. Например, в пространстве между галактиками газ необычайно разрежен: в объеме, равном объему всего земного шара, там содержится чуть больше одного грамма газа, и тем не менее астрономическими методами удастся наблюдать излучение такой среды. С другой стороны, в таких сверхплотных телах, как нейтронные звезды, плотность вещества достигает огромных значений, в сотни миллиардов раз превышающих плотность самых твердых веществ, известных на Земле. Велик и диапазон температур наблюдаемых объектов: от близких к абсолютному нулю температур газа и пыли вдали от звезд до значений в десятки и сотни миллионов кельвинов в их недрах. Самые сильные магнитные и гравитационные поля, существующие в природе, самые высокоэнергетичные элементарные частицы также связаны с астрономическими объектами. Вещество в столь экстремальных состояниях нельзя получить на Земле. Поэтому его исследование методами астрономии позволяет

проверить существующие физические теории и лучше понять *фундаментальные свойства материи* и составляющих ее элементарных частиц и полей.

Помимо физики и математики, с которыми в настоящее время астрономия органически связана, она оказывает большую помощь и другим наукам, например геологии, геофизике и биологии, изучая те условия, в которых возникла, развивалась и продолжает существовать Земля. По астрономическим событиям, упомянутым в древних летописях и хрониках, историки могут уточнить даты важных исторических событий.

1.4. Развитие астрономии. Астрономия — одна из древнейших наук. Она возникла в процессе практической деятельности людей на самой заре цивилизации. Наиболее наглядно это проявилось в выработке календарной системы счета времени. Она создавалась на основе наблюдений Солнца, Луны и звезд, проводившихся в специально построенных обсерваториях. Развитие сельского хозяйства сильно зависит от сезонных явлений, которые надо уметь предсказывать, особенно периодические наступления холодов, дождей, теплой погоды, засух, разливов рек и т. п. Уже с незапамятных времен было замечено, что климатические явления связаны с Солнцем и повторяются через определенный промежуток времени, который мы называем *годом*. Определение продолжительности года оказалось непростой задачей. Отмечая положения небесных светил, люди обнаружили, что в разное время года, но в одно и то же время суток восходят и заходят различные группы звезд — *созвездия*. Изучение звездного неба помогало предсказывать время наступления важнейших сезонных явлений. Так в древности начал разрабатываться *календарь* и были заложены принципы измерения больших промежутков времени.

Огромную роль в истории цивилизации, в частности в развитии мореплавания, сыграли астрономические методы ориентации, определения направлений стран света и положения путешественников на земном шаре. Уже тысячи лет назад мореплаватели умели ориентироваться по звездам и водить корабли, находя свой путь в открытом море.

Вспомните из курса географии, как по звездам можно определить направления стран света и почему с изменением широты места наблюдения меняется вид звездного неба.

Во все века немалую роль в развитии астрономии играла также и естественная любознательность человека, его желание знать, как устроен окружающий мир, что находится вдали



Рис. 1.5. Древняя обсерватория Стоунхендж

от Земли, на недоступной высоте, как объяснить наблюдаемые небесные явления, как они отражаются в нашей жизни. Но только сравнительно недавно, не более ста лет тому назад, мы стали, и то лишь в самых общих чертах, представлять себе масштабы окружающего мира и природу далеких космических объектов.

Систематические наблюдения небесных светил начались еще тысячи лет тому назад в Древнем Египте, Двуречье, Индии и Китае. Положения Солнца, Луны, звезд и планет определялись с помощью простейших угломерных приспособлений и визиров, фиксировавших направление. Сохранились остатки древних обсерваторий, где проводились такие наблюдения. В Европе самой древней из них считается Стоунхендж (Великобритания). Его исполинские каменные глыбы, через определенные щели между которыми фиксировались положения Солнца и Луны, были воздвигнуты еще в каменном веке, около шести тысяч лет тому назад (рис. 1.5).

В странах Древнего мира несколько тысяч лет тому назад систематические наблюдения небесных объектов велись немногочисленными служителями культа — жрецами. Уже тогда астрономия носила не только практический, но и мировоззренческий характер. Было важно понять, что представляет собой окружающий мир и, главное, как он влияет на земные события. Науки в современном понимании тогда еще не существовало, и все, что происходило на небе, считалось проявлением Высших сил. С самых древних времен была очевидна исключительная роль Солнца и его движения по небу для всего живого на Земле. По аналогии можно было предположить важную роль в событиях

земной жизни и других ярких объектов, в первую очередь Луны и планет. Так возникла вера в то, что явления, наблюдаемые на небе, отражают и даже позволяют предвидеть не только сезонные изменения, но и определенные события в жизни людей и целых государств, надо только научиться читать небесные послания.

Появления комет, вспышки “новых” звезд, затмения Солнца и Луны, перемещения планет относительно Луны и звезд, их сближения друг с другом на небе и другие астрономические явления сопоставлялись с благоприятными и неблагоприятными событиями в общественной и частной жизни людей. Они интерпретировались как божественные знаки, предупреждающие о тех или иных событиях. Отголоски этих древних языческих, дохристианских верований, в которых обожествлялись Солнце, Луна и планеты, дошли и до нашего времени в виде различных астрологических “учений”, подчас противоречащих одно другому. Эти учения базируются на чисто формальных правилах и соотношениях между видимыми положениями планет, Луны и Солнца на небе и событиями земной жизни. Важную роль в таких предвидениях играет психологический фактор, как, впрочем, проницательность и интуиция прорицателя, а планеты и звезды на самом деле здесь совершенно ни при чем.

Астрология как учение о связи земных событий с положением и движением небесных объектов сыграла важную историческую роль в формировании действительной науки о космосе — астрономии. Сходную роль сыграла алхимия в химии. Хотя астрология и астрономия в Древние века и Раннем Средневековье были одним целым в силу необходимости проведения точных наблюдений и предвычислений взаимного расположения небесных тел, эти два направления уже давно разошлись. Ни научного обоснования, ни объективных, доступных проверке научных методов исследования астрология не имеет. Поэтому, несмотря на свое укоренившееся с эпохи средневековья название, наукой она не является.

Однако идея о возможном влиянии космических факторов на физические явления на Земле, в том числе на живую природу, была рациональной, хотя научное развитие она смогла получить сравнительно недавно. Современная наука подтвердила существование опосредованной и очень сложной физической связи между земными явлениями (как в живой, так и в неживой природе) и космическими воздействиями. Астрономия, например, изучает влияние солнечной активности на Землю, ее погоду, климат, магнитное поле и на множество других процессов и яв-

лений, в том числе и на здоровье людей. Этот важный раздел астрономии и геофизики называется *солнечно-земные связи*.

Наука изучает и такой важный для человечества вопрос, как вероятность и последствия для Земли и жизни на ней редких катастрофических событий космической природы, например падения на нее малых космических тел — комет или астероидов, взрывов сравнительно близких звезд Галактики. Да и само возникновение благоприятных условий для появления и развития жизни на Земле неразрывно связано с космическими факторами.

Результаты наблюдений астрономов Древних и Средних веков, дополненные последующими поколениями ученых, сыграли большую роль в становлении современной науки. Накопленный материал лег в основу разработки различных систем календаря, позволил определить размер и форму Земли, скорость ее вращения и орбитального движения вокруг Солнца и многое другое.

Философы Древней Греции одними из первых поставили вопрос о природе и строении окружающего мира, об оценке расстояний до небесных тел на основе астрономических наблюдений. Для объяснения наблюдаемых движений Солнца, Луны и планет были разработаны сложные схемы их движения по окружностям. Мыслители античного мира смогли не только понять, что Земля — свободный, ни на что не опирающийся шар, но и определить его радиус из астрономических наблюдений. Аристарх Самосский уже в III в. до н. э. показал, что Солнце значительно больше Земли. Было подвергнуто сомнению представление о том, что Земля покоится в центре мира.

В Средние века в Европе развитие новых идей затормозилось, а многие достижения античной науки оказались забытыми или отвергнутыми. Хотя астрономические наблюдения продолжались, общие концепции строения мира долгое время оставались религиозно-догматическими. Землю снова стали считать плоской и находящейся в центре Вселенной.

Фундаментальной наукой об окружающем нас мире астрономия становится только в эпоху Возрождения (Европа, XIV–XVI вв.). Многие достижения древних мыслителей получили дальнейшее развитие. Николай Коперник возродил и обосновал гелиоцентрическую систему мира, в которой Земля — рядовая планета и обращается вокруг Солнца. Первые кругосветные путешествия не оставили сомнений в шарообразности нашей планеты. Леонардо да Винчи, развивая идеи Демокрита и других античных философов, представлял Землю и небесные светила как тела одной природы. В философском учении Джордано Бруно звезды рассматривались как далекие солнца в безграничной

Вселенной. Строгого доказательства этих взглядов в те времена еще не было, но сами идеи оказались чрезвычайно плодотворными.

С развитием техники появились астрономические угломерные инструменты, позволявшие с большой точностью измерять угловые расстояния между объектами на небе (армилярные сферы, квадранты и т. п.). С их помощью были уточнены законы движения планет, что впоследствии сыграло большую роль в установлении основных законов механики.

Изобретение телескопа в XVII в. резко раздвинуло границы наблюдаемой части Вселенной. Перед астрономией открылись новые горизонты. Обнаружение целого мира недоступных невооруженному глазу небесных тел имело исключительное значение. В середине XVII в. удалось определить расстояния до Солнца и размеры планетных орбит. Стали очевидными гигантские размеры окружающего мира по сравнению с земными масштабами. В XIX в. стало известно, насколько велико расстояние даже до ближайших звезд, а в начале XX в. выяснилась реальная сложная структура звездной Вселенной и масштабы, доступные наблюдениям.

Расширение технических возможностей наблюдений и эксперимента, бурное развитие физики, открытие законов механики, газовых законов и законов электромагнетизма не только позволили объяснить в общих чертах наблюдаемую картину мира, но и дали возможность исследовать физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел.

Итак, в истории развития астрономических представлений можно выделить три основных периода.

Первый — это *древний* (дотелескопический) период, когда все накопленные знания основывались только на наблюдениях невооруженным глазом или при помощи простых угломерных инструментов. Этот период завершается гениальным трудом Николая Коперника, который заменил прежние геоцентрические представления гелиоцентрической системой мира.

Второй период — *классический* — начался в эпоху Возрождения с первых телескопических наблюдений Галилео Галилея в самом начале XVII в. и продолжался примерно до середины XIX столетия. В это время механика Исаака Ньютона стала теоретической основой астрономии.

Третий — *современный* — период начался с открытия метода спектрального анализа (Кирхгоф и Бунзен, 1859) и применения фотографии, а позднее — и других приемников излучения. Удалось показать, что космические тела состоят из атомов тех же

химических элементов, которые встречаются на Земле, и что к ним применимы открытые на Земле законы физики. Развитие техники наблюдений привело к превращению астрономии во второй половине XX в. во *всеволновую астрономию*, и наблюдениям стали доступны практически все виды электромагнитного излучения космических объектов. Благодаря космическим исследованиям и достижениям физики возникла возможность более глубокого изучения физической картины окружающего мира во всех его масштабах — от микро- до макрокосмоса.

В 1961 г. произошло историческое событие: впервые на околоземную орбиту был запущен космический корабль с человеком на борту (Ю. А. Гагарин, СССР). После выхода Человека в космическое пространство и создания крупных космических обсерваторий можно говорить о новом, *космическом этапе* современного периода развития астрономии. Наземные астрономические наблюдения дополняются ранее недоступной информацией, поступающей непосредственно из космического пространства от различных специализированных космических аппаратов.

Очень важную научную информацию получают при помощи длительно и непрерывно работающих космических обсерваторий. В 1990 г. Солнечную систему и дальний космос начал изучать оптический телескоп “Хаббл” (США), позволивший получать высококачественные изображения далеких объектов с непревзойденной четкостью. В 1994 г. начали работу российские космические аппараты серии “Коронас” для исследования солнечной активности в рентгеновских лучах. С 1996 г. работает Солнечная орбитальная гелиосферная обсерватория, созданная совместно НАСА (Национальное космическое агентство США) и Европейским космическим агентством. Она ведет непрерывные наблюдения Солнца в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного спектра. Были созданы разнообразные космические аппараты для регистрации различных видов излучения, которые не доходят до поверхности Земли (гамма-, рентгеновского, инфракрасного). В начале XXI в. реализовались крупные международные проекты: Международная космическая станция, Международная гамма-обсерватория “Интеграл” и другие. Космические аппараты побывали в окрестностях всех планет. Четыре космических аппарата (“Пионер-11 и -12”, “Вояджер-1 и -2”) уже фактически вылетели за пределы планетной системы, навсегда уйдя в межзвездное пространство.

1.5. Значение астрономии. Астрономия — это прежде всего фундаментальная наука, изучающая окружающий мир и самые общие законы природы. Совершенствование календарной системы, определение географических координат или точного времени уже не входят в задачи астрономии, как это было в прошлые века. Но знания, полученные астрономическими методами, широко используются для прикладных целей. Достаточно напомнить космическую радиосвязь или слежение (мониторинг) за различными природными явлениями (пожары, тайфуны, перемещение айсбергов и пр.). Задачи по обеспечению навигации, связанные с определением положения или перемещения на земном шаре, составление подробных карт и планов в настоящее время также решаются при помощи специализированных космических аппаратов, позволивших многократно увеличить точность измерений. Ошибки в определении положений на Земле составляют метры и даже сантиметры. Системы глобального определения координат используются все шире и шире — от управления движением самолетов или кораблей до прокладывания маршрутов автомашин по городским улицам.

Кроме того, большое прикладное значение имеют исследования Солнца и его воздействий на земные процессы, а также изучение околоземного космического пространства, состояние которого влияет на многие геофизические явления.

Как фундаментальная наука, астрономия изучает весь окружающий Землю мир. Земля не существует сама по себе, изолированно от остальной природы. Более того, она (вместе с Солнцем и другими планетами) возникла благодаря сложным процессам, происходившим в космическом пространстве нашей Галактики миллиарды лет назад. Наша планета, как и все, что на ней находится, продолжает испытывать внешние воздействия — и прежде всего влияние ближайшей к ней звезды — Солнца, от которого она получает свет и тепло. Вместе с Солнцем Луна вызывает приливные волны в океане, атмосфере и твердой оболочке Земли. Потоки быстрых *элементарных частиц* и *рентгеновских лучей*, приходящих от Солнца, могут влиять на состояние земной атмосферы. В атмосферу и на поверхность Земли каждые сутки выпадают сотни тонн твердого межпланетного метеоритного вещества. В истории Земли неоднократно происходили катастрофические события космической природы — столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы. Изменяя, пусть даже на короткое время, состояние земной атмосферы, они, по-видимому, играли очень большую роль в эволюции растительного и животного мира на нашей планете. Даже глобальные изменения

климата, неоднократно происходившие на Земле, могли иметь не только земные, но, как предполагают, также и космические причины. Следовательно, астрономия дает возможность лучше понять как далекие объекты, так и нашу планету — Землю.

Так как астрономия рассматривает наиболее общие закономерности строения мира, она всегда определяла *мировоззрение* людей, их представление об окружающем мире.

По мере развития науки обнаруживаются новые, ранее неизвестные факты и явления, требующие объяснения, а то и вовсе не укладывающиеся в рамки существующих теорий. Поэтому астрономия, подобно многим другим наукам, неисчерпаема.

Но главное, вся история развития астрономии доказывает, что окружающий мир познаваем, что на Земле и во Вселенной действуют одни и те же физические законы, хотя их проявление в различных условиях может быть неодинаковым. Астрономия изучает эти законы и помогает человеку их использовать.

1.6. Вопросы

1. Какие астрономические объекты вам известны? Перечислите их в определенном порядке (например, в порядке их удаленности от Солнца или Земли либо в порядке убывания их размеров и массы).
2. Какое место в астрономии занимает изучение Земли?
3. Перечислите известные вам системы небесных тел. Какие из них не были упомянуты в главе 1?
4. В чем различие между понятиями “Галактика” и “галактика”?
5. Дайте наиболее полное и развернутое определение предмета астрономии.
6. Перечислите важнейшие особенности астрономии.
7. Назовите источники информации в астрономии.
8. Приведите известные вам примеры связи астрономии с другими науками.
9. Как возникла астрономия? Охарактеризуйте основные периоды ее развития.
10. Назовите имена известных вам астрономов, оставивших яркий след в науке. К каким периодам относится их деятельность?
11. Можно ли сказать, что астрология в свое время принесла пользу развитию науки? Когда и в чем?
12. Приведите примеры прикладного и фундаментального значения астрономии.
13. Как астрономические данные связаны с мировоззрением?

1.7. Упражнения

1. Сколько времени идет до нас свет от Сириуса (расстояние $8,5 \cdot 10^{16}$ м)?
2. Пользуясь данными табл. 2 приложения, выразите расстояния до Луны, Солнца и Плутона в световых годах. Удобно ли этой единицей измерять расстояния до тел Солнечной системы? Какую более удобную единицу вы предложили бы?
3. Перечислите астрономические объекты, которые можно наблюдать невооруженным глазом.

Основные выводы

Астрономия изучает физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел и образуемых ими систем, их положение и движение в пространстве, а также строение и эволюцию Вселенной как целого. Важнейшая особенность астрономии — использование наблюдений с целью исследовать природу и эволюцию космических объектов. Астрономия является фундаментальной наукой, раскрывающей основные закономерности природы. Она тесно связана с другими естественными науками, прежде всего с физикой и математикой, и, подобно им, играет основную роль в развитии представлений об окружающем мире.

Астрономия возникла в глубокой древности в связи с практическими потребностями людей. Чтобы научиться ориентироваться на местности, определять свое местоположение на Земле или на море, а также измерять время, требовались знания того, как происходит видимое движение звезд, Солнца, Луны и планет. Выявление закономерностей движения небесных тел было использовано для разработки календарных систем; на основе астрономических наблюдений были предложены способы определения точного времени и точного географического положения наблюдателя. Современная астрономия, опираясь на фундаментальные законы физики и используя как наземные, так и космические методы исследований, ставит своей целью дать физическое объяснение тому, что наблюдается на различных расстояниях от Земли, выяснить, как рождаются и эволюционируют космические объекты и вся Вселенная как целое. Она также изучает происхождение и физические свойства нашей планеты и зависимость происходящих на Земле процессов от влияния ее космического окружения.

Глава 2

ВИДИМЫЕ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

§ 2. Суточное движение звезд

2.1. Созвездия и звездные карты. Человек с нормальным зрением в ясную ночь может видеть одновременно на небе 2–3 тыс. звезд. В отличие от Солнца, Луны и планет, их относительное расположение не меняется со временем. Поэтому картина, образуемая звездами на небе, остается в течение многих веков практически неизменной. Положение звезд можно зарисовать или занести на карту.

Еще в древности наблюдатели стали выделять на небе яркие звезды и объединять их в легко запоминающиеся фигуры — созвездия, давая им названия, как правило связанные с мифами и легендами.

Древние греки в определенных группах звезд видели изображения мифических героев: Персея (рис. 2.1), охотника Ориона, сражающегося с разъяренным Тельцом, царя Цефея, царицы Кассиопеи и их дочери Андромеды, которую Персей спас от мифического чудовища — Кита.

Долгое время число созвездий и их границы на небе оставались произвольными. В 1922 г. Международным астрономическим союзом было принято соглашение для удобства ориентации на звездном небе условно разделить его на 88 участков (созвездий) со строго определенными и закрепленными границами. Важно подчеркнуть, что созвездия — это не астрономические объекты или их группировки, а условно выделенные области звездного неба.

Наиболее яркие звезды каждого созвездия условились обозначать буквами греческого алфавита: α (*альфа*), β (*бета*), γ (*гамма*), δ (*дельта*) и т. д. — в порядке убывания их кажущейся яркости, которая измеряется в специальных единицах — *звездных величинах* (подробно об этом будет сказано в § 21). Чем слабее свет от звезды, тем больше ее звездная величина.

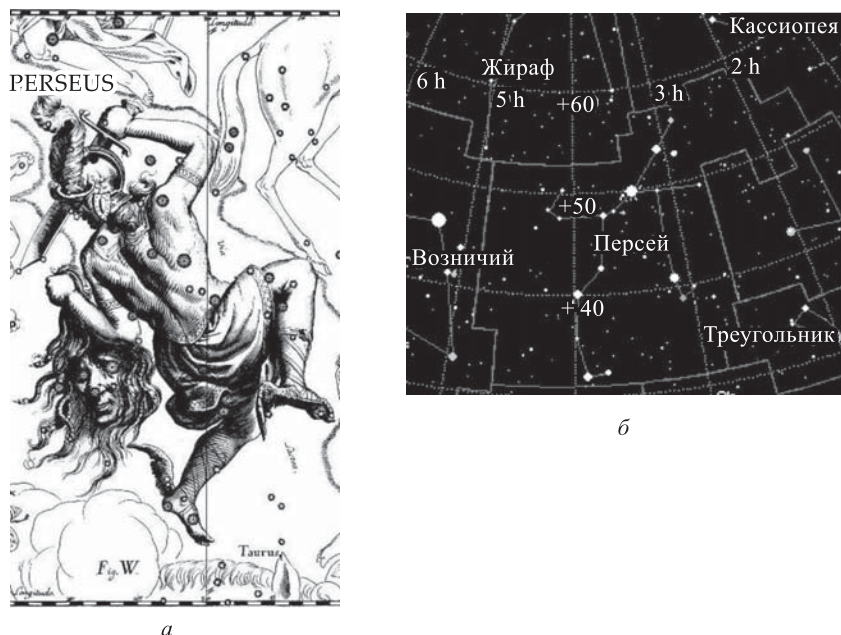
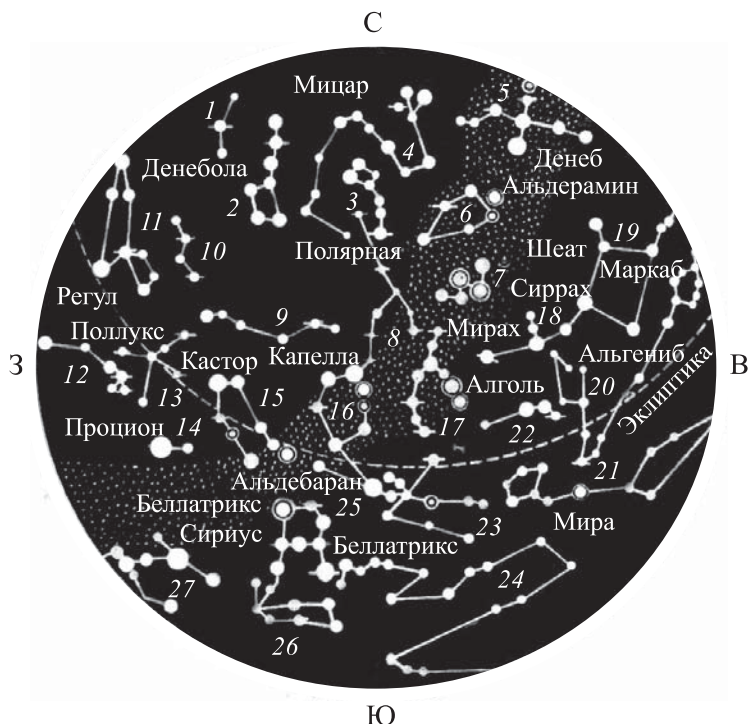


Рис. 2.1. *а* — Созвездие Персея из атласа Яна Гевелия (1660 г., Польша); *б* — современная карта созвездия Персея

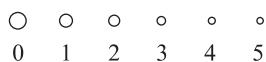
Многие звезды имеют собственные имена, например: Вега (α *Лиры*), Сириус (α *Большого Пса*), Полярная (α *Малой Медведицы*). Некоторые из них отмечены на рис. 2.2.

2.2. Суточное движение небесных тел. Поскольку суточное движение небесных тел отражает осевое вращение Земли, происходящее с запада на восток, мы видим, что все светила восходят на восточной стороне неба, а заходят — на западной. Для наблюдателя на экваторе они поднимаются из-под горизонта вертикально, но для других географических широт их путь по небу наклонен к югу или к северу в зависимости от того, с северной или с южной стороны от экватора Земли находится наблюдатель. Наблюдатель в северном полушарии Земли в полдень видит Солнце на юге, а если он находится в южном полушарии, то солнечная сторона — северная. После полудня, приближаясь к горизонту, Солнце начинает опускаться и заходит в западной части неба для наблюдателя в любом полушарии.

Дневной путь Солнца на небе, как и путь любого другого небесного тела, симметричен относительно направления север–юг (см. рис. 4.4).



Звездные величины



○— двойные звезды
◎ переменные звезды

Цифрами обозначены созвездия:

1 — Гонимые Псы	10 — Малый Лев	19 — Пегас
2 — Большая Медведица	11 — Лев	20 — Рыбы
3 — Малая Медведица	12 — Гидра	21 — Кит
4 — Дракон	13 — Рак	22 — Овен
5 — Лебедь	14 — Малый Пес	23 — Телец
6 — Цефей	15 — Близнецы	24 — Эридан
7 — Кассиопея	16 — Возничий	25 — Орион
8 — Жираф	17 — Персей	26 — Заяц
9 — Рысь	18 — Андромеда	27 — Большой Пес

Рис. 2.2. Созвездия Северного полушария звездного неба

Общую картину суточного движения небесных тел можно представить себе, считая, что все они находятся на небосводе, имеющем форму сферы, которая вращается как целое вокруг некоторой оси. Эта ось называется *осью мира*. Наблюдая ясной

ночью звезды в северной части неба, можно заметить, что они описывают концентрические круги с центром в некоторой точке, близкой к звезде α Малой Медведицы (*Полярная*). Эта точка называется *северным полюсом мира*. В южном полушарии можно найти диаметрально противоположную ей точку — *южный полюс мира*. Ось мира, вокруг которой происходит кажущееся вращение небосвода, проходит через наблюдателя на Земле и оба полюса мира.

На рис. 2.3 приведена фотография звездного неба вблизи полюса мира, полученная неподвижной камерой, затвор которой был открыт на несколько часов. Видимые пути звезд изобразились дугами окружностей одинаковой угловой протяженности.

Поскольку кажущееся вращение небесного свода вокруг оси мира — следствие действительного вращения Земли вокруг своей оси, ось мира ориентирована параллельно оси вращения Земли.

Видимое движение светил, происходящее из-за вращения Земли вокруг оси, называется *суточным движением*, а период вращения Земли вокруг оси — *сутками*.

Материалы §§ 2.3–3.7, посвященные небесной сфере и системе небесных координат, важны для проведения наблюдений и знакомства со звездными картами, но могут быть опущены по усмотрению преподавателя.

2.3. Небесная сфера. Небесные объекты очень далеки от нас. Поэтому кажется, что все они удалены одинаково и как бы расположены на некоторой сфере, окружающей наблюдателя. В астрономии для определения взаимного расположения различных объектов измеряют углы между соответствующими направлениями (*угловые расстояния*). Для удобства измерений, а также для решения практических задач в астрономии используются специальные сферические системы координат на *небесной сфере*.

Небесной сферой принято называть воображаемую сферу произвольного радиуса, на которую проецируются объекты, видимые на небе, вне зависимости от расстояний до них. При этом предполагается, что наблюдатель находится в центре этой сферы.

Небесная сфера — это математическое построение, хотя термин сохранился с древних времен, когда считалось, что Земля действительно окружена реальной сферой с “укрепленными” на ней звездами. Примером задач, решаемых при помощи небесной сферы, может служить определение условий видимости тех или иных объектов, изучение их движений и т. д.

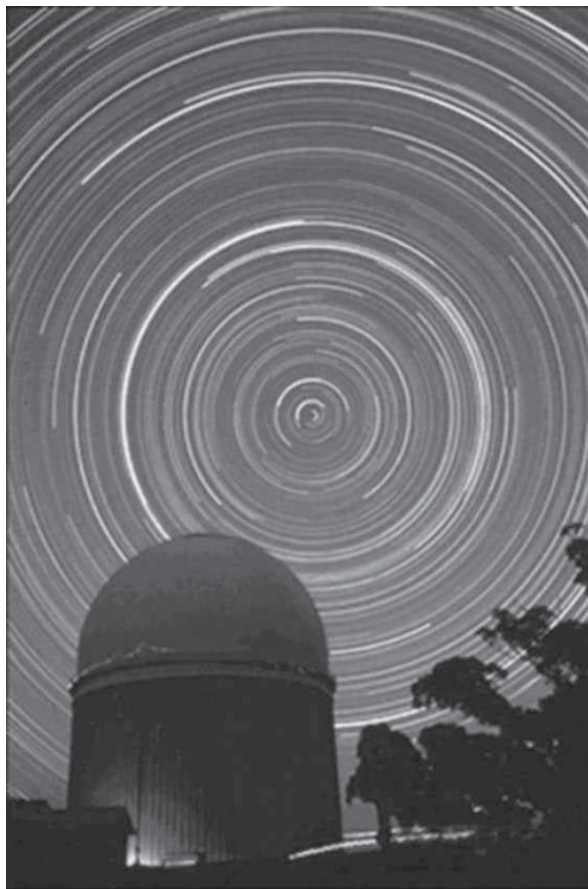


Рис. 2.3. Следы околополярных звезд, сфотографированные неподвижной камерой

2.4. Важнейшие точки и линии на небесной сфере.

На рис. 2.4 изображена небесная сфера: P_N — северный полюс мира, P_S — южный полюс мира, $P_N P_S$ — ось мира, параллельная оси вращения Земли. Располагаясь в Северном полушарии и глядя из центра O небесной сферы, мы видим, что **звезды обращаются вокруг северного полюса мира против часовой стрелки.**

Линия $P_N P_S$ — одна из двух главных линий, связанных с небесной сферой. Другой является *отвесная линия*, соответствующая направлениям вверх и вниз.

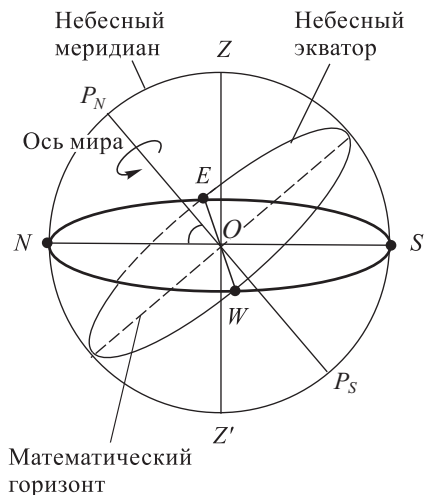


Рис. 2.4. Небесная сфера

Отвесной линией называется линия, совпадающая с направлением силы тяжести в месте наблюдения. Она близка к направлению на центр земного шара.

Отвесная линия пересекает небесную сферу в двух точках: точке *зенита* Z (над головой наблюдателя) и точке *надир* Z' (диаметрально противоположная точка).

Любые плоскости пересекают небесную сферу по окружностям. Эти окружности принято называть кругами. Круги наибольшего радиуса (когда сечение проходит через центр сферы) называют *большими кругами*, а остальные — *малыми*.

Отсчет углов между точками на небесной сфере производят по дугам больших кругов путем измерения соответствующих центральных углов.

Важнейшими большими кругами на небесной сфере являются:

- 1) *математический горизонт* — большой круг, плоскость которого перпендикулярна отвесной линии;
- 2) *небесный экватор* — большой круг, плоскость которого перпендикулярна оси мира;
- 3) *небесный меридиан* — большой круг, проходящий через зенит Z и полюс мира P_N (а следовательно, и через надир Z' и южный полюс мира P_S).

Математический горизонт пересекается с небесным меридианом в *точках севера N и юга S* , а с небесным экватором — в *точках востока E и запада W* .

Точкой севера называется ближайшая к северному полюсу мира точка горизонта, а точкой юга — ближайшая к южному полюсу мира; точка востока — на 90° справа, а запада — слева от точки севера.

Математический горизонт делит небесную сферу на две половины — *видимую и невидимую*, а небесный экватор — на *северную и южную*.

2.5. Вопросы

1. Назовите основные точки и линии на небесной сфере.
2. В каком направлении наблюдатель видит суточное перемещение светил, если он находится в северном полушарии Земли и обращен лицом к югу? Если к северу? (Ответьте на тот же вопрос для случая, когда наблюдатель находится в южном полушарии Земли.)
3. В каких частях неба восходят и заходят небесные светила для наблюдателя, находящегося в южном полушарии Земли?

2.6. Упражнения

1. Докажите, что угол между плоскостью горизонта и осью мира равен углу между плоскостью экватора и отвесной линией (а этот угол, в свою очередь, равен географической широте наблюдателя).
2. Начертите небесную сферу и проведите на ней суточные пути: а) для звезд, которые можно наблюдать в зените; б) для звезд, которые в течение суток лишь раз касаются горизонта.
3. В каком направлении должен смотреть наблюдатель, чтобы увидеть звезды вблизи Полюса мира: а) в северном и б) в южном полушариях; в) в тропиках и г) за полярными кругами?

§ 3. Система небесных координат

3.1. Небесные координаты. Определить положение точки на поверхности Земли нам помогают географические координаты — *широта* и *долгота*. Точно так же на небесной сфере, для того чтобы изучать видимое расположение и движение светил, вводятся *небесные координаты*.

Как и на географическом глобусе, положение точки на небесной сфере однозначно определяется двумя углами. Поэтому координат должно быть две. Для их определения необходимо ввести основную плоскость, в которой отсчитываются соответствующие углы; кроме того, на этой плоскости надо установить начало и направление отсчета.

Для географических координат основной плоскостью, от которой отсчитываются широты, является плоскость *земного экватора*, а началом отсчета долгот — *нулевой меридиан*.

В качестве основной плоскости для отсчета углов на небесной сфере обычно используют плоскость небесного экватора.

Чтобы определить первую координату светила M (рис. 3.1), проведем через точку M большой круг P_NMP_S , плоскость которого перпендикулярна плоскости небесного экватора. Его называют *кругом склонения*.

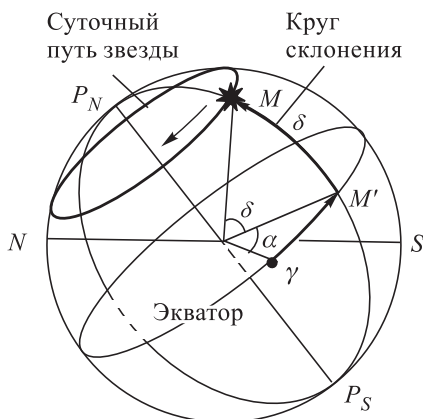


Рис. 3.1. Экваториальная система небесных координат

Дуга $M'M$ круга склонения от экватора до светила M определяет небесную координату, называемую *склонением* (δ). Склонение отсчитывают от плоскости небесного экватора к северному полюсу мира со знаком “+”, а к южному — со знаком “−” и выражают в градусах, минутах и секундах дуги. Эта координата аналогична географической широте.

Вторая координата — *прямое восхождение* (α) — аналогична географической долготе. Она отсчитывается по экватору (дуга $\gamma M'$) с запада на восток от особой точки γ — точки *весеннего равноденствия*. Так называется точка, в которой Солнце при своем годичном видимом перемещении относительно звезд

пересекает небесный экватор в день весеннего равноденствия, т.е. около 20–21 марта. При этом углы обычно выражают не в градусах, а в часах, минутах и секундах, из расчета, что 24 часа соответствуют полной окружности (360°). Один градус при этом равен четырем минутам ($1^\circ = 4 \text{ мин}$).

Вследствие суточного движения все звезды вместе с точкой весеннего равноденствия γ перемещаются по небу параллельно экватору с одинаковой угловой скоростью 15 градусов в час. Поэтому их координаты (α и δ) можно принять неизменными, что позволяет создавать звездные карты и наносить на них координатные сетки.

Описанная система координат называется *экваториальной*. Широко используются и другие системы координат, например *горизонтальная*, в которой основной является плоскость математического горизонта. Угол между направлением на светило и плоскостью горизонта называется *высотой светила* (h). Он отсчитывается вдоль большого круга (круга высоты) от горизонта к зениту со знаком “+” и к надиру со знаком “–”. Второй горизонтальной координатой является *азимут*, отсчитываемый в градусах по горизонту от точки юга до точки его пересечения с кругом высоты данного светила. Заметим, что в геологии и геодезии азимут отсчитывается обычно от точки севера.

3.2. Зависимость суточного движения светил от положения наблюдателя на Земле. Суточные пути светил на небесной сфере представляют собой окружности, плоскости которых параллельны небесному экватору. Каждая из этих окружностей в двух точках пересекает небесный меридиан (рис. 3.2, а).

Явление пересечения светилом небесного меридиана называется *кульминацией*. Ближайшая к зениту — *верхняя кульминация*, а более удаленная — *нижняя*. В верхней кульминации светило имеет наибольшую высоту, а в нижней — наименьшую. Момент верхней кульминации центра Солнца называется истинным *полуднем*, а нижней — истинной *полночью*.

Высота светила в кульминации зависит от географической широты места наблюдения. Действительно, если наблюдатель находится на одном из географических полюсов Земли, то для него ось мира совпадает с отвесной линией. Высота северного полюса мира над горизонтом в этом случае $h_{PN} = \pm 90^\circ$ (знак “–” для наблюдателя на южном полюсе). Наблюдателю на полюсе кажется, что небо вращается вокруг вертикальной оси, а суточные пути светил параллельны математическому горизонту, с которым совпадает небесный экватор (рис. 3.2, б). Поэтому

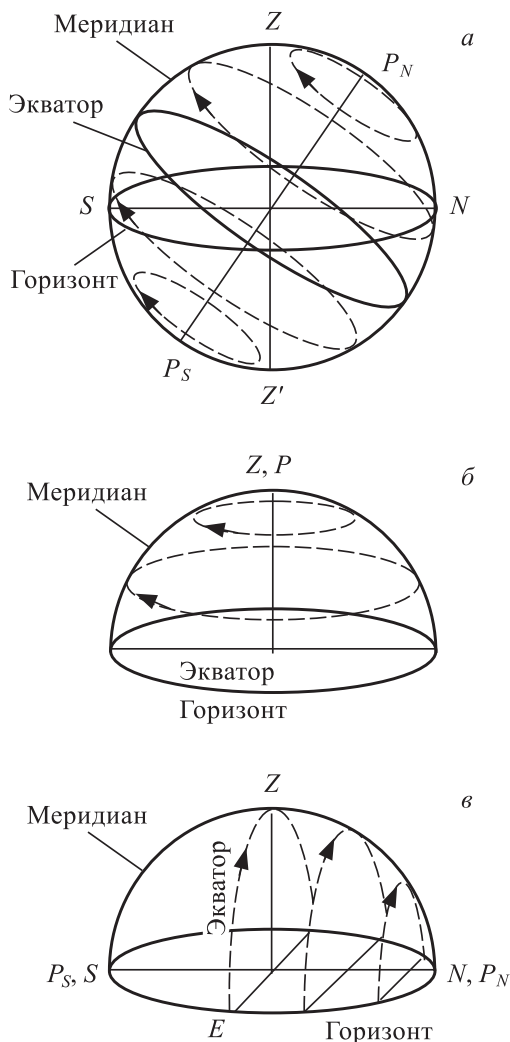


Рис. 3.2. Суточные пути светил: *а* — на средних широтах; *б* — на Северном полюсе Земли; *в* — на экваторе

для наблюдателя, находящегося на полюсе Земли, высоты звезд над горизонтом в течение суток не меняются.

Предположим, что наблюдатель перемещается от Северного полюса вдоль какого-либо географического меридиана. Высота полюса мира для него начнет уменьшаться. Когда наблюдатель достигнет земного экватора, ось мира станет перпендикулярной

отвесной линии и будет находиться в плоскости математического горизонта (рис. 3.2, в). Тогда высота полюса $h_{PN} = 0^\circ$. Полюсы мира окажутся при этом в соответствующих им точках севера N и юга S , а плоскости небесного экватора и суточных путей светил станут перпендикулярными плоскости математического горизонта. Вследствие этого на земном экваторе могут наблюдаться все светила северного и южного полушарий неба.

Итак, наблюдатели, находящиеся на полюсе Земли и на ее экваторе, видят движение светил совершенно по-разному: на полюсах всегда над горизонтом находятся все звезды соответствующего полушария неба, они являются *незаходящими*; на экваторе в каждый момент времени над горизонтом находятся половины обоих полушарий неба, все светила в течение суток восходят и заходят.

Когда наблюдатель переходит в южное полушарие Земли, северный полюс мира становится невидимым. Над горизонтом оказывается южный полюс мира, который тем ближе к зениту, чем наблюдатель ближе к Южному полюсу Земли. Вблизи южного полюса мира нет яркой звезды, но на расстоянии около 10° от него находится созвездие Южного Креста, которое легко найти на небе по четырем звездам, образующим фигуру, похожую на крест.

3.3. Высота полюса мира над горизонтом. Описанные выше свойства суточных движений светил являются следствием важной теоремы, согласно которой *высота северного полюса мира равна географической широте места наблюдения*:

$$h_{PN} = \varphi.$$

Докажем это. По определению, географическая широта — это угол между плоскостью экватора и радиусом Земли, проведенным в данную точку (угол φ на рис. 3.3), а высота полюса мира h_{PN} — это угол между осью мира и линией NO , лежащей в плоскости горизонта.

Ось мира OP_N и ось вращения Земли $O'P$ параллельны, поэтому отвесная линия $O'z$ пересекает их под одним и тем же углом: Угол $P_N O z =$ углу $PO'O$. Следовательно, равны и дополнительные углы: угол $OO'Q =$ углу NOP_N , т. е. $\varphi = h_{PN}$.

3.4. Типовая задача. Найти максимальную высоту над горизонтом звезды, которая кульминирует в южной части неба.

Пояснение. Максимальную высоту звезда M имеет в момент верхней кульминации, т. е. при пресечении меридиана к югу

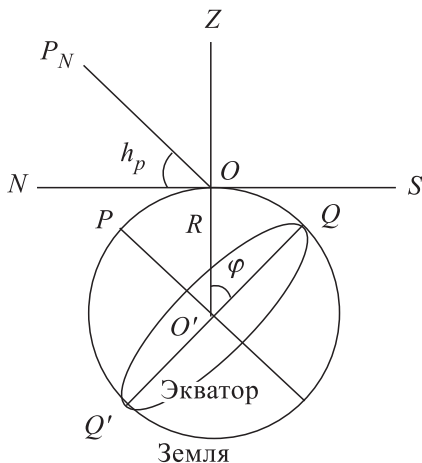


Рис. 3.3. Связь между высотой полюса мира и географической широтой

от зенита, если наблюдатель находится в северном полушарии (рис. 3.4). Требуется найти связь между высотой звезды в кульминации, ее склонением δ и широтой места наблюдения φ .

Решение. Обозначим искомую высоту через h . Она равна дуге меридиана от точки юга до светила. Как видно из рис. 3.4, дуга SM равна сумме двух дуг: от горизонта до экватора QS , равной $90^\circ - \varphi$, и от экватора до светила QM , равной δ . Следовательно,

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta.$$

3.5. Видимость светил в данном месте Земли. Как мы знаем (см. 3.3), на экваторе можно увидеть любое светило, а на

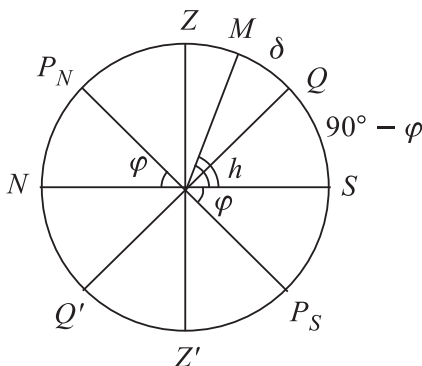


Рис. 3.4. К задаче о высоте светила в кульминации

полюсе Земли видны только светила соответствующего полушария. Для всех остальных мест на Земле, где географическая широта удовлетворяет условию

$$0 < |\phi| < 90^\circ,$$

имеются три категории светил: 1) *незаходящие*, у которых высота в нижней кульминации $h > 0$ (они всегда находятся выше горизонта); 2) *восходящие и заходящие*; 3) *невосходящие*, никогда не наблюдаемые в данном месте (высота в верхней кульминации $h < 0$). К какой категории относится данное светило, зависит лишь от его склонения и широты места наблюдения.

3.6. Вопросы

1. Как изменяется при суточном движении светила его: а) высота, б) прямое восхождение, в) склонение?
2. Меняются ли в течение суток высота, прямое восхождение и склонение основных точек небесной сферы: z , z' , P_N , P_S , N , S , E , W ?
3. На сколько отличаются высоты светил в верхней и нижней кульминациях для наблюдателя, находящегося на расстоянии 10° от полюса Земли?
4. Находясь на полюсе Земли, вы наблюдаете суточный путь неизвестного светила. Как определить, на каком именно полюсе вы находитесь?
5. Справедлива ли теорема о высоте северного полюса мира над горизонтом для южного полушария Земли?
6. Какая аналогичная теорема может быть сформулирована относительно высоты над горизонтом южного полюса мира?

3.7. Упражнения

1. Для наблюдателя в северном полушарии у звезд, склонение которых больше широты места, обе кульминации — и верхняя и нижняя — происходят к северу от зенита. Докажите, что для таких звезд высота светила в верхней кульминации

$$h = 90^\circ + \varphi - \delta.$$

Справедливо ли это соотношение для наблюдателя в южном полушарии?

- 2*. Выведите формулы, определяющие высоту светил в нижней кульминации. Одинаковы ли они для наблюдателей в северном и южном полушариях?

3. Найдите интервал склонений звезд, которые на вашей широте: а) никогда не заходят, б) никогда не восходят, в) могут восходить и заходить.

§ 4. Особенности видимых движений Луны и Солнца

4.1. Видимое движение и фазы Луны. Люди уже давно заметили, что в то время как звезды не изменяют своего взаимного расположения, Солнце, Луна и планеты перемещаются относительно них. Эти светила, участвуя в общем суточном движении, обладают еще и своим собственным движением.

Луна — единственный естественный спутник Земли, ближайшее к ней космическое тело. Поэтому она быстрее всех других светил перемещается на фоне звезд. Это движение всегда происходит с запада на восток, т. е. в сторону, противоположную суточному вращению звездного неба. Наблюдая Луну невооруженным глазом, за несколько часов наблюдений легко заметить ее перемещение относительно звезд рядом с нею.

В ясную лунную ночь заметьте расположение Луны относительно близких к ней ярких звезд. Измерьте расстояние от них до Луны, например, в диаметрах ее видимого диска. Выразите это расстояние в градусах, учитывая, что видимый угловой диаметр диска Луны примерно равен $0,5^\circ$. Повторите наблюдения через несколько часов, и вы убедитесь, что Луна переместилась относительно звезд. В каком направлении и с какой угловой скоростью происходит видимое движение Луны среди звезд?

Видимое перемещение Луны на фоне звездного неба объясняется действительным ее движением вокруг Земли, которое происходит с линейной скоростью около 1 км/с.

Луна не только изменяет свое видимое положение на небе относительно звезд, но и перемещается относительно Солнца, всегда освещающего половину лунного шара. Поэтому с Земли мы видим в различных пропорциях освещенную и неосвещенную ее части (рис. 4.1). Доля освещенной Солнцем части Луны называется ее *фазой*.

Изменение внешнего вида Луны, вызванное ее обращением вокруг Земли, называется *сменой фаз Луны*.

Рассмотрим фазы Луны начиная с *новолуния*, когда Луна проходит между Землей и Солнцем и поэтому с Земли совсем не видна.

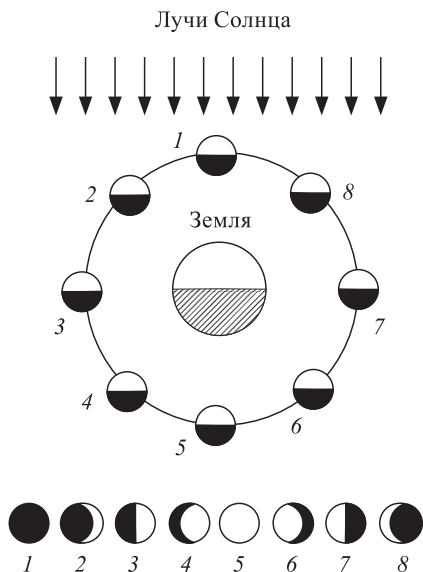


Рис. 4.1. Смена лунных фаз: 1 — новолуние; 3 — первая четверть; 5 — полнолуние; 7 — последняя четверть

Через 2–3 дня после новолуния Луну можно видеть ясным вечером вскоре после захода Солнца на западе. Ее тонкий узкий серп обращен выпуклостью в сторону только что зашедшего Солнца. На фоне неба заметна также и не освещенная Солнцем часть Луны в виде тусклого сероватого свечения. Это *пепельный свет* Луны. Он объясняется тем, что Луну освещает Земля, которая в это время обращена к Луне дневной своей стороной, т. е. освещенной Солнцем.

В течение первой недели после новолуния, день за днем все дальше перемещаясь на восток от Солнца, Луна проходит по небу среди звезд путь, примерно равный четверти полного круга, и ее угловое удаление от Солнца достигает 90° . Тогда западная ее половина видна освещенной, а восточная — темной. Эта фаза называется *первой четвертью* (см. рис. 4.1).

Еще через неделю Луна оказывается в противоположной Солнцу части неба и лучше всего видна в середине ночи. В это время весь диск Луны освещен Солнцем. Эта фаза называется *полнолунием*. После полнолуния появляется ущерб с западной стороны Луны, она начинает приближаться к положению Солнца на небе, и освещенная ее часть постепенно уменьшается.

Когда освещенной окажется снова половина видимого диска Луны (теперь уже восточная), наступает *последняя четверть*. Затем, приближаясь к Солнцу с запада, Луна становится видна только под утро перед восходом Солнца в виде узенького серпа, обращенного выпуклостью на этот раз к востоку. Потом снова наступает новолуние, и Луна перестает быть видимой на небе.

От одного новолуния до следующего проходит около $29\frac{1}{2}$ суток. Этот период смены лунных фаз называется *синодическим месяцем* (от греч. *συνδος* — соединение).

4.2. Годичное движение Солнца. Наблюдая звездное небо в один и тот же час в течение ряда ночей, можно заметить, что вид его меняется: одни звезды уходят под горизонт, другие появляются; небо как будто медленно поворачивается в ту же сторону, в которую происходит его суточное вращение. Из-за этого каждую ночь любая звезда кульминирует раньше, чем в предыдущую ночь, на 3 мин 56 с.

Задание. Постарайтесь пронаблюдать звездное небо осенью. При помощи карты звездного неба определите, какие созвездия видны над горизонтом. Повторите наблюдения через 1–2 месяца примерно в то же время. Отметьте, какие созвездия видны на востоке и на западе, а какие проходят через меридиан (кульминируют). Обратите внимание, как изменяется расположение созвездий относительно горизонта.

Выполняя приведенное выше задание, вы, например, заметите, что созвездие Лебедя, которое в начале сентября в 20 ч. находилось к востоку от меридиана, в конце месяца в тот же час окажется западнее него. Причина этого явления — *годовое движение Земли вокруг Солнца* (рис. 4.2), которое, как и суточное, происходит против часовой стрелки, если смотреть на систему Солнце–Земля от северного полюса мира. Вследствие этого наблюдателю кажется, что Солнце медленно движется относительно звезд с запада на восток, проецируясь на различные созвездия.

Видимое годовое движение Солнца среди звезд происходит по большому кругу небесной сферы, наклоненному к плоскости небесного экватора под углом $23,5^\circ$, называемому *эклиптикой* (от греч. *εκλειψις* — затмение). Это название связано с тем, что когда Луна, передвигаясь на фоне звезд, при пересечении эклиптики оказывается в той же точке неба, что и Солнце, происходит редкое и красивое явление — *солнечное затмение*.

Очевидно, что плоскость эклиптики — это плоскость, в которой лежит путь Земли вокруг Солнца (*орбита Земли*).

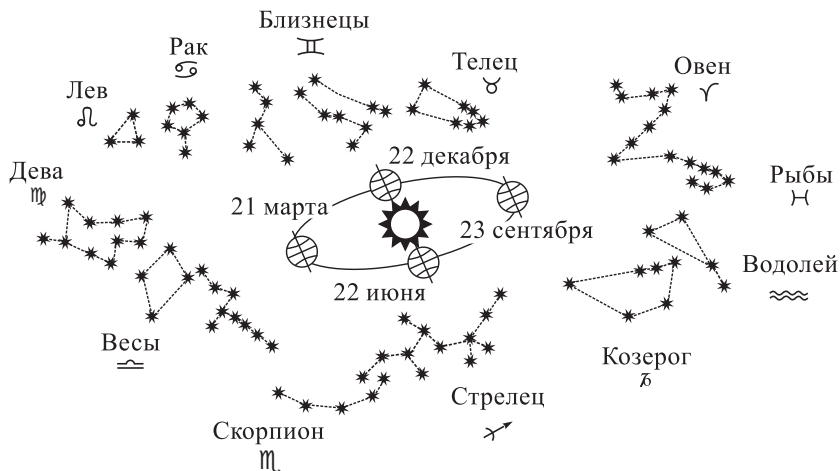


Рис. 4.2. Движение Земли вокруг Солнца и объяснение его видимого годичного движения среди звезд

Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках (рис. 4.3). В точке *весеннего равноденствия* (точке весны, Υ) Солнце переходит из южного полушария неба в северное. В противоположной точке *осеннего равноденствия* (точке осени, \cap) оно переходит из северного полушария неба в южное. Эклиптика проходит через 12 созвездий, называемых *зодиакальными* (от греч. $\zeta\omega\upsilon\nu$ — животное), слегка задевая тринадцатое созвездие (Змееносца), традиционно не причисляемое к зодиакальным.

Полный круг эклиптики (360°) Солнце проходит за год, т. е. за $365\frac{1}{4}$ дней. Поэтому за одни сутки Солнце перемещается относительно звезд по эклиптике чуть меньше чем на 1° . Это примерно два видимых угловых диаметра Солнца. В каждом зодиакальном созвездии Солнце находится в среднем по одному месяцу.

4.3. Изменение суточного пути Солнца и Луны в течение года. В точке весны (созвездие Рыб) Солнце бывает 20–21 марта, в точке осени (созвездие Девы) — около 23 сентября. В эти моменты центр солнечного диска находится на небесном экваторе и его склонение $\delta_\odot = 0$, а точки его восхода и захода на всей Земле в точности совпадают с точками востока и запада.

В середине лета (21–22 июня) Солнце достигает точки эклиптики, наиболее удаленной к северу от небесного экватора, называемой точкой *летнего солнцестояния* (точка лета, созвездие Тельца): в это время его склонение δ_\odot меняется очень

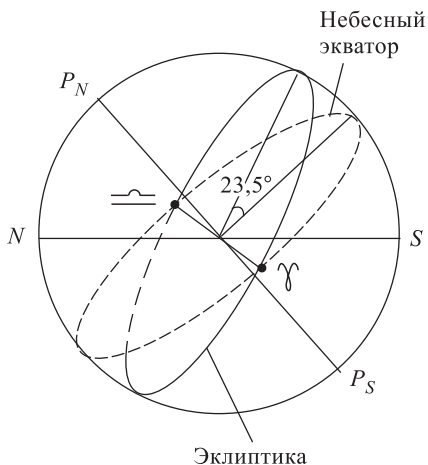


Рис. 4.3. Эклиптика и небесный экватор

медленно и достигает своего наибольшего значения

$$\delta_{\max} = +23,5^\circ.$$

Во вторую половину лета склонение Солнца δ_\odot уменьшается от $23,5^\circ$ до 0° в момент осеннего равноденствия, после чего оно становится отрицательным и достигает своего наименьшего значения $-23,5^\circ$ в момент зимнего солнцестояния (в точке зимы, 21–22 декабря; созвездие Стрельца).

Плоскость, в которой лежит орбита Луны, наклонена к плоскости эклиптики (или земной орбиты) под углом около 5° . Поэтому максимальное склонение Луны составляет примерно $+28,5^\circ$, а минимальное: $-28,5^\circ$.

Вследствие изменения со временем склонений Солнца и Луны их суточные пути все время меняются.

Ежедневно изменяется и полуденная высота Солнца. Ее легко определить по формуле (см. п. 3.4)

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot.$$

С изменением δ_\odot меняются также точки восхода и захода Солнца (рис. 4.4). Летом в средних широтах северного полушария Земли Солнце восходит в северо-восточной части неба и заходит в северо-западной, а зимой восходит на юго-востоке и заходит на юго-западе. Большая высота кульминации Солнца и большая продолжительность дня и являются причиной наступления лета.

Таким образом, с этими изменениями видимого движения Солнца связаны сезонные изменения на Земле, т. е. наступления

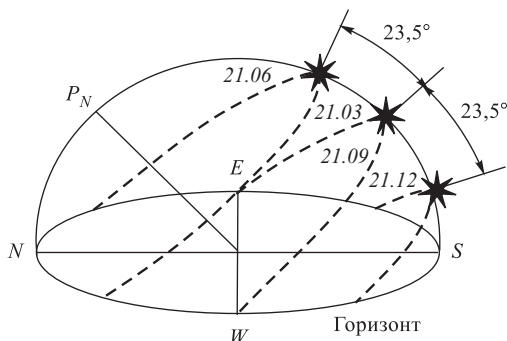


Рис. 4.4. Видимый путь Солнца на небе

весны, лета, осени и зимы: летом теплее потому, что Солнце дольше остается над горизонтом и выше поднимается над ним. При этом, когда в северном полушарии наступает лето или осень, в южном — зима или весна.

За полярными кругами на Земле, где $|\varphi| > 66,5^\circ$, высоты светил в течение суток изменяются мало. Солнце до полугода может оставаться незаходящим и столько же — невосходящим светилом. Это объясняет явления *полярного дня* и *полярной ночи*. Напротив, в тропических областях ($|\varphi| < 23,5^\circ$) Солнце дважды в году кульминирует вблизи зенита.

Летом в южном полушарии Земли Солнце восходит на северо-востоке, кульминирует в северной стороне неба и заходит на северо-западе. В это время в северном полушарии зима.

4.4. Типовая задача. Определение высоты Солнца в кульминациях.

Условие. Определить высоту верхней и нижней кульминаций Солнца 8 марта в С.-Петербурге. Склонение Солнца для этого дня составляет $\delta_\odot = -5^\circ$.

Решение. Сначала находим широту С.-Петербурга (по карте):

$$\varphi = 60^\circ.$$

Поскольку $\delta_\odot < \varphi$, верхняя кульминация происходит к югу от зенита, а нижняя — к северу от надира. Поэтому формулы для высоты светила в кульминации имеют вид

$$h_{\text{в. к.}} = (90^\circ - \varphi) + \delta_\odot,$$

$$h_{\text{н. к.}} = \delta_\odot - (90^\circ - \varphi).$$

Следовательно,

$$h_{\text{в.к.}} = 25^\circ, \quad h_{\text{н.к.}} = -55^\circ.$$

Примечание. Приближенное значение склонения Солнца можно узнать, пользуясь подвижной картой звездного неба, положением эклиптики и оцифровкой дат на ней.

4.5. Вопросы

1. Оцените, в каких пределах меняется максимальная высота над горизонтом Солнца и Луны для широты вашего места жительства.
2. Где восходит и заходит Солнце зимой в южном полушарии (т. е. когда в северном полушарии лето)?
3. Когда в южных полярных областях бывает полярный день? А полярная ночь?
4. Почему летом Солнце поднимается высоко над горизонтом, зимой — низко? Объясните это, исходя из характера движения Солнца по эклиптике.
5. Почему зимой вблизи полнолуния Луна поднимается высоко над горизонтом, а летом — низко?
6. Северный и южный полярные круги имеют широты $\pm 66,5^\circ$. Чем характерны эти широты?
7. На каких широтах Солнце может проходить через зенит только один раз в году? На каких — Луна?
8. Когда Солнце бывает в зените на экваторе?
9. Как движется Солнце для наблюдателя на полюсе в течение года?
10. Как должна быть ориентирована ось вращения Земли, чтобы на ней не было смены времен года?

4.6. Упражнения

1. Определите, на каких высотах кульминирует Солнце в городах: Архангельск, Мурманск, Норильск, Киев, Москва, Хабаровск, Каир, Сидней в следующие даты: 1 января, 25 октября, 12 июля того года, для которого вы располагаете астрономическим календарем. Координаты городов определите по карте.
2. Когда в Каире Солнце бывает в зените?
- 3*. Когда наступает и заканчивается полярный день на северной оконечности Новой Земли?
Звездочкой здесь и далее отмечены задачи повышенной трудности.

4. Может ли Луна в нашей стране наблюдаться в зените?
На каких географических широтах это возможно?

§ 5. Солнечные и лунные затмения

5.1. Условия наступления затмений. Если бы плоскость орбиты Луны совпадала с плоскостью эклиптики, то каждое новолуние Луна в точности оказывалась бы между Землей и Солнцем и наблюдалось бы *солнечное затмение*, а каждое полнолуние она сама входила бы в тень Земли и наступало бы *лунное затмение* (рис. 5.1). В действительности эти явления случаются значительно реже, так как орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом около 5° и пересекается с ней только в двух точках, называемых *узлами орбиты Луны*.

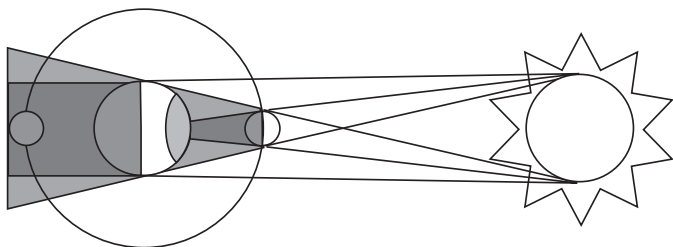


Рис. 5.1. Схемы возникновения солнечных и лунных затмений

Для наступления солнечного затмения необходимо, чтобы Солнце и Луна находились в одном и том же направлении, а для лунного затмения — в диаметрально противоположных направлениях. Это может произойти только тогда, когда Солнце, перемещаясь по эклиптике, окажется вблизи одного из узлов орбиты Луны. Если Солнце и Луна одновременно находятся вблизи какого-либо из узлов орбиты Луны (в новолуние), то наступает солнечное затмение, а если оба тела близки к противоположным узлам (в полнолуние!), то происходит лунное затмение.

Соотношение между наклоном орбиты Луны к эклиптике и видимыми угловыми диаметрами Солнца и Луны таковы, что условия для возникновения солнечного затмения сохраняются в течение 17 суток (рис. 5.2), а лунного — около 11 суток до и после момента прохождения Солнца через узел. Поскольку интервал между последовательными новолуниями составляет 29,5 суток, то каждое прохождение Солнца через узел лунной орбиты обязательно сопровождается хотя бы одним солнечным

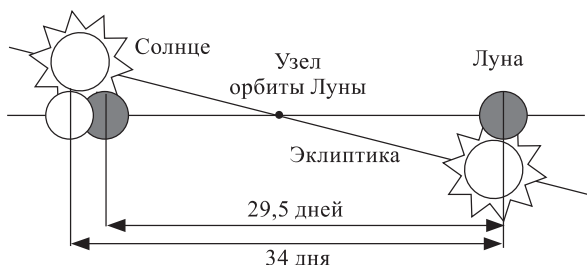


Рис. 5.2. Условия наступления солнечных затмений

затмением. Но их может быть и два (см. рис. 5.2), так как два интервала по 17 суток (до и после прохождения Луны через узел) составляют 34 суток, что продолжительнее, чем интервал между последовательными новолуниями в 29,5 суток. Кроме того, может произойти одно лунное затмение (или ни одного, так как промежуток в 22 дня короче 29,5 суток). Следующий благоприятный для затмений период наступает немногим (почти на 10 дней) менее чем через полгода, когда Солнце оказывается в направлении противоположного узла.

В итоге в течение календарного года условия, благоприятные для затмений, обязательно наступают дважды, хотя если первые затмения произошли в самом начале года, то в конце года Солнце может еще третий раз подойти к узлу лунной орбиты. Поэтому в году происходит не менее двух, но и не более пяти солнечных затмений, а лунных — не более трех. Однако солнечных и лунных затмений вместе в году бывает не более семи.

5.2. Виды затмений. Лунное затмение возникает, когда Луна целиком (*полное затмение*) или частично (*частное затмение*) попадает в конус земной тени. Очевидно, что во время лунного затмения с Луны можно наблюдать затмение Солнца Землей. На лунном небе Земля должна казаться темной, но окруженной ярким кольцом — это светятся слои земной атмосферы, преломляющие и рассеивающие свет. Они-то во время лунного затмения и освещают Луну, которая поэтому наблюдается с Земли окрашенной как правило в буровато-зеленые и красноватые тона (вспомните цвет зари).

Полное затмение Луны может длиться почти два часа, а вместе с частными фазами — вдвое больше.

Так как во время лунного затмения поверхность Луны действительно находится в тени, это явление видно из любой точки Земли, где только может в это время наблюдаться Луна.

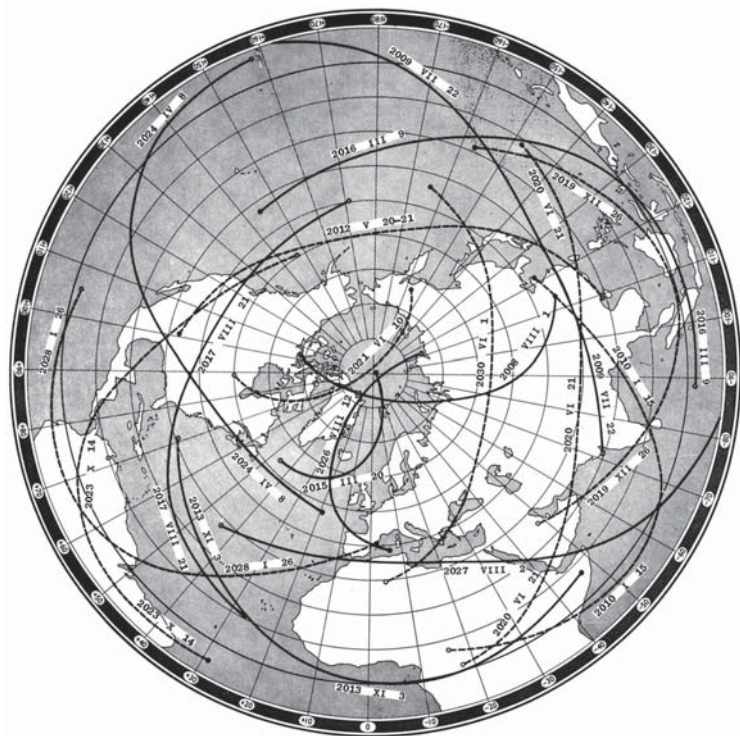
В отличие от лунных *солнечные затмения* видны только в тех областях, где Земля пересекается с конусом лунной тени (*полное солнечное затмение*) или полутени (*частное солнечное затмение*). Поэтому, хотя солнечные затмения случаются чаще, чем лунные, в каждом данном месте Земли они наблюдаются реже.

Видимые угловые диаметры Солнца и Луны очень близки и составляют около $0,5^\circ$. Однако из-за эллиптичности орбит Земли и Луны они слегка меняются. В итоге видимый диаметр Луны часто оказывается меньше видимого диаметра Солнца. Тогда вершина конуса лунной тени не достигает поверхности Земли и вместо полного солнечного затмения наблюдается *кольцеобразное затмение*.

При полном солнечном затмении конус лунной тени пересекает земную поверхность, образуя эллипс размером не более 270 км. Из-за вращения Земли и движения Луны по орбите с запада на восток лунная тень пробегает путь длиной в несколько тысяч километров по поверхности Земли. Этот путь называется *полосой полного солнечного затмения*. В центре полосы продолжительность полного затмения — наибольшая, достигает в редких случаях 8 мин. Вне полосы полной фазы на обширной территории Земли протяженностью в тысячи километров наблюдается *частное затмение Солнца*.

Для научных исследований особенно ценны наблюдения полных солнечных затмений, позволяющие изучить внешние разреженные слои атмосферы Солнца. Полное солнечное затмение — очень красивое явление, если его удастся наблюдать в ясную погоду. Вначале появляется едва заметный ущерб на западном краю Солнца. С его увеличением дневной свет постепенно ослабевает. Начинаются частные фазы затмения. Вот от Солнца остается узкий яркий серп. Надвигаются сумерки. Тени становятся резче. Наконец Луна целиком закрывает Солнце, наступает темнота, и на небе, несмотря на дневное время, выступают наиболее яркие звезды. Вокруг черного диска Луны внезапно возникает розовое кольцо солнечной хромосферы и через считанные секунды “вспыхивает” серебристо-жемчужное лучистое сияние *солнечной короны*. Это самые внешние части атмосферы Солнца. Спустя несколько минут вновь появляются яркие лучи Солнца. Полная фаза затмения кончается, корона исчезает. Быстро светлеет, и частные фазы затмения повторяются, но уже в обратном порядке.

Для наблюдений солнечных затмений организуются специальные экспедиции. Время, место и условия наблюдения затме-



С 1 августа 2008 г. по 1 июня 2040 г.

Солнечное затмение	○ начало
———— полное	● конец
----- кольцеобразное	

Рис. 5.3. Полосы солнечных затмений с 2008 по 2040 г.

ний рассчитываются на много лет вперед (рис. 5.3). Ближайшее полное затмение Солнца, которое будет наблюдаться в Москве, произойдет в 2126 г.

5.3. Вопросы

1. В каком направлении по Земле перемещается конус лунной тени во время солнечного затмения?
2. Одновременно ли начинается и заканчивается лунное затмение для наблюдателей в разных местах на Земле? (То же для солнечного затмения.)
3. С какого края (восточного или западного) Луна начинает затмевать Солнце во время затмения? Поясните ответ.
4. С какого края начинается затмение Луны?

5. Почему солнечные затмения в любом пункте Земли наблюдаются реже, чем лунные?

§ 6. Время и календарь

6.1. Измерение времени. Повседневная жизнь людей тесно связана со сменой дня и ночи. Естественно, что сутки стали первой простой и удобной единицей для измерения времени. В древности положение Солнца на небе служило наиболее надежной мерой прошедшей доли светового дня. Ее оценивали на глаз, а более точно — по изменению направления тени, отбрасываемой, например, вертикальным стержнем (*гномоном*), служившим указателем *солнечных часов*. Но точность подобных измерений оставалась очень низкой.

Промежуток времени между последовательными моментами верхних (или нижних) кульминаций центра видимого диска Солнца получил название *солнечных суток*. Они отличаются от периода осевого вращения Земли — *звездных суток*, которые равны промежутку времени между последовательными верхними (или нижними) кульминациями любой звезды. Следовательно, звездные сутки — это период осевого вращения Земли в инерциальной системе отсчета (или, как говорят, относительно далеких звезд, поскольку их движением в данном случае можно пренебречь), а солнечные сутки — это период видимого движения Солнца по небу. Если бы Земля не обращалась вокруг Солнца, солнечные и звездные сутки совпадали бы. Из-за годичного обращения Земли (т. е. из-за годичного движения Солнца по эклиптике) солнечные сутки почти на 4 минуты длиннее звездных суток (см. § 4.2).

Астрономические наблюдения показали, что движение Солнца по эклиптике происходит неравномерно. Причина этого явления в том, что из-за эллиптичности земной орбиты угловая скорость обращения Земли вокруг Солнца в течение года меняется в пределах нескольких процентов. Это приводит к медленному изменению продолжительности солнечных суток в течение года. Следовательно, часы, “идущие” по Солнцу (или, как говорят, показывающие *истинное солнечное время*), должны то спешить, то отставать, что неудобно. Поэтому за единицу измерения времени была принята средняя продолжительность солнечных суток за год. Время, измеряемое в таких “средних” сутках, в отличие от *истинного*, называется *средним солнечным временем*.

Среднее солнечное время согласовано со средним за год видимым движением Солнца. Однако в каждый данный день 12 часов по среднему солнечному времени может не совпадать с моментом верхней кульминации центра видимого солнечного диска. Различие это не превышает ± 16 минут.

Очевидно, что показания часов, идущих по солнечному времени, не одинаковы на различных географических долготах. Лишь для наблюдателей, находящихся на одном и том же географическом меридиане, кульминация Солнца, как и любого другого светила, происходит одновременно.

Пусть долгота данного меридиана выражена в часах (от 0 до 24 часов). Когда Солнце кульминирует на этом меридиане, то к востоку от него кульминация уже прошла, а к западу, на меридиане с долготой $\lambda_2 < \lambda_1$, произойдет через промежуток времени $\lambda_1 - \lambda_2$: за этот промежуток Земля повернется так, что меридиан λ_2 займет место меридиана λ_1 . Если, допустим, на московском меридиане 5 ч утра, то на меридиане, расположенном на 90° (на 6 ч) к востоку, уже 11 ч, а на 180° — 17 ч. Отсюда следует, что **разность как солнечных, так и звездных времен равна разности долгот, выраженных в часовой мере.**

Для практической жизни очень неудобно, если время заметно отличается в пределах одного экономического района, области или даже крупного города. Для устранения этого неудобства по специальному международному соглашению весь земной шар условно разделен на 24 часовых пояса со средней шириной в 1 ч по долготе (15°). Всюду в пределах каждого часового пояса время считается одинаковым и совпадающим со средним солнечным временем центрального меридиана данного пояса. Такой счет времени называется *поясным*. **При пересечении границы двух соседних поясов с запада на восток часы надо переставить на один час вперед, а с востока на запад — на один час назад.** Минуты и секунды во всех поясах остаются одинаковыми.

Часовой пояс, для которого центральным является гринвичский меридиан, считается *нулевым*. Москва, имея долготу 2 ч 30 мин ($37,5^\circ$), расположена во втором часовом поясе, вблизи границы с третьим. На практике границы часовых поясов проводят не строго по меридианам, а с учетом границ административных районов.

Почти все страны живут по поясному времени. В некоторых государствах (например, в России) используется так называемое *декретное время*, которое равно поясному времени, увеличенному на 1 час. Кроме того, летом в нашей стране, как и в

ряде других, часы переводятся еще на один час вперед (*летнее время*). Это делается для того, чтобы сместить начало и конец рабочего дня на более раннее время суток и сэкономить тем самым электроэнергию, которая тратится на вечернее освещение.

Если для данного меридиана (или часового пояса) наступает полночь, то к востоку от него она наступила раньше, и там уже наступила дата нового дня, в то время как к западу сохраняется дата дня предыдущего. Поэтому на Земле одновременно существует два календарных дня. Дата меняется также при пересечении условно выбранной линии смены дат, которая приблизительно совпадает с меридианом 180° долготы и проходит через Берингов пролив.

Продолжительность средних солнечных суток, положенная в основу измерения времени (в том числе и поясного), определяется и контролируется астрономическими наблюдениями. Тщательный анализ моментов прохождения звезд через меридиан позволил обнаружить небольшую неравномерность скорости вращения Земли, а следовательно, и непостоянство средней продолжительности суток. Поэтому для очень точных измерений промежутков времени понадобились часы, ход которых не связан с вращением Земли. Такие часы были созданы на основе известных свойств излучения атомов. Они называются *атомными часами*, а время, основанное на их показаниях, — *атомным временем*. В качестве основной единицы времени — *секунды* — выбран интервал времени, за которое электромагнитная волна, излучаемая атомами одного из изотопов цезия, совершает определенное число колебаний. Для измерения такого времени созданы специальные атомные часы. Сигналы точного атомного времени транслируются радиостанциями всех стран через сеть искусственных спутников Земли. По атомному времени проверяются все часы.

Таким образом, самое точное время определяется не астрономическим путем. Но его всегда согласуют с «астрономическим» средним солнечным временем, связанным с вращением Земли. Специальные службы времени следят за различием между средним солнечным и атомным временем. Когда оно приближается к 1 с (обычно это бывает раз в несколько лет), по специальному решению Международного бюро времени показания атомных часов меняют на целую секунду. Тем самым атомное время «подстраивается» под время, определяемое вращением Земли.

6.2. Типовая задача. Нахождение среднего солнечного времени.

Условие. В Москве часы показывают $T = 15$ ч 17 мин 8 августа. Чему равно среднее солнечное время в Иркутске?

Решение. В августе в Москве часы идут по летнему декретному времени.

Следовательно,

декретное время $T_{\text{Д}} = T - 1 \text{ ч} = 14 \text{ ч } 17 \text{ мин};$

поясное время $T_{\text{П}} = T_{\text{Д}} - 1 \text{ ч} = 13 \text{ ч } 17 \text{ мин};$

номер пояса (для Москвы) $n = 2;$

поясное время нулевого меридиана $T_0 = T_{\text{П}} - n = 11 \text{ ч } 17 \text{ мин};$

среднее солнечное время нулевого меридиана $T_{\text{ср.}, \lambda=0} = T_0;$

долгота Иркутска $\lambda = 104^\circ = 6 \text{ ч } 56 \text{ мин}$ (по карте);

среднее время в Иркутске $T_{\text{ср.}, \lambda} = T_0 + \lambda = 18 \text{ ч } 13 \text{ мин}.$

6.3. Календарь. В результате длительных и высокоточных измерений установлено, что продолжительность года (т. е. время, за которое Солнце совершает полный оборот по эклиптике) составляет 365 дней 5 ч 48 мин 46 с, или 365,2422 средних солнечных суток. Дробное число суток в году приводит к большим неудобствам. Календарный год, по которому живут и работают люди, обязательно должен содержать целое число суток, и при этом его продолжительность должна быть как можно ближе к действительной продолжительности года. Это достигается чередованием календарных лет с разным числом дней.

Было разработано несколько систем календарей, в которых год всегда содержит целое число суток. Мы живем по *григорианскому календарю (новый стиль)*, введенному в странах Европы в конце XVI в.

В григорианском календаре средняя продолжительность календарного года очень близка к действительной продолжительности года и составляет 365,2425 средних солнечных суток. Это число можно представить в таком виде: $365,2425 = 365 + \frac{1}{4} - \frac{3}{400}$. Чтобы обеспечить такую среднюю продолжительность года, в каждом году, номер которого не делится на 4, принимается 365 дней (*простой год*), а в остальных — 366 дней (*високосный год*). Средняя продолжительность года при этом равна $365\frac{1}{4}$ суток, как в юлианском календаре (старый стиль). Чтобы уменьшить ее на $\frac{3}{400}$ суток, три раза каждые 400 лет високосные годы делают простыми. Такими годами договорились считать те, номера которых оканчиваются на 00 и не делятся без остатка на 400. Например, 1700, 1800, 1900-й годы считаются простыми, а 1600, 2000, 2400-й — високосными. Таким образом,

за 400 лет набирается 303 года по 365 дней и 97 лет по 366 дней, т. е. в среднем

$$(365 \times 303 + 366 \times 97)/400 = 365,2425.$$

Это превышает истинную продолжительность года на 0,0003 суток, что дает расхождение в 1 сутки лишь за 3300 лет.

До 14 февраля 1918 г. Россия жила по *юлианскому календарю (старый стиль)*, который отличался от нового тем, что каждый четвертый год считался високосным (без исключений), так что средняя продолжительность календарного года составляла точно $365\frac{1}{4}$ суток. В настоящее время юлианский календарь отстает от григорианского на 13 дней. По новому и по старому стилю 2000 г. високосный, так что это различие сохранится вплоть до 28 февраля 2100 года, после чего оно достигнет 14 дней.

Юлианским календарем (старым стилем) продолжает пользоваться Русская православная церковь. Поэтому в России наряду, например, с новогодним праздником 31 декабря/1 января многие отмечают и “старый новый год” 13/14 января.

6.4. Типовая задача. Переход от дат старого к датам нового стиля.

Условие. А.С. Пушкин родился в Москве 26 мая 1799 г. Когда следует отмечать день его рождения по новому стилю?

Решение. В XVIII в. в Москве действовал старый стиль, в котором, в отличие от нового стиля, считались високосными годы 1800-й и 1900-й. Следовательно, в 1799 г. оба стиля различались не на 13 дней, как сейчас, а на 11 дней, и по новому стилю искомая дата — 6 июня.

6.5. Вопросы

1. Что такое звездные и солнечные сутки?
2. На сколько отличаются солнечные сутки от звездных?
3. Что такое средние солнечные сутки?
4. Равна ли разность поясных времен разности долгот?
5. Как отличается декретное время от летнего?
6. На сколько часов максимально различается время, по которому живут в нашей стране?
7. На чем основана современная шкала точного времени?

6.6. Упражнения

1. Считая движение Солнца по эклиптике равномерным, докажете, что солнечные сутки примерно на 4 мин превышают

- период осевого вращения Земли. А на сколько, если с точностью до секунды?
- 2*. На сколько секунд различается истинное солнечное время на восточной и западной окраинах Москвы, если протяженность города по долготе около 30 км?
Указание. Широта Москвы 56° . На экваторе 1° долготы примерно соответствует 110 км.
3. Торжественное открытие Пулковской обсерватории состоялось 19 августа 1839 г. по новому стилю. Какая это дата по старому стилю?
- 4*. Разработайте удобную календарную систему счета лет для Марса, приняв, что длина года на Марсе равна в точности 668,60 марсианских суток.

Основные выводы

Для определения видимых положений и движений светил на небе пользуются вспомогательным построением — небесной сферой, на которую проецируют наблюдаемые небесные объекты. Направление, параллельное оси вращения Земли и проходящее через центр небесной сферы, называют осью мира. Перпендикулярная ему плоскость экватора используется в качестве начала отсчета экваториальных координат (склонения и прямого восхождения). Небесная сфера удобна для описания положения и движения различных небесных тел.

Видимое положение светил на небе и их суточное движение, обусловленное вращением Земли вокруг оси, зависят от географической широты места наблюдения. Следствием движения Луны вокруг Земли является смена фаз Луны, связанная с изменением взаимного расположения Солнца и Луны.

Солнце и Луна иногда оказываются в близких или диаметрально противоположных областях неба. Тогда на Земле можно наблюдать солнечные и лунные затмения.

Видимое движение Солнца по эклиптике объясняется обращением Земли вокруг Солнца. Период этого обращения, называемый годом, используется в качестве единицы в системе измерения длительных промежутков времени (т.е. в календаре), а период осевого вращения Земли — для измерения коротких промежутков времени. Для удобства счета времени земной шар условно разделен на 24 часовых пояса, в пределах каждого из которых время считается одинаковым.

Глава 3

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

§ 7. Движение планет

7.1. Видимые движения планет. Уже в глубокой древности люди заметили, что, помимо Солнца и Луны, еще пять объектов на небе постоянно изменяют свое положение относительно звезд. Их называли *планетами*, что означает блуждающие (звезды). Римляне дали им имена своих богов: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. В древнем мире к планетам относили Солнце и Луну. Телескоп позволил открыть и другие планеты, не видимые невооруженным глазом.

Помимо общего суточного движения, планеты на фоне звезд описывают сложные петлеобразные пути (рис. 7.1), медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное движение*). В результате длительных наблюдений еще в дотелескопическую эпоху удалось выявить некоторые закономерности этих движений. Например, оказалось, что Меркурий никогда не удаляется от Солнца более чем на 28° , а для Венеры этот предельный угол равен 48° . Остальные планеты могут находиться на любых угловых расстояниях от Солнца, даже диаметрально противоположно Солнцу. В это время планеты, изменив направление движения, перемещаются среди звезд всегда попятно. Для каждой планеты длина дуги попятного движения имеет определенное значение. Для Марса она составляет около 14° , для Юпитера — 10° и для Сатурна — 7° .

Проверьте по рис. 7.1 приведенное выше значение дуги попятного движения Марса.

Уже в древности некоторые ученые подозревали, что сложность видимых движений планет связана со сложением движений планет и Земли вокруг Солнца. Таких взглядов, например, придерживался древнегреческий астроном Аристарх Самосский, живший в начале III в. до н.э. Однако в ту эпоху еще не

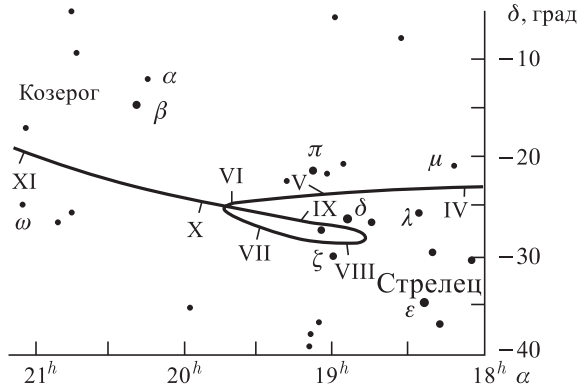


Рис. 7.1. Пример видимого движения Марса среди звезд. Римскими цифрами обозначено начало соответствующих месяцев

хватало данных для доказательства подобных идей. Поэтому более распространенными в древнем мире были взгляды греческого философа Аристотеля, который жил в IV в. до н. э. Он обобщил и развил представления о *геоцентрической системе мира*, утверждая, что Земля неподвижна и находится в центре мира. Кроме того, признавая шарообразность Земли, Аристотель не допускал возможности ее вращения вокруг своей оси. Все эти положения он обосновывал тем, что на Земле не наблюдается никаких проявлений возможных движений нашей планеты. Авторитет Аристотеля был настолько велик, что уверенность в непогрешимости его системы сохранялась в течение многих веков, вплоть до эпохи Возрождения.

Тщательная математическая разработка геоцентрической системы мира была выполнена греческим ученым Клавдием Птолемеем, который жил в Александрии во II в. н. э. Он изложил ее в своем знаменитом труде “Альмагест” (искаженное греческое *Μεγάλη σενταξις*, т. е. “Великое построение”).

Птолемеи исходил из утверждения древних ученых о том, что небесные тела могут двигаться только равномерно по окружностям (*эпициклам*). Для объяснения попятных движений планет центры эпициклов в его системе должны были двигаться по другим окружностям — *деферентам*, в общем центре которых покоится Земля. Для более точного согласования такой схемы с наблюдениями приходилось вводить дополнительные окружности (добавочные эпициклы). В целом получалась очень сложная схема, подобная колесикам часового механизма, общее вращение которых подбиралось так, чтобы как можно точнее объяснить

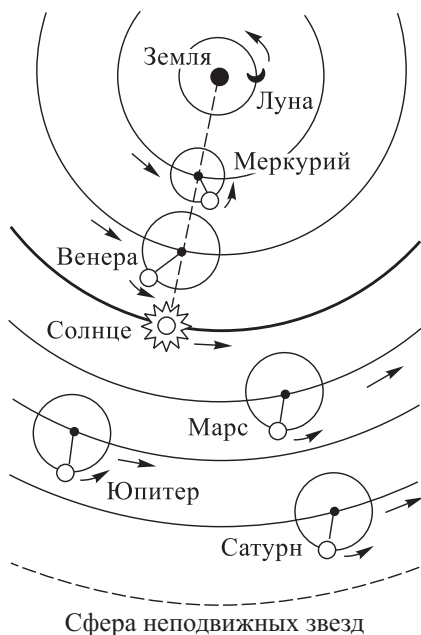


Рис. 7.2. Система Птолемея

видимое движение планет (рис. 7.2). Благодаря математической строгости и тщательности учета данных многовековых наблюдений система Птолемея позволяла достаточно хорошо предсказывать видимые положения планет на многие годы вперед. Более того, при ее разработке были найдены такие зависимости и соотношения, которые соответствуют действительным свойствам планетной системы, впоследствии созданной знаменитым польским ученым Николаем Коперником. Разумеется, точность этих предсказаний была невелика, однако она соответствовала возможностям измерений, проводимых невооруженным глазом при помощи простейших угломерных инструментов.

Геоцентрическая система мира господствовала в науке вплоть до эпохи Возрождения, т.е. до конца XV столетия. Ее живучесть во многом связана с тем, что сама идея движения Земли в пространстве оказалась очень трудной для восприятия и выглядела неубедительной, поскольку это движение не сказывалось заметным образом на обычных земных явлениях и к тому же нарушало привычный взгляд на Землю как на созданный Богом центр всего материального мира.

7.2. Система Коперника. В эпоху Возрождения началось активное движение за очищение науки от церковных догм. В астрономии произошла первая революция. Она связана с именем великого польского ученого Николая Коперника. Коперник глубоко изучил труд Птолемея и сам много наблюдал движение Солнца и планет. В результате огромной работы, занявшей почти всю жизнь ученого, он пришел к выводу, что система строения мира Птолемея принципиально неверна. В центре мира находится Солнце, а не Земля, и вокруг него обращаются все планеты вместе с Землей.

Система Коперника легко объясняла, почему Меркурий и Венера, которые ближе к Солнцу, чем Земля, в своем видимом движении никогда не удаляются от него дальше определенных угловых расстояний, а остальные планеты описывают на небе среди звезд петлеобразные пути (см. рис. 7.1).

Пользуясь рис. 7.3, объясните прямое и попятное движения планет.



Николай Коперник
(1473–1543)

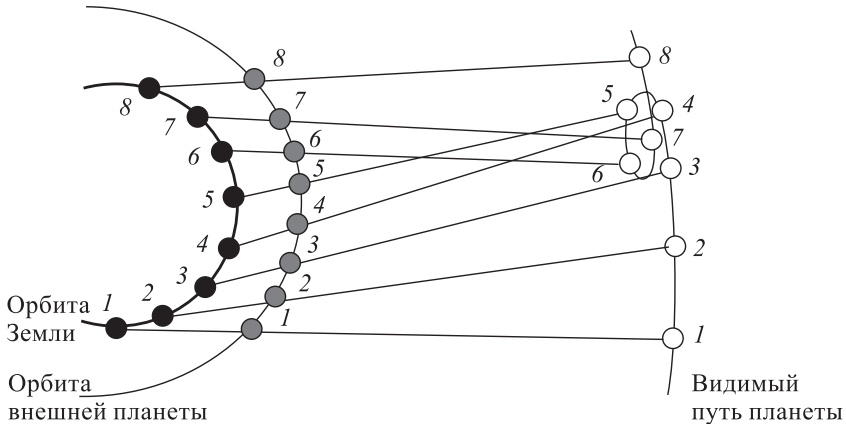
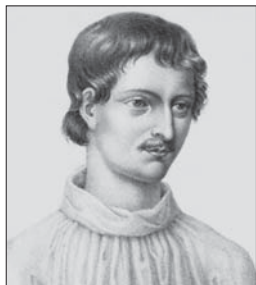


Рис. 7.3. Видимое петлеобразное движение планет

Ведущие умы эпохи Возрождения сразу же оценили огромную роль идей Коперника и его предшественников, став горячими сторонниками новой системы мира. Они заложили основы современного научного мировоззрения. Хорошо известно

имя итальянского мыслителя Джордано Бруно. Если Коперник низвел Землю до уровня рядовой планеты, то Бруно выступал со смелым утверждением, что Солнце — рядовая звезда. Вселенная не ограничена “сферой неподвижных звезд”, а безгранична. Развивая учение Коперника, Бруно с огромным энтузиазмом и убежденностью говорил о бесконечности Вселенной и бесчисленности миров в глубинах космоса, ставя при этом под сомнение догматы христианской церкви. Католической инквизицией он был обвинен в ереси и в 1600 г. сожжен на костре в Риме после долгих и безуспешных попыток заставить его покаяться в своих “заблуждениях”.



Джордано Бруно
(1548–1600)



Галилео Галилей
(1564–1642)

Последовательным коперниканцем был также великий итальянский ученый Галилео Галилей, который впервые использовал подзорную трубу (телескоп) для астрономических наблюдений. С ее помощью он, в частности, обнаружил четыре спутника Юпитера, обращающиеся вокруг планеты, наблюдал пятна на Солнце, открыл фазы Венеры, аналогичные лунным фазам, узнал о существовании гор на Луне. Все это сыграло большую роль в последующем принятии и широком распространении идей Коперника. Галилей первым осознал роль инерции — фундаментального свойства движущихся тел — и сформулировал важнейший физический принцип, утверждающий, что тело, на которое не действуют никакие силы, должно продолжать движение, не замедляясь, т.е. двигаться равномерно. Открытие закона инерции положило конец ошибочным аристотелевским основам динамики, согласно которым для поддержания движения любого тела требовалось постоянное действие на него внешней силы.

По Аристотелю, прекращение действия силы означало прекращение движения. На этом основании “доказывалась” непо-

движность Земли, поскольку считалось, что если бы Земля двигалась, то подброшенные вверх тела, потеряв с нею связь, тут же начинали бы отставать от нее, чего не наблюдается.

Труды Галилея помогли впоследствии Ньютону установить основные законы механики, открыть закон всемирного тяготения и объяснить причины движения планет.

7.3. Вопросы

1. Чем различаются прямое и попятное движения планет?
2. Наблюдается ли у Луны попятное движение?
- 3*. Посмотрите внимательно на рис. 7.2. Какие можно заметить закономерности в системе Птолемея, отражающие действительное строение Солнечной системы?
4. В чем заключается революционность взглядов Коперника?

§ 8. Взаимное расположение планет

8.1. Конфигурация светил. В системе Коперника Солнце играло роль центрального тела планетной системы. Наблюдаемое движение планет на фоне звезд кажется сложным, потому что мы его видим с движущейся Земли. Поэтому особое значение приобретают определенные взаимные расположения Солнца и планет, называемые *конфигурациями* (см. рис. 8.1).

1. *Соединение* — конфигурация, при которой Солнце и планета (или Луна) имеют одинаковые значения прямых восхождений, т.е. когда на небе они ближе всего к Солнцу. В частности, солнечное затмение может происходить лишь при соединении Луны с Солнцем. Объекты в соединении с Солнцем всегда находятся на минимальном угловом расстоянии от него, но не обязательно совпадают с ним. Луна и планеты движутся не точно по эклиптике, а лишь вблизи нее и во время соединения обычно проходят чуть выше или ниже Солнца, но изредка — за его диском или перед ним.
2. *Противостояние* — конфигурация, при которой прямые восхождения светила и Солнца различаются на 180° , или 12 ч.
3. Для внутренних планет (Меркурий и Венера) различают конфигурацию, соответствующую наибольшему удалению планеты от Солнца, называемую *элонгацией*, которая может быть восточной и западной в зависимости от того, с какой стороны от Солнца они находятся (точки *a* и *c* на рис. 8.1).



Рис. 8.1. Конфигурации планет

4. Для внешних планет удаление планеты от Солнца на прямой угол называют *квадратурой*, западной или восточной.

8.2. Синодический и сидерический периоды обращений.

Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями называется *синодическим периодом обращения* светила. О синодическом периоде обращения Луны уже шла речь в п. 4.1.

Промежуток времени, за который небесное тело совершает один полный оборот по орбите (в невращающейся инерциальной системе координат, или, как иногда говорят, относительно звезд), называется *звездным* или *сидерическим* (лат. *sideris* — звезда) *периодом обращения*.

Непосредственно из наблюдений определяются только синодические периоды обращения Луны и планет. Их значения были определены еще в глубокой древности.

Система Коперника позволила легко установить простое соотношение между синодическим и сидерическим периодами обращения. Рассмотрим наблюдаемое с Земли обращение вокруг Солнца более далекой (*внешней*) и более близкой к нему (*внутренней*) планеты (например, Марса и Венеры). Пусть в начальный момент времени Венера наблюдается с Земли в соединении с Солнцем, а Марс — в противостоянии, т. е. все четыре тела проецируются на линию $СМ_1$ (рис. 8.2). Если бы угловая скорость обращения по орбитам ω у всех планет была одинакова, то они все время сохраняли бы указанные выше конфигурации. В действительности же, чем ближе планета к Солнцу, тем больше ее орбитальная угловая скорость. Разность угловых скоростей определяет скорость изменения угла между направлениями от Солнца на планету и на Землю. Этот угол за промежуток вре-

мени, равный синодическому периоду обращения планеты (S), увеличивается от 0 до 2π (360°). Следовательно, за единицу времени он изменяется на $\omega = 2\pi/S$ радиан. Тогда, обозначая через T сидерический период обращения планеты, а через T_3 — земной год, получим для Венеры:

$$2\pi/T_V - 2\pi/T_3 = 2\pi/S_V,$$

или

$$1/T_V - 1/T_3 = 1/S_V,$$

а для Марса, который движется медленнее, чем Земля:

$$2\pi/T_3 - 2\pi/T_M = 2\pi/S_M,$$

или

$$1/T_3 - 1/T_M = 1/S_M.$$

Оба выражения можно объединить, взяв модуль разности и записав его для любых двух планет с сидерическими периодами обращения T_1 и T_2 :

$$|1/T_1 - 1/T_2| = 1/S.$$

При помощи этой формулы по наблюдаемому значению S синодического периода обращения планеты 2 при наблюдении ее с планеты 1 легко вычислить сидерический период обращения планеты 2 вокруг Солнца. Если планета наблюдается с Земли, то,

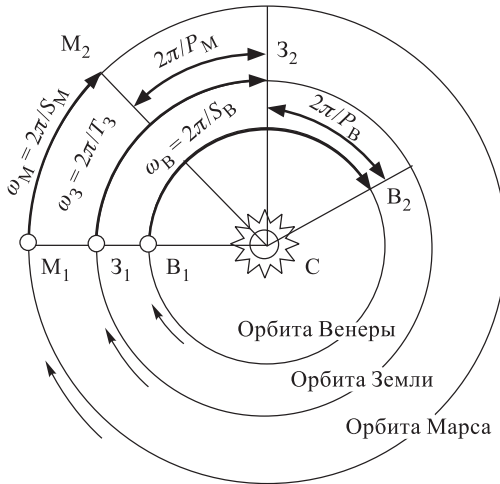


Рис. 8.2. К выводу соотношения между синодическим и сидерическим периодами обращения планет

принимая, что $T_1 = T_{\text{Зем}} = 1$ году, получим следующую формулу для синодического периода ее обращения, выраженного в годах:

$$1/S = |1 - 1/T_2|.$$

Полученная формула называется уравнением синодического движения.

Примечание. Замечательно, что это уравнение знал Птолемей и принял его как один из постулатов, на которых зиждется его система. Он утверждал, что этот постулат следует из наблюдений. Любопытно, что он фактически получил сидерические периоды обращений планет, зная синодические их периоды. Однако его система не предполагала возможности движения планет вокруг Солнца, и величине S он придавал иной смысл.

8.3. Типовая задача. Соотношение между сидерическим и синодическим периодами обращений.

Условие. Определить период обращения Луны вокруг Земли относительно звезд (сидерический месяц), если период смены фаз (синодический месяц) равен 29,5 суток.

Решение. Синодический месяц (P) больше звездного (S) из-за движения Земли вокруг Солнца, происходящего с периодом T в ту же сторону, что и Луны вокруг Земли. Поэтому соотношение между периодами имеет вид

$$1/S - 1/T = 1/P, \quad \text{или} \quad 1/S = |1/P + 1/T|.$$

Подставляя в полученную формулу значения $T = 365\frac{1}{4}$ сут. и $P = 29,5$ сут., находим, что $S = 27,3$ дня.

8.4. Расстояния до планет. Найдя правильное объяснение видимых движений планет, Коперник впервые в истории астрономии смог установить верные соотношения между расстояниями планет от Солнца. Это было важным достижением, принципиально невозможным в системе Птолемея. Основную идею определения относительных расстояний до планет проще всего уяснить на примере внутренней планеты, например Венеры. В среднем наибольшее угловое удаление этой планеты от Солнца (C) (рис. 8.3) составляет 46° ; следовательно, под таким углом виден с Земли ($З$) радиус орбиты Венеры, когда луч зрения $ЗВ$ касается орбиты. Так как треугольник $ВСЗ$ прямоугольный, то $СВ = СЗ \sin 46^\circ = 0,72СЗ$, и расстояние до Венеры составляет $0,72$ расстояния от Земли до Солнца.

Строго говоря, удаление Венеры от Солнца бывает то немного больше 46° , то меньше. Это означает, что орбиты Земли и Венеры — не точно круги, и расстояние планет от Солнца

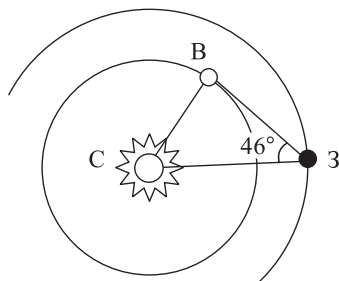


Рис. 8.3. Принцип определения расстояния до Венеры

меняется в некоторых пределах. У Меркурия эти пределы отличаются весьма заметно — от 0,31 до 0,47 расстояния от Солнца до Земли. Поэтому говорят о средних расстояниях планет от Солнца.

Среднее расстояние Земли от Солнца называют *астрономической единицей* и обозначают 1 а. е.

В астрономических единицах измеряют расстояния до тел Солнечной системы.

Для планет, находящихся от Солнца дальше Земли, определение расстояний в системе Коперника также сводится к несложной геометрической задаче. Ясно, что чем дальше от нас находится космический объект, тем меньше дуга его попятного движения, которая фактически отражает движение земного наблюдателя вокруг Солнца. Это хорошо иллюстрирует рис. 8.4, на котором изображен путь кометы Галлея на фоне звездного неба во время ее приближения к Солнцу. Чем ближе она к Солнцу и Земле, тем шире “размах” годичной петли на траектории кометы. В равной степени это относится и к планетам.

Таким образом, в системе Коперника удалось измерить периоды обращения планет вокруг Солнца и расстояния до них, выраженные в расстояниях от Земли до Солнца (см. Приложение, табл. 2).

8.5. Определение расстояний до тел Солнечной системы.

По дугам попятных движений или по максимальным угловым отклонениям планет от Солнца можно определить лишь относительные расстояния, измеренные в астрономических единицах. Расстояния до планет в линейной мере (в метрах или километрах) впервые были получены методом тригонометрического параллакса.

Параллаксом объекта называется угол между двумя направлениями, под которыми объект виден из двух различных пунк-

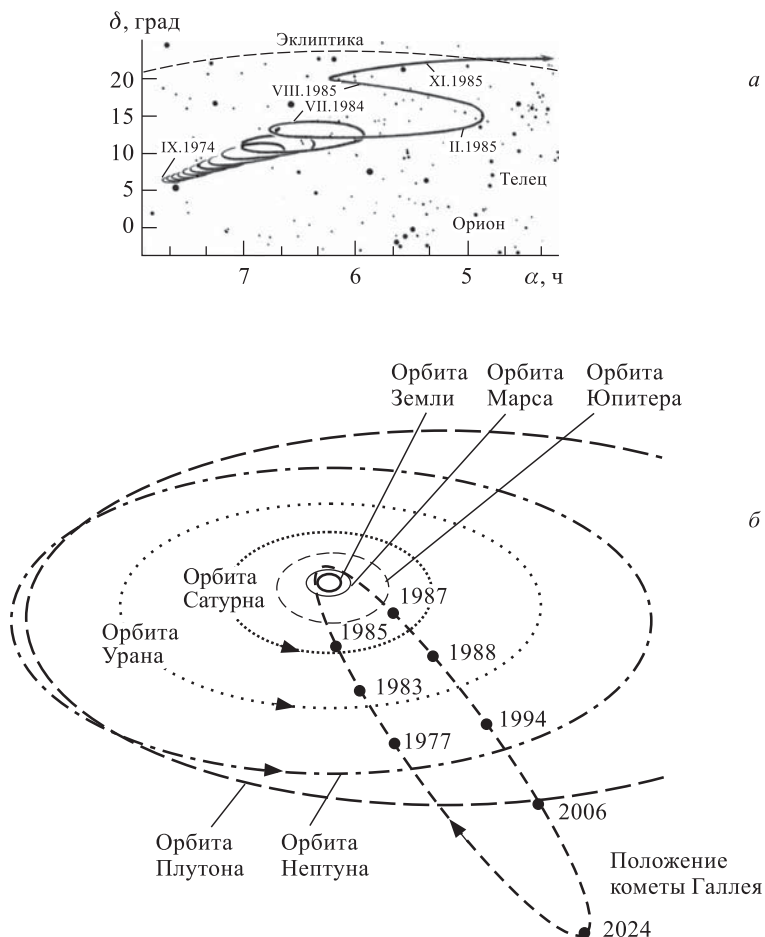


Рис. 8.4. Орбита кометы Галлея и ее видимый путь по небу

тов наблюдения (угол p на рис. 8.5). Расстояние между этими пунктами, выраженное в линейной мере, называется *базисом*. Понятие параллакса используется при составлении топографических планов и карт на основании геодезических измерений. Зная базис и углы, которые он образует с двумя направлениями на объект (рис. 8.5), легко из треугольника ABC найти расстояние до удаленного недоступного предмета (точка C).

При определении расстояний до тел Солнечной системы методом тригонометрического параллакса одну и ту же планету наблюдают одновременно из разных пунктов Земли или из одно-

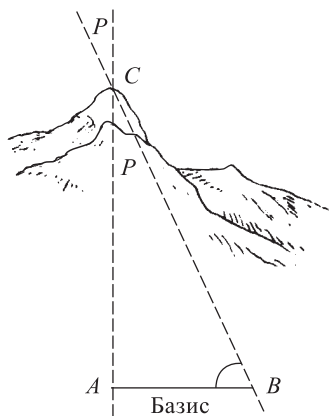


Рис. 8.5. Принцип определения расстояния по параллактическому смещению.
Угол p — параллакс

го и того же места, но спустя несколько часов, когда положение наблюдателя изменилось вследствие осевого и орбитального движения Земли.

Из треугольника ABC (рис. 8.5), зная углы A и B , легко найти угол C , т. е. параллакс для базиса AB . При наблюдении планеты параллакс p равен ее угловому смещению на фоне далеких звезд, вызванному перемещением наблюдателя.

Во второй половине XX века для определения расстояний до тел Солнечной системы начал применяться метод радиолокации, обеспечивший наиболее точные оценки расстояний. Измеряя время τ , за которое посланный с Земли радиолокационный импульс достигает Луны или какой-либо планеты, отражается и возвращается на Землю, вычисляют расстояние d до этого тела по формуле

$$d = c\tau/2,$$

где c — скорость радиоволн (скорость света), равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

Посредством радиолокации найдены точные значения расстояний до тел Солнечной системы, что позволило уточнить значение астрономической единицы:

$$1 \text{ а. е.} = 149\,597\,870 \text{ км (около } 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м)}.$$

8.6. Вопросы

1. Прохождение каких планет по диску Солнца можно наблюдать с Земли?

2. Можно ли из непосредственных наблюдений планеты определить ее сидерический период обращения?
3. Какие существуют способы определения расстояний до тел Солнечной системы?

8.7. Упражнения

1. Определите сидерический период обращения планеты, если он равен синодическому периоду. Какой реальной планете Солнечной системы это условие наиболее соответствует?
2. Карликовая планета Церера, имеет сидерический период обращения 4,6 года. Вычислите его синодический период и выразите полученное значение в сутках.
3. Некий астероид имеет сидерический период 1,077 года. Каков синодический период его обращения?
4. Найдите приближенные значения линейных размеров Солнца и Луны, принимая, что их видимые диаметры одинаковы и составляют $0,5^\circ$. Расстояние до Луны считать равным 384 400 км.
5. Оцените максимальное параллактическое смещение Марса (в угловых секундах), если его расстояние до Земли составляет 100 млн км и он наблюдается одновременно из двух точек Земли, удаленных друг от друга на 6000 км.

§ 9. Законы движения планет

9.1. Законы Кеплера. В конце XVI в. датский астроном Тихо Браге достиг наибольшей точности измерения углов на небе, возможной при наблюдениях без применения оптики. Ошибки измеренных им координат планет не превышали $2'$ дуги.



Иоганн Кеплер
(1571–1630)

Под таким углом виден отрезок длиной 1 см с расстояния 17 м. Тихо Браге передал результаты уникальных наблюдений Марса своему помощнику, немецкому астроному Иоганну Кеплеру.

Тихо Браге надеялся, что эти наблюдения подтвердят разработанную им систему мира, в которой все планеты, кроме Земли, обращаются вокруг Солнца, но при этом само Солнце, как и в системе Птолемея, вместе со всеми планетами движется вокруг неподвижной Земли, находящейся в центре мира. Система Тихо Браге явля-

лась промежуточной между системами Птолемея и Коперника. Она также позволяла предсказывать приближенные расположения планет. Если бы эта система была создана до появления труда Коперника, она была бы шагом вперед по сравнению с системой Птолемея. Однако выдвинутая уже после выхода в свет бессмертного труда Коперника, система Тихо Браге была шагом назад в развитии научных представлений о строении мира.

Кеплер был убежден в правоте Коперника и выполнил огромное число расчетов относительных расстояний от Солнца до Земли и до Марса, основываясь на гелиоцентрической системе. Надо учесть, что в эпоху Кеплера не было тригонометрических таблиц, и он фактически впервые рассчитал их. Получив множество значений относительных расстояний сначала между Землей и Солнцем, а затем между Солнцем и Марсом, Кеплер смог вычертить орбиты Земли и Марса вокруг Солнца и получить форму траекторий. Испробовав разные кривые, он нашел, что планеты движутся вокруг Солнца не по кругам, как принимал Коперник, а по эллипсам.

Эллипс — плоская замкнутая кривая, замечательным свойством которой является постоянство суммы расстояний от любой ее точки до двух особых внутренних точек, называемых *фокусами*.

Отрезок прямой, соединяющий наиболее удаленные друг от друга точки эллипса, называется его *большой осью*.

Среднее расстояние планеты от Солнца равно половине длины большой оси орбиты.

Почти 24 года потратил Кеплер на обработку наблюдений Марса, выполненных Тихо Браге. В итоге он установил три закона движения планет.

1. **Каждая планета движется вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.**
2. **Отрезок прямой между планетой и Солнцем описывает площади, пропорциональные времени** (т. е. равные площади за равные промежутки времени). Тем самым Кеплер обнаружил неравномерность движения планеты по орбите: приближаясь к Солнцу, она движется быстрее, а удаляясь — медленнее.
3. **Квадраты времен обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца.** Это означает, что если периоды обращения двух планет T_1 и T_2 , а средние расстояния от Солнца A_1 и A_2 , то

$$T_1^2/T_2^2 = A_1^3/A_2^3.$$

Используя принцип инерции Галилея и законы Кеплера, следующий большой шаг в развитии астрономии и физики сделал Ньютон, введя в науку представление о *гравитационном взаимодействии тел*.

9.2. Закон всемирного тяготения. Представление о том, что между телами действуют силы притяжения, а планеты движутся вокруг Солнца, из-за того что оно их притягивает, возникло задолго до Ньютона. Кеплер, например, считал, что вес тел — это сила их притяжения Землей, аналогичная силе магнитного притяжения. Однако он полагал, что сила притяжения между телами убывает обратно пропорционально первой степени расстояния между ними. Заслуга Ньютона в том, что он сумел количественно определить силу взаимодействия между телами, показал, что она убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, и доказал универсальность закона тяготения в природе, поскольку он позволил естественно объяснить наблюдаемые особенности движения Луны и планет.

Закон всемирного тяготения был сформулирован и доказан на основе астрономических наблюдений.

Сначала Ньютон рассмотрел движение Луны и показал, что центростремительное ускорение, с которым она движется по орбите, меньше ускорения свободного падения тел на поверхности Земли примерно в 3630 раз. Это число оказалось близким к квадрату расстояния от Земли до Луны, выраженному в радиусах Земли: $60,3^2 = 3636$. Отсюда Ньютон сделал вывод, что сила, удерживающая Луну при ее движении вокруг Земли, имеет ту же природу, что и сила тяжести (гравитация), и что действие этой силы убывает как квадрат расстояния. Затем, пользуясь законами Кеплера, Ньютон доказал, что для их объяснения достаточно предположить, что та же зависимость имеет место и при движении планет вокруг Солнца.

Если M_1 и M_2 — массы тел, а r — расстояние между их центрами, то закон всемирного тяготения записывается в виде

$$F = GM_1M_2/r^2,$$

где $G = 6,6710^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ и называется *гравитационной постоянной*.

Важной заслугой Ньютона является доказательство того, что из закона всемирного тяготения следуют все три закона Кеплера.

Следует иметь в виду, что эта формула является точной лишь для частиц, имеющих исчезающе малые размеры по сравнению с расстоянием между ними. Однако она строго справедлива и для

тел конечного размера, внутри которых вещество распределено сферически симметрично. Для астрономических объектов эти условия почти всегда выполняются с большой точностью, хотя в случае сравнительно близких друг к другу тел (например, Земли и Луны), значения силы гравитационного взаимодействия слегка отличаются от рассчитанных по приведенной выше формуле. Это связано с неоднородностью и несферичностью распределения масс внутри них.

9.3. Вопросы

1. На чем основывался Кеплер при выводе своих законов?
2. Какие астрономические наблюдения использовал Ньютон при выводе закона всемирного тяготения?

9.4. Упражнения

- 1*. Докажите, что из второго закона Кеплера следует вывод: планета, двигаясь по своей орбите, имеет максимальную скорость на самом близком расстоянии от Солнца, а минимальную — на самом большом расстоянии. Как этот вывод согласуется с законом сохранения энергии?
2. Меняется ли скорость планеты, движущейся по круговой орбите? Является это движение равномерным или равноускоренным?
3. Сравнив расстояния от Солнца до Земли и до других планет с периодами их обращения (см. табл. 3 Приложения), проверьте выполнение третьего закона Кеплера.
4. Вычислите ускорения, которые: а) Солнце сообщает Земле, притягивая ее; б) Земля сообщает Солнцу, притягивая его. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, масса Солнца в 330 000 раз больше.

§ 10. Движение тел под действием гравитации

10.1. Задача двух тел. Только с открытием Закона всемирного тяготения и основных законов механики появилась возможность математически рассчитать скорости и траектории тел, движущихся под действием сил гравитации.

Все тела в космическом пространстве притягивают друг друга. Поэтому не существует таких тел, которые бы двигались строго равномерно и прямолинейно.

Рассмотрим, как движутся под действием силы взаимного тяготения два тела с массами M и m (будем называть их телами

M и m). Эта задача носит название задачи двух тел. Ускорение a тела m вызывается силой притяжения со стороны M , т. е.

$$F = GMm/r^2 = ma. \quad (10.1)$$

Следовательно,

$$a = GM/r^2. \quad (10.2)$$

Тело m также действует на тело M , сообщая ему ускорение

$$a_1 = Gm/r^2. \quad (10.3)$$

Отнесем массу M к более массивному объекту (звезда, Солнце, большая планета), а m — к его спутнику. Из формул 10.2 и 10.3 видно, что ускорения a и a_1 относятся как массы M и m . Иными словами, ускорение всегда испытывают оба притягивающихся друг к другу тела, но с наибольшим ускорением движется тело меньшей массы m . Главное тело с массой M движется с ускорением в M/m раз меньшим, и нередко этим ускорением можно пренебречь, считая тело M неподвижным.

Ньютон математически доказал, что под действием тяготения тело m может двигаться относительно M по кривым трех типов: эллипс, парабола или гипербола. Окружность является частным случаем эллипса. Формы этих кривых можно получить сечением конуса плоскостью, поэтому их принято называть *коническими сечениями*. Эллипс получается при пересечении плоскостью всех образующих одной полости конуса, так что линия пересечения оказывается замкнутой. При пересечении плоскостью, параллельной какой-либо образующей конуса получается одна незамкнутая кривая — *парабола*. При пересечении плоскостью обеих полостей конуса получаются две незамкнутые кривые — ветви *гиперболы*. Движение происходит по той ветви, которая обращена вогнутостью к притягивающему телу.

Таким образом, Ньютон уточнил и обобщил первый закон Кеплера, который теперь можно сформулировать следующим образом.

Под действием сил тяготения всякое тело движется по одному из конических сечений, т. е. по одной из трех кривых: эллипсу (или окружности), параболе или гиперболе. Притягивающее тело всегда находится в соответствующем фокусе кривой.

В частности, движение тела m вокруг M может происходить по круговой орбите. Окружность — это предельный случай эллипса, когда оба фокуса эллипса совпадают.

Рассмотрим сначала задачу двух тел для кругового движения.

Пусть тело массы $m \ll M$ движется с линейной скоростью v_k вокруг тела M по окружности радиуса r_k (рис. 10.1). Это возможно только в том случае, если движение происходит под действием силы, создающей центростремительное ускорение $a = v_k^2/r_k$. Единственная сила, создающая ускорение, — сила тяготения, равная GMm/r^2 . Приравнявая v_k^2/r_k к ускорению GM/r_k^2 , создаваемому тяготением, получаем

$$v_k^2 = GM/r_k. \quad (10.4)$$

Мы получили важный вывод: круговое движение возможно при строго определенном значении скорости движения, зависящей от радиуса орбиты и массы центрального тела.

Скорость, которую необходимо сообщить телу для вывода на круговую орбиту, радиус которой равен радиусу Земли, называется первой космической скоростью v_1 :

$$v_1 = \sqrt{GM_3/R_3}; \quad v_1 = 7,9 \text{ км/с}, \quad (10.5)$$

где M_3 — масса Земли.

Представим себе, что из точки A на расстоянии r_0 от центра тела массы M производят запуски искусственных спутников с различными значениями начальной скорости v_0 , перпендикулярной r_0 (рис. 10.2).

Очевидно, что если

$$v_0 < v_k, \quad (10.6)$$

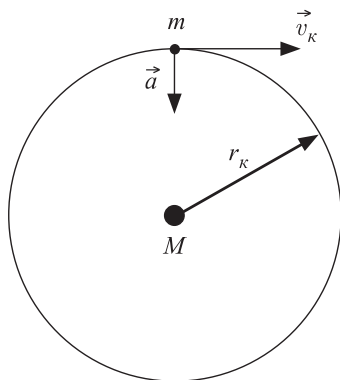


Рис. 10.1. Схема кругового движения тел

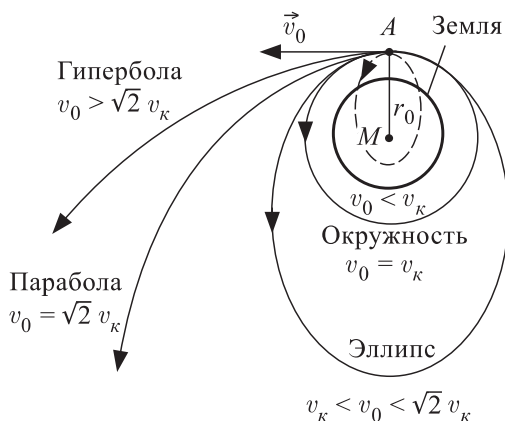


Рис. 10.2. Типы орбит

то тело движется медленнее, чем по круговой орбите, и эллипс орбиты оказывается внутри круга радиуса r_0 , а тело M — в более дальнем от точки A фокусе. При

$$v_0 > v_k \quad (10.7)$$

движение быстрее кругового, и эллипс орбиты оказывается вне круга v_0 , а тело M находится в ближнем к точке A фокусе этого эллипса.

Однако эллиптическое движение возможно только при значениях v_0 , меньших некоторого предела, называемого *параболической скоростью*, а для Земли — *второй космической скоростью*. Эта скорость равна

$$v_2 = \sqrt{2GM/r_0} = \sqrt{2} v_k. \quad (10.8)$$

При запуске со второй космической скоростью тело m движется по незамкнутой кривой — параболе — и навсегда покидает тело M .

Если

$$v_0 > \sqrt{2GM/r_0}, \quad (10.9)$$

то тело m движется по гиперболе и также уходит от тела M .

На основании закона всемирного тяготения и законов механики Ньютон объяснил не только первый, но и два других закона Кеплера.

Покажем выполнение третьего закона Кеплера для случая кругового движения со скоростью v_k .

Мы уже знаем из формулы (10.4), что $v_k^2 = GM/r_k$. Если период обращения тела m вокруг тела M составляет T , то линейная скорость движения этого тела по орбите равна

$$v_k = 2\pi r_k / T. \quad (10.10)$$

Подставляя это выражение в приведенную выше формулу для v_k^2 , получим

$$(2\pi r_k / T)^2 = GM / r_k,$$

или

$$r_k^3 / T^2 = GM / 4\pi^2. \quad (10.11)$$

Для эллиптического движения эта формула также справедлива, если вместо радиуса окружности r_k подставить большую полуось A эллиптической орбиты. Тогда получим соотношение, которое можно сформулировать так: *куб большой полуоси орбиты тела, деленный на квадрат периода его обращения и на массу центрального тела, есть величина постоянная*:

$$A^3 / T^2 M = G / 4\pi^2. \quad (10.12)$$

Если массой меньшего тела m нельзя пренебрегать по сравнению с массой центрального M , то в третий закон Кеплера, как показал Ньютон, вместо массы M войдет сумма масс $(m + M)$:

$$A^3 / T^2 (M + m) = G / 4\pi^2. \quad (10.13)$$

Третий закон Кеплера сыграл исключительно важную роль в астрономии, позволив на основании наблюдаемых значений расстояний и периодов находить массы — важнейшие характеристики небесных тел.

10.2. Небесная механика. В XVIII в. происходит быстрое развитие *небесной механики*, изучающей движения небесных тел с учетом их взаимного притяжения.

Математический аппарат небесной механики в XVIII и XIX вв. достиг большого совершенства, и появилась возможность решения сложных астрономических задач. Некоторые из них имели принципиальное значение и стали кардинальной проверкой правильности теории движения небесных тел. Так, на основании трудоемких расчетов английский астроном Эдмонд Галлей пришел к заключению, что ряд ранее наблюдавшихся комет в действительности представляет собой одну комету, которая обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой эллиптической орбите. Он рассчитал ее орбиту и срок нового появления. В 1758 г. эта комета снова появилась, как и было

предсказано Галлеем. С тех пор она носит его имя. Так было обнаружено, что кометы входят в состав Солнечной системы и их движение подчиняется закону всемирного тяготения.

Триумфом небесной механики было открытие восьмой планеты Солнечной системы — Нептуна — на основании теоретических расчетов. Основой для них послужили отклонения наблюдаемого движения самой далекой из известных в то время планет — Урана — от теоретически вычисленного. Было высказано предположение, что имеется неизвестное небесное тело, которое своим притяжением искажает (возмущает) движение Урана. В 1846 г. положение этой гипотетической планеты практически одновременно было определено путем расчетов независимо друг от друга двумя астрономами: Леверье во Франции и Адамсом в Англии. Когда телескоп был наведен в соответствующую точку неба, обнаружилась ранее неизвестная планета. Ее назвали Нептуном.

Открытие Нептуна было великолепным подтверждением теории движения небесных тел.

В настоящее время небесная механика позволяет рассчитывать движения не только естественных тел Солнечной системы, но и искусственных космических аппаратов. Траектории движения последних иногда имеют чрезвычайно сложный характер из-за одновременно действующих сил притяжения со стороны Земли, Луны, Солнца и планет.

10.3. Вопросы

1. Как изменилась формулировка законов Кеплера после их уточнения на основании закона всемирного тяготения? Какие из уточнений связаны с их обобщением, а какие — с более точными числовыми соотношениями?
2. Какие задачи решает небесная механика?

10.4. Упражнения

1. Какую скорость надо сообщить космическому аппарату, чтобы он навсегда покинул Землю?
2. Вычислите первую и вторую космические скорости для Луны, масса которой в 81 раз, а радиус в 4 раза меньше, чем у Земли.
3. Определите период обращения ИСЗ, движущегося по круговой орбите на высоте 20 000 км, сравнив его с периодом обращения Луны, расстояние до которой примите равным 400 000 км.

4. Большая полуось орбиты спутника — 100 000 км. Каков период его обращения?

§ 11. Орбиты космических аппаратов. Космические исследования

11.1. Движение искусственных небесных тел. Без знания небесной механики нельзя рассчитать траектории космических аппаратов (КА), ракет и орбитальных станций, невозможно осваивать космическое пространство.

Идея применения ракетной техники для запуска пилотируемых аппаратов в космическое пространство была обоснована в работах нашего замечательного соотечественника К. Э. Циолковского. Однако на практике задача посылки аппаратов в космос оказалась технически трудновыполнимой. Ведь минимальная скорость, которую для этого надо сообщить телам, — первая космическая скорость — в несколько раз превышает скорость артиллерийского снаряда.

Первый в истории искусственный спутник Земли (ИСЗ), возвестивший начало космической эры, был запущен в СССР 4 октября 1957 г. Вскоре были созданы космические ракеты с начальной скоростью запуска, равной и даже большей, чем вторая космическая. Космические аппараты, выведенные такими ракетами на орбиты, смогли уже навсегда покинуть Землю и совершать полеты сначала к Луне, а затем к Венере, Марсу и другим планетам.

В настоящее время в космическом пространстве движутся тысячи аппаратов, созданных человеком, главным образом в СССР (России) и в США. Большая часть из них обращается вокруг Земли по эллиптическим орбитам. Форма орбит выбирается в зависимости от конкретных задач, выполняемых КА. Обычно ближайшая к Земле точка орбиты (*перигей*) находится на высоте не менее 200 км. На меньших высотах спутники испытывают сильное тормозящее влияние земной атмосферы, быстро теряют скорость и падают на Землю.

11.2. Практическое значение космических исследований.

Использование ИСЗ оказалось очень удобным и рентабельным для многих отраслей народного хозяйства. При помощи КА можно получать изображения больших участков земной поверхности (рис. 11.1). Через ИСЗ устанавливают надежную радио- и телесвязь между отдаленными пунктами Земли или между океанскими судами и материком, осуществляют прием радио-

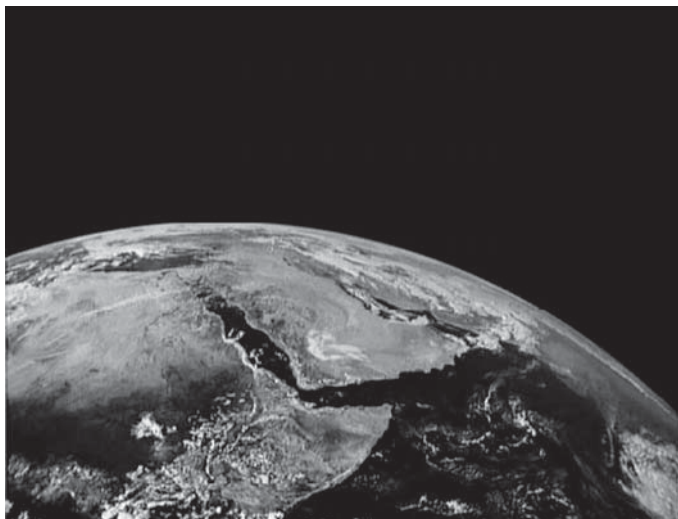


Рис. 11.1. Участок земной поверхности (фотография из космоса)

и телепередач на большие расстояния. Метеорологические спутники следят за перемещением облачного покрова и изменением температуры различных районов планеты. Поступающая от них информация используется для составления прогнозов погоды. Специализированные ИСЗ используются для составления точных карт и для определения географических координат различных объектов. Из космоса проводятся географические и геологические исследования планеты, слежение за морями и океанами, за таянием льдов, за ростом и созревaniem сельскохозяйственных культур.

Системы специализированных навигационных спутников, разрабатываемые в ряде стран, позволяют с очень большой точностью определять местоположение различных объектов на Земле, принимающей с помощью специальной аппаратуры радиосигналы со спутников. Точное определение координат широко используется в самых различных областях практической деятельности — от составления подробных планов местности до слежения за перемещением любых объектов, например автомобиля на городских улицах.

Этим далеко не исчерпываются все возможности применения ИСЗ.

Для ретрансляции радио- и телевизионных сигналов запускаются *геостационарные спутники*, радиус орбит которых составляет около 42 000 км, а плоскость совпадает с плоскостью

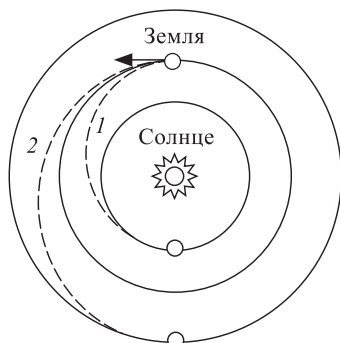


Рис. 11.2. Оптимальные траектории полета к внутренней (1) и внешней (2) планете

земного экватора. Период обращения этих ИСЗ равен периоду осевого вращения Земли (т. е. звездным суткам, или 23 ч 56 мин). Поэтому, двигаясь в сторону вращения Земли, такой *геостационарный* спутник оказывается неподвижным относительно земной поверхности, он как бы “висит” над некоторой точкой экватора. Это дает возможность поддерживать круглосуточную связь со спутником с помощью неподвижных (стационарных) радиоантенн, направленных в ту точку неба, где находится спутник.

Запуск космических аппаратов осуществляется при помощи ракет, состоящих из нескольких ступеней, или реактивных аппаратов многоразового использования, сочетающих возможности самолета и ракеты (космические челноки “Шаттл”, США).

Начальный участок траектории, на протяжении которого работают ракетные двигатели, называется *активным*. На этом участке, помимо сил притяжения Земли и сопротивления воздуха, на КА воздействует еще и сила тяги ракетного двигателя. Когда скорость КА достигает заданной величины и направления, двигатели выключаются и КА начинает свободный полет под действием только одних сил гравитации. Аппарат движется по траектории, которую можно рассчитать методами небесной механики. При полете к другим планетам обычно выбираются энергетически наиболее выгодные траектории, которыми являются касательные к орбитам Земли и другой планеты (рис. 11.2). Свободный полет КА может продолжаться сколь угодно долго без всякой затраты энергии, если на пути его движения не встретится какое-либо другое космическое тело.

Когда КА удаляется на большое расстояние от Земли, становятся существенными действующие на него силы притяжения

Луны, Солнца и тех планет, к которым он приближается. В этом случае равнодействующая всех сил равна векторной сумме сил гравитационного притяжения всеми этими телами. По второму закону Ньютона эта равнодействующая определяет вектор ускорения аппарата. Из-за того что все тела движутся относительно КА, расстояния до них и направления на них непрерывно меняются. Это значительно усложняет расчеты движения КА и требует использования быстродействующих компьютеров для управления КА.

Если слежение за КА показывает, что его траектория отклоняется от расчетной, то обычно в определенный момент на короткое время включают специальный ракетный двигатель КА и, слегка изменяя скорость, выводят его на расчетную траекторию. Такая процедура называется *коррекцией* траектории. Участок траектории, на котором она проводится, называется активным. При полете КА к другим планетам обычно проводят несколько коррекций траектории, чтобы аппарат подошел к планете в определенное время и приблизился на заданное расстояние с требуемой скоростью.

В настоящее время благодаря успехам космической техники созданные человеком КА исследовали с близкого расстояния окрестности всех больших планет. На самое большое расстояние от Земли успел удалиться аппарат “Вояджер-1”, запущенный в США еще в 1977 г. Расстояние до него возрастает примерно на 3,6 а. е. в год, и к 2008 г. составило чуть больше 100 астрономических единиц. Это самое далекое от Земли тело, созданное человеком.

Исследование космического пространства в большой степени приобретает международный характер. Разработка и запуски космических аппаратов являются дорогостоящими научными экспериментами. Совместные работы в космосе по международным программам не только дают ощутимый экономический эффект, но также играют огромную роль, сближая различные страны на пути решения глобальных общегосударственных задач.

11.3. Вопросы

1. Почему с точки зрения затраты энергии выгоднее запускать ИСЗ с запада на восток?
2. Первый ИСЗ совершал один оборот вокруг Земли за 1,5 ч. Может ли современный космический аппарат облететь Землю быстрее?

3. Можно ли запустить ИСЗ, который, вращаясь вокруг Земли, все время “висел” бы над Москвой?
4. В каком направлении (по отношению к направлению Земля–Солнце) энергетически выгодно запускать КА:
а) к Марсу; б) к Меркурию?

11.4. Упражнения

1. Определите высоту над Землей и скорость движения спутника на геостационарной орбите.
Указание: воспользуйтесь значением первой космической скорости и формулой для скорости движения по круговой орбите в задаче двух тел.
- 2*. Рассчитайте время перелета до Венеры и до Марса (в годах) по траекториям, изображенным на рис. 11.2. (радиусы орбит Венеры и Марса считать равными 0,7 а.е. и 1,5 а.е. соответственно).
3. Используя приведенные в тексте данные, переведите скорость аппарата “Вояджер-1” в единицы км/с.

Основные выводы

Первые попытки объяснить сложные видимые движения планет были предприняты еще в древности. Непосредственно из наблюдений можно было установить только синодический период повторяемости различных конфигураций (положений) планет относительно Солнца (соединение, противостояния и т. д.). Верные представления о движении тел Солнечной системы сложились лишь в XVI–XVII вв. благодаря трудам Коперника, Кеплера, Галилея и Ньютона.

Коперник показал, что видимые перемещения планет по небу объясняются их обращением вокруг Солнца, наблюдаемым с движущейся Земли. Система Коперника позволила установить соотношение между синодическим и сидерическим периодами обращения планет, а также найти относительные расстояния планет от Солнца. После того как удалось измерить параллаксы ближайших планет и размеры орбиты Земли, стало возможным выражать расстояния до планет в линейных единицах.

Кеплер на основании наблюдений сформулировал три важных закона обращения планет вокруг Солнца. Галилей открыл свойство инерции механического движения, а Ньютон сформулировал основные законы механики и закон всемирного тяготения. Эти законы легли в основу механики, а также важного раздела астрономии — небесной механики, целью которой является

расчет траекторий движения (орбит) космических тел (как естественных, так и искусственных) и их положений на орбитах.

В общем случае два притягивающих друг друга тела могут двигаться по одному из конических сечений. У планет скорость движения по орбите тем больше, чем они ближе к Солнцу.

Движение космических аппаратов подчиняется тем же законам, что и движение планет. Развитие космической техники открыло новые широкие возможности для науки и народного хозяйства.

МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 12. Исследования электромагнитного излучения небесных тел

12.1. Шкала электромагнитных волн. Подавляющая часть наших знаний о физической природе космических объектов получена путем анализа приходящего от них света или других видов электромагнитного излучения.

Свет — сложное физическое явление: с одной стороны, это электромагнитные волны, с другой стороны, свет обладает свойствами частиц: он испускается и поглощается только отдельными порциями, которые характеризуются определенным значением энергии и импульса. Поэтому всякое излучение можно рассматривать и как волну, и как поток отдельных частиц — *фотонов (квантов)*.

В вакууме электромагнитное излучение распространяется всегда и по всем направлениям с одинаковой скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Напомним, что всякая волна характеризуется частотой ν и длиной волны λ , между которыми существует зависимость

$$\nu \cdot \lambda = c.$$

Энергия фотона пропорциональна частоте излучения и обратно пропорциональна длине его волны.

При помощи специальных оптических приборов — спектрографов — излучение можно разложить на составляющие его электромагнитные колебания разных длин волн. Результатом такого разложения является полоска спектра, вдоль которой меняется цвет. Радуга, часто наблюдаемая на небе после дождя, — пример естественного спектра, получающегося при разложении света Солнца множеством капелек воды на лучи различных цветов благодаря зависимости коэффициента преломления воды от длины волны. Для количественных оценок спектр обычно пред-

ставляется в форме графика распределения энергии излучения по длинам волн или частотам.

Цвет видимого излучения определяется длиной волны. Глаз человека воспринимает излучение с длиной волны от 0,4 мкм (фиолетовый цвет) до 0,7 мкм (красный цвет). К видимому диапазону с длинноволновой стороны примыкает *инфракрасное*, а с коротковолновой — *ультрафиолетовое* излучение. Свет — лишь один из многих видов электромагнитного излучения, которые все вместе образуют *шкалу* (последовательность) *электромагнитных волн*. Наибольшую длину волны имеют радиоволны, а наименьшую — *гамма-лучи*.

12.2. Всеволновая астрономия. Земная атмосфера прозрачна для видимого электромагнитного излучения. Кроме того, она пропускает незначительную часть ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, а также широкий диапазон радиоволн от нескольких миллиметров до 15–20 м. Все остальные электромагнитные волны сильно поглощаются и отражаются различными слоями земной атмосферы и недоступны наблюдениям с поверхности Земли (рис. 12.1). Таким образом, атмосфера имеет два “окна” прозрачности — для радио- и оптического излучения.

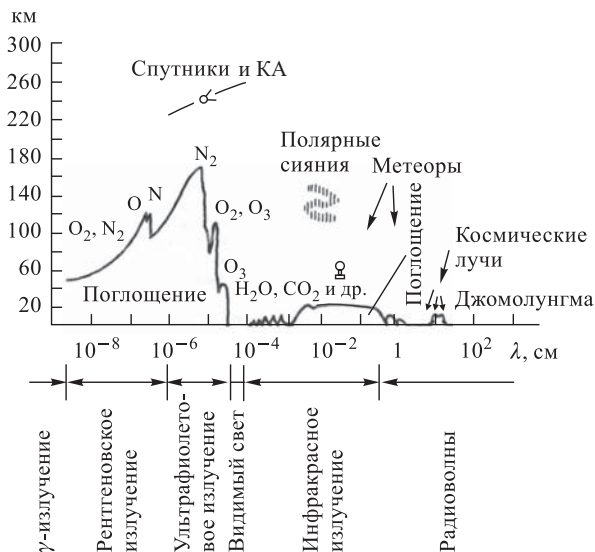


Рис. 12.1. Глубина проникновения электромагнитного излучения в земную атмосферу

До изобретения фотографии единственным приемником излучения служил глаз наблюдателя. Поэтому использовался лишь видимый свет, т. е. ничтожная часть всей шкалы электромагнитных волн.

С появлением фотографии, а позднее и фотоэлектрических приемников излучения стали осваиваться и другие участки спектра электромагнитных волн — *инфракрасные* и *ультрафиолетовые лучи*, частично проходящие через земную атмосферу.

В 1930-е годы развитие радиотехники привело к открытию *космического радиоизлучения*, приходящего из межзвездного пространства и достигающего земной поверхности. Тем самым началось освоение “радиоокна” земной атмосферы. Возникла *радиоастрономия*, необычайно расширившая наши знания о процессах, происходящих во Вселенной.

Прием электромагнитного излучения в диапазонах, не пропускаемых земной атмосферой, стал возможен лишь в последние десятилетия в результате использования высотных ракет, искусственных спутников Земли и других космических аппаратов. На них устанавливают научную аппаратуру для регистрации рентгеновского и гамма-излучения или длинноволнового инфракрасного излучения, приходящего из космоса.

Наблюдение астрономических объектов в диапазонах спектра, недоступных с поверхности Земли, является основной задачей современных космических исследований в области астрофизики.

С возникновением радиоастрономии и развитием внеатмосферных методов наблюдений небесных объектов ученым стали доступны практически все виды космического электромагнитного излучения. Таким образом, современная астрономия является *всеволновой*.

Оказалось, что в различных диапазонах электромагнитного излучения небо “выглядит” по-разному. Объекты, яркие в одних лучах, могут быть совершенно незаметными в других. В видимых лучах, например, ничто не может сравниться по яркости с Солнцем. Следующий по яркости объект — полная Луна — уступает Солнцу примерно в миллион раз. Однако на “радионебе” в диапазоне метровых волн ярче всего “светят” три источника: Солнце, центр нашей Галактики и мощный радиоисточник в созвездии Кассиопеи, возникший несколько сотен лет назад в результате взрыва звезды. В рентгеновских и гамма-лучах наблюдается множество объектов различной природы, которые вообще не видны в других диапазонах спектра и о существовании которых во многих случаях ранее даже не догадывались.

12.3. Вопросы

- 1*. Скольким октавам (октава — интервал частот, на котором они меняются в два раза) соответствует шкала наблюдаемых электромагнитных волн (см. рис. 12.1) и сколько из них приходится на видимое излучение?
2. Что означает выражение “всеволновая астрономия”?
3. Каковы цели и возможности внеатмосферной астрономии?

§ 13. Телескопы в астрономии

13.1. Назначение телескопов. Для наблюдения космических объектов используют специальные инструменты — *телескопы*, снабженные приемниками излучения самых различных типов. Их конструкция и размеры зависят от конкретных научных задач. Существуют оптические телескопы для изучения космических источников в оптическом диапазоне спектра, специальные рентгеновские, гамма-телескопы, различные системы радиотелескопов, и даже нейтринные телескопы, регистрирующие не свет или другие электромагнитные волны, а потоки всепроникающих элементарных частиц — нейтрино, приходящих из космоса. В отличие от обычных телескопов, они не имеют линз или отражающих поверхностей и устанавливаются глубоко под землей для устранения помех.

При всем своем разнообразии телескопы решают две основные задачи:

1) собрать от исследуемых объектов как можно больше энергии излучения в данной области спектра для повышения точности ее измерений; 2) создать как можно более резкое изображение источников, позволяющее изучать их структуру, отдельные мелкие детали, а также с максимальной точностью измерять угловые размеры объектов или угловое расстояние между ними.

Для выполнения этих задач телескоп использует два важнейших элемента: 1) *объектив*, собирающий излучение и создающий резкое изображение исследуемого объекта (у радиотелескопа роль объектива играет антенна или совокупность отдельных антенн); 2) устройство, регистрирующее и анализирующее это излучение (*фотоэлектрический приемник излучения, различная аппаратура для спектрального анализа излучения, приемник радиоволн и т.д.*). У телескопов, предназначенных для любительских наблюдений, приемником излучения является глаз человека. Зеркальный или линзовый объектив создает изображение источника, а глаз рассматривает его через корот-

кофокусную линзу (или систему линз), называемую окуляром. Телескопические наблюдения глазом называются *визуальными* наблюдениями. До начала XX века это был единственный способ наблюдений, доступный астрономам. В настоящее время в профессиональной работе визуальные наблюдения практически не используются.

Современный астрономический телескоп — это сложный высокоточный измерительный инструмент, оснащенный разнообразным оборудованием, предназначенным для управления работой телескопа, регистрации и анализа излучения.

13.2. Оптические телескопы. В начале XVII в. Галилео Галилей впервые направил на небо изготовленный им телескоп, состоящий из двух линз. Положительная, более длиннофокусная линза играла роль объектива, а отрицательная — окуляра. Телескопы Галилея по качеству изображения были хуже, чем современные бинокли. Тем не менее при помощи этих инструментов путем внимательных и кропотливых наблюдений Галилей смог сделать ряд важнейших открытий. Он увидел пятна на Солнце, неровности и кратеры на Луне, четыре спутника Юпитера, обращающиеся вокруг планеты, фазы Венеры, которые доказали ее обращение вокруг Солнца, а в области Млечного Пути — множество слабых звезд, никогда прежде не наблюдававшихся невооруженным глазом. В астрономии настала эпоха *телескопических наблюдений*. Телескоп использовался как большая подзорная труба для наблюдений за небом.

В настоящее время телескопические визуальные наблюдения (глазом) проводятся почти исключительно для любительских целей. Для научной работы телескопы снабжаются приемниками излучения, способными накапливать действие света и измерять световую энергию, приходящую от наблюдаемых источников.

Принцип работы *оптического телескопа* основан на свойстве выпуклой линзы или вогнутого зеркала (*объектива*) собирать в точку (*фокус*) параллельные лучи света, приходящие от далеких источников, и создавать резкое *изображение* этих источников в плоскости, называемой *фокальной*. Изображение в фокальной плоскости можно рассматривать в *окуляр*, фотографировать, разлагать в спектр с помощью спектрографа или изучать каким-либо другим способом.

Самой важной характеристикой телескопа является диаметр его объектива, который строит изображение. Чем больше объектив, тем больше света попадает в телескоп, и тем более слабые объекты будут доступны наблюдателю. Если объективом теле-

скопа является линза или система линз, то телескоп называется *рефрактором*, а если вогнутое зеркало или система зеркал — то *рефлектором*. В рефракторе свет проходит через объектив, в рефлекторе отражается от его зеркальной поверхности (рис. 13.1). Рефрактор с положительной линзой в качестве окуляра первым предложил И. Кеплер. Первый небольшой рефлектор был изготовлен позднее И. Ньютоном.

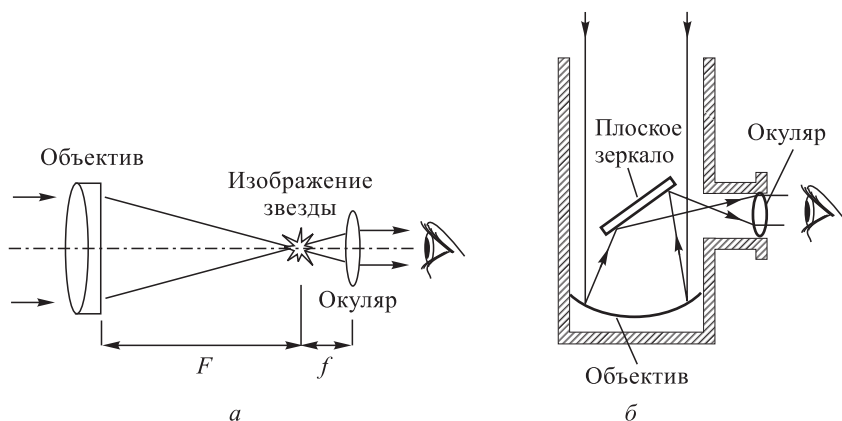


Рис. 13.1. Ход лучей от звезды в рефракторе (а) и рефлекторе (б)

Самый крупный в мире рефрактор был установлен на Йеркской обсерватории близ Чикаго еще в конце XIX века. Диаметр его объектива около 1 м. Очень большие тяжелые линзы поглощают много света и сильно деформируются под действием своего веса, что сказывается на качестве изображения. Поэтому с начала XX века объективы всех больших телескопов стали делать исключительно зеркальными.

В настоящее время телескопы принято считать большими, если размеры их зеркальных объективов составляют не менее 3–4 метров. Каждый из таких инструментов является уникальным.

В мире существует более десятка оптических телескопов, диаметр объектива которых превышает 8 м. Все они установлены в высокогорных обсерваториях. Четыре крупнейших из них имеют объективы диаметром около 10 м (Кек I и Кек II на Гавайских островах, США, телескоп обсерватории Мак-Дональд, США и Большой Южно-африканский телескоп, созданный с участием нескольких стран). Зеркальные объективы этих телескопов не сплошные, а состоят из нескольких десятков шестиугольных фрагментов. Построено несколько телескопов со сплошными зер-

калами диаметром около 8 м. Среди них четыре телескопа, объединенные в одну систему, установленные в Южной Европейской обсерватории в горах Чили. Планируется строительство и более крупных инструментов. Самый крупный рефлектор, построенный в нашей стране (Большой Телескоп Азимутальный, или БТА), имеет объектив диаметром 6 м (рис. 13.2). Он установлен в северном предгорье Кавказа (Карачаево-Черкессия).

Ограничение размеров объектива прежде всего связано с техническими трудностями очень точного изготовления отражающей поверхности вогнутого зеркала необходимой формы и сохранения этой формы при наведении на различные объекты, поскольку важно, чтобы при движении телескопа или изменении температуры воздуха зеркало сохраняло рассчитанный профиль поверхности, не деформируясь даже на тысячную долю миллиметра. В противном случае изображение теряет резкость.

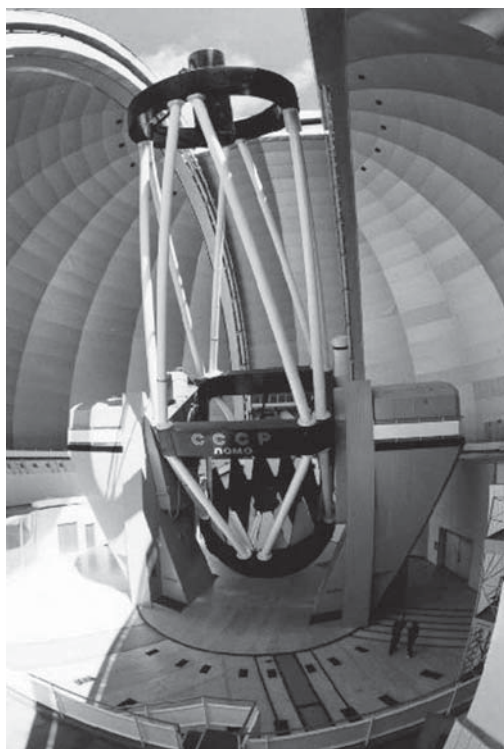


Рис. 13.2. Рефлектор с зеркальным объективом диаметром 6 м (Россия)

Выбор места для установки крупного телескопа требует тщательного исследования климатических условий (изучения *астроклимата*), учета множества других факторов и представляет самостоятельную проблему. Как правило, телескопы устанавливаются в высокогорной местности, чтобы свести к минимуму искажения, связанные с прохождением света через атмосферу.

При визуальных наблюдениях, рассматривая через окуляр изображение, построенное объективом, наблюдатель видит его увеличенным. При этом под *увеличением* понимают отношение видимых угловых размеров объектов при наблюдении в телескоп и без него. **Увеличение равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.** Меняя окуляры, можно с одним и тем же телескопом получать самые различные увеличения. На практике редко используют увеличения более чем в 200–300 раз, главным образом из-за размывания изображения воздушными потоками, так как неоднородности воздушной среды нарушают прямолинейное распространение световых лучей, ограничивая резкость изображения.

Однако визуальные наблюдения, очевидно, страдают рядом недостатков. Глаз не способен мгновенно запомнить тонкие детали изображения. Он также не может длительно накапливать и объективно измерять световую энергию. Зато, в отличие от глаза, фотоэмульсия, например, обладает способностью накапливать энергию приходящего излучения, запоминать и надолго сохранять изображения. Так, за несколько минут на фотоэмульсии можно получить изображения гораздо более слабых звезд, чем видимые в тот же телескоп глазом. Фотография в свое время оказала неоценимую пользу астрономии благодаря трем основным своим свойствам: *моментальность, интегральность (т. е. свойство накапливать действие света) и документальность.* С появлением светочувствительных фотопластинок астрономы перешли от субъективных визуальных наблюдений к объективной регистрации структуры изображений объектов, а также к измерению энергии излучения в различных диапазонах оптического спектра и в множестве спектральных линий. Это привело к качественному скачку в астрономических исследованиях.

Во второй половине двадцатого столетия для регистрации света, собранного телескопом, в помощь фотографии, а затем и на смену ей пришли различные приборы других типов, превращающие световую энергию в энергию электрического тока. Такие приемники излучения называются *фотоэлектрическими.* Принцип их действия основан на использовании внутреннего или внешнего фотоэффекта, при котором кванты света “выбивают” из

металла или полупроводника отдельные электроны. Фотоэлектрические приемники значительно более чувствительны к свету, чем фотоэмульсии. Электрические сигналы на выходе из них многократно усиливаются, записываются и вводятся в память ЭВМ для дальнейшей математической обработки. Широкое распространение получили светочувствительные матрицы, состоящие из миллионов крошечных полупроводниковых элементов (пикселей). Эти матрицы подобны тем, которые используются в бытовых цифровых фотокамерах, но обладают значительно более высокой чувствительностью к слабым потокам света.

Чувствительность современных фотоэлектрических приемников настолько велика, что с их помощью можно “поштучно” считать отдельные кванты света, упавшие на светочувствительные элементы. Большие телескопы с фотоэлектрическими приемниками позволили измерять потоки излучения от звезд, в сотни миллионов раз более слабых, чем те, которые едва различимы на ночном небе невооруженным глазом.

13.3. Угловое разрешение телескопов. Важной задачей телескопа является получение возможно более резкого изображения исследуемого объекта. Чем резче изображение, тем более мелкие детали объекта можно исследовать и тем более далекие звезды доступны наблюдениям: их свет легче выделить на фоне слабого свечения неба, которое не исчезает полностью даже темной ночью.

Качество изображения, создаваемого телескопом, характеризуется его *угловым разрешением*. Угловое разрешение β можно определить как минимальный угловой размер изображения источника, который в состоянии построить телескоп. Его можно представить также как минимальное угловое расстояние β между двумя звездами одинаковой яркости, при котором их изображения не будут сливаться в одно. Чем выше качество объектива данного телескопа, а также чем спокойнее земная атмосфера, тем лучше разрешение, т. е. меньше угол β .

Человек с нормальным зрением без большого напряжения различает детали размером 100–200 секунд дуги (2–3 угловые минуты). Современная технология изготовления больших объективов позволяет добиться разрешения в тысячи раз лучше, чем у самого зоркого глаза. Однако, как уже говорилось, при наблюдениях с Земли неоднородности воздушной среды приводят к заметному размыванию изображения. В итоге наземные телескопы, как правило, позволяют получить угловое разрешение около 1", и только при очень хороших атмосферных условиях

удается добиться разрешения в несколько десятых долей секунды дуги. Это достигается благодаря использованию специальных оптических приемов, позволяющих исправлять в реальном времени искажения, вносимые атмосферой.

Примечание. Угловые размеры звезд, даже самых близких, во много раз меньше $1''$. Поэтому различить их диски в телескоп при прямых наблюдениях невозможно. Лишь с использованием специальных интерференционных методов удалось “увидеть” детали дисков небольшого количества ярких звезд.

Улучшение качества изображения телескопов — важнейшая задача, решаемая различными методами. Для увеличения углового разрешения больших телескопов, т. е. для уменьшения β , как правило, используется специальный метод активной оптики: оптическая система телескопа включает зеркало с меняющейся формой отражающей поверхности, управляемое компьютером. Форма зеркала быстро меняется таким образом, чтобы отслеживать в реальном времени искажения, вносимые атмосферой, и, компенсируя их, исправлять изображение.

Какое предельное увеличение n целесообразно применять при визуальных наблюдениях, если $\beta = 1''$?

Помимо земной атмосферы и качества изготовления объектива, есть еще одна причина, ограничивающая разрешение телескопа. Она имеет принципиальный характер и связана с волновой природой света. Оказывается, что существует предельно возможное разрешение телескопа, которое мы обозначим через β_0 . Оно называется *теоретическим* или *дифракционным разрешением*. Если выражать углы в радианах, то оно приблизительно равно отношению длины волны излучения к диаметру объектива телескопа:

$$\beta_0 \approx \lambda/D. \quad (13.1)$$

Выразите β в приведенной выше формуле в секундах дуги.

Современное оптическое производство может обеспечить разрешение объектива, близкое к теоретическому. Однако если β_0 существенно меньше $1''$, то из-за турбулентных движений воздуха на пути света реализовать высокое разрешение можно, как правило, только проводя заатмосферные наблюдения. Самый большой космический телескоп, созданный для наблюдения в оптическом диапазоне, имеет зеркало диаметром 2,4 м (телескоп имени Хаббла, США) и способен давать разрешение, близкое

к дифракционному (лучше $0,1''$). Для примера: под углом $0,1''$ на Луне виден предмет размером 20 м.

13.4. Радиотелескопы. Для приема космического радиоизлучения используются специальные *радиотелескопы*. Они имеют очень большие антенны, подключенные к чувствительным приемникам, от которых усиленный сигнал попадает в регистрирующую аппаратуру, связанную с компьютером. Антенна радиотелескопа отличается от обычных антенн радиосвязи высокой *направленностью*, т. е. способностью выделить радиоизлучение небольшого участка неба. Предельное угловое разрешение радиотелескопа, как и в случае оптического инструмента, также составляет $\beta_0 = \lambda/D$, причем D определяется размерами и конструкцией антенны. Поскольку длины радиоволн в тысячи или даже в миллионы раз больше, чем у видимых лучей, антенны радиотелескопов обычно делают очень большими. Так, например, один из крупнейших в Европе радиотелескопов РАТАН-600 ¹⁾, установленный в нашей стране, имеет антенну примерно из тысячи металлических щитов, расположенных по кругу диаметром 600 м (рис. 13.3).

Используя системы антенн (*радиоинтерферометры*), удается получить очень высокое угловое разрешение, даже лучшее, чем дают оптические телескопы. С этой целью радиоисточники одновременно наблюдаются на двух или нескольких антеннах, установленных на очень больших расстояниях друг от друга, иногда даже на различных континентах Земли. Сигналы, записанные и синхронизированные с помощью атомных часов, обрабатываются на компьютере. Угловое разрешение в этом случае



Рис. 13.3. Антенна радиотелескопа РАТАН-600 (Россия)

¹⁾ РАдио Телескоп Академии Наук.

соответствует теоретическому разрешению, определенному по формуле (13.1), в которой, однако, величина D характеризует не диаметр отдельных антенн, а максимальное расстояние между ними.

13.5. Типовая задача. Определение параметра телескопа

Условие. Диаметр объектива рефрактора $D = 20$ см, а фокусное расстояние $F = 3$ м. Каково теоретическое разрешение β_0 для визуальных наблюдений? Какое увеличение получается при работе с окуляром, если его фокусное расстояние $f = 10$ мм?

Решение. По формуле 13.1 имеем: $\beta_0 \approx \lambda/D$. Принимая для визуальных лучей $\lambda = 500$ нм, получаем: $\beta_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ м/0,2 м = $2,5 \cdot 10^{-6}$ рад. (1 радиан = $57,3^\circ = 3438' = 206\,265''$). Следовательно, $\beta_0 = 0,5''$. Увеличение $n = F/f = 3$ м/0,01 м = 300 раз.

13.6. Вопросы

1. Что такое телескоп и для чего он предназначен?
2. Чем отличаются рефлекторы от рефракторов? Кто впервые применил их в астрономии?
3. Что называют увеличением телескопа и его угловым разрешением?
4. Чем различаются оптические и радиотелескопы?
5. От чего зависит угловое разрешение оптического телескопа и радиотелескопа?

13.7. Упражнения

1. Луч, проходящий через центр линзы, не меняет своего направления. Пользуясь этим свойством, покажите, что в фокальной плоскости объектива телескопа изображения двух звезд видны из центра объектива под тем же углом, что и на небе.
- 2*. Докажите, что угловое увеличение телескопа при визуальных наблюдениях равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.
- 3*. При каком условии весь свет, прошедший от звезды через объектив телескопа, имеющего диаметр D и фокусное расстояние F , может попасть в глаз наблюдателя, если диаметр зрачка глаза равен d ? Какое ограничение это накладывает на используемое увеличение?
- 4*. Диаметр объектива телескопа 14 см, его угловое разрешение при данных метеоусловиях равно $3''$, диаметр зрачка глаза наблюдателя 7 мм, а разрешение глаза $2'$. В каких пределах целесообразно выбирать увеличение телескопа?

5. Каково (примерно) теоретическое угловое разрешение глаза, если диаметр зрачка 5 мм? Как оно отличается от фактического разрешения нормального глаза?
6. С каким угловым разрешением работает радиотелескоп РАТАН-600 при наблюдении на волне 30 см?
7. Каково теоретическое разрешение межконтинентального радиоинтерферометра, принимающего излучение с длиной волны 1 см, если расстояние между антеннами равно радиусу Земли?

§ 14. Спектральный анализ излучения. Определение физических свойств, химического состава и скоростей движения небесных тел

14.1. Спектры небесных тел. Если перед объективом телескопа поместить стеклянную призму, то после прохождения через нее направление световых лучей несколько изменится, причем тем сильнее, чем короче длина световой волны. Происходит это потому, что призма по-разному преломляет лучи различных длин волн. В результате изображение каждой звезды в фокальной плоскости “растянется” в полоску *спектра*. В современных телескопах для получения спектров отдельных источников обычно используют не призмы, а специальные приборы — *спектрографы*, щель которых устанавливается в фокальной плоскости объектива. Спектры получаются при отражении света от дифракционной решетки, пришедшей на смену стеклянной призме в спектрографе.

Анализ спектров дает основную информацию об источнике. В каждом участке спектра собирается излучение с определенной длиной волны. Общий вид спектра и детальное распределение энергии в нем зависят от температуры, химического состава и физических свойств источника, а также от скорости и направления его движения относительно наблюдателя.

Анализ спектров — это основной метод изучения физической природы астрономических объектов, который используется в астрофизике.

Различают три разновидности спектров источников.

1. *Линейчатый спектр испускания.* В этом спектре преобладает излучение в отдельных спектральных линиях, т.е. свет излучается на определенных длинах волн. Такой спектр характерен для разреженного газа, например для светящихся газовых облаков в межзвездном пространстве. Длины волн спектральных

линий и их относительные яркости зависят от температуры газа, его плотности и химического состава. С ростом непрозрачности газа помимо спектральных линий усиливается фон непрерывного спектра.

2. *Непрерывный спектр.* Полоса спектра непрерывна, т. е. излучение присутствует на всех длинах волн рассматриваемого участка спектра. Такой спектр возникает, если источники представляют собой непрозрачное тело — например, планеты, излучающие инфракрасный свет, или плотный непрозрачный газ, как, например, в случае звезд. Длина волны, на которую приходится самая яркая часть спектра, зависит от температуры тела. С повышением температуры максимум излучения перемещается в сторону более коротких длин волн. Поэтому, например, горячие звезды выглядят голубыми, а более холодные — красноватыми. Очень горячий газ с температурой в миллионы кельвинов также имеет непрерывный спектр.

3. *Линейчатый спектр поглощения.* Это тот же непрерывный спектр, только на его фоне заметны темные линии, соответствующие определенным длинам волн. Такой спектр имеют, например, звезды. Темные линии образуются, когда излучение тела, имеющего непрерывный спектр, проходит через газовую среду, атомы которой поглощают или рассеивают свет на определенных длинах волн. В случае звезд роль такой среды играют их газовые атмосферы.

Спектр поглощения имеет Солнце (рис. 14.1) и большинство звезд.

Возникновение спектральных линий (как излучения, так и поглощения) объясняется квантовой механикой. Оно обусловлено способностью атомов любых химических элементов, образующих разреженный газ, излучать и поглощать свет строго определенных длин волн (т. е. поглощать и излучать фотоны с определенными значениями энергии). Это свойство атомов связано с тем, что внутренняя энергия атома не может принимать любые значения, а только лишь строго определенные. Изменение энергии атома, связанное с его переходом из одного энергетического состояния в другое, приводит к излучению или поглощению квантов света соответствующих энергий или длин волн.

Когда атом поглощает квант света, энергия атома увеличивается, поскольку один из его электронов переходит на орбиту большего радиуса. После этого электрон может вернуться на более низкую, ближе к атомному ядру, орбиту, и тогда произойдет излучение фотона, который унесет высвободившуюся энергию.

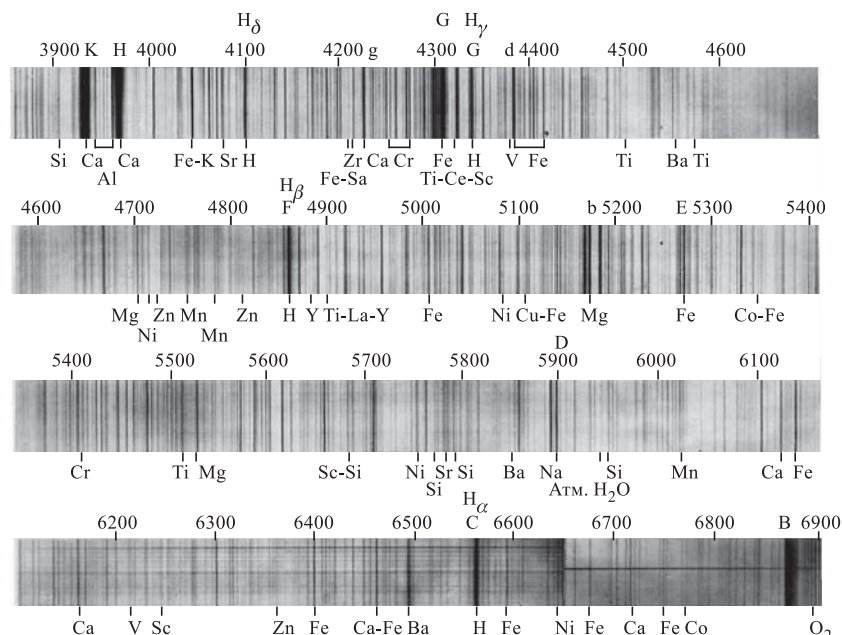


Рис. 14.1. Спектр Солнца с обозначениями спектральных линий некоторых химических элементов. Приведена шкала длин волн в ангстремах (1 ангстрем (\AA) = $10 \text{ нм} = 10^{-4} \text{ мкм} = 10^{-10} \text{ м}$)

Конкретный “набор” длин волн, которые могут излучаться или поглощаться атомами, прежде всего зависит от того, к какому химическому элементу они относятся. Тщательные измерения спектров позволяют расшифровать содержащуюся в них информацию о химическом составе, физическом состоянии вещества, т. е. о температуре, давлении, плотности, наличии магнитного поля и т. п., а также о движении и других свойствах небесных объектов.

Химический состав небесных тел определяется по относительной яркости линий, принадлежащих различным химическим элементам, с учетом температуры и плотности газа, от которых зависит форма и яркость различных линий. Измеряя и сравнивая энергию в отдельных спектральных линиях, можно, опираясь на законы физики, провести не только качественный, но и количественный химический анализ небесных тел, т. е. узнать о процентном содержании различных химических элементов в излучающем (или поглощающем) газе. Разработаны также методы,

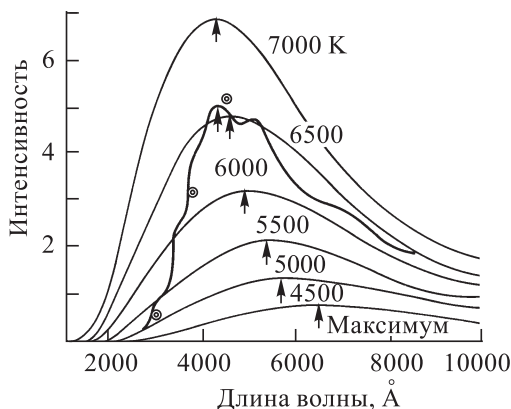


Рис. 14.2. Распределение энергии в непрерывных спектрах тел, нагретых до различных температур, и в спектре Солнца (жирная линия)

позволяющие по относительной яркости линий в спектре судить о температуре и плотности газа.

Температура небесных тел, имеющих непрерывный спектр, может быть измерена по его форме, т. е. по распределению энергии (яркости) в спектре. Распределение энергии определяет цвет источника, поэтому цвет оказывается связанным с температурой. Так, по цвету расплавленного металла определяют температуру плавки, а по цвету звезд можно узнать их температуру: чем она выше, тем “голубее” цвет.

Распределение энергии в непрерывном спектре непрозрачных тел, нагретых до различной температуры, графически показано на рис. 14.2. Длина волны λ_{\max} , на которую приходится максимум в распределения энергии, связана с абсолютной температурой простым соотношением

$$\lambda_{\max} T = b.$$

Если T выражать в кельвинах, а λ — в микрометрах, то $b = 2900 \text{ К} \cdot \text{мкм}$. Этот закон пригоден не только для оптического, но и для любого другого диапазона теплового (т. е. создаваемого нагретыми телами) излучения. В честь немецкого ученого В. Вина он называется *законом Вина*. Спектры звезд (в том числе Солнца) описываются приведенными на рис. 14.2 теоретическими кривыми лишь приблизительно. Это связано с тем, что различные участки звезд, от которых к нам приходит свет, имеют неодинаковую температуру.

Задание. Рассчитайте, на какую область спектра приходится максимум излучения тела, нагретого до комнатной (20°C) температуры.

Анализ спектров различных астрономических объектов показал, что подавляющая часть наблюдаемого вещества во Вселенной представляет собою газ. Оказалось, в природе очень мало вещества в твердом состоянии, а что касается жидкостей (и не только воды), то они практически отсутствуют и могут встречаться только на поверхности или в недрах некоторых планет или спутников, поскольку существование жидкостей требует специфических температур и достаточно высоких давлений.

При температуре 10 и более тысяч кельвинов большинство атомов газа “теряют” электроны из-за столкновений между частицами. При этом атомы становятся положительно заряженными ионами, а оторванные от атомов *электроны* — свободными отрицательно заряженными частицами. Газ, содержащий свободно движущиеся электроны и ионы, называется *ионизованным газом* или плазмой. Большая часть вещества, наблюдаемого во Вселенной, представляет собой плазму. Если плотность плазмы очень мала, она имеет линейчатый спектр испускания. Таков, например, спектр межзвездных облаков, нагреваемых горячими звездами, или спектр солнечной короны.

У твердых тел спектр иной. Так, межзвездная пыль, как совокупность твердых частиц, излучает непрерывный спектр, максимум которого приходится на длинноволновой инфракрасный диапазон, что, в соответствии с законом Вина, свидетельствует о низкой температуре пыли ($20\text{--}50\text{ K}$). В инфракрасный диапазон попадает и собственное излучение планет: они излучают как любые нагретые тела.

Таким образом, в спектрах небесных тел “зашифрована” информация о физических свойствах излучающего или поглощающего свет вещества. Кроме того, оказывается, что анализ спектра дает возможность измерить и составляющую вектора скорости источника вдоль луча зрения, т. е. определить, с какой скоростью тот или иной объект приближается к нам или удаляется от нас.

14.2. Эффект Доплера. Если волна излучается движущимся источником, то ее длина изменяется. С этим явлением мы часто сталкиваемся в акустике. Известно, что высота звука определяется длиной волны колебания: чем ниже звук, тем длина волны больше. Стоя на платформе, мимо которой проносится гудящий локомотив, можно заметить, что, когда поезд приближается, высокий тон гудка понижается, причем особенно резко в момент, когда он проносится мимо наблюдателя, после чего

тон становится низким. Аналогичное явление есть и в оптике: длина волны света от приближающегося источника уменьшается, а от удаляющегося — возрастает. Это изменение длин волн сказывается на положении спектральных линий: они смещаются в синюю или красную сторону спектра в зависимости от скорости приближения или удаления источника. Такое явление называется *эффектом Доплера*.

При скоростях в десятки и даже в сотни километров в секунду изменение длины волны настолько мало, что обнаружить его по изменению цвета практически невозможно, однако относительное смещение спектральных линий между движущимся и неподвижным источником можно измерить значительно легче и точнее.

Доплеровское изменение длины волны спектральных линий относится к несмещенной длине волны излучения так же, как скорость удаления (или приближения) $v_{\text{отн}}$ относится к скорости света c :

$$(\lambda_{\text{ист}} - \lambda_{\text{лаб}})/\lambda_{\text{лаб}} = v_{\text{отн}}/c.$$

Здесь $\lambda_{\text{ист}}$ и $\lambda_{\text{лаб}}$ — длины волн спектральной линии в спектрах наблюдаемого и неподвижного (лабораторного) источников соответственно, $v_{\text{отн}}$ — компонента относительной скорости источника вдоль луча зрения (положительная, если источник удаляется).

Как видно из этой формулы, относительное изменение длины волны излучения зависит только от скорости, а следовательно, оно одинаково для всех областей спектра. Поэтому в астрономии с помощью эффекта Доплера измеряют относительные скорости не только оптических источников, но и радио-, и рентгеновских источников — по смещению спектральных линий в этих диапазонах длин волн (если только линии присутствуют в спектре). Если линии смещены в красную часть спектра, то объект удаляется от нас, если в синюю — то приближается.

Для измерения доплеровского смещения спектральных линий в оптическом диапазоне вместе со спектром изучаемого объекта (например, звезды) одновременно фотографируют и спектр лабораторного источника, длины волн спектральных линий которого хорошо известны. Относительно них измеряют смещение линий астрономического источника. Затем по приведенной выше формуле вычисляют скорость приближения или удаления источника.

14.3. Типовая задача. Использование эффекта Доплера.

Условие. Измерение спектрограммы звезды показало, что линия железа ($\lambda = 530,2 \text{ нм}$) в ее спектре смещена по сравнению с линиями лабораторного источника в сторону более коротких волн на $0,02 \text{ нм}$. Какова скорость звезды по лучу зрения?

Решение. По условию $\lambda_{\text{ист}} < \lambda_{\text{лаб}}$ (синее смещение). Используя формулу доплеровского смещения, имеем

$$v_{\text{отн}} = c(\lambda_{\text{ист}} - \lambda_{\text{лаб}})/\lambda_{\text{лаб}},$$
$$v_{\text{отн}} = -3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \times 2 \cdot 10^{-11} \text{ м} / 5,302 \cdot 10^{-7} \text{ м} \approx 11 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Знак “—” означает, что расстояние до звезды уменьшается, т.е. она приближается со скоростью 11 км/с .

14.4. Вопросы

1. Что такое спектр? Какие явления доказывают сложный состав света?
2. Что можно узнать, изучая спектр небесного объекта?
3. Как можно использовать эффект Доплера для измерения периода обращения одной звезды относительно другой, если телескоп не разделяет изображения звезд?
4. Какую скорость надо использовать вместо скорости света в формуле эффекта Доплера для изменения длины звуковых волн? Чему она равна?
5. Эффект Доплера во многих случаях позволяет обнаружить звезды с очень быстрым вращением. При быстром вращении звезды все ее спектральные линии становятся более широкими. Объясните почему.
6. В каком случае смещения линий не происходит несмотря на движение объекта?

14.5. Упражнения

1. Какую температуру должна иметь звезда, чтобы максимум в ее спектре приходился на область ультрафиолетового излучения?
2. Считая, что глаз в области $\lambda = 600 \text{ нм}$ замечает изменение цвета при изменении λ на 50 нм , определите, при какой скорости источника монохроматического (одноцветного) излучения изменение цвета будет заметно на глаз.
- 3*. Где на небе расположены звезды, у которых доплеровское смещение спектральных линий, обусловленное обращением Земли вокруг Солнца, максимально? Чему оно равно для зеленых лучей? (Орбитальную скорость Земли принять равной 30 км/с .)

§ 15. Массы небесных тел

15.1. Определение масс небесных тел. Важнейшая физическая характеристика астрономических объектов — масса — определяется на основании закона всемирного тяготения. Используя третий закон Кеплера в форме, уточненной Ньютоном (см. формулу 10.13), можно вычислить сумму масс центрального тела и обращающегося вокруг него спутника, если известна большая полуось его орбиты A и сидерический период обращения T :

$$M + m = 4\pi^2 A^3 / (G T^2). \quad (15.1)$$

Обозначив постоянный множитель $4\pi^2/G = 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг с}^2/\text{м}^3$ через B , получим

$$M + m = B \cdot A^3 / T^2. \quad (15.2)$$

При $m \ll M$ данная формула определяет массу центрального тела:

$$M = B \cdot A^3 / T^2. \quad (15.3)$$

Например, если в качестве A и T взять радиус орбиты Земли и период ее обращения вокруг Солнца, то можно вычислить массу Солнца M_\odot . Подставляя в формулу значения $T = 1 \text{ год} \approx 3,2 \cdot 10^7 \text{ с}$ и $A = 1 \text{ а. е.} \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$, находим, что

$$\begin{aligned} M_\odot &= B \cdot (1 \text{ а. е.})^3 / (1 \text{ год})^2 \approx \\ &\approx 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг с}^2/\text{м}^3 \times (1,5 \cdot 10^{11} \text{ м})^3 / (3,2 \cdot 10^7 \text{ с})^2 \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Используя выражение для массы Солнца, записанное в виде $M_\odot = B \cdot (1 \text{ а. е.})^3 / (1 \text{ год})^2$, удобно вычислять массу M любого тела, когда период обращения T его спутника выражен в годах, а большая полуось орбиты A — в астрономических единицах. В этом случае

$$M = M_\odot \cdot A^3 / T^2. \quad (15.4)$$

Если спутник обращается вокруг центрального тела M по круговой орбите и известны его орбитальная скорость и радиус орбиты, то массу M можно найти из формулы (10.4) для круговой скорости.

В случае когда у планеты нет спутника, ее массу M определяют, пользуясь законом всемирного тяготения, измеряя ускорение, которое она сообщает другим телам, например ближайшим планетам или пролетающим мимо нее космическим аппаратам.

Аналогичным образом, на основе закона тяготения, определяют и массы звезд, образующих двойные системы.

15.2. Типовая задача. Определение массы планеты.

Условие. Определить массу Юпитера $M_{\text{Ю}}$, если известно, что один из его спутников (Ганимед) удален от его центра на $A = 1\,070\,000$ км и обращается с периодом $T_{\text{Ю}} = 7,2$ сут.

Решение. По формуле (15.3), выражающей III закон Кеплера, масса центрального тела

$$M_{\text{Ю}} = B \cdot A^3 / T_{\text{Ю}}^2.$$

Подставляя значения величин в формулу, получим

$$\begin{aligned} M_{\text{Ю}} &= 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3 \times (1,07 \cdot 10^9 \text{ м})^3 / (6,22 \cdot 10^5 \text{ с})^2 \approx \\ &\approx 1,9 \cdot 10^{27} \text{ кг}. \end{aligned}$$

15.3. Упражнения

1. Определите массу Сатурна (выразив ее в массах Земли и в килограммах), если один из его спутников отстоит от центра планеты на 185 500 км и имеет период обращения 0,94 сут.
Указание. Используйте сравнение с системой Земля–Луна.
- 2*. Две звезды одинаковой массы M движутся по круговой орбите вокруг центра, находящегося на половине расстояния A между ними. Найдите массы звезд, если $A = 100$ а. е., $T = 10^3$ лет.
3. Докажите, что формулы (15.2) и (10.4) эквивалентны, если спутник массы $m \ll M$ обращается по круговой орбите.

Основные выводы

Астрономические наблюдения проводятся при помощи телескопов, регистрирующих электромагнитное излучение космических источников. Важнейшими характеристиками, определяющими возможности телескопа и решаемые им задачи, являются диаметр объектива, угловое разрешение и диапазон спектра, на работу в котором он рассчитан. В настоящее время астрономия стала всеволновой, т. е. ей доступно исследование практически всех видов электромагнитного излучения, испускаемого различными космическими объектами, — от излучения с очень короткими длинами волн (гамма-лучи) до длинных радиоволн. Это стало возможным во многом благодаря успехам в развитии космической техники, позволившим осуществлять астрономические исследования за пределами земной атмосферы.

В астрономических исследованиях важное место занимает анализ спектрального состава излучения (спектральный анализ). С его помощью оказалось возможным определять химический состав вещества, его температуру, плотность и другие физические свойства независимо от расстояния до источника, а также измерять скорость приближения или удаления астрономических объектов.

Измерение периодов обращения тел или ускорений, с которыми движутся тела под действием взаимного притяжения, дает возможность вычислять массы астрономических объектов.

Глава 5

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

§ 16. Состав и происхождение Солнечной системы

В центре Солнечной системы находится наша дневная звезда — Солнце. Вокруг него на различных расстояниях обращаются многочисленные тела различных размеров, начиная с больших планет, таких как *Меркурий*, *Венера*, *Земля*, *Марс*, *Юпитер*, *Сатурн*, *Уран*, *Нептун*, и кончая множеством малых планет и космических метеоритных тел и частиц. Орбиты планет лежат вблизи некоторой средней плоскости — плоскости эклиптики. Важно, что в окрестности больших планет, на близких к ним орбитах нет других тел, сравнимых с ними по массе. До 2006 г. к числу больших планет относили также Плутон. Плутон, открытый в 1930 г., считался самой далекой планетой от Солнца. Он удален от Солнца в среднем на расстояние 39,5 а.е. Однако из-за эллиптичности орбиты иногда он бывает ближе к Солнцу и Земле, чем Нептун (последний раз это имело место в конце XX века).

Открытие у Плутона спутника позволило определить массу этой планеты, которая оказалась неожиданно малой — значительно меньшей, чем у любой другой планеты и примерно в 6 раз меньше, чем даже у Луны. Позднее, в конце XX и начале XXI в., за орбитой Нептуна было открыто много мелких тел, самые крупные из которых оказались сопоставимыми с Плутоном по размеру и массе. Поэтому было принято отнести Плутон и несколько других тел сходного размера в отдельную категорию *карликовых планет*.

Помимо больших планет и их спутников, в состав Солнечной системы входят сотни тысяч *малых тел* — *астероидов* и *комет*. Астероиды — тела, имеющие размеры от тысячи километров до нескольких сотен метров. Многие из них наблюдаются между орбитами Марса и Юпитера и образуют так называемый *главный пояс астероидов*. Более чем в десять раз дальше от Солнца,

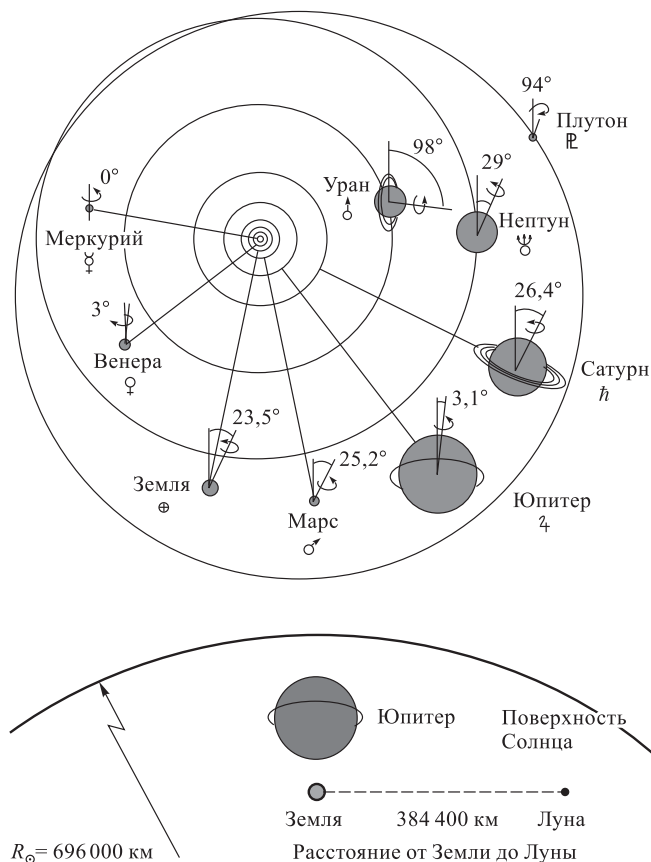


Рис. 16.1. Строение Солнечной системы и сравнительные размеры Солнца и планет

за орбитой Нептуна, также обнаружено множество астероидов, получивших общее название *транснептуновых объектов*. Наиболее близкие из них образуют второй (после главного), но более широкий пояс астероидов, называемый поясом Койпера. Он включает несколько крупных и очень много мелких ледяных тел, причем некоторые из них имеют сильно вытянутые орбиты, уходящие от Солнца на тысячи астрономических единиц. Крупнейшие транснептуновых объектов по своим размерам соизмеримы с Плутоном, который формально также можно отнести к этому типу объектов.

Твердые ледяные тела, окруженные газовой оболочкой, относят к *кометам*. Их также можно наблюдать с больших расстоя-

ний. Кроме того, вокруг Солнца обращается множество более мелких тел: камней, ледяных глыб и частиц различных размеров. Их называют *метеоритным веществом* или *метеороидами*, но из-за небольшого размера эти тела можно наблюдать только тогда, когда они приближаются к Земле.

Таким образом, Солнечная система содержит объекты различных типов. При этом она характеризуется рядом важных свойств и закономерностей, которые отражают условия ее формирования и эволюции. Перечислим самые главные из них.

1. Подавляющая часть полной массы Солнечной системы принадлежит Солнцу, т. е. центральному телу. На долю планет и остальных тел приходится чуть более 0,1%. Поэтому Солнце своим притяжением управляет движением всех тел Солнечной системы, которые обращаются вокруг него по разнообразным эллиптическим орбитам.
2. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одну сторону, причем направление их осевого вращения, как правило, совпадает с направлением движения по орбите. Исключения составляют Венера, Уран, а из планет-карликов — Плутон, которые вращаются в противоположную сторону, причем оси вращения Урана и Плутона так сильно наклонены, что лежат почти в плоскостях своих орбит (см. рис. 16.1).
3. Орбиты планет, в том числе карликовых, крупных и мелких астероидов в большинстве случаев лежат вблизи плоскости эклиптики. Их совокупность образует как бы гигантский вращающийся диск из отдельных тел вокруг Солнца с радиусом в десятки а. е.
4. По размерам, массе и общему строению большие планеты делятся на две группы: на планеты типа Земли (или планеты земной группы), расположенные внутри главного пояса астероидов, и планеты-гиганты (вне этого пояса). Планеты типа Земли значительно меньше гигантов по массе и размерам. Они обладают большей средней плотностью вещества, сравнительно медленным вращением и малым числом спутников. Планеты-гиганты в десятки и сотни раз массивнее планет земной группы. Они окружены сравнительно плотными протяженными атмосферами. В основном планеты-гиганты состоят из водорода и гелия; доля всех других элементов в них значительно меньше, чем у планет земной группы.

Перечисленные особенности планетной системы объясняются теми условиями, в которых происходило формирование планет

миллиарды лет тому назад. Возраст Солнечной системы определен на основании лабораторного изотопного анализа земных скальных пород, а также метеоритов и доставленных на Землю космическими аппаратами образцов лунного грунта. Оказалось, что наиболее старые из них имеют возраст около 4,5 млрд лет. Поэтому считается, что все планеты сформировались приблизительно в одно и то же время: 4–5 млрд лет тому назад.

Вещество, из которого образовались планеты и их спутники, первоначально представляло собой массивный диск из холодного газа и пыли, окружавший еще молодое Солнце. Планеты сформировались в результате медленного, продолжавшегося сотни миллионов лет роста сгущений в этом диске под действием сил гравитации и молекулярного сцепления. Многочисленные сгущения, первоначально очень мелкие и рыхлые, постепенно росли, сталкиваясь и слипаясь друг с другом, их размеры и масса становились все больше, а число — все меньше. Поэтому сформировавшиеся планеты, сохраняя направление вращения диска, движутся вокруг Солнца в одну и ту же сторону.

Из-за того что внутренняя область диска сильнее нагревалась Солнцем, плотность, температура и химический состав протопланетного вещества были различными во внешних, далеких от Солнца, и внутренних, близких к нему, частях диска. Это привело к сильному различию двух групп планет — внутренних и внешних. Вблизи Солнца в диске преобладали тугоплавкие вещества, вдали, при низкой температуре — легкие газы: водород и гелий, вошедшие в состав планет-гигантов.

16.1. Вопросы

1. Перечислите важнейшие объекты, входящие в состав Солнечной системы.
2. Когда, из чего и каким путем предположительно возникла Солнечная система?

§ 17. Планета Земля

17.1. Общее строение Земли. Строение Земли исследовано гораздо лучше, чем других планет. Центральная часть земного шара примерно до половины радиуса представляет собой плотное железо-никелевое *ядро* с температурой в несколько тысяч кельвинов, внешняя часть которого находится в расплавленном или вязком состоянии. Внешняя твердая оболочка Земли толщиной от нескольких километров до 40–60 км называется *корой*. Она состоит из хорошо известных минералов и горных пород.

Между корой и земным ядром вещество находится в особом пластическом состоянии, близком к расплавленному. Эта область называется *мантией*.

Основная масса Земли приходится на четыре химических элемента: железо, кислород, кремний и магний. Легкие элементы встречаются в основном в верхнем слое Земли и атмосфере.

Поверхность Земли сильно отличается от поверхности других планет. Жидкая вода занимает около 70% ее площади, и лишь вблизи полюсов она постоянно находится в твердом состоянии, образуя ледяные шапки: арктическую и антарктическую.

Земля обладает относительно сильным магнитным полем. Происхождение этого поля, как и у других планет, скорее всего, связано с электрическими токами, возникающими при движении электропроводящего вещества в жидком ядре Земли. Линии магнитной индукции Земли подобны линиям двухполюсного магнита. Северный магнитный полюс находится на севере Канады, южный — в Антарктике. В течение долгой истории нашей планеты положение магнитных полюсов на ней могло меняться.

Земля (рис. 17.1), как и большинство других планет, окружена газовой оболочкой — *атмосферой*, которая состоит в основном из азота и кислорода. Ни одна другая планета не обладает атмосферой с таким химическим составом. Он возник в результате длительной химической и биологической эволюции.

Несколько миллиардов лет назад атмосфера Земли была иной и, по-видимому, напоминала современную атмосферу Венеры, состоящую в основном из углекислого газа CO_2 вулканического происхождения. Постепенно атмосфера менялась. Химическое взаимодействие CO_2 с твердыми породами и образование мощных осадочных пород (известняков), которое происходило с участием древних микроорганизмов, перевели в связанное состояние почти весь углекислый газ атмосферы. Климат Земли изменился. За счет жизнедеятельности зеленых растений атмосфера обогатилась кислородом и постепенно приобрела современные свойства.

В настоящее время интенсивная хозяйственная деятельность человека достигла такого уровня, что способна существенно влиять как на химический состав атмосферы, так и на климат всей планеты. Растет запыленность атмосферы, уменьшая количество солнечной энергии, достигающей поверхности планеты. Постепенно увеличивается содержание углекислого газа в воздухе и различных кислот в атмосферной влаге. Уменьшается площадь лесов, которые играют важную роль в поддержании кислородного баланса, загрязняется поверхность морей и океанов.

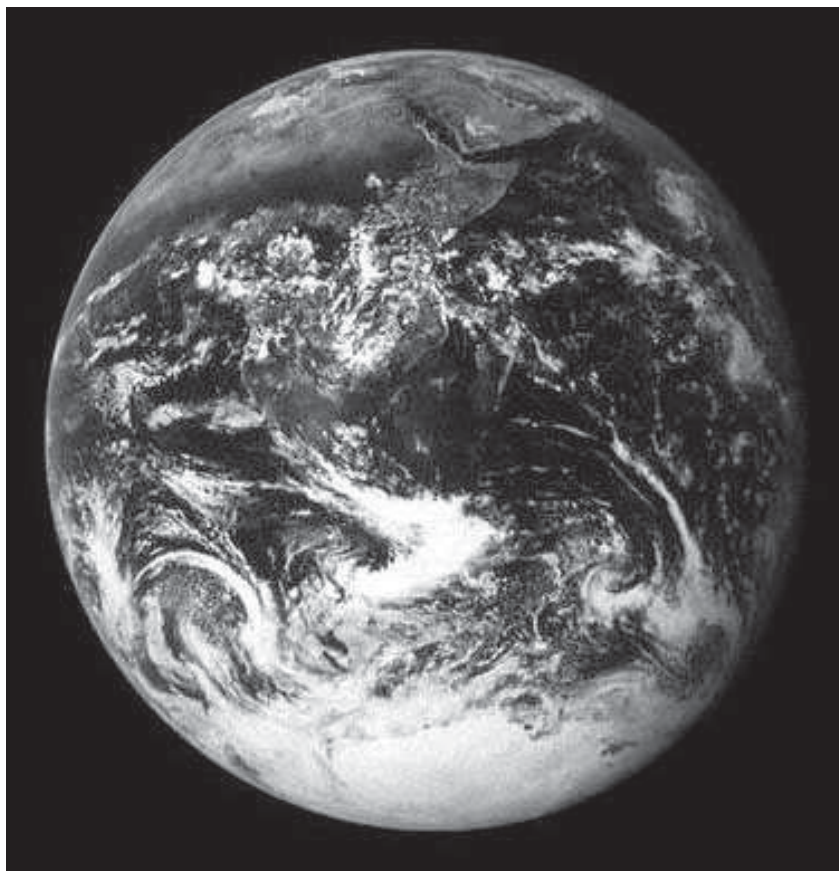


Рис. 17.1. Фотография Земли из космоса (НАСА)

Плохо управляемая и не всегда продуманная хозяйственная деятельность людей в масштабах планеты в конце концов может привести к катастрофическому глобальному изменению климата на Земле. Уже сейчас это вызывает серьезное беспокойство. Чтобы предотвратить подобное бедствие, необходимо объединить усилия промышленно и культурно развитых стран по защите окружающей среды.

Плотные, пригодные для дыхания слои земной атмосферы имеют толщину не более 4–5 км. Выше атмосфера очень разрежена: ее плотность уменьшается примерно в три раза на каждые 8 км подъема. При этом температура воздуха сначала уменьшается (*тропосфера*), а затем на высоте нескольких десятков

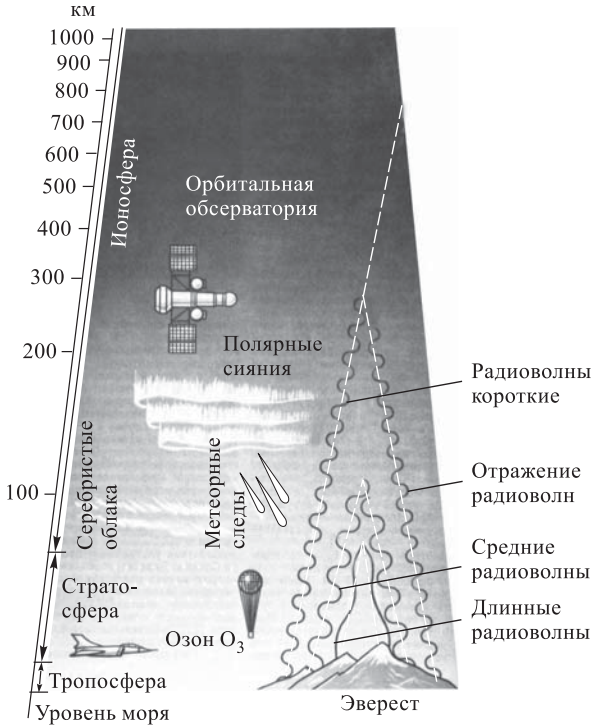


Рис. 17.2. Строение атмосферы Земли и уровни, на которых происходит отражение радиоволн

километров начинается ее рост (*стратосфера*) (рис. 17.2). Происходит это из-за нагревающего действия поглощаемого здесь солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения, не проникающего в нижние слои атмосферы. На высоте 20–25 км располагается *озоновый слой*. Молекулы озона O_3 легко разрушаются под действием коротковолнового излучения. Поэтому, несмотря на свою разреженность, озоновый слой эффективно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, прошедшее сквозь более высокие и прозрачные атмосферные слои. Благодаря этому живые организмы на Земле защищены от губительного воздействия ультрафиолетового света Солнца. Существует опасение, что непродуманная индустриальная деятельность человека может привести к частичному химическому разрушению озонового слоя, что неизбежно вызовет нежелательные последствия для здоровья людей и состояния окружающей среды.

Кванты солнечных коротковолновых (ультрафиолетовых и рентгеновских) лучей ионизуют атомы и молекулы воздуха. Ионизованные верхние слои земной атмосферы называются *ионосферой*. Поглощая излучение Солнца, верхняя атмосфера нагревается примерно до тысячи кельвинов. Большое количество заряженных частиц (особенно электронов, оторванных от атомов) делает ионосферу способной отражать радиоволны (см. рис. 17.2). Именно благодаря этому передачи коротковолновых радиостанций можно принимать с больших расстояний.

На высотах от нескольких сотен до нескольких тысяч километров от поверхности Земли располагаются *радиационные пояса*, окружающие нашу планету. Их образуют потоки электрически заряженных элементарных частиц — электронов и протонов, которые движутся по винтовым траекториям вдоль линий индукции магнитного поля Земли. Частицы эти обладают энергиями до сотен мегаэлектронвольт (МэВ) (1 МэВ равен $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). Они имеют солнечное происхождение и захвачены магнитным полем Земли.

Область вокруг Земли, где давление земного магнитного поля преобладает над давлением разреженной газовой среды, называется земной магнитосферой. Она простирается на десятки тысяч километров в направлении Солнца и образует значительно более длинный магнитный “хвост” в противоположном, антисолнечном направлении. За пределами магнитосферы простирается газовая межпланетная среда, образуемая потоками солнечной плазмы — *солнечным ветром*.

В верхних слоях атмосферы Земли на высоких географических широтах частицы потока плазмы от Солнца — солнечного ветра — возбуждают свечения, называемые *полярными сияниями* (рис. 17.2). Они возникают на высотах более 100 км. Несколько ниже них, на высотах около 80 км, иногда возникают особые условия для конденсации паров воды. Тогда на небе наблюдаются необычайно красивые *серебристые облака*. Это происходит, когда в летнее время температура воздуха в верхней атмосфере, весьма непостоянная из-за солнечной активности, уменьшается, иногда до 150 К. Нижние слои земной атмосферы (тропосфера) определяют хорошо знакомые нам погодные явления.

17.2. Вопросы

1. Опишите строение Земли и ее атмосферы.
2. Каковы могут быть последствия нарушения химического состава атмосферы Земли, а также увеличения ее запыленности и ослабления защитных свойств ионосферы?

§ 18. Система Земля–Луна

18.1. Движение Луны относительно Земли. Земля вместе со своим естественным спутником Луной образует самую знакомую нам и хорошо изученную систему двух астрономических тел. Расстояние между центрами Земли и Луны в среднем составляет около 384 400 км — свыше 60 радиусов Земли. Луна — сравнительно крупное тело Солнечной системы, хотя она уступает Земле по размеру в четыре, а по массе — в 81 раз.

Земля и Луна притягивают друг друга. Под действием этого притяжения они движутся по орбитам, близким к окружностям, вокруг общего центра масс. Он находится на прямой, соединяющей центры Луны и Земли, на расстоянии около 4700 км от центра Земли (т. е. внутри Земли). Таким образом, Земля не только обращается вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси: ее центр описывает еще одну окружность радиуса, немного меньшего радиуса Земли. Строго говоря, именно центр масс системы Земля–Луна, а не центр Земли движется по эллипсу вокруг Солнца. В то же время центры Земли и Луны описывают в пространстве более сложную линию (рис. 18.1).

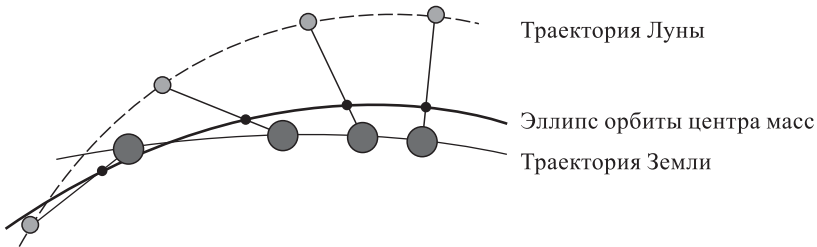


Рис. 18.1. Движение Земли и Луны относительно Солнца (масштаб не соблюден)

Период обращения Луны вокруг Земли (точнее, вокруг центра масс системы Земля–Луна) составляет $27\frac{1}{3}$ сут., что приблизительно на двое суток короче, чем период смены лунных фаз, с которым изменяется видимое положение Луны относительно Солнца (см. п. 4.1).

С чем связано это различие?

Луна, как и Земля, вращается вокруг своей оси. Ее звездный период вращения (т. е. в инерциальной системе координат) равен периоду обращения вокруг Земли — $27\frac{1}{3}$ земных суток. Период смены дня и ночи на Луне, естественно, совпадает с периодом

смены лунных фаз и составляет 29,5 земных суток. Таким образом, сутки на Луне продолжаются почти месяц.

Если бы Луна совсем не вращалась вокруг своей оси, то она, обращаясь вокруг Земли, поворачивалась бы к ней разными сторонами. Но из-за осевого вращения, происходящего в ту же сторону и с тем же периодом, что и орбитальное движение, Луна оказывается все время повернутой к Земле одной и той же стороной. Сфотографировать противоположную сторону Луны удалось только при ее облете космическими аппаратами. Впервые такие фотографии были получены в 1959 г. автоматической межпланетной станцией (АМС) “Луна-3”.

18.2. Приливы. Притяжение Луны деформирует Землю и ее водную оболочку. Это связано с тем, что различные части Земли удалены от Луны неодинаково, и она притягивает их с разной силой, из-за чего возникает сила растяжения, действующая на Землю. Действительно, вещество на той стороне Земли, которая обращена к Луне, притягивается сильнее и стремится двигаться с бóльшим ускорением, а на противоположной стороне Земли — с меньшим ускорением, чем вещество в центре Земли. Но Земля — единое твердое тело и поэтому движется как целое с одним (средним) ускорением. В результате как области Земли, расположенные со стороны Луны, так и противоположные им области стремятся под действием лунного притяжения “отойти” от центра Земли. Это приводит к тому, что Земля, и в первую очередь ее жидкая водная оболочка, растягивается вдоль направления Земля–Луна. На рис. 18.2 изображена схема возникновения приливов. При суточном вращении Земли в полосу приливов и отлива поочередно вступают разные участки Земли. Легко понять, что за сутки должно быть два прилива и два отлива. Существуют приливы и в коре Земли, но они значительно меньше, чем в водной оболочке (десятки см).

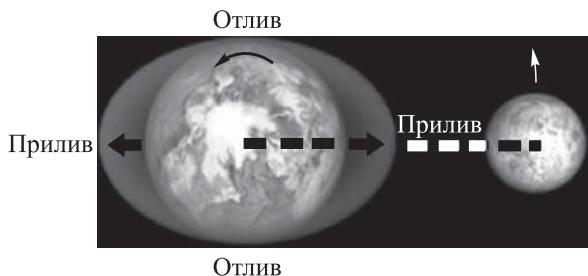


Рис. 18.2. Схема возникновения приливов

Разность ускорений, из-за которых возникает деформация планеты, убывает с расстоянием от притягивающего тела быстрее, чем гравитационная сила: она обратно пропорциональна не квадрату, а кубу расстояния. Поэтому, хотя Солнце притягивает Землю значительно сильнее, чем Луна, его приливное воздействие на Землю почти вдвое меньше лунного. В этом нетрудно убедиться, если учесть, что расстояние до Луны в 400 раз меньше, чем до Солнца ($400^3 = 6,4 \cdot 10^7$), а масса Луны примерно в $2,7 \cdot 10^7$ раз меньше, чем Солнца. Тем не менее влияние солнечных приливов сказывается на амплитуде лунных: во время ново- и полнолуний наблюдаются наиболее высокие приливы.

В приливах участвуют колоссальные массы воды. Если бы удалось использовать существенную долю энергии движения воды, связанной с приливами, то ее хватило бы для удовлетворения всех энергетических потребностей человека.

Ось приливных выступов всегда близка к линии, проходящей через центры Земли и Луны. Вращаясь, Земля как бы проворачивается под водяными горбами, своим трением стремясь повернуть их вместе с собой. Притяжение Луны препятствует этому. Силы трения между перемещающимися массами воды и твердыми породами Земли приводят к медленному торможению вращения земного шара. Как следствие, период осевого вращения Земли медленно растет, и сутки за каждую тысячу лет становятся длиннее примерно на $1/100$ с. Сотни миллионов лет тому назад сутки были на несколько часов короче, и поэтому в году было не 365, а более четырехсот суток. Тогда Луна была намного ближе к Земле, а сейчас она продолжает медленно удаляться.

Таким образом, часы, идущие “по Солнцу”, т. е. связанные с осевым вращением Земли, медленно, но неуклонно, замедляют свой ход. В системе счета точного времени это замедление учитывается систематическим введением секундных поправок к равномерному ходу атомных часов (см. п. 6.1).

Влияние приливов на вращение других небесных тел может быть очень сильным. Так, приливы, вызываемые Землей, настолько затормозили осевое вращение Луны, что ее период вращения сравнялся с периодом обращения вокруг Земли. Из-за этого, как мы уже знаем, Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Через миллиарды лет подобное же должно произойти и с Землей: длина суток увеличится почти до месяца.

Влияние приливов на форму и скорость вращения наблюдается не только в случае планет и их спутников, но и у близких друг к другу звезд и даже целых галактик.

18.3. Луна. Луна — естественный спутник Земли, ближайшее к ней небесное тело, в 81,3 раз меньшее по массе и в 1,65 раз по средней плотности. Луна практически лишена атмосферы. Магнитное поле также почти отсутствует (в 10 000 раз меньше земного). Луна, по-видимому, имеет небольшое ядро, скорее всего твердое. Оно окружено мантией и тонкой корой толщиной около 60 км. При наблюдении с Земли на Луне удастся различить детали размером до нескольких километров. Поэтому обращенная к Земле сторона Луны хорошо изучена (рис. 18.3). Камеры, установленные на космических аппаратах, позволили получить снимки Луны с близкого расстояния (рис. 18.4), а также исследовать не наблюдаемую с Земли обратную сторону Луны. Осуществление технологии мягкой посадки на поверхность Луны позволило определить строение ее поверхности и подготовить посещение ее космонавтами.

Первый аппарат, созданный человеком, достиг Луны в 1959 г. (советский аппарат “Луна-2”). Луна — пока единственное космическое тело, на котором побывали люди. Всего было проведено шесть экспедиций американских астронавтов. Первыми на поверхность Луны ступили Н. Армстронг и Э. Олдрин (“Аполлон-11”, США, июль 1969 г.). Высадка человека на Луну позволила непосредственно провести исследование ее поверхности и собрать образцы лунных пород. Пробы лунного грунта были также доставлены на Землю несколькими АМС, запущенными в нашей стране. Лабораторный анализ лунного вещества показал, что это базальты, похожие на земные вулканические раздробленные породы, называемые *реголитом*. В лунных породах почти нет связанных молекул воды. Нет в них и каких-либо следов органических соединений, которые могли бы свидетельствовать об органической жизни.

Около 60% поверхности Луны приходится на обширные светлые неровные и гористые области (см. рис. 18.3), называемые *материками*. Они пересечены многочисленными *горными хребтами*. Вершины наиболее высоких гор поднимаются до 9 км. Горные хребты и материки окружают более темные крупные области лунной поверхности, еще со времен первых телескопических наблюдений Галилея условно называемые *морями*, хотя хорошо известно, что воды на Луне нет. Темная окраска морей связана с содержанием в “морских” базальтах темного минерала — *ильменита*, хорошо известного на Земле. Лунные “моря” возникли позднее “материков”, в результате извержений лавы из недр Луны, происходивших несколько миллиардов лет назад. Лава затем застыла и образовала обширные равнины.

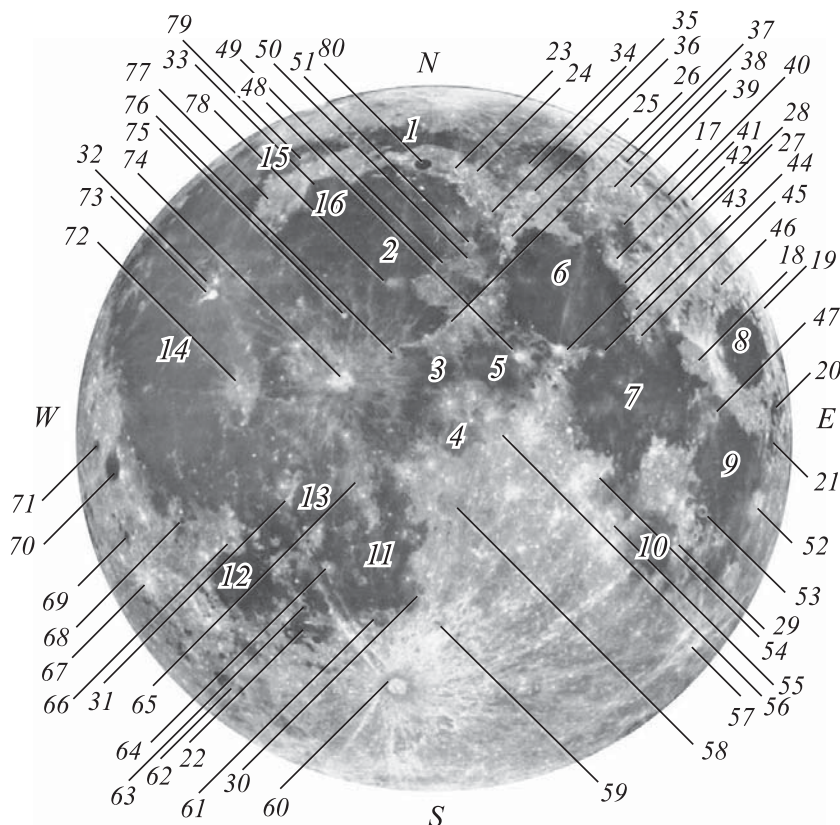


Рис. 18.3 Детали на Луне

Моря:**Север:**

1. Море Холода (Mare Frigoris)
2. Море дождей (Mare Imbrium)
3. Залив Зноя (Sinus Aestuum)

Северо-Восток:

4. Центральный Залив (Sinus Medii)
5. Море Паров (Mare Vaporum)
6. Море Ясности (Mare Serenitatis)
7. Море Спокойствия (Mare Tranquillitatis)
8. Море Кризисов (Mare Crisium)
17. Озеро Сновидений (Lacus Somniorum)
18. Болота Сна (Palus Somnii)
19. Море Змей (Mare Anguis)
20. Море Волн (Mare Undarum)

Юго-Восток:

9. Море Изобилия (Mare Fecunditatis)
10. Море Нектара (Mare Nectaris)
21. Море Пены (Mare Spumans)

Юго-Запад:

11. Море Облаков (Mare Nubium)
12. Море Влажности (Mare Humorum)
13. Море Познанное (Mare Cognitum)
22. Болото Эпидемий (Palus Epidemiarum)

Запад:

14. Океан Бурь (Oceanus Procellarum)

Северо-Запад:

15. Залив Росы (Sinus Roris)
16. Залив Радуги (Sinus Iridum)

Горы:**Северо-Восток:**

- 23. Альпы (Montes Alpes)
- 24. Альпийская Долина (Vallis Alpes)
- 25. Кавказ (Montes Caucasus)
- 26. Апеннины (Montes Apenninus)
- 27. Горы Хемус (Montes Haemus)
- 28. Таврические Горы (Montes Taugus)

Юго-Восток:

- 29. Пиренеи (Montes Pyrenaeus)

Юго-Запад:

- 30. Прямая Стена (Rupes Recta)
- 31. Рифейские Горы (Montes Riphaeus)

Северо-Запад:

- 32. Долина Шретера (Vallis Schroteri)
- 33. Горы Юра (Montes Jura)

Кратеры:**Северо-Восток:**

- 34. Кратер Аристотель (Crater Aristotile)
- 35. Кратер Кассини (Crater Cassini)
- 36. Кратер Евдокс (Crater Eudoxus)
- 37. Кратер Эндимион (Crater Endymion)
- 38. Кратер Геркулес (Crater Hercules)
- 39. Кратер Атлас (Crater Atlas)
- 40. Кратер Меркурий (Crater Mercurius)
- 41. Кратер Посейдон (Crater Posidonius)
- 42. Кратер Зенон (Crater Zeno)
- 43. Кратер Ле-Монье (Crater Le Monnier)
- 44. Кратер Плиний (Crater Plinius)
- 45. Кратер Витрувий (Crater Vitruvius)
- 46. Кратер Клеомед (Crater Cleomedes)
- 47. Кратер Тарунций (Crater Taruntius)
- 48. Кратер Менелай (Crater Manilius)
- 49. Кратер Архимед (Crater Archimedes)
- 50. Кратер Автолик (Crater Autolycus)

- 51. Кратер Аристилл (Crater Aristillus)

Юго-Восток:

- 52. Кратер Лангрен (Crater Langrenus)
- 53. Кратер Гоклен (Crater Goclenius)
- 54. Кратер Ипатия (Crater Hypatia)
- 55. Кратер Теофил (Crater Theophilus)
- 56. Кратер Гиппарх (Crater Hipparchus)
- 57. Кратер Стивенс (Crater Stevinus)
- 58. Кратер Птолемей (Crater Ptolemaeus)
- 59. Кратер Вольтер (Crater Walter)

Юго-Запад:

- 60. Кратер Тихо (Crater Tycho)
- 61. Кратер Питат (Crater Pitatus)
- 62. Кратер Шиккард (Crater Schickard)
- 63. Кратер Кампан (Crater Campanus)
- 64. Кратер Биллиад (Crater Bulliadus)
- 65. Кратер Фра Майро (Crater Fra Mauro)
- 66. Кратер Гассенди (Crater Gassendi)
- 67. Кратер Бюрги (Crater Byrgius)
- 68. Кратер Билли (Crater Billy)
- 69. Кратер Крюгер (Crater Crueger)
- 70. Кратер Гримальди (Crater Grimaldi)
- 71. Кратер Риччоли (Crater Riccioli)

Северо-Запад:

- 72. Кратер Кеплер (Crater Kepler)
- 73. Кратер Аристарх (Crater Aristarchus)
- 74. Кратер Коперник (Crater Copernicus)
- 75. Кратер Пифей (Crater Pytheas)
- 76. Кратер Эратосфен (Crater Eratosthenes)
- 77. Кратер Майран (Crater Mairan)
- 78. Кратер Тимохарис (Crater Timocharis)
- 79. Кратер Арпал (Crater Harpalus) — к северу от него кратер Пифагор (Crater Pythagoras)
- 80. Кратер Платон (Crater Plato)

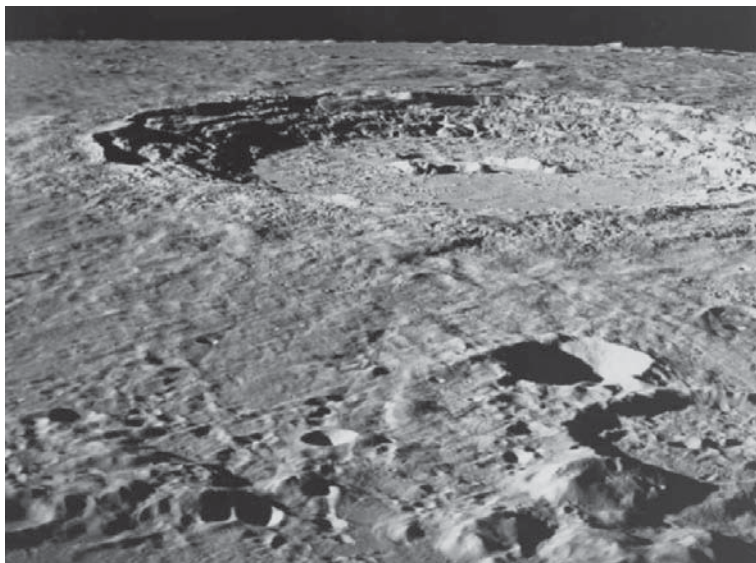


Рис. 18.4. Лунный кратер Коперник

В настоящее время вулканическая деятельность на Луне если и есть, то очень слабая. Самыми заметными деталями на поверхности Луны являются многочисленные кольцевые образования — *кратеры*. Некоторые из них можно видеть в телескоп или бинокль даже при небольшом увеличении. Кратер обычно представляет собой углубление, окруженное кольцевым валом. В центре иногда находятся одна или несколько небольших горок. Крупнейшие кратеры превышают в диаметре 100 км, но в основном они очень мелкие. Большинство кратеров возникло в результате сопровождавшихся взрывами падений космических камней — *метеоритов* — на твердую поверхность Луны. Многим крупным кратерам были даны имена ученых.

Воды на Луне нет, хотя не исключено наличие льда на дне некоторых кратеров вблизи полюсов, находящихся днем в тени.

День и ночь на Луне длятся примерно по две земных недели. Так как атмосфера на Луне отсутствует, то за день под лучами Солнца поверхность Луны нагревается до 100–130°С, а за ночь температура может упасть ниже 150°С. Резкие смены температур характерны для всех тел Солнечной системы, лишенных атмосферы.

Луна не обладает ни атмосферой, ни магнитным полем, поэтому частицы солнечного ветра и более энергичные ча-

стицы космических лучей непрерывно “обстреливают” ее поверхность. Основные детали лунного рельефа, которые можно наблюдать невооруженным глазом или в телескоп, приведены в Приложении II.

18.4. Вопросы

1. Какие детали на Луне видны: а) невооруженным глазом; б) в телескоп?
2. Опишите, каким должно выглядеть небо с Луны, чем оно отличается от земного неба.
3. Через какие промежутки времени в среднем должны наступать приливы и отливы в каждом данном месте на Земле?
4. В какие фазы Луны можно ожидать наиболее сильных приливов (учесть приливное влияние Солнца)?
5. Почему на поверхности Земли метеоритные кратеры встречаются редко, а на Луне их очень много?
6. Почему горы и кратеры на Луне плохо заметны в телескоп вблизи полнолуния?
7. Как выглядит Земля с Луны?

18.5. Упражнения

- 1*. С какой скоростью движется центр Земли вокруг центра масс системы Земля–Луна?
2. Чему равна угловая скорость обращения Луны вокруг Земли?
3. Зная угловую скорость движения Луны относительно Земли и Земли относительно Солнца, свяжите период смены фаз Луны и период ее осевого вращения.
4. Зная размер и массу Луны, вычислите, во сколько раз все тела на ее поверхности весят меньше, чем на Земле.

§ 19. Физические свойства больших планет

19.1. Меркурий. Поперечник ближайшей к Солнцу планеты Меркурий превышает лунный менее чем в 1,5 раза. Объем и масса планеты примерно в 20 раз меньше, чем у нашей планеты. Скорость осевого вращения Меркурия была измерена по доплеровскому изменению частоты радиоимпульсов, отраженных при радиолокации планеты. Оказалось, что она вращается вокруг оси с периодом $T_s = 58,6$ земных суток. Это не намного меньше года на Меркурии, продолжающегося около 88 земных суток. Орбитальное и осевое вращения планеты происходят в одну и ту же сторону. Сложение этих движений приводит к тому, что

солнечные сутки на Меркурии, как и на Земле (см. п. 6.1), оказываются длиннее, чем период вращения вокруг оси (звездные сутки). Чтобы найти продолжительность солнечных суток T_c , надо вычислить угловую скорость ($2\pi/T_c$) вращения планеты относительно Солнца, которая равна разности угловых скоростей осевого ($2\pi/T_s$) и орбитального ($2\pi/T_o$) движения планеты:

$$2\pi/T_c = 2\pi/T_s - 2\pi/T_o.$$

Отсюда $T_c = T_o \cdot T_s / (T_o - T_s) \approx 176$ земным суткам. Меркурий оказывается уникальной планетой: солнечные сутки на нем продолжаются два его года!

Орбита Меркурия довольно вытянута, так что его расстояние от Солнца меняется от 46 до 70 млн км.

Во сколько раз меняется мощность солнечного излучения, падающего на Меркурий, в течение меркурианского года?

Наблюдения показали, что Меркурий практически лишен атмосферы. За день его поверхность нагревается до максимальной температуры ~ 700 К, а за долгую ночь опускается до 100 К. Это рекордный перепад суточных температур для тел Солнечной системы.

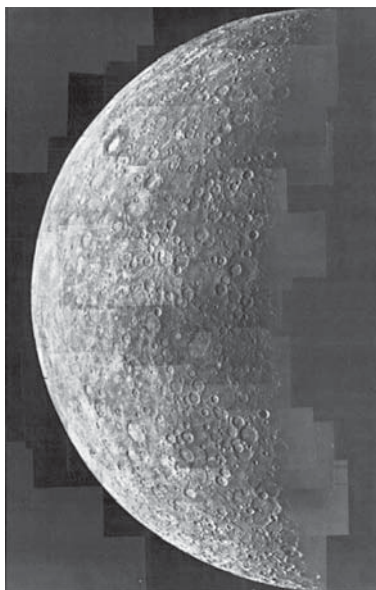


Рис. 19.1. Мозаичная фотография Меркурия (КА "Маринер-10" (НАСА))

На небе Меркурий можно увидеть только в лучах утренней или вечерней зари вблизи Солнца, от которого он удаляется не более, чем на $27^{\circ}50'$. Долгое время он был малоизученной планетой. С Земли практически невозможно наблюдать какие-либо детали на поверхности этой планеты. Подробные телевизионные изображения поверхности Меркурия были получены американской космической станцией “Маринер-10” в 1974–1975 гг. Поверхность планеты оказалась удивительно похожей на поверхность Луны (рис. 19.1), хотя там нет таких высоких гор, как на спутнике Земли. На ней также имеются следы древней космической бомбардировки: кратеры различных размеров, самые крупные из которых достигают 300 км.

У Меркурия обнаружено магнитное поле, которое примерно в 300 раз слабее, чем у Земли.

19.2. Венера. Венера — ближайшая к Земле планета и может наблюдаться как очень яркий объект на утреннем или вечернем небе. Среди звезд и других планет ей нет равных по яркости. Во время наибольшей элонгации ее видимая звездная величина достигает $-4,4^m$. Даже в небольшой телескоп виден диск Венеры и можно наблюдать ее фазы. По своим размерам и массе вторая от Солнца планета — Венера — лишь немного уступает Земле. Поэтому средняя плотность ее вещества и ускорение силы тяжести на поверхности почти такие же, как и у Земли. Наблюдать ее на небе в виде самой яркой утренней или вечерней звезды гораздо легче, чем Меркурий, поскольку наибольшее удаление Венеры от Солнца (элонгация) достигает 48° .

Период обращения Венеры вокруг Солнца составляет 225 земных суток. Радиолокационные измерения показали, что вращение вокруг оси происходит за 243 земных суток, причем в противоположную сторону по отношению к направлению вращения планет вокруг Солнца (*обратное вращение*). В результате сложения осевого и орбитального движений Венеры за один оборот вокруг Солнца происходит два восхода и два захода Солнца, а длительность солнечных суток составляет 116 земных суток.

Проверьте эти выводы, выполнив вычисления, аналогичные предложенным выше для Меркурия (§19.1).

Следя за прохождением Венеры по диску Солнца, М. В. Ломоносов в 1761 г. открыл, что она окружена мощной атмосферой, преломляющей световые лучи. Эта атмосфера непрозрачна для видимых лучей и полностью скрывает от нас поверхность пла-

неты, которая освещается только рассеянным солнечным светом. Поэтому на поверхности Венеры всегда пасмурно.

Увидеть и подвергнуть исследованиям поверхность Венеры оказалось возможным только с помощью радиолокации (радиоволны свободно проходят сквозь атмосферу планеты), а также используя спускаемые космические аппараты. Венера исторически была первой планетой, с поверхности которой спускаемые аппараты передали на Землю телевизионные изображения (“Венера-9” и “Венера-10”, 1975 г.). На рис. 19.2 изображена панорама поверхности Венеры в месте посадки аппарата “Венера-14” (1982 г.).



Рис. 19.2. Часть панорамы Венеры, переданной спускаемым аппаратом “Венера-14”

Подробные карты Венеры удалось получить при помощи радиолокации как с Земли, так и с борта искусственных спутников Венеры (советская станция “Венера-16” и американские “Пионер-Венера-1” и “Магеллан”) (рис. 19.3). Поверхность планеты носит следы активной вулканической деятельности. На Венере найдено несколько горных областей, причем самый большой горный район — земля Иштар — по площади вдвое превышает Тибет. В центре его на высоту 11 км поднимается гигантский вулканический конус, принадлежащий горам Максвелла. Имеются на планете и кольцевые кратеры, по-видимому метеоритного происхождения, а также образования, характерные только для Венеры, например куполообразные холмы, паутинные сети лавовых потоков и тектонические трещины. Мелких кратеров, каких очень много на Луне и Меркурии, на Венере нет. Обширные равнины с многочисленными следами излияния лавы — отличительная черта поверхности Венеры.

В результате проведения экспериментов на спускаемых аппаратах был определен химический анализ венерианского грунта. По составу он оказался похожим на земные базальты.

Атмосфера Венеры оказалась очень плотной: у поверхности ее плотность всего лишь в 10 раз меньше, чем у воды, а давление примерно в 90 раз больше, чем давление воздуха у поверхности

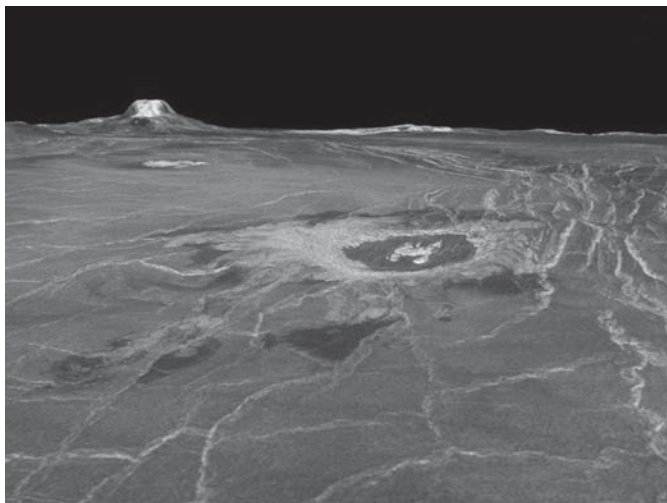


Рис. 19.3. Изображение поверхности Венеры, восстановленное по радиолокационным данным аппарата “Магеллан” (НАСА)

Земли — как на глубине 900 м в земном океане. Атмосфера Венеры на различных высотах была изучена при помощи советских и американских АМС. Выяснилось, что она содержит очень мало кислорода и состоит в основном из углекислого газа (96,5%). На высотах 50–70 км располагаются мощные облачные слои и дуют ураганные ветры. В 1984 г. был осуществлен уникальный эксперимент: советские космические станции “Вега-1” и “Вега-2” сбросили в облачный слой Венеры надувные баллоны, снабженные различными приборами для изучения атмосферы. Путь этих баллонов над планетой отслеживался наземными радиоинтерферометрами.

В отличие от земных облаков облака на Венере почти не содержат воды. Зато в них содержится серная кислота с различными химическими примесями.

Плотный углекислый газ (CO_2), из которого в основном состоит атмосфера, играет роль одеяла, укутывающего планету и сохраняющего ее тепло. Это объясняется тем, что CO_2 плохо пропускает инфракрасное тепловое излучение планеты. Благодаря этому вблизи поверхности Венеры, как в оранжерейном парнике, накапливается энергия, приносимая солнечными лучами, и температура достигает почти 500°C . Суточные и сезонные изменения температуры на Венере несут незначительные.

Оцените по закону Вина, на какую длину волны приходится максимум в спектре излучения горячей поверхности Венеры.

19.3. Марс. Марс получил имя бога войны из-за своего красноватого цвета. Марс примерно вдвое меньше Земли по диаметру и в 9 раз — по массе. Год на Марсе длится около двух земных лет ($T \approx 687$ сут.), но период вращения планеты вокруг оси почти такой же, как у Земли, и примерно на тот же угол ось вращения наклонена к плоскости орбиты (см. рис. 16.1). Поэтому смена дня и ночи на Марсе происходит так же, как и на Земле. Так же как и на Земле, на Марсе наблюдается смена сезонов, но она происходит вдвое медленнее из-за более длинной продолжительности года.

В телескоп на Марсе видны темные и светлые участки поверхности и белые полярные области — северная и южная *полярные шапки* (см. рис. 19.4 а), состоящие из замерзшей углекислоты и обычного водяного льда. Более мелкие детали поверхности стали доступны изучению только в результате полетов АМС к этой планете (рис. 19.4 б).

Изучение Марса с близкого расстояния началось во второй половине XX в. с помощью целой серии советских и американских космических аппаратов. Две американские станции (“Викинг-1” и “Викинг-2”), опустившиеся на Марс в 1976 г., впервые провели ряд сложных экспериментов по изучению марсианского грунта и, в частности, поиску в нем следов живых микроорганизмов. Исследования дали отрицательный результат: признаков жизни на Марсе не обнаружено.

Комплексное исследование поверхности Марса, его полярных шапок и свойств его атмосферы над равнинами и горами проведено с помощью космического аппарата “Марс Экспресс”, запущенного Европейским космическим агенством (ЕКА) в 2003 г. В этом эксперименте приняли участие несколько европейских стран, включая Россию. С 2006 г. к исследованию Марса подключился КА “Разведчик Марс-орбитер”, запущенный в США. На получаемых им изображениях на поверхности Марса различимы детали размером всего несколько метров.

Большая часть поверхности Марса — это сухая холодная пустыня, покрытая красноватым песком с разбросанными повсюду крупными и мелкими камнями. На Марсе сохранились и многочисленные кратеры метеоритного происхождения, хотя они сильно изменены ветровой эрозией. Есть на планете и горные районы. Несколько гор очень большой высоты представляют

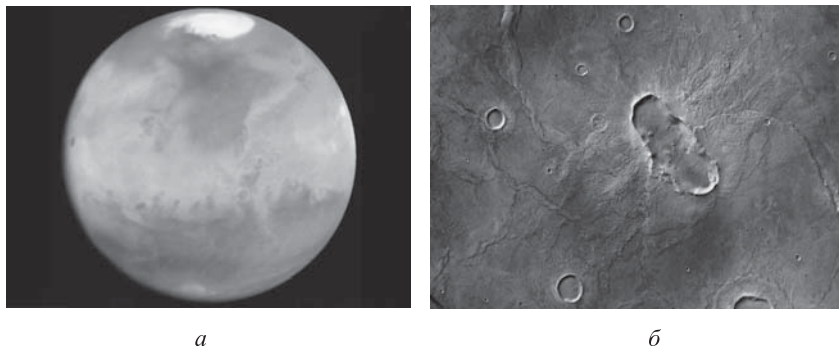


Рис. 19.4. *а* — Марс. Космический телескоп “Хаббл” (НАСА). *б* — Кратеры на равнинной поверхности Марса. “Марс Экспресс” (ЕКА)

собой давно потухшие вулканы. Самая большая из них — гора Олимп — имеет высоту около 25 км — втрое выше Эвереста! Это самая высокая гора во всей Солнечной системе.

Температура на Марсе в среднем составляет около -60°C . Днем вблизи экватора она бывает от -10° до -30°C , и только изредка может подниматься выше 0°C . Ночью температура обычно падает ниже -100°C . В околополярных областях еще холоднее. Углекислый газ, из которого в основном состоит атмосфера, и водяные пары вымерзают, образуя полярные шапки. Летом размер полярных шапок уменьшается, зимой, с усилением холодов, возрастает.

Открытых водоемов на Марсе нет. Однако вода на планете все же существует в замерзшем состоянии — в полярных шапках и в грунте, в форме вечной мерзлоты.

На поверхности Марса заметны длинные извилистые долины, похожие на русла высохших рек или системы оврагов. Возможно, миллиарды лет назад Марс обладал более мощной атмосферой и климат на нем в далеком прошлом, по-видимому, был более теплым. Тогда на Марсе могло существовать некоторое количество незамерзшей воды, а следовательно, были озера и реки.

Атмосфера Марса значительно разреженнее, чем у Земли. В среднем давление у поверхности примерно в 150 раз меньше земного — такое же, как на высоте около 30 км. Помимо углекислого газа, который составляет 95 % атмосферы, в ее состав входят азот, аргон и немного водяных паров. Обнаружены также слабые следы метана, происхождение которого пока неясно.

Сильные перепады температуры на планете иногда приводят к возникновению ураганных ветров и охватывающих всю пла-

нету пылевых бурь, при которых пыль и песок поднимаются на десятки километров над поверхностью. В атмосфере часто возникают высокие вихревые столбы — торнадо. Все это — типично марсианские явления.

У Марса два небольших спутника — Фобос и Деймос (что по-гречески означает “страх” и “ужас”). Они очень близки к планете, особенно Фобос, удаленный от центра Марса менее чем на 2,8 его радиуса. Поэтому угловая скорость его обращения (период менее 7 ч 40 мин) больше скорости суточного вращения самого Марса (период которого на 37 мин превышает земные сутки). Поэтому Фобос быстро перемещается по марсианскому небу с запада на восток! Изображения, полученные космическими аппаратами, показывают, что оба спутника представляют собой каменные глыбы неправильной формы с хорошо заметными следами ударов метеоритов. Размер Фобоса 22–25 км, Деймос — меньше (около 13 км) и удален от Марса на 6,9 его радиуса.

19.4. Юпитер. Это самая крупная планета Солнечной системы. Диаметр Юпитера в 11 раз превышает поперечник Земли. Планета очень быстро вращается вокруг оси: сутки на ней длятся менее 10 земных часов. Время обращения Юпитера вокруг Солнца составляет почти 12 лет. Подробные данные о Юпитере и его спутниках (как и о более далеких планетах) были получены с помощью нескольких космических аппаратов, изучавших их с близкого расстояния.

Юпитер обладает толстым облачным слоем. Облака на Юпитере состоят в основном из кристалликов аммиака и его соединений, а “воздух” — это смесь самых легких газов — молекулярного водорода и гелия. Обнаружена также небольшая примесь метана, аммиака и паров воды. Облака образуют вытянутые вдоль экватора полосы, что и определяет внешний вид планеты. В атмосфере Юпитера наблюдаются ураганные ветры, как и в земной атмосфере, в ней возникают гигантские вихри (циклоны и антициклоны). Эти структуры в атмосфере могут сохраняться в течение столетий. Хорошо известным примером является *Большое красное пятно* — красноватое вихревое образование эллиптической формы, по размерам превышающее земной шар (12×25 тыс. км).

Юпитер, как и другие планеты-гиганты, состоит в основном из легких элементов — водорода и гелия. Средняя плотность Юпитера ($1,33 \text{ г/см}^3$) близка к плотности воды. Предполагается, что его протяженная атмосфера постепенно переходит в оболочку из молекулярного водорода, сжиженного под большим давле-

нием, а еще глубже водород переходит в особое, очень плотное, металлизированное (вырожденное) состояние. Центральная часть Юпитера — ядро — имеет температуру около 30 000 К и, возможно, состоит уже не из водорода и гелия, а из расплавленных тяжелых пород.

Измерения собственного инфракрасного излучения планеты показали, что Юпитер излучает больше тепла, чем получает от Солнца. По-видимому, это связано с медленным гравитационным сжатием, которое “подогревает” планету. Если бы Юпитер был в несколько десятков раз массивнее, он превратился бы в звезду.

Юпитер обладает мощным магнитным полем, которое у поверхности раз в 15 сильнее, чем у Земли. Оно генерируется электрическими токами в жидких недрах планеты. Захваченные этим полем быстрые заряженные частицы, летящие от Солнца, образуют мощные радиационные пояса, более обширные, чем существующие вокруг нашей планеты (см. § 17). В области магнитных полюсов планеты, как и на Земле, наблюдаются полярные сияния.

У Юпитера более 60 спутников. Четыре самых крупных из них — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто — были обнаружены еще Галилеем и называются *галилеевыми*. Их можно увидеть рядом с планетой даже в хороший бинокль. Два первых по размерам близки к Луне, два последних — к Меркурию. По внешнему виду каждый из этих спутников не похож на остальные. Галилеевы спутники движутся в плоскости экватора планеты в ту же сторону, в какую вращается сам Юпитер. Самые далекие от планеты спутники удалены от планеты более чем на 20 миллионов километров. Их размеры очень невелики (километры или десятки километров). В большинстве случаев они обращаются в направлении, противоположном направлению вращения самой планеты.

Во время пролета двух аппаратов “Вояджер” (США) мимо спутника Ио на нем были обнаружены действующие вулканы. Продукты вулканических извержений покрывают всю поверхность спутника. Спектральные наблюдения обнаружили присутствие серы. Считается, что разогрев недр Ио, приводящий к извержениям, связан с его близостью к Юпитеру; притяжение Юпитера производит мощные приливы в недрах спутника, что сопряжено с внутренним трением и выделением большого количества теплоты.

Необычный вид имеет спутник Европа. Его удивительно гладкая поверхность (ни одной возвышенности!) покрыта лаби-

ринтом тонких линий. Предполагается, что это трещины в толстой ледяной коре.

Поверхность Ганимеда испещрена длинными бороздами, происхождение которых не выяснено. Ледяная поверхность Каллисто усыпана метеоритными кратерами всевозможных размеров.

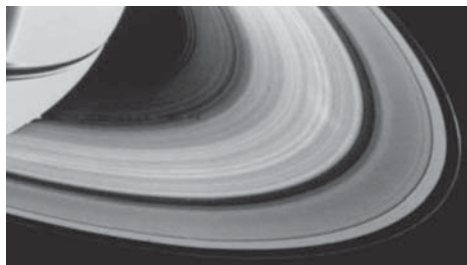
Космические аппараты выявили существование узкого и неяркого кольца, окружающего Юпитер и состоящего из мелких твердых пылевых частиц, плохо отражающих свет.

19.5. Сатурн, Уран, Нептун. Эти большие планеты в общем подобны Юпитеру, хотя и уступают ему по размерам. Как и у Юпитера, их атмосферы состоят в основном из легких газов (водорода и гелия), хотя, по-видимому, в центре у них существуют плотные твердые ядра из более тяжелых химических элементов. У всех трех планет обнаружено магнитное поле.

Сатурн по своим наблюдаемым свойствам и внутреннему строению больше всего похож на Юпитер. Но эта планета отличается от всех других планет тем, что окружена ярким кольцом. Впервые его следы заметил Галилей, хотя ему не удалось установить, что это действительно кольцо. Когда плоскость кольца располагается вдоль направления к Земле, его не видно ни в какие наземные телескопы — так оно тонко! Его толщина оказалась удивительно маленькой (несколько сотен метров) по сравнению с гигантским радиусом, составляющим более 150 000 км.



а



б

Рис. 19.5. Общий вид Сатурна и структура его колец (НАСА)

Кольцо состоит из твердых и рыхлых ледяных частиц (снежных комков) различного размера — от долей сантиметра до нескольких метров, обращающихся вокруг Сатурна со скоростью около 10 км/с в его экваториальной плоскости и хорошо отражающих свет (поэтому кольцо такое яркое). Но правильнее говорить не о кольце, а о системе колец Сатурна. Изображения, полученные межпланетными станциями, показали, что кольцо

Сатурн разделяется на многие тысячи узких колец, разделенных промежутками различной ширины (рис. 19.5). Структура колец во многом связана с гравитационным воздействием спутников Сатурна на частицы, составляющие кольца.

Как и Юпитер, Сатурн обладает большим количеством спутников (известно более полусотни). Детальные изображения ряда спутников были получены межпланетными станциями. Самый крупный спутник Сатурна — *Титан* — в полтора раза крупнее Луны и уникален тем, что обладает плотной азотной атмосферой, давление которой у поверхности около 10^5 Па (т. е. около одной земной атмосферы.). В 2005 г. была осуществлена мягкая посадка спускаемого аппарата “Гюйгенс” (НАСА, ЕКА) на поверхность этого спутника. Были получены уникальные данные об атмосфере и свойствах поверхности, частично покрытой слоем жидкости (по-видимому, жидким метаном).

У Сатурна обнаружено магнитное поле, примерно такое же как у Земли.

Уран почти вдвое дальше от Солнца, чем Сатурн, и более чем вдвое меньше него по размерам. В отличие от более близких к Солнцу планет, эта планета невооруженным глазом не видна, и была обнаружена Уильямом Гершелем в 1781 г. с помощью изготовленного им телескопа. Ось вращения планеты наклонена на 98° к плоскости орбиты, так что она вращается как бы лежа на боку, причем в обратную сторону по отношению к направлению орбитального движения. Космическим аппаратом “Вояджер-2” в 1989 г. было не только получено изображение планеты с близкого расстояния, но и обнаружено много ранее не наблюдавшихся спутников Урана. В настоящее время их известно около 30. Кроме того, подтвердилось наличие тонкой системы из нескольких колец. Ранее они были заподозрены по наблюдениям с Земли во время покрытия звезд Ураном. Перед тем как звезда заходит за диск планеты, ее свет на короткое время прерывается при прохождении через кольца. Цвет густого облачного покрова Урана, по-видимому, объясняется большим количеством замерзшего метана.

Нептун — малоизученная планета, по размеру и массе похожая на Уран, но более холодная, поскольку она удалена от Солнца в 30 раз дальше Земли. По массе планета примерно в тысячу раз превышает Землю и уступает только Юпитеру.

Планета открыта в 1846 г. на основе расчетов и анализа возмущений в движении Урана. Ее положение на небе было теоретически вычислено одновременно английским ученым Д. Адам-

сом и французским ученым У. Леверье. Обнаружение планеты явилось настоящим триумфом небесной механики.

Американская АМС “Вояджер-2”, пролетевшая мимо этой планеты в 1991 г., значительно обогатила наши представления о ней. В частности, были получены изображения кольца вокруг Нептуна, содержащие чередующиеся яркие и темные участки. По своему строению и свойствам атмосферы Нептун очень похож на Уран. В атмосфере Нептуна наблюдаются рекордные по скорости ураганные ветры со скоростью — свыше 1000 км/час.

У Нептуна обнаружено 13 спутников, размер которых превышает 30 км. Более мелких спутников, по-видимому, значительно больше. Самый крупный спутник — Тритон — гигант среди спутников планет, уступает по размеру только Луне, Титану и галилеевым спутникам Юпитера: его радиус составляет 1350 км.

19.6. Система Плутон–Харон. Плутон — карликовая планета Солнечной системы. Его размер лишь немногим превышает 1000 км. Плутон был открыт в 1930 г. в результате целенаправленных поисков, но все же достаточно случайно (К. Томбо, США). Масса Плутона почти в 500 раз меньше, чем у Земли. Осевое и орбитальное вращения Плутона происходят в противоположных направлениях, как у Венеры и Урана. Температура на поверхности составляет от -210 до -235°C . Крайне разреженная атмосфера, по-видимому, появляется у Плутона только тогда, когда он находится на ближайшем к Солнцу участке орбиты и происходит интенсивное испарение замерзших газов. Низкая температура связана с очень большим расстоянием от Солнца (около 40 а. е.). С такого расстояния Солнце должно выглядеть просто как очень яркая звезда: планета освещается Солнцем в полторы тысячи раз слабее, чем Земля.

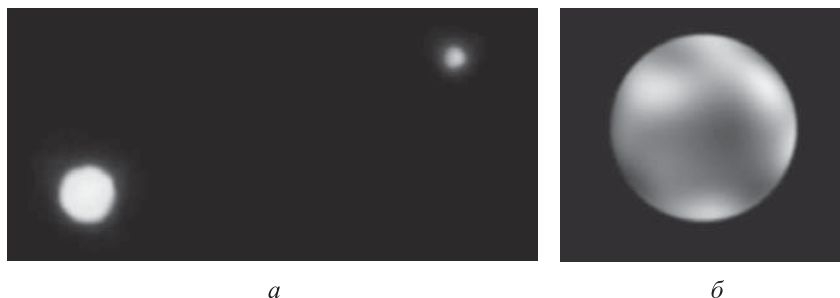


Рис. 19.6. *a* — Плутон и Харон (космический телескоп “Хаббл”, НАСА). *б* — “восстановленное” в результате компьютерной обработки изображение Плутона

В 1978 г. у Плутона был обнаружен крупный спутник, который получил название Харон. По размеру он всего раза в 2 меньше Плутона, поэтому обычно говорят о двойной системе Плутон–Харон. Оба этих тела обращаются вокруг центра масс системы, расположенного между Плутоном и Хароном. Этим система Плутон–Харон отличается от системы Земля–Луна, центр масс которой находится внутри Земли.

Плутон и Харон успели “затормозить” свое осевое вращение: эти два тела вращаются синхронно, будучи обращенными друг к другу одной и той же своей стороной, как Луна к Земле. Позднее было найдено еще два маленьких спутника Плутона размером в несколько десятков километров.

По периоду орбитального движения спутников можно оценить массу планеты (см. п. 10.1). Она оказалась очень маленькой — менее $\frac{1}{500}$ массы Земли. Пока еще о Плуtone и его атмосфере известно очень мало. В 2006 г. стартовал космический аппарат (США), который в 2015 г. должен первым достичь этой далекой карликовой планеты.

19.7. Основные причины различий физических свойств планет. Планеты очень сильно отличаются друг от друга. Особенно велико различие между планетами земной группы и планетами-гигантами. Рассмотрим, с чем это связано.

Два основных фактора, определяющие важнейшие свойства каждой планеты, — это ее расстояние от Солнца и масса. Чем больше среднее расстояние планеты от Солнца, тем меньше энергии она от него получает. По этой причине температура на планетах быстро уменьшается с увеличением расстояния от Солнца.

Напомним, что, в отличие от далеких планет, планеты земной группы, расположенные ближе к Солнцу, содержат очень мало легких газов, зато много тугоплавких элементов (кремний, железо и др.). По-видимому, это отражает особенности химического состава того протопланетного газо-пылевого диска, из вещества которого сформировались планеты: чем дальше от Солнца, тем больше легких газов содержалось в протопланетном диске. На больших расстояниях от Солнца при более низких температурах молекулы легких газов могли замерзать на пылинки, в то время как вблизи Солнца легкие газы нагревались и покидали протопланетный диск.

Масса планеты определяет ее способность удерживать вокруг себя атмосферу. Газ всегда стремится к расширению, и газовые атмосферы удерживаются вокруг планет только благодаря гра-

витационному притяжению к ним. Но из атмосферы любой планеты непрерывно происходит утечка вещества в межпланетное пространство. Причина этого понятна: она связана с тепловым движением молекул газа. Скорость каждой молекулы постоянно меняется из-за столкновения с другими молекулами. Если скорость частицы во внешнем разреженном слое атмосферы случайно превысит вторую космическую, то такая молекула может навсегда покинуть планету. Чем меньше масса планеты, тем слабее ее гравитационное притяжение и тем быстрее она теряет свою атмосферу, поскольку наиболее “быстрым” молекулам легче ее покинуть.

Из курса физики известно, что средняя скорость теплового движения молекул и атомов пропорциональна $\sqrt{T/m_0}$, где T — абсолютная температура газа, а m_0 — средняя масса его молекул (или атомов). Поэтому при любой температуре быстрее всего покидают атмосферу молекулы легких газов, имеющие более высокую среднюю скорость. Следовательно, со временем масса атмосферы и ее химический состав должны меняться. В атмосферах планет земной группы осталось очень мало легких газов (водорода и гелия). Меркурий из-за небольшой массы и высокой температуры, обусловленной близостью к Солнцу, практически вовсе лишен атмосферы. Атмосфера Марса из-за слабости его гравитационного поля сильно разрежена, а Луна и спутники планет вообще не смогли удержать вблизи себя газовую оболочку. Исключение составляет массивный и холодный спутник Сатурна — Титан, имеющий атмосферу, содержащую много достаточно тяжелого газа — азота, и небольшой спутник Юпитера Ио. Он непрерывно теряет атмосферу, которая постоянно пополняется за счет извержения вулканов. При этом вместе с выбросом лавы выделяются различные газы. По-видимому, и у планет земной группы (в том числе и у Земли) в эпоху их молодости вулканические извержения и выделения газов из недр сыграли значительную роль в образовании атмосфер.

На твердой поверхности больших планет (особенно не обладающих атмосферой) и их спутников наблюдаются многочисленные кратеры — результат метеоритной бомбардировки, которая происходит и в настоящую эпоху. Однако наиболее интенсивной она была миллиарды лет тому назад. Такие тела, как Луна, Меркурий, спутник Юпитера Каллисто и другие, где кратеров очень много и где они мало разрушались, сохранили большую часть своей поверхности в том виде, который она имела миллиарды лет тому назад. На Венере, Марсе и на некоторых спутниках (частично и на Луне) происходил процесс постепенного исчезно-

вения старых кратеров. Они могли затопляться лавой (на Луне), разрушаться под действием ветра (как, например, на Земле, Марсе и Венере) или воды (как на Земле). Поэтому изучение поверхностей различных планет и спутников дает возможность узнать об их далекой истории и путях эволюции.

Сильные магнитные поля обнаружены у трех планет: у Земли, Юпитера и Сатурна. По-видимому, их существование связано с наличием электрических токов в расплавленных недрах этих планет. Магнитные поля влияют на потоки заряженных частиц (протонов и электронов солнечного ветра), “обдувающих” планеты. На Юпитере и Сатурне, как и на Земле, эти частицы вызывают полярные сияния над магнитными полюсами планеты.

19.8. Вопросы

1. На поверхности каких планет Солнечной системы могла бы находиться вода в жидком состоянии?
2. На каких телах и в какой форме наблюдаются следы:
а) вулканической деятельности; б) метеоритной бомбардировки?

19.9. Упражнения

1. Рассчитайте ускорение свободного падения на поверхности Меркурия, Венеры, Марса. (Воспользоваться данными о размерах и массах этих планет в сравнении с Землей, табл. 2 Приложения.)
2. Под каким углом видны с Земли Венера, Юпитер и Сатурн, когда они находятся на минимальных расстояниях от нее? (Воспользоваться данными о радиусах планет и их орбит.)
3. Во сколько раз меньше солнечной энергии получают участки одинаковой площади, ориентированные перпендикулярно солнечным лучам на поверхности Марса по сравнению с Землей? А на поверхности Плутона?
4. Какой угловой размер будет иметь Солнце для наблюдателя на Плутоне?

§ 20. Малые тела Солнечной системы и межпланетная среда

20.1. Астероиды. К настоящему времени обнаружено более сотни тысяч тел небольших размеров (от нескольких сотен километров примерно до одного километра, а иногда и меньше), которые не являются спутниками планет, а движутся вокруг Солнца самостоятельно, как маленькие планеты со скоростью,

составляющей в большинстве случаев 10–30 км/с. Они называются *астероидами*, что означает “подобные звездам”. Астероиды относят к малым телам Солнечной системы. На фотографиях звездного неба их можно отличить только по медленному перемещению относительно звезд: если при хорошем гидировании звезды выглядят точками, то изображение астероида при длительных экспозициях получается в виде черточки, так что уже за несколько часов становится хорошо заметным сдвиг астероида относительно звезд.

Большая часть астероидов движется между орбитами Марса и Юпитера, где они образуют главный пояс астероидов. Их орбиты, как правило, близки к плоскости эклиптики и не слишком сильно отличаются от окружностей, поэтому лишь небольшая часть астероидов заходит за орбиту Земли. Однако есть исключения. Например, у астероида Икар орбита сильно вытянута, и его расстояние от Солнца при движении по орбите меняется более чем в десять раз. Подобные астероиды могут близко подходить к Земле и даже сталкиваться с ней, и хотя таких столкновений за историю Земли было немного, они могли приводить к катастрофическим последствиям, в том числе массовым вымираниям животных.

Многие астероиды, в том числе с размером более 100 км, относятся к транснептуновым объектам: они располагаются за орбитой Нептуна. Некоторые из них сопоставимы по размеру с Плутоном или даже больше него. Эти холодные ледяные тела как бы окаймляют границу нашей планетной системы. Но многие мелкие тела находятся еще дальше, на расстоянии десятков тысяч а. е. от Солнца.



а



б

Рис. 20.1. а — Астероид Эрос с близкого расстояния (НАСА). б — Комета Хейла-Боппа, которая весной 1997 г. была хорошо видна невооруженным глазом

Известно лишь около 30 астероидов с диаметром не менее 200 км. Самый крупный астероид главного пояса — Церера — имеет диаметр около 1000 км. Церера исторически была открыта первой, в 1801 г., и пока несколько лет спустя не обнаружилось другие тела, движущиеся по сходным орбитам между Марсом и Юпитером, ее считали равноправной с остальными планетами. В настоящее время Цереру относят к карликовым планетам. Диаметр крупнейшего транснептунового объекта, обнаруженного в 2003 г. и предварительно названного Ксена, еще больше: около 3000 км. Этот объект также классифицируется как карликовая планета. Но размеры подавляющего большинства астероидов во много раз меньше. Самые маленькие из известных астероидов не превышают 1 км. Без сомнения, существует и множество совсем мелких астероидов, которые невозможно заметить с больших расстояний. Суммарная масса всех астероидов вряд ли превышает массу Луны. Наиболее далекий известный в настоящее время объект Солнечной системы — астероид Седна — был открыт в 2003 г. Двигаясь по сильно вытянутой орбите, он удаляется от Солнца на максимальное расстояние около 400 а. е.

Периодические изменения яркости, наблюдаемые у некоторых астероидов, говорят об их неправильной форме, неровной поверхности и об их вращении вокруг своих осей. Лишь самые крупные астероиды имеют, как и планеты, шарообразную форму.

Ряд астероидов был исследован с близких расстояний при помощи космических аппаратов. Как правило, они оказывались телами неправильной формы, часто сильно вытянутыми, со следами метеоритных ударов. У ряда астероидов обнаружены спутники (например, астероид И да со спутником Д а к т и л ь). На астероид Э р о с в 2000 г. удалось успешно посадить космический аппарат “Шумейкер”, созданный в США, а японский аппарат “Хаябуса” в 2005–2006 гг. работал у поверхности и на поверхности крошечного астероида И т о к а в а, взял пробу его грунта и, вероятно, в 2010 г. сможет доставить ее на Землю.

Атмосфер у астероидов практически нет: слабая гравитация не может сколько-нибудь долго удерживать газовую оболочку.

Некоторые небольшие астероиды являются осколками более крупных, но в своей совокупности они никогда не образовывали единой планеты.

20.2. Кометы. О существовании *комет* людям известно с глубокой древности. Туманные хвостатые светила, очень медленно перемещающиеся по звездному небу, считались посланца-

ми богов, связанными, как правило, с дурными предзнаменованиями.

Природа комет долгое время была совершенно неизвестной, хотя еще в XVI в. Тихо Браге показал, что кометы дальше Луны. В XVII в. современник и друг И. Ньютона Э. Галлей доказал периодичность появления одной из комет, получившей впоследствии его имя. Он точно рассчитал ее движение под действием солнечного притяжения. Орбита кометы Галлея оказалась сильно вытянутой. Период ее обращения вокруг Солнца 76 лет. В конце 1985 — начале 1986 г. эта комета в очередной раз прошла вблизи Солнца. Ее можно было наблюдать с Земли в бинокль.

Хорошо заметные невооруженным глазом кометы появляются на небе довольно редко. Однако при помощи телескопов слабые кометы можно наблюдать в любую ночь. Они видны как едва заметные туманные пятнышки на темном небе, медленно перемещающиеся на фоне далеких звезд. Ежегодно открываются ранее неизвестные кометы. Во многих случаях новые кометы обнаруживают любители астрономии.

Основная масса кометы сосредоточена в ее *ядре*, состоящем из обычного льда, замерзших газов и твердых вкраплений. Ядро может иметь размеры до нескольких километров. Когда комета приближается к Солнцу, ядро нагревается и начинает разрушаться. Вокруг него возникает светящаяся под действием солнечных лучей газовая оболочка — *кома*. Поток частиц ионизированного газа, непрерывно летящих от Солнца (*солнечный ветер*), взаимодействует с газом кометы посредством своего магнитного поля и “сдувает” его в сторону, противоположную Солнцу. На пылинки, покидающие ядро кометы вместе с газом, действует световое давление солнечных лучей. В итоге у кометы развивается длинный *хвост* из очень разреженного газа и пыли, направленный в сторону, противоположную Солнцу (рис. 20.1). Газовый и пылевой хвост иногда видны раздельно. Размеры хвоста в некоторых случаях превышают сотни миллионов километров, но его масса ничтожно мала, а вещество столь разрежено, что свет звезд проходит через него без поглощения. С удалением кометы от Солнца хвост постепенно исчезает. Большинство комет не подходит близко к Солнцу, поэтому хвостов у них не наблюдается. Такие кометы можно увидеть только в телескоп.

Ядра комет, переставшие терять свое вещество, не отличимы от небольших ледяных астероидов. По-видимому, между ними нет принципиальной разницы.

Основная часть комет находится далеко за пределами планетной системы, и недоступна для наблюдений. Кометы заканчивают свое существование, подойдя слишком близко к Солнцу.

Для научных исследований комет было запущено несколько космических аппаратов на встречу с ними. Они дали бесценную информацию об их химическом составе, физических свойствах, о форме и размере ядра. Первый полет такого рода состоялся к комете Галлея, когда она в очередной раз прошла через внутреннюю часть Солнечной системы. В 1999 г. в США был запущен КА “Stardust” (“Звездная пыль”), который прошел в непосредственной близости от ядра одной из комет, а в 2006 г. спускаемая капсула этого аппарата вернулась на Землю и доставила образцы пылевых частиц, выброшенных кометой.

Кометы, которые попадают во внутреннюю область Солнечной системы, под действием солнечного тепла со временем разрушаются; вещество ядра превращается в межпланетный газ, а тугоплавкие части рассыпаются на множество мелких метеоритных частиц, которые постепенно рассеиваются в широкий поток вдоль орбиты кометы.

Космическая обсерватория SOHO ¹⁾ (США) многократно регистрировала падения комет на Солнце.

В 1994 г. астрономы наблюдали редчайшее событие — столкновение кометы с Юпитером. Фрагменты разрушившегося ядра кометы размером до нескольких километров один за другим врывались в атмосферу планеты со скоростью около 65 км/с. Яркие вспышки при ударах и большие возмущения в атмосфере Юпитера наблюдались космическими и наземными телескопами. Падение подобной кометы на Землю имело бы катастрофические последствия для жизни людей — не столько из-за локальных разрушений вблизи места падения, сколько из-за выброса в атмосферу большого количества пыли, который может привести к длительному и существенному понижению температуры на планете. К счастью, вероятность этого события очень мала. Серьезные “глобальные” катастрофы на нашей планете, связанные с падением на Землю космических тел размером около километра и более, происходили в прошлом в среднем один раз в несколько десятков миллионов лет.

20.3. Откуда приходят кометы? На место комет, распадающихся под действием Солнца, постоянно приходят новые. Предполагается, что миллиарды кометных тел движутся вокруг

¹⁾ Solar Orbital Heliospheric Observatory

Солнца на периферии Солнечной системы: в поясе Койпера, на расстояниях до нескольких сотен а. е. от Солнца, и еще дальше, на расстояниях в тысячи а. е., где гигантское количество ледяных тел сохранилось еще со времен рождения планет из газопылевой среды протопланетного диска. Скорости движения кометных тел на таких расстояниях очень малы (менее 1 км/с), что делает их орбиты легко подверженными действию гравитационных сил. Время от времени некоторые из этих далеких тел под действием изменяющихся сил притяжения со стороны больших планет и даже ближайших звезд начинают двигаться в сторону Солнца и входят во внутреннюю область Солнечной системы, где мы наблюдаем их как кометы.

Таким образом, кометы, по-видимому, представляют собой уцелевшие мелкие тела, возникшие в далеком прошлом из “первичного” вещества, из которого когда-то образовались Солнце и планеты. Эти тела сохранились практически без изменений в течение последующих миллиардов лет. Поэтому исследования комет исключительно важны для изучения ранней истории Солнечной системы.

20.4. Метеоры и метеориты. Остатки больших комет, распавшихся на мелкие фрагменты, растягиваются вдоль кометных орбит, образуя *метеорные потоки*. Пересекаясь с орбитой Земли и попадая в сферу ее притяжения, мелкие тела с космической скоростью проникают в верхние слои земной атмосферы и, в результате трения о воздух, разогреваются. Из-за резкого нагрева атомы ионизируются, и по пути падения частицы на мгновение вспыхивают ярким узким след. Это явление называется *метеором*. Когда Земля пересекает поток, мелкие частицы со скоростью более 11 км/с влетают в ее атмосферу, быстро раскаляются и разрушаются на высотах в несколько десятков километров.

Метеоры можно наблюдать в любую ясную ночь. Иногда они появляются реже, иногда чаще. Каждый год около 21 октября наблюдается не очень сильный метеорный поток, связанный с кометой Галлея. Направление движения потока таково, что метеоры кажутся вылетающими из созвездия Ориона. Но чаще всего метеоры можно наблюдать в августовские ночи, когда Земля пересекает поток *персеид*. Пути этих метеоров как бы исходят из одной точки, называемой *радиантом* и находящейся в созвездии Персея. Тела с массой в десятки граммов вспыхивают как очень яркие метеоры, оставляющие за собой широкий и продолжительный след. Их называют *болидами*. Если масса падающего тела достигает нескольких килограммов, то оно может не успеть

полностью разрушиться в полете и упасть на Землю. Упавшие на Землю космические тела называются *метеоритами*.

Метеориты не содержат никаких веществ или химических элементов, которые не встречались бы на Земле. Но их структура специфична. Обычно они представляют собой либо камни с особой внутренней структурой и составом, отличающимся от состава обычных земных камней, либо металлические тела, состоящие в основном из железа с примесью никеля.

Метеориты — это образцы космического вещества. Часть метеоритов связана не с кометами, а с астероидами, по-видимому, разрушившимися при столкновениях. Исследование метеоритов представляет большую ценность для науки, так как они содержат информацию о веществе внеземного происхождения. Поэтому каждый, кто нашел метеорит или наблюдал его падение на Землю, должен сообщить об этом в Государственный комитет по метеоритам при Российской академии наук.

Падение крупных метеоритов оставило свои следы на твердых поверхностях всех планет и их спутников. Ряд крупных кратеров имеется и на Земле. Прекрасно сохранился гигантский кратер диаметром 1,4 км в США (штат Аризона), образованный тысячи лет назад падением метеорита, масса которого составляла, по расчетам, около миллиона тонн. На Земле известно и немало древних разрушенных кратеров. Размеры крупнейших из них измеряются десятками километров, а в отдельных случаях — и более 100 км.

В 1908 г. в глухой сибирской тайге, возможно, упал очень крупный метеорит, названный *Тунгусским*. Никаких осколков его найти не удалось. Он взорвался на высоте в несколько километров, не долетев до Земли. Взрыв вызвал повал леса на огромной площади и большой лесной пожар. Никаких кратеров или метеоритных следов на месте падения не обнаружено. Предполагается, что Тунгусский метеорит был ледяным ядром небольшой кометы.

В 1947 г. на Дальнем Востоке в отрогах хребта Сихотэ-Алинь раскололся на множество частей в воздухе и упал крупный железный метеорит. С площади более трех квадратных километров удалось собрать космическое вещество массой более 27 т. Общая масса выпавшего вещества оценивается примерно в 70 т. Возникший при этом *метеоритный дождь* образовал более сотни кратеров и воронок.

Мелкие метеориты падают на Землю ежедневно. Полная масса вещества, выпадающего на Землю из космического простран-

ства за сутки (главным образом, в виде очень мелких частиц космической пыли), достигает нескольких сотен тонн.

Таким образом, межпланетное пространство непрерывно пронизывается летящими пылинками, крупными и мелкими метеоритными телами.

Помимо этого твердого вещества, межпланетная среда включает сильно разреженный ионизованный газ, движущийся от Солнца через всю Солнечную систему, — *солнечный ветер*, упоминавшийся в § 20.3. Скорость этого потока составляет сотни километров в секунду, но его плотность настолько мала, что он не оказывает практически никакого влияния на движение твердых тел.

20.5. Вопросы

1. Чем астероиды по наблюдаемым проявлениям отличаются от комет?
2. Как можно узнать химический состав метеорных частиц?
3. Почему на астероидах отсутствует атмосфера?
4. Как можно по спектру кометного хвоста узнать о содержании в нем газа? А пыли?
5. Почему все метеориты входят в атмосферу со скоростью, не меньшей чем 11 км/с?
6. Можно ли наблюдать метеоры на Луне?
7. Объясните, почему под утро в среднем наблюдаются более быстрые метеоры, чем вечером.

20.6. Упражнения

1. Как по скорости орбитального движения астероида можно узнать его расстояние от Солнца? (Считать, что его орбита близка к круговой.)
2. Какая энергия выделится при ударе о Землю метеорита массой 100 кг, имеющего скорость у поверхности Земли 2 км/с? Почему скорость удара меньше второй космической скорости?

Основные выводы

Наша планетная система включает в себя несколько типов тел, обращающихся вокруг Солнца: большие планеты с их спутниками, карликовые планеты, астероиды, кометы, метеориты, мелкую пыль и разреженный газ, движущийся от Солнца (солнечный ветер).

Объекты Солнечной системы обладают рядом общих закономерностей, представляющих собой результат единого процесса образования Солнца и планет, происходившего 4–5 млрд лет тому назад.

Следствием этого процесса явилось появление планет, которые можно разделить на две группы: планеты типа Земли и планеты-гиганты. Они различаются по размерам, массе, плотности вещества и химическому составу, составу атмосфер, скорости вращения и т. д. Физические свойства больших и малых планет Солнечной системы весьма разнообразны и определяются в первую очередь массой и расстоянием от Солнца.

Небольшие тела, вторгающиеся в атмосферу Земли из межпланетного пространства, сгорают в ней, вызывая явление метеоров. Более крупные могут упасть на поверхность Земли (метеориты) и даже оставить долго сохраняющиеся на ней следы.

Глава 6

ЗВЕЗДЫ И СОЛНЦЕ

§ 21. Звездные величины

21.1. Шкала звездных величин. Обычно на картах звездного неба звезды изображают кружками различного размера, чтобы показать, какая из них ярче, а какая — слабее. Конечно, размер этого кружка не имеет никакого отношения к действительным размерам звезды.

Самая яркая звезда на ночном небе — Сириус. По сравнению с ней звезды, едва заметные невооруженным глазом, примерно в тысячу раз слабее, а лучшим телескопам доступны звезды, от которых приходит еще меньше света — в сотни миллионов раз. Из-за такого большого различия между количеством света, приходящего от звезд, измерять его удобнее не в линейном, а в логарифмическом масштабе. Для этого используется особая система единиц — *шкала звездных величин*. Ее основы были заложены еще в глубокой древности. Греческий астроном Гиппарх во II в. до н.э. впервые ввел понятие *звездной величины* как меры видимой яркости звезды, оцениваемой на глаз. Самые яркие звезды он отнес к первой величине, а едва заметные невооруженному глазу — к шестой. Эта шкала звездных величин в модернизированном виде широко используется и в настоящее время.

Кажущаяся «яркость» звезды определяется количеством световой энергии, приходящей от нее за единицу времени на площадку единичной площади, перпендикулярную лучам. В физике эта величина называется *освещенностью*. В астрономии она измеряется и выражается в *звездных величинах*.

Измерять приходящую от звезды световую энергию в абсолютных физических единицах (например, в Вт/м²) на практике очень трудно. Обычно производят относительные оценки, сопоставляя источники друг с другом. Для этого наблюдаемая звезда сравнивается с другими звездами, звездные величины которых

уже известны или приняты в качестве стандарта. Звездные величины обозначаются индексом m (от лат. *magnitudo* — величина), который ставят сверху после числового значения (например, 5^m). Следуя Гиппарху, **звездную величину источника условились считать тем большей, чем слабее он выглядит.**

Оценки, полученные Гиппархом для нескольких сотен звезд, были очень грубыми. Измерения, выполненные в середине XIX в., показали, что разности в 5^m в шкале Гиппарха соответствует отношение освещенностей почти 1 : 100. Тогда было решено создать новую, уже строгую шкалу, в которой это отношение в точности равно 1 : 100. В этом случае различие в 1^m соответствует отношению освещенностей, равному $(100)^{1/5} = 2,512$. Для m звездных величин оно составляет $(2,512\dots)^m$. Отсюда следует, что звездные величины двух звезд отличаются на единицу, если создаваемые ими освещенности отличаются в 2,512 раза, на две единицы — если освещенности отличаются в $2,512^2 = 6,31$ раз, на три — в $(2,512)^3 = 15,85$ раз, на четыре — в $(2,512)^4 = 39,81$ раз, на пять — в $(2,512)^5 = 100$ раз и т. д.

Это условие означает, что освещенности от двух объектов, звездные величины которых равны m_1 и m_2 , связаны соотношением

$$\frac{E_1}{E_2} = (2,512\dots)^{-(m_1-m_2)},$$

или

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = -0,4(m_1 - m_2). \quad (21.1)$$

Из последнего равенства следует, что разность звездных величин двух объектов равна десятичному логарифму отношения создаваемых ими освещенностей, умноженному на коэффициент, равный $-1/0,4 = -2,5$.

Формула (21.1) позволяет определять звездные величины не только слабых звезд, но и объектов ярче $m = 1$; для них m принимает нулевое или отрицательное значения. Так, Луна в полнолуние имеет звездную величину $-12,5^m$. Получающаяся таким путем шкала звездных величин изображена на рис. 21.1. У звезды Вега $m = 0,0^m$, звездная величина Сириуса равна $-1,46^m$, а у Полярной $+2,3^m$.

Звездные величины в настоящее время измеряют при помощи телескопов, снабженных точными фотоэлектрическими приемниками излучения — *электрофотометрами*. В них регистрируется количество электрических импульсов, возникших в результате фотоэффекта при освещении приемника звездой. Результаты из-

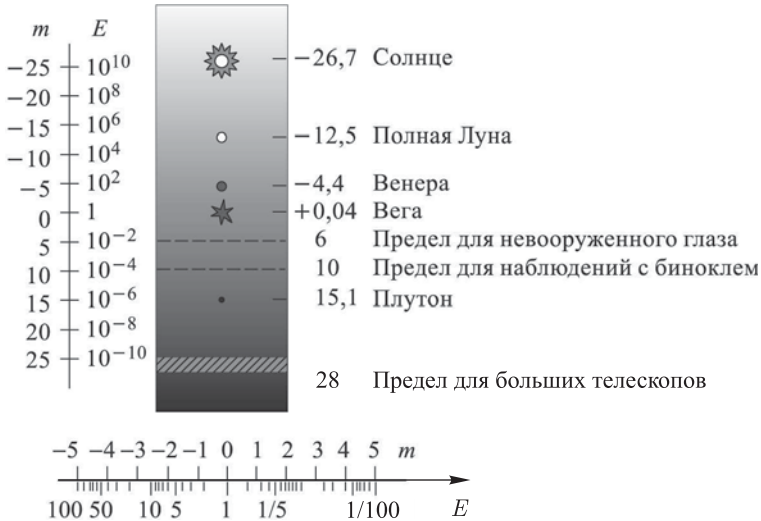


Рис. 21.1. Шкала звездных величин

мерений обычно поступают в компьютер, который обрабатывает их и хранит в своей памяти.

Специальными измерениями получено, что **в видимой области спектра от звезды нулевой величины на площадь поверхности 1 м^2 приходит примерно 10^{10} фотонов за 1 с.** Отсюда можно получить, что число фотонов, приходящих от звезды 25^m , в $10^{0,4 \cdot 25} = 10^{10}$ раз меньше, или всего лишь 1 фотон на 1 м^2 за 1 с. Наблюдения с использованием больших телескопов при длительном накоплении света позволяют зарегистрировать излучение еще более слабых объектов, примерно до 28^m – 30^m .

Зависит ли звездная величина звезды от того, в какой телескоп она наблюдается?

В астрономии используется несколько систем звездных величин. Каждая характеризуется своим определенным интервалом длин волн (областью спектра), к которому измеряется световая энергия. Все приведенные в этой книге звездные величины относятся к желто-зеленой области спектра, в которой наиболее чувствителен глаз человека. Такая звездная величина обычно обозначается латинской буквой V . Звездные величины определяются и в других областях спектра: ультрафиолетовой (U), голубой (B), красной (R), инфракрасной (I , H или K). Разность звездных величин источника, измеренных в различных областях спектра (к примеру, $U-B$ или $B-V$), зависит от цвета его из-

лучения и называется *показателем цвета*. Ее используют для количественной оценки цвета данного объекта.

Любопытно, что глаз человека плохо различает цвета при слабом освещении, например, цвет звезд. Только у самых ярких звезд заметен легкий красноватый или голубоватый оттенок, а все слабые звезды кажутся одинаково белыми. Это связано с особенностями нашего зрения: глаз ощущает цвет лишь при достаточно большой освещенности (только тогда в сетчатке начинают “работать” специальные клетки — так называемые колбочки, реагирующие на цвет). Однако с помощью фотоэлектрических приборов цвет измеряется с большой точностью даже у очень слабых звезд.

21.2. Типовая задача. Суммарная звездная величина объектов.

Условие. Двойная звезда состоит из двух близких компонентов со звездными величинами m_1 и m_2 . Компоненты в отдельности неразличимы. Какова суммарная звездная величина этого объекта, если $m_1 = 2$ и $m_2 = 3$?

Решение. По формуле (21.1) находим отношение освещенностей обоих компонентов двойной звезды:

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = -0,4(m_1 - m_2); \quad E_1/E_2 = 10^{-0,4(m_1 - m_2)},$$

а затем — суммарную освещенность от них:

$$E = E_1 + E_2 = E_1 + E_1 \cdot 10^{0,4(m_1 - m_2)}.$$

Наконец, по формуле (21.1) определим искомую звездную величину всего объекта:

$$\begin{aligned} m &= m_1 - 2,5 \lg(E_1 + E_2)/E_1 = \\ &= m_1 - 2,5 \lg \left[1 + 10^{0,4(m_1 - m_2)} \right] = 1,64^m. \end{aligned}$$

21.3. Упражнения

1. Во сколько раз отличаются освещенности, создаваемые Вегой и Полярной звездой?
2. Звездная величина полной Луны равна $-12,5^m$. Определите звездную величину Солнца, если создаваемая им освещенность в 400 000 раз выше, чем создаваемая Луной.
3. На сколько отличаются звездные величины звезд, если освещенности от них относятся как $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$, 10, 100, 1000?

4. Какую звездную величину имеет скопление из N звезд, если звездная величина каждой из них равна m ?
5. Большие телескопы позволяют получать изображения звезд до 28^m . Во сколько раз эти объекты слабее звезд, едва различимых невооруженным глазом (6^m)? Сколько фотонов от звезды 28^m падает на объектив телескопа диаметром 4 м ежесекундно?
6. Какая энергия попадает ежесекундно в глаз человека, наблюдающего такую яркую звезду, как Вега (звездная величина $m = 0$)? Площадь зрачка глаза принять равной 10 мм^2 . Среднюю энергию фотона в видимой области спектра принять равной 2 эВ .

§ 22. Основные свойства звезд

22.1. Звезды — важнейшие объекты Вселенной. Напомним, что звезды — это массивные горячие газовые шары. Они подобны Солнцу, но настолько удалены от нас, что видны лишь как слабосветящиеся точки на фоне темного ночного неба. С помощью телескопов на всем небе можно наблюдать миллиарды отдельных звезд и звездных систем.

В звездах сосредоточено более 95 % всего наблюдаемого в природе вещества. Изучая, как распределены в пространстве звезды и их скопления, астрономы исследуют тем самым строение окружающего нас мира, структуру Вселенной.

Звезды кажутся неизменными. Их видимая яркость и относительное расположение остаются практически теми же в течение многих веков. Однако очень медленно по земным масштабам они все же меняются. Звезды перемещаются в пространстве друг относительно друга, стареют, со временем медленно изменяя свою яркость, могут “сбрасывать” в окружающее пространство часть своего вещества, и, наконец, “умирают”, переставая излучать видимый свет. Наиболее массивные звезды (Солнце к ним не относится) в конце жизни могут взрываться. Со временем меняется даже химический состав звезд: новые химические элементы рождаются в их недрах. В звездах возникло большинство химических элементов окружающего нас мира. Родившиеся в звездах атомы гелия, углерода, кислорода и других элементов попадают в межзвездную среду вместе с веществом, сбрасываемым звездами. Затем из этой среды рождаются новые поколения звезд. Атомы, из которых состоим мы сами, успели побывать в недрах

звезд или родились там еще до того, как возникла Солнечная система.

При определенных условиях вместе со звездами могут возникать и планеты, обращающиеся вокруг них. Изучение эволюции звезд помогает понять, как могла возникнуть наша планетная система, как рождаются новые поколения звезд и какие изменения постепенно происходят в окружающей нас Вселенной. Поэтому исследование природы звезд, их возникновения и эволюции — важнейшая задача современной астрономии.

Мощное излучение звезд объясняется их огромными массами, размерами и высокой температурой. Звезда излучает как сильно нагретое тело. Но если бы звезды не “подогревались” изнутри, они давно бы остыли и перестали светить. Излучая энергию в окружающее пространство, звезды непрерывно пополняют свою тепловую энергию за счет естественного ядерного реактора, каким являются их центральные области.

Исследование звезд во многом облегчается тем обстоятельством, что одна из них, а именно наше Солнце, по астрономическим масштабам очень близка к нам. С Земли можно подробно изучать не только Солнце в целом, но и отдельные детали его атмосферы. Солнце — это наиболее изученная звезда. Для нас оно играет особую роль, потому что жизнь на Земле существует только благодаря его свету и теплу. Тем не менее Солнце — одна из типичных, рядовых звезд. Но это стало очевидным лишь после того, как научились оценивать расстояния до звезд.

22.2. Расстояния до звезд. Расстояния до наиболее близких звезд оценивают методом тригонометрического параллакса (см. п. 8.5). Для этого тщательно измеряют, как меняется направление на звезду в течение года вследствие движения Земли вокруг Солнца. Близкие звезды имеют большие параллактические смещения, чем далекие, поскольку это смещение обратно пропорционально расстоянию до них (см. п. 8.5). По той же причине близкие предметы быстрее перемещаются на фоне далеких, когда мы проезжаем мимо них.

Впервые попытку определить параллактическое смещение звезд предпринял еще Коперник. Он хорошо понимал, что обнаружение такого смещения послужило бы доказательством обращения Земли вокруг Солнца и подтверждением гелиоцентрической системы мира. Но в те времена точность измерений была слишком низкой, для того чтобы обнаружить параллактическое смещение звезд. Коперник лишь смог сделать вывод, что звезды

находятся по крайней мере в тысячу раз дальше от нас, чем Солнце.

Впервые параллактические смещения нескольких ближайших звезд удалось обнаружить лишь в середине XIX века, когда точность угломерных измерений стала достаточно высокой. Чтобы выявить перемещение звезды, тщательно измеряется ее положение относительно слабых, значительно более далеких звезд, направления на которые из-за большого расстояния остаются практически неизменными в течение года. Эти измерения необходимо проводить в различные моменты времени в течение года. Траектория, по которой происходит вызванное движением Земли видимое перемещение звезды, имеет форму эллипса, тем более сжатого, чем она ближе к эклиптике. Звезда “обходит” его с периодом в 1 год. Это, конечно, не действительное движение звезды, а лишь отражение движения наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца.

Большая полуось эллипса параллактического смещения называется *годовым параллаксом* (или просто *параллаксом*) звезды. Его обычно измеряют в долях секунды дуги. Даже у самых близких к Солнцу звезд параллакс ничтожно мал, меньше $1''$, именно поэтому его долгое время не удавалось измерить.

Рассчитайте, на каком приблизительно расстоянии (в километрах) надо поместить мяч диаметром 40 см, чтобы он был виден под углом $1''$.

Параллаксом p называется угол рис. 22.1, под которым со звезды была бы видна большая полуось земной орбиты, развернутая перпендикулярно направлению на звезду.

Если значение параллакса известно, то из $\triangle AOS$ легко получить расстояние D , выраженное в тех же единицах, что и длина AO полуоси орбиты:

$$D = AO / \sin p. \quad (22.1)$$

В астрономических единицах:

$$D_{\text{а.е.}} = 1 / \sin p. \quad (22.2)$$

Поскольку параллакс звезды очень мал (меньше $1''$), можно использовать формулу для малых углов: $\sin p \cong p$, где p выражено в радианах. Учитывая, что $1'' = \frac{1}{206265}$ радиана, формулу (22.2) можно записать иначе:

$$D_{\text{а.е.}} = 206\,265 / p'', \quad (22.2a)$$

где p'' — параллакс в секундах дуги.

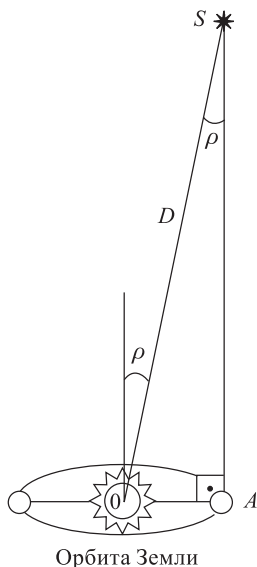


Рис. 22.1. Параллакс звезды

Зная соотношение между световым годом и астрономической единицей ($1 \text{ св. год} = 63\,240 \text{ а. е.}$), легко выразить полученное расстояние в световых годах:

$$D_{\text{св.г.}} = 3,26/p'' \quad (22.3)$$

Измерения параллаксов звезд привели к появлению еще одной единицы расстояния, очень часто используемой в астрономии, — *парсек* (пк); термин образован от слов “параллакс” и “секунда”; 1 ПК — расстояние, которому соответствует параллакс в $1''$. Чем меньше параллакс, тем дальше находится звезда. Если, например, $p = 0,1''$, то расстояние до звезды в десять раз больше, чем при $p = 1''$, т.е. оно равно 10 парсекам (не забывайте склонять это наименование!). Таким образом, расстояние, выраженное в парсеках, равно обратному значению параллакса в секундах дуги:

$$D_{\text{ПК}} = 1/p'' \quad (22.4)$$

Сравнение этого выражения с (22.2а) и (22.3) показывает, что $1 \text{ ПК} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,26 \text{ св. года}$.

Расстояние до ближайших к Солнцу звезд измеряется несколькими парсеками (см. табл. 3 Приложения). Самые близкие к Солнцу звезды расположены в южном созвездии

Центавра: это Проксима (Ближайшая) и α Центавра. Расстояние до них составляет 1,3 пк.

Если расстояние от Земли до Солнца принять за один метр, то каким окажется расстояние до ближайшей к нему звезды?

Для выражения очень больших расстояний обычно используют килопарсеки (1 кпк = 10^3 пк) и мегапарсеки (1 Мпк = 10^6 пк).

Наибольшее число параллаксов звезд было измерено с помощью космического аппарата ГИППАРКОС, специально разработанного для этой цели и запущенного на околоземную орбиту Европейским космическим агентством. Для сотен тысяч звезд были измерены годовые параллаксы с точностью до нескольких тысячных долей угловой секунды. Для сравнения: под углом в две тысячные доли секунды видна монетка сантиметрового диаметра на расстоянии в 1000 км. Но и такая фантастическая точность дает возможность измерять более или менее надежно расстояния до звезд лишь в пределах одной-двух тысяч световых лет, в то время как основное количество доступных наблюдениям звезд находится значительно дальше. Современные телескопы позволяют наблюдать наиболее яркие звезды даже в других галактиках, на расстояниях в миллионы световых лет. Для далеких звезд используются другие, косвенные методы определения расстояний. Об одном из них вы узнаете в п. 22.4.

22.3. Температуры звезд. Солнце и другие звезды излучают свет потому, что их наружные слои сильно нагреты и имеют температуру несколько тысяч *кельвинов*. Излучение — неотъемлемое свойство всех нагретых тел, независимо от их природы. Звезда излучает свет, так же как и любое нагретое тело, например нить накаливания в электрической лампочке. Чем выше ее температура, тем большая часть световой энергии приходится на фиолетовую, коротковолновую часть спектра (см. п. 14.1). Поэтому горячие звезды всегда выглядят голубоватыми. Наиболее холодные звезды с $T \approx 3\text{--}4$ тыс. К, наоборот, излучают преимущественно в красной и инфракрасной области спектра и кажутся на глаз красноватыми. Это хорошо заметно, например, у таких звезд, как Бетельгейзе (α Ориона), Антарес (α Скорпиона). Их температура менее 4000 К.

По цвету, как и по распределению энергии в непрерывном спектре, можно определить температуру звезды. Более голубой цвет означает более высокую температуру. Точнее, чем по цвету, температуру звезд (а точнее — звездных атмосфер) определяют

по спектральным линиям в их спектрах. Оказалось, что почти у всех известных звезд она заключена в пределах от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч кельвинов и лишь в очень редких случаях превышает 100 000 К. Температура Солнца близка к 6000 К.

Определенные таким путем температуры звезд относятся лишь к внешним их слоям, — звездным атмосферам, откуда излучение доходит до нас. В недрах звезд температура значительно выше и составляет миллионы кельвинов. Но непосредственно ее измерить нельзя: сквозь толщу звездного вещества мы не видим центральных областей звезды. Температуры внутри звезд оцениваются путем теоретических расчетов. Правда, в самое последнее время высокая температура в недрах Солнца подтверждена регистрацией солнечных нейтрино — частиц, неизбежно возникающих при высокотемпературных термоядерных реакциях.

22.4. Светимость звезд. Звезды сильно различаются по своей кажущейся яркости (по видимой звездной величине). Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, они находятся на различных расстояниях от нас. Во-вторых, одни звезды являются более мощными, другие — менее мощными источниками энергии.

Мощность излучения звезды называется *светимостью*. Светимость — это полная энергия, излучаемая звездой за 1 с. Светимость Солнца, измеренная по количеству излучаемой им энергии, составляет $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт.

Светимость звезд можно выразить в ваттах, но чаще всего ее выражают в единицах светимости Солнца.

Рассчитайте, какая энергия приходит каждую секунду от Солнца на площадку площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной атмосферы. Расстояние до Солнца принять равным $1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$.

Звездная величина Солнца $m_{\odot} = -26,6^m$. Зная m_{\odot} , легко найти светимость любой звезды, если известны ее звездная величина m и расстояние $D_{\text{а. е.}}$ до нее (в астрономических единицах).

Исходим из того, что освещенность, создаваемая звездой как точечным объектом, обратно пропорциональна квадрату расстояния до нее (т. е. если бы звезда находилась в 10 раз дальше, она выглядела бы в 100 раз слабее).

Расстояние до Солнца равно 1 а. е. Отнесем мысленно Солнце на то же расстояние $D_{\text{а. е.}}$, на котором находится звезда. Тогда его наблюдаемое излучение станет слабее в $D_{\text{а. е.}}^2$ раз, звездная

величина возрастет на $2,5 \lg D_{\text{а. е.}}^2 = 5 \lg D_{\text{а. е.}}$ (см. формулу 2.4) и станет равной

$$m''_{\odot} = m_{\odot} + 5 \lg D_{\text{а. е.}} \quad (22.5)$$

Разность звездных величин звезды m и Солнца m''_{\odot} на том же расстоянии позволяет легко узнать, во сколько раз звезда излучает больше (или меньше) световой энергии, чем Солнце, т. е. как относятся светимости звезды L и Солнца L_{\odot} :

$$m''_{\odot} - m = 2,5 \lg(L/L_{\odot}), \quad (22.6)$$

откуда

$$\lg(L/L_{\odot}) = 0,4(m''_{\odot} - m) = 0,4(m_{\odot} - m + 5 \lg D_{\text{а. е.}}). \quad (22.7)$$

Полученная формула может быть использована для определения расстояния до звезды, если известна ее светимость и звездная величина. Для этого формулу удобно переписать в виде

$$\lg D_{\text{а. е.}} = 0,5 \lg(L/L_{\odot}) + 0,2(m - m_{\odot}). \quad (22.8)$$

Измерения показали, что звезды очень сильно различаются по светимости — от $10^{-4}L_{\odot}$ вплоть до (в редких случаях) 10^6L_{\odot} ! Большинство звезд, которые хорошо видны на небе невооруженным глазом, имеют более высокую светимость, чем Солнце (см. Приложение).

Среди звезд очень высокой светимости выделяют *гиганты* и *сверхгиганты*. Большинство гигантов имеет невысокую температуру (3–4 тыс. К), и поэтому их называют *красными гигантами*. Светимость красных гигантов — более $100L_{\odot}$. Примером таких звезд могут служить Альдебаран (α Тельца), Арктур (α Волопаса). Сверхгиганты — это самые мощные источники света среди всех звезд (кроме взрывающихся). Их светимости в десятки тысяч раз выше солнечной. Они могут иметь различный цвет. Из ярких звезд, наблюдаемых на небе, примером голубого сверхгиганта может служить Ригель (β Ориона), а красного сверхгиганта — Антарес (α Скорпиона) или Бетельгейзе (α Ориона).

Из-за того что плотность газа в атмосферах звезд высокой и низкой светимости неодинакова (в звездах-гигантах и сверхгигантах атмосферы во много раз разреженнее), их спектры немного различаются даже при одной и той же температуре: некоторые спектральные линии усилены, а некоторые ослаблены. Поэтому по спектральным линиям также можно грубо оценить светимость звезды. Тогда, зная звездную величину звезды, по формуле

(22.8) не трудно найти $D_{\text{а.е.}}$. Этот метод определения расстояний до звезд называют методом *спектрального параллакса*.

22.5. Размеры звезд. Из-за очень большого расстояния до звезд их диски нельзя разглядеть ни в какие телескопы. Угловые размеры небольшого числа звезд удалось измерить лишь при помощи специальных оптических приборов — *звездных интерферометров*. В большинстве случаев диаметры звезд оценивают лишь теоретически по известной температуре и светимости.

Из курса физики известно, что мощность излучения горячего тела (его светимость) L пропорциональна произведению абсолютной температуры T в четвертой степени на площадь поверхности S . Этот закон носит название *закона Стефана–Больцмана*. Для шара $S = 4\pi R^2$, где R — радиус. Поэтому выражение для светимости звезды можно записать следующим образом:

$$L = (\sigma T^4) \cdot 4\pi R^2. \quad (22.9)$$

Здесь σ — коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной Стефана–Больцмана*, равный $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$. Если температуру Солнца обозначить T_{\odot} , а радиус — R_{\odot} , то для светимости Солнца можно записать аналогичное выражение:

$$L_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 \cdot 4\pi R_{\odot}^2. \quad (22.10)$$

Из этих двух выражений следует

$$L/L_{\odot} = (T/T_{\odot})^4 \cdot (R/R_{\odot})^2. \quad (22.11)$$

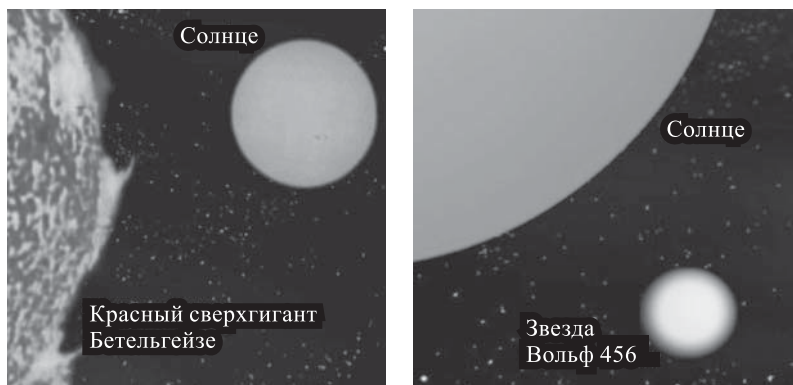
Отсюда, зная L и T звезды, легко найти ее радиус, выраженный в радиусах Солнца.

Радиус Солнца R_{\odot} можно оценить непосредственно из наблюдений по угловому радиусу солнечного диска α , равному $16'$. Принимая расстояние до Солнца $A = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$, находим

$$R_{\odot} = A \operatorname{tg} \alpha \approx 7 \cdot 10^8 \text{ м}, \quad (22.12)$$

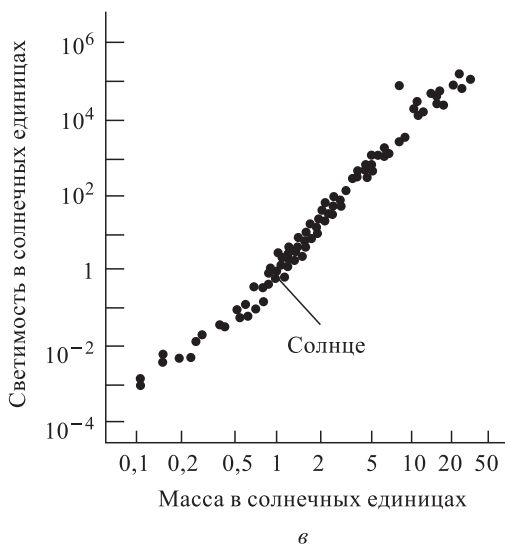
или около 700 000 км.

Таким образом, Солнце представляет собой шар диаметром почти полтора миллиона километров. Для звезд это довольно скромный размер. Звезды высокой светимости — гиганты — в десятки и сотни раз больше Солнца. Но особенно велики сверхгиганты. Их диаметры в тысячи раз больше солнечного. Будь эти звезды на месте Солнца, внутри них оказалась бы орбита не только Земли, но и Юпитера! Рядом с такими звездами Солнце выглядело бы меньше, чем Земля по сравнению с Солнцем (рис. 22.2, а, б).



а

б



в

Рис. 22.2. Солнце в сравнении со звездой-сверхгигантом (а) и карликовой звездой (б). Зависимость между массой звезд и их светимостью (в)

Но такие звезды встречаются редко. Большинство наблюдаемых звезд по размерам сопоставимо с Солнцем. Немало и таких, у которых размеры во много раз меньше солнечных. Например, звезды, называемые *белыми карликами*, имеют диаметр, типичный для планет Солнечной системы, — всего несколько тысяч километров.

22.6. Типовая задача. Определение радиуса звезды.

Условие. Найти радиус звезды, излучающей в 100 раз больше энергии, чем Солнце, если ее температура $T = 3000$ К.

Решение. По условию задачи $L = 100L_{\odot}$, а $T = 0,5T_{\odot}$ (так как $T_{\odot} \approx 6000$ К). Из формулы (22.11) получаем, что

$$R/R_{\odot} = (L/L_{\odot})^{1/2} \cdot (T/T_{\odot})^{-4},$$

$$R/R_{\odot} = 100^{3/2} \cdot 2^2 = 400; \quad R = 400R_{\odot} \approx 280 \text{ млн км.}$$

22.7. Масса и плотность звезд. Наиболее важной характеристикой каждой звезды является ее масса. В основном от массы зависят все остальные свойства звезд. Измерение звездных масс представляет собой сложную задачу. Непосредственно массу можно оценить только по гравитационному полю звезды, измеряя силу ее воздействия на соседние звезды, если они находятся на близком расстоянии. Масса Солнца тоже была определена по измерению силы его гравитационного воздействия, но не на звезды, а на Землю и другие планеты. Ее значение легко найти, определив из наблюдений период обращения и радиус орбиты планеты (см. § 15). Она приблизительно равна $2 \cdot 10^{30}$ кг. У других звезд планеты непосредственно не видны, и подобным образом оценить их массу нельзя. Но во многих случаях звезды образуют пары, и тогда для оценки массы можно воспользоваться третьим законом Кеплера (см. п. 15.1), определив из наблюдений большие полуоси их орбит и периоды обращения.

Измерения масс двойных звезд показали, что почти во всех случаях они заключены в пределах от 0,1 до 10 масс Солнца (M_{\odot}). Более массивные звезды, имеющие массу 10–50 M_{\odot} , в природе крайне редки. Масса 50–70 масс Солнца — это фактически верхний предел звездных масс. Более массивные газовые шары оказываются неустойчивыми и быстро “сбрасывают” с себя избыточную массу. Поэтому они встречаются крайне редко.

Звезды с массой меньше 0,5 M_{\odot} из-за низкой температуры и малого размера имеют очень низкую светимость. Поэтому такие звезды могут наблюдаться, только если находятся сравнительно близко к нам. С большого расстояния они не видны, и по этой причине число известных звезд малой массы сравнительно невелико, хотя в действительности это самые многочисленные звезды в природе. Но существует и нижний предел масс звезд. Он составляет 0,07–0,08 масс Солнца. Как показывают теоретические расчеты, при меньшем значении массы в недрах звезд температура не может подняться до тех значений, при которых начинается протон-протонная термоядерная реакция (около

10 млн К). Поэтому газовые шары малой массы быстро остывают, так и не став настоящими звездами, а остыв, они должны стать похожими на большие планеты вроде Юпитера.

Таким образом, даже самые малые по массе звезды значительно массивнее любой планеты Солнечной системы. Именно большая масса звезд за счет своей потенциальной гравитационной энергии и дает им способность разогреваться и излучать свет в течение сотен миллионов и миллиардов лет. Даже у самой большой планеты Солнечной системы — Юпитера — масса составляет всего около $\frac{1}{1000} M_{\odot}$. Если бы можно было раз в сто увеличить массу этой планеты, Юпитер превратился бы в небольшую звезду.

Независимые измерения масс и светимостей звезд показали, что для большинства звезд эти величины связаны друг с другом: светимость приблизительно пропорциональна четвертой степени массы. Иными словами, выполняется примерное равенство

$$L/L_{\odot} \approx (M/M_{\odot})^4. \quad (22.13)$$

Это означает, что если звезда имеет массу, вдвое большую, чем Солнце, то она излучает примерно в 16 раз больше световой энергии.

Примечание. К гигантам, сверхгигантам и белым карликам это соотношение неприменимо.

Используя соотношение между массой и светимостью, можно по известной светимости примерно оценить массу звезды. Для одиночных звезд этот косвенный метод определения массы часто является единственным.

Самые массивные и наименее массивные звезды отличаются по массам в несколько десятков раз. Но по размерам они различаются несравненно больше. По этой причине звезды очень большого размера, имея примерно такую же массу, что и большинство остальных, обладают очень низкой средней плотностью вещества. У таких звезд, как Солнце, средняя плотность вещества близка к плотности воды. У звезд-гигантов и сверхгигантов из-за их больших размеров она ничтожно мала — часто во много раз ниже, чем плотность воздуха на Земле на уровне моря. Еще ниже плотность их сильно разреженных атмосфер. Но даже при таких плотностях любая звезда представляет собой непрозрачный газовый шар.

Из сказанного ясно, что самой высокой средней плотностью должны обладать звезды малых размеров. О них речь пойдет в § 24.

22.8. Диаграмма температура–светимость (Герцшпрунга–Рассела). Температуры и светимости звезд заключены в очень широких пределах. Как горячие, так и сравнительно холодные звезды могут иметь и очень высокую, и очень низкую светимость. Но оказалось, что эти параметры не являются независимыми. В этом можно убедиться, если нанести положение звезд на *диаграмму температура–светимость* (рис. 22.3). При построении диаграммы обычно используют логарифмический масштаб. Горизонтальную ось шкалы температур принято направлять не как обычно, слева направо, а справа налево, так что температура влево растет. Это дань традиции, чтобы график выглядел таким, каким его в начале столетия построили голландский астроном Герцшпрунг и американский астрофизик Рассел. Не имея возможности получить оценки температур для большого числа звезд, они расположили их по цвету излучения, который, как мы знаем, зависит от температуры, причем, чем краснее звезда, тем правее располагается она на диаграмме. Диаграмму температура–светимость для звезд часто называют диаграммой Герцшпрунга–Рассела.



Рис. 22.3. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела. Линии показывают эволюционные перемещения на диаграмме звезд различных масс. Цифры дают представление о времени пребывания звезды данной массы на главной последовательности, по истечении которого звезда начинает быстро “стареть”

Около 90% всех звезд располагается на диаграмме вдоль длинной полосы, называемой *главной последовательностью*. Ниже нее находятся звезды очень низкой светимости — белые карлики. Правее главной последовательности в верхней части диаграммы имеются последовательности *звезд-гигантов* и *сверхгигантов*.

Диаграмма температура–светимость имеет глубокий физический смысл. Выяснилось, что главная последовательность — это последовательность звезд различных масс, излучающих за счет медленной реакции превращения водорода в гелий. Самые массивные звезды расположены в верхней части диаграммы, менее массивные — внизу, в области низких температур.

Со временем положение звезд на диаграмме может меняться. Место, занимаемое звездой на диаграмме, зависит не только от ее массы, но и от возраста. Большую часть своей жизни звезды находятся на главной последовательности. Постепенно старея, звезда перемещается в область гигантов, а очень массивные звезды — в область сверхгигантов. Для иллюстрации на диаграмме (рис. 22.3) линиями показаны теоретически рассчитанные эволюционные пути для звезды типа Солнца и более массивных звезд массой $4,5M_{\odot}$ и $20M_{\odot}$. На диаграмме приведены также времена пребывания данного типа звезд на главной последовательности. По истечении этого времени звезда покидает главную последовательность. Чем массивнее звезда, тем короче ее жизненный путь.

Таким образом, совокупность значений температуры и светимости звезды, т. е. ее положение на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, определяется массой и возрастом этой звезды.

Подробнее эволюция звезд будет рассмотрена в § 27.

22.9. Вопросы

1. Что представляют собой звезды как физические тела? Попробуйте сформулировать определение понятия “звезда” в астрономии.
2. Как оценивают расстояния до звезд?
3. Перечислите известные вам единицы расстояний, используемые в астрономии.
4. Что такое диаграмма Герцшпрунга–Рассела и где на ней располагается основная масса звезд?
5. Используя закон Стефана–Больцмана, определите, в каких пределах различаются размеры звезд вдоль *главной последовательности*.

22.10. Упражнения

1. Если принять масштаб $1 \text{ см} = 1\,000\,000 \text{ км}$, то каким окажется расстояние до ближайшей к Солнцу звезды?
2. Пользуясь законом Вина (см. п. 14.1), определите температуру звезды, максимум излучения которой приходится на область спектра около $0,1 \text{ мкм}$.

3. Оцените радиус Солнца по его температуре (5800 К) и светимости и сравните с оценкой радиуса, полученной по его угловому размеру и расстоянию.
4. Чему равен радиус звезды, если ее температура 10 000 К, а светимость $6 \cdot 10^3 L_{\odot}$?
5. Какую светимость будет иметь звезда, имеющая радиус, равный радиусу орбиты Сатурна, и температуру 3000 К?
- 6*. В астрономии светимость звезд часто характеризуют так называемой *абсолютной звездной величиной* M . Она равна видимой звездной величине, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10 пк. Чему равно значение M для звезд со светимостью: а) $1L_{\odot}$; б) $100L_{\odot}$; в) $0,1L_{\odot}$? Видимую звездную величину Солнца примите равной $m_{\odot} = -27^m$.
- 7*. Учитывая связь между температурой, светимостью и размером звезды, определите, вдоль каких линий на диаграмме Герцшпрунга–Рассела располагаются звезды различного размера? Где на диаграмме находятся самые маленькие и самые большие по размеру звезды? А где — звезды с самой большой и самой маленькой средней плотностью?

§ 23. Физическая природа звезд

23.1. Физическое состояние и химический состав звездного вещества. Звезды состоят из горячего газа. Об этом говорит прежде всего высокая температура звезд, при которой существование твердого или жидкого состояния невозможно. Спектры звезд также свидетельствуют об их газовом состоянии, поскольку спектральные линии могут возникать только в газовой среде.

До открытия в середине XIX в. спектрального анализа определение химического состава небесных тел считалось принципиально невозможным. Получение спектров звезд и их сравнение со спектрами лабораторных газовых источников сразу же позволили сделать вывод о том, что звезды состоят из известных на Земле химических элементов. На Солнце и звездах были найдены практически все элементы периодической системы Менделеева, кроме неустойчивых изотопов и самых тяжелых атомов. **У большинства звезд около 98 % массы приходится на два самых легких химических элемента — водород и гелий**, причем по массе водорода примерно в 2,5 раза больше, чем гелия. **На долю всех остальных более тяжелых элементов прихо-**

дится около 2 % массы. Примечательно, что гелий был открыт сначала по спектральным наблюдениям на Солнце, и только позднее этот элемент был выделен на Земле. Поэтому Солнцу он обязан своим названием (*гелиос* по-гречески Солнце).

Хотя звезды состоят из знакомых нам химических элементов, звездный газ обладает двумя важными особенностями. Во-первых, если в обычных, “земных” условиях газ состоит из молекул, то в звездах из-за высокой температуры молекулы распадаются (диссоциируют) на отдельные атомы, так что звездный газ атомарный. Лишь во внешних слоях сравнительно холодных звезд, где температура не превышает 4000 К, присутствуют наиболее устойчивые к высоким температурам радикалы или молекулы, например CN, CH, OH, TiO. Эти молекулы дают очень много широких линий (“полос”) в спектрах наиболее холодных звезд. Вторая особенность заключается в том, что основная масса звездного газа ионизована. Звездный газ — смесь ионов и свободных электронов. Это также вызвано высокой его температурой. Только в тонком внешнем слое таких звезд, как Солнце, или более холодных, звездный газ сохраняется преимущественно в нейтральном состоянии. Наконец, третья особенность — очень высокая плотность газа в недрах звезд, особенно небольшого размера, часто измеряемая сотнями тонн в м³.

Несмотря на эти особенности, вещество большинства звезд обладает свойствами идеального газа, и для него выполняется уравнение Клапейрона–Менделеева, согласно которому давление газа пропорционально произведению его плотности на значение абсолютной температуры. Даже в недрах звезд, где газ во много раз плотнее любого твердого вещества, встречающегося на Земле, он подчиняется тем же законам идеального газа Бойля–Мариотта, Гей–Люссака и Шарля.

На первый взгляд кажется странным, что газ может быть плотнее твердого вещества. Вспомним, чем газ отличается от твердых тел или жидкостей. Частицы газа не связаны друг с другом, среднее расстояние между ними значительно больше их размеров, иначе газ нельзя было бы считать идеальным. Для звездного вещества эти условия тоже выполняются, даже при очень больших значениях плотности. Это связано с тем, что в звездах газ ионизован, и частицы, из которых он состоит (электроны и атомные ядра), имеют размеры, несравненно меньшие, чем атомы или молекулы при более низких температурах. Поэтому даже при плотности, в сотни раз более высокой, чем плотность воды, горячий ионизованный газ остается идеальным.

23.2. Равновесие звезд. Газ в недрах звезд находится под большим давлением вышележащих слоев. Нетрудно оценить его примерное значение.

Вспомним, что из уравнения состояния идеального газа и определения температуры следует простое соотношение между газовым давлением P , концентрацией частиц n и температурой T :

$$P = nkT, \quad (23.1)$$

где k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Среднее значение концентрации частиц в звезде, имеющей массу $M_{\text{зв}}$ и радиус $R_{\text{зв}}$ при средней массе частиц \bar{m} равно

$$n = \frac{M_{\text{зв}}/\bar{m}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{зв}}^3}. \quad (23.2)$$

Здесь числитель представляет собой полное число частиц, а знаменатель — объем звезды.

Звезды, состоящие в основном из ионизованного водорода, содержат примерно одинаковое число протонов с массой $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг и электронов, масса которых во много раз меньше чем m_p . Поэтому средняя масса частиц в звезде $\bar{m} \approx m_p/2$. Для оценки давления по формуле (23.1) требуется знать температуру газа T . Расчеты показывают, что температура в звездах растет к центру. При этом характерное значение T в средних слоях звезды типа Солнца составляет около $3 \cdot 10^6$ К. Используя

“солнечные” значения $M_{\text{зв}} = 2 \times 10^{30}$ кг, $R_{\text{зв}} = 7 \cdot 10^8$ м, из формул (23.1) и (23.2) находим, что давление в средних слоях звезды составляет $7 \cdot 10^{13}$ Н/м², или около $7 \cdot 10^8$ атмосфер! Столь большое давление способно буквально “взорвать” звезду и за несколько дней превратить ее в расширяющееся газовое облако. Однако этого не происходит, потому что существует сила, сдерживающая силу давления горячего газа. Это сила взаимного гравитационного притяжения частиц звезды, т. е. атомов, друг к другу (рис. 23.1).

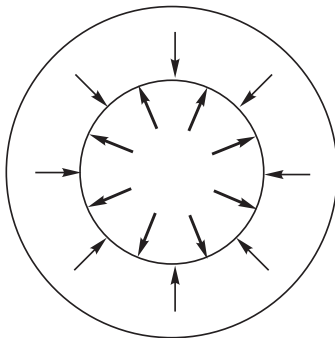


Рис. 23.1. Схема равновесия внутренних сил в звезде: силы газового давления уравновешивают силы гравитационного притяжения

Гравитация стремится сжать звезду. Внешние слои звезды, при-

тягиваясь к центру, давят своим весом на те, что расположены ближе к центру, и, если бы силы давления газа не препятствовали сжатию, звезда типа нашего Солнца менее чем за час сжалась бы до ничтожных размеров. По этой причине газ, в обычных условиях стремящийся занять весь предоставленный ему объем, в случае звезд удерживается в устойчивой форме шара.

Так как звезды (за очень редким исключением) в течение долгого времени сохраняют свои размеры, можно считать, что их вещество находится в равновесии: силы газового давления внутри звезды уравниваются силами гравитационного сжатия. Это равновесие устойчиво благодаря своеобразному свойству звезды саморегулировать баланс между тепловой и потенциальной энергией своего вещества. В противном случае ни звезд, ни Солнца в природе не существовало бы. Если силы тяжести немного сожмут ядро звезды, его потенциальная энергия уменьшится, но, поскольку полная энергия сохраняется, при этом возрастет температура, а значит и тепловая энергия газа. В результате возросшее давление газа остановит сжатие. Любое нарушение равновесия звезды тут же приведет к движению вещества к центру или от центра — назад к положению равновесия.

Размер звезды всегда устанавливается таким, при котором соблюдается равновесие между силами, стремящимися расширить и сжать ее. Каков он будет — зависит от мощности источников энергии, поддерживающих тепловые движения атомов. Поэтому звезды, в отличие от твердых тел, могут значительно менять свои размеры и без внешнего воздействия, в зависимости от внутренней энергии. Если в недрах звезды будет выделяться больше энергии, звезда увеличит свой радиус, если меньше — равновесие звезды наступит при меньших размерах. Отсюда следует важный вывод: при ослаблении мощности источников внутренней (тепловой) энергии вещество звезд должно сжиматься под действием собственного веса. В конце жизни это ожидает каждую звезду.

Исходя из условий равновесия можно рассчитать плотность, давление и температуру вещества в недрах звезд, на любом расстоянии от центра. Такие расчеты довольно сложны и выполняются при помощи компьютеров. Оказалось, что температура и плотность газа внутри звезд быстро возрастают вглубь. Так, в центре Солнца температура составляет около 14 млн кельвинов, а плотность газа примерно в 150 раз больше, чем у воды.

Вещество в недрах звезд отличается от вещества внешних слоев не только количественно, т. е. большими значениями плотности, давления и температуры. Количественные изменения при-

водят к качественному различию: вещество вблизи центра звезд в условиях высокого давления и температуры может самопроизвольно выделять ядерную энергию, за счет которой звезда излучает свет и тепло.

23.3. Источники энергии звезд. По существующим оценкам, большинство звезд может светить, не переставая, миллиарды лет. Наше Солнце излучает свет уже около 5 миллиардов лет. Это существенно больше возраста самых древних ископаемых остатков растительного происхождения, найденных на Земле.

Откуда же звезды черпают излучаемую ими энергию? Ответ на этот вопрос был получен лишь в середине XX в., после успешного развития физики атомных ядер, а также открытия ядерных реакций превращения одних химических элементов в другие. В условиях тех давлений и температур, которые существуют в недрах звезд, основным источником энергии звезд является взаимодействие между атомными ядрами. Из физики известно, что заключенная в атомных ядрах энергия может высвобождаться в двух случаях: когда ядра тяжелых элементов распадаются на более легкие (этот процесс осуществляется в ядерных реакторах атомных электростанций) или когда происходит слияние (*синтез*) легких ядер в более тяжелые. Поскольку звезды состоят в основном из самых легких элементов — водорода и гелия, для них возможен лишь второй вариант освобождения энергии, заключенной в атомных ядрах.

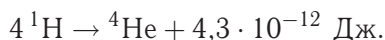
В недрах большинства звезд происходит взаимодействие между ядрами водорода — протонами.

Протоны, как и атомные ядра других элементов, имеют положительный электрический заряд и потому отталкиваются друг от друга. Чтобы два ядра вступили в тесное взаимодействие, они должны, преодолев электростатические силы отталкивания, сблизиться до расстояния порядка своих размеров (около 10^{-15} м). Уже на расстоянии 10^{-14} м, т.е. в 10 раз большем, протоны отталкиваются друг от друга с силой, которая, согласно закону Кулона, составляет около 2 Н! Лишь большая кинетическая энергия быстрых частиц позволяет им сблизиться. Но, как известно, кинетическая энергия хаотического движения частиц пропорциональна температуре среды. Вот почему ядерные реакции синтеза могут происходить только в очень горячем газе, причем тем интенсивнее, чем выше температура.

При температуре 10–20 млн кельвинов, царящей в центральных областях большинства звезд, средняя скорость движения протонов составляет несколько сотен километров в секунду.

Но у различных частиц она не одинакова. Наиболее энергичные протоны (с кинетической энергией значительно выше средней), сталкиваясь, могут сливаться и взаимодействовать между собой довольно сложным образом. В результате этого процесса из четырех протонов с некоторой вероятностью образуется одно ядро атома гелия. Такая реакция сопровождается выделением термоядерной энергии. Эта энергия поддерживает высокую температуру в недрах звезды и компенсирует ее потери на излучение в окружающее пространство. Если потери энергии превысят энергию нагрева и звезда начнет остывать, ей достаточно будет немного сжаться, и недра разогреются за счет уменьшения потенциальной энергии вещества, и, как следствие, ядерные реакции пойдут интенсивнее, так что баланс восстановится. Получается, что недра звезд — это саморегулирующиеся термоядерные реакторы.

Реакцию превращения водорода в гелий можно представить так:



Масса ядра гелия равна $6,63 \cdot 10^{-27}$ кг, масса одного протона — $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса четырех протонов отличается от массы одного ядра гелия на

$$4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} - 6,63 \cdot 10^{-27}\ \text{кг} = 5 \cdot 10^{-29}\ \text{кг}.$$

Энергия, соответствующая этому избытку массы, уносится квантами излучения и нейтрино. **Звезды типа Солнца каждую секунду теряют на излучение миллионы тонн своей массы.** При этом сотни миллионов тонн водорода каждую секунду превращаются в гелий.

Оцените, за сколько лет масса такой звезды, как Солнце, уменьшится на 10% из-за потерь на излучение, если каждую секунду Солнце становится “легче” на 4,4 миллиона тонн.

У звезд, температура которых в центре существенно выше, чем у Солнца, происходит синтез ядер гелия в ядра более тяжелых элементов. Эти реакции также сопровождаются выделением энергии, обеспечивающим высокую светимость звезды. Температура в недрах Солнца недостаточно высока для “выгорания” гелия. Но в красных гигантах, в ядрах которых температура превышает 10^8 К, могут идти реакции слияния ядер гелия, приводящие к образованию ядер углерода. У наиболее массивных и горячих звезд углерод превращается в кислород, а у самых массивных — цепочка превращений доходит до синтеза атомов железа и близких к нему элементов периодической системы Мен-

делеева. Элементы тяжелее железа рождаются уже не в результате термоядерных реакций, а иным путем, в результате взрывов массивных звезд.

Итак, в звездах в результате термоядерных реакций возникают новые химические элементы, тем самым увеличивается их количество в природе.

На определенных этапах эволюции звезды, например при ее образовании, большую роль может играть еще один источник энергии — сжатие звезды под действием собственной гравитации. При сжатии гравитационная потенциальная энергия вещества переходит во внутреннюю тепловую энергию, температура газа в рождающейся звезде возрастает, и звезда при этом может иметь очень высокую светимость. Сжатие молодой звезды останавливается лишь тогда, когда температура в ее недрах возрастет до значений, при которых начинается термоядерная реакция превращения водорода в гелий, и звезда становится устойчивым долгоживущим объектом.

23.4. Вопросы

1. Что свидетельствует о том, что звезды состоят из горячего газа?
2. Почему термоядерные реакции могут происходить в недрах звезд и не могут в недрах планет?
3. Как известно из физики, если газ не заключен в герметический сосуд, он быстро расширяется в окружающее пространство. Почему тогда не разлетается газ, образующий звезды?
4. Могут ли звезды ярко светиться при отсутствии термоядерных реакций?

23.5. Упражнения

1. Масса протона равна $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг. Оцените приблизительно среднее расстояние между протонами в солнечном веществе (плотность $\rho_{\odot} = 1,4 \text{ г/см}^3$) и в веществе белого карлика (плотность $\rho_{\odot} = 100 \text{ кг/см}^3$). (Считать, что вся масса заключена в протонах.)
2. Чему равно давление газа в центре Солнца ($T = 1,4 \cdot 10^7 \text{ К}$, плотность $\rho = 1,5 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$)?
3. С какой средней скоростью движутся атомы водорода, имеющие массу $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, в центре Солнца ($T = 1,4 \times 10^7 \text{ К}$), и в его атмосфере ($T = 6000 \text{ К}$)?
4. Какую массу теряет Солнце каждую секунду за счет своего излучения? Светимость Солнца равна $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. На сколь-

ко процентов уменьшится масса Солнца за 1 млрд лет? (Воспользоваться формулой $E = mc^2$.)

5. Почему для ядерной реакции между ядрами атомов гелия требуется более высокая температура, чем для реакции между ядрами атомов водорода?

Указание. Ядра He имеют электрический заряд, вдвое больший, чем ядра H.

§ 24. Необычные звезды

24.1. Белые карлики. Большинство известных звезд и все без исключения звезды, которые видны на небе невооруженным глазом, состоят из газа, который можно считать идеальным. При помощи телескопов удалось открыть звезды, вещество которых так сильно сжато, что приобретает свойства, отличные от свойств идеального газа.

Наблюдается два типа таких необычных звезд очень высокой плотности: *белые карлики* и *нейтронные звезды*. Первыми были открыты белые карлики. Самая близкая звезда такого типа — это Сириус В, звезда-спутник ярчайшей звезды всего неба — Сириуса. Расстояние до него 8,8 светового года. С такого расстояния Солнце выглядело бы довольно яркой звездой 2-й звездной величины. Однако Сириус В примерно в 500 раз слабее. Анализ спектра показывает, что температура этой звезды довольно высока — около 10 000 К. Поэтому ее низкая светимость говорит о малых ее размерах: радиус звезды должен быть почти в 50 раз меньше, чем у Солнца.

Пользуясь формулой (22.11), рассчитайте радиус Сириуса В.

Поскольку Сириус и Сириус В — это две близкие друг к другу звезды, обращающиеся вокруг общего центра масс, по их видимому движению можно найти массу каждой звезды (см. п. 15.1). Оказалось, что масса Сириуса В примерно такая же, как у Солнца, несмотря на очень малый размер. Зная диаметр и массу звезды, нетрудно оценить ее среднюю плотность. Она составляет около 10^8 кг/м³, или в 100 000 раз больше, чем у воды. На Земле вещество такой плотности получить невозможно.

Существование белых карликов позволило подтвердить одну из фундаментальных физических теорий — *общую теорию относительности*. Согласно этой теории, в мощном гравитационном поле, которое должно существовать на поверхности белого карлика, темп течения времени чуть замедляется и, как след-

ствие этого, периоды колебаний электромагнитных волн немного возрастают, и поэтому слегка увеличиваются длины волн спектральных линий. Это гравитационное красное смещение длин волн спектральных линий было обнаружено, и оно совпало с ожидаемым.

Сейчас известно несколько тысяч белых карликов. Их исследование представляет большой научный интерес. Газ, из которого состоят эти звезды, не подчиняется обычным газовым законам, изучаемым в школьном курсе физике. Например, его давление не пропорционально температуре, как у обычного газа, а почти не зависит от нее и определяется только плотностью вещества. Такой газ называется *вырожденным*, а сами звезды часто называют *вырожденными звездами*. Внутренних источников энергии в белых карликах нет, и они излучают, медленно остывая, просто за счет запасенного в них тепла. Через десятки миллиардов лет белые карлики превратятся в “черные карлики” — темные и холодные шары из вырожденного газа.

Даже если белый карлик остынет до абсолютного нуля, давление сверхплотного газа останется большим и гравитационные силы не смогут его сжать. Темные, очень плотные и холодные шары, имеющие размеры, характерные для планет, — такова конечная стадия жизни большинства звезд.

24.2. Нейтронные звезды. В 60-е годы XX века были найдены звезды еще меньших размеров, в которых плотность и давление вещества несравнимо больше, чем в белых карликах. Это массивные и сверхкомпактные шары, называемые *нейтронными звездами*. При массе, в 1,5–3 раза превышающей массу Солнца, они обладают диаметром всего 20–30 км. Плотность вещества при этом приближается к плотности атомного ядра: она в 10^{14} раз больше плотности воды! При такой фантастической плотности в звезде, за исключением очень тонкого и, по видимому, твердого внешнего слоя, не сохраняются даже ядра атомов химических элементов. В ее недрах происходит процесс “нейтронизации” вещества: протоны, взаимодействуя с электронами, превращаются в электрически нейтральные частицы (нейтроны). В результате “нейтронизации” звезда почти целиком оказывается состоящей уже не из атомов, а из нейтронов, близко расположенных друг к другу. Поэтому такие звезды называются *нейтронными*.

Нейтронные звезды — одни из самых необычных объектов в природе. Они обладают чрезвычайно сильным гравитационным полем вблизи поверхности. При падении на них тел даже

с ничтожной высоты в 10 м и с нулевой начальной скоростью гравитация разгонит их до скорости в несколько тысяч км/с; а при падении с очень больших расстояний скорость достигнет 100–200 тысяч км/с. Поэтому падение даже разреженного газа на нейтронную звезду неизбежно приводит к выделению колоссальной энергии при столкновении атомов газа с поверхностью такой звезды.

Нейтронные звезды, несмотря на очень высокую температуру поверхности, не видны в оптическом диапазоне спектра из-за своего крошечного размера и, как следствие, низкой светимости — за исключением нескольких наиболее близких объектов. Они были открыты случайно как совершенно необычные источники космического радиоизлучения, состоящего из очень коротких радиоимпульсов. Промежуток времени между радиоимпульсами у различных источников составляет от долей секунды до 1–2 с. Удивительнее всего то, что интервалы между импульсами сохраняются практически неизменными в течение месяцев и лет. Это казалось настолько странным и непохожим на излучение других радиоисточников, что открывшие их английские радиоастрономы сначала заподозрили искусственное происхождение сигналов, будто от иных цивилизаций. Такие пульсирующие радиоисточники получили название *пульсаров*. Впоследствии были найдены пульсары, излучающие импульсы и в других диапазонах спектра.

Исследования показали, что пульсарами могут быть только нейтронные звезды. Особенность излучения пульсаров объясняется тем, что, в отличие от обычных звезд, излучение идет от них не одинаково по всем направлениям, а, в основном, в пределах узкого конуса, наподобие луча прожектора. Пульсары отличаются очень быстрым вращением вокруг оси, и вместе с пульсаром поворачивается и “луч”. Если на его пути попадает Солнечная система, то на Земле за каждый оборот звезды вокруг своей оси мы воспринимаем один импульс. Поэтому нам кажется, что пульсар излучает импульсы, частота следования которых равна частоте его вращения вокруг оси.

Известно более двух тысяч пульсаров. Но в природе много нейтронных звезд, не обладающих импульсным излучением, их просто труднее обнаружить.

Некоторые из нейтронных звезд были обнаружены не по радиоизлучению, а по рентгеновскому излучению. В 70-е годы на небе были открыты загадочные переменные рентгеновские источники. Обычные звезды не дают мощного рентгеновского излучения — для этого их температура слишком низка

(вспомните закон Вина!). Тем не менее на месте некоторых рентгеновских источников, как оказалось, наблюдаются звезды высокой светимости. Отсюда следовало, что невидимые рентгеновские источники находятся рядом с этими звездами. Это удалось подтвердить по измерению лучевых скоростей звезд. По периодическим смещениям линий в их спектрах (вспомните эффект Доплера) удалось показать, что эти звезды подвержены действию сил притяжения близких и массивных спутников, не видимых в оптических лучах, сил, которые заставляют их обращаться вокруг общего центра масс. Именно со спутниками-невидимками и связано наблюдаемое рентгеновское излучение. Этими “рентгеновскими” объектами оказались нейтронные звезды.

Действительно, звезды очень часто образуют двойные системы с таким небольшим расстоянием между компонентами, которое сопоставимо с суммой их диаметров. Подобные системы называются *тесными звездными парами*. Как мы уже знаем, звезды на определенной стадии своей жизни, когда в их недрах кончается водородное топливо, “раздуваются”, многократно увеличивая свои размеры. Если такая звезда оказывается в тесной двойной системе, то часть вещества начинает покидать звезду, перетекая на вторую звезду под действием ее притяжения. Такой процесс называют *аккрецией* звездного вещества. Аккреция может продолжаться миллионы лет — до тех пор, пока звезда не потеряет существенную часть своей массы.

В том случае, когда спутником гигантской звезды является не обычная, а нейтронная звезда, аккреция имеет особые следствия. Вокруг нейтронной звезды при определенных условиях возникает быстро вращающийся и очень горячий газовый диск, называемый аккреционным, в котором закручивается струя газа, прежде чем упасть на поверхность звезды (рис. 24.1). Перетекая со звезды на аккреционный диск, газ нагревается до гигантских температур (сотни миллионов и миллиарды кельвинов). В соответствии с законом Вина (см. § 14) основная часть энергии, излучаемой газом с такой температурой, приходится на рентгеновскую область спектра. Так возникают наблюдаемые рентгеновские источники, связанные с двойными звездными системами. Мощность их излучения может в сотни раз превосходить мощность излучения Солнца. Если нейтронная звезда вместе с газовым диском в своем орбитальном движении “заходит” за диск оптической звезды, рентгеновский источник на небе “гаснет” и “включается” вновь при выходе звезды из-за диска. Энергия рентгеновского излучения — это преобразованная кинетическая энергия газа

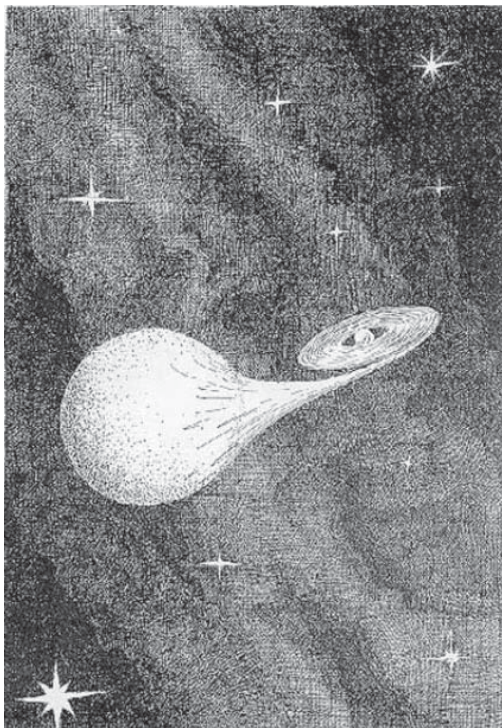


Рис. 24.1 (эскиз). Тесная двойная система: перетекание вещества на компактную звезду и формирование горячего диска (рис. В. Липунова)

обычной звезды, падающего в сильном гравитационном поле ее компактного спутника.

Очень сильное магнитное поле нейтронной звезды управляет движением потоков горячей плазмы и может направлять их вдоль линий магнитной индукции к магнитным полюсам звезды. Действительно, во многих случаях наблюдаемая картина рентгеновских источников свидетельствует о падении газа с гигантской скоростью на небольшие области на поверхности нейтронной звезды площадью не более квадратного километра — по-видимому, вблизи ее магнитных полюсов. На каждый квадратный метр поверхности могут падать тысячи тонн газа каждую секунду. В результате вблизи магнитных полюсов возникают очень горячие и яркие пятна с мощным рентгеновским излучением. Нейтронная звезда быстро вращается, и наличие таких пятен приводит к регулярным изменениям наблюдаемой яркости рентгеновского источника с периодом, равным периоду

вращения звезды, — от нескольких минут до нескольких секунд. Так, благодаря перетеканию вещества с нормальной звезды на нейтронную и вследствие огромной силы ее тяготения, возникают пульсирующие рентгеновские источники. Их называют *рентгеновскими пульсарами*. В нашей Галактике таких объектов известно несколько десятков. Мощность рентгеновского излучения подобных источников такова, что с помощью современных рентгеновских телескопов они могут наблюдаться даже в соседних галактиках.

24.3. Вопросы

1. Чем отличаются белые карлики от обычных звезд?
2. Чем различаются белые карлики и нейтронные звезды?
3. Как выглядел бы с Земли белый карлик, находящийся на месте Солнца? А нейтронная звезда?
4. Чем отличаются радиопульсары от рентгеновских пульсаров?

24.4. Упражнения

1. До какого размера пришлось бы сжать земной шар (средняя плотность $\rho = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), чтобы плотность вещества в нем стала примерно такой же, как в белых карликах? А в нейтронных звездах?
2. Какую светимость имеет белый карлик, имеющий размер, в 100 раз меньший, чем у Солнца, если его температура 30 000 К?
3. Сколько весила бы гиря массой 1 кг на поверхности нейтронной звезды, масса которой равна $2M_{\odot}$, а радиус — 10 км? (Воспользоваться законом всемирного тяготения.) Рассчитать вторую космическую скорость для такой звезды.
4. С какой скоростью вращается вещество на экваторе нейтронной звезды-пульсара, если период между его импульсами 0,5 с, а радиус — 10 км?
5. Пользуясь законом Стефана–Больцмана, оцените светимость нейтронной звезды с температурой 10 млн К и радиусом 10 км в единицах светимости Солнца.

§ 25. Звезды, меняющие светимость

25.1. Переменные звезды. Яркость всех звезд кажется не меняющейся со временем. Однако это далеко не всегда так. Еще в глубокой древности арабы заметили, что звезда β Персея от

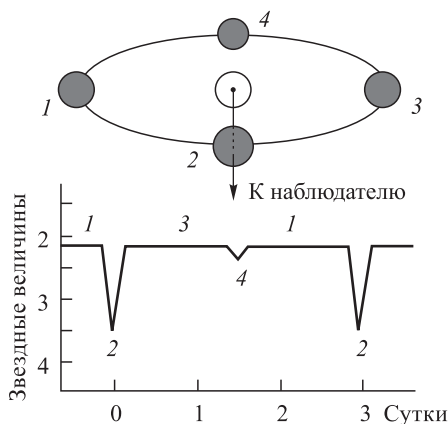


Рис. 25.1. Схема движения и зависимость звездной величины от времени для затменно-переменной звезды

ночи к ночи меняет яркость, становится то ярче, то слабее. Она получила название Эль-Гуль или Алголь, что означает “глаз дьявола”. Убедиться в переменности этой звезды может каждый внимательный наблюдатель, сравнивая ее яркость с ближайшими звездами несколько ночей подряд.

Звездная величина Алголя меняется строго периодически с периодом 2 сут 20 ч 49 мин (рис. 25.1).

В конце XVIII в. английский любитель астрономии Джон Гудрайк первым установил периодический закон, по которому меняется яркость Алголя, и правильно объяснил причину ее изменения, предположив, что звезда периодически затмевается каким-то непрозрачным телом. И действительно, оказалось, что Алголь — это не одиночная, а двойная звезда, хотя из-за близкого расстояния между компонентами она воспринимается как одиночная. Обе звезды обращаются вокруг общего центра масс и периодически затмевают одна другую. Когда затмевается более яркая звезда, яркость Алголя сильно падает (точка 2 на кривой, рис. 25.1), а когда за яркую звезду “заходит” более слабая, она уменьшается ненамного (точка 4).

Такие звезды, как Алголь, называются *затменно-переменными*. Двойные звезды в природе встречаются очень часто, но затменно-переменными они наблюдаются лишь в тех случаях, когда плоскость, в которой они движутся, составляет небольшой угол с лучом зрения, иначе затмений звезд не происходит.

Наблюдения затменно-переменных звезд оказались очень плодотворными. Были разработаны сложные математические ме-

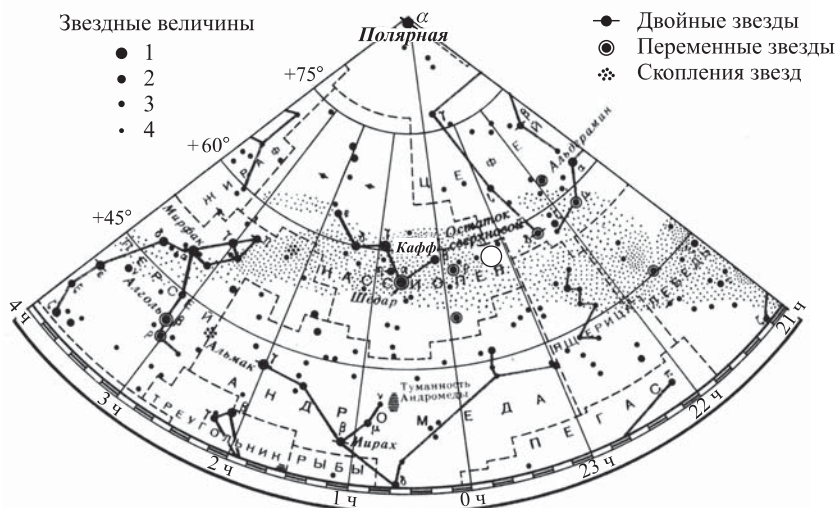


Рис. 25.2. Карта участка звездного неба. Отмечены положения некоторых интересных объектов

тоды, позволяющие по точным измерениям звездных величин и скоростей движения этих звезд определять не только их массу, но и размер, форму, температуру и даже оптические свойства и протяженность атмосфер звезд.

У переменных звезд другого типа — *цефеид* — совершенно иная причина регулярного изменения яркости. Первая известная цефеида (от которой эти звезды и получили свое название) — это звезда δ Цефея, хорошо видимая на небе невооруженным глазом.

В отличие от затменно-переменных звезд, цефеиды — это одиночные звезды, меняющие свою светимость в силу внутренних причин. Если непрерывно измерять их лучевую скорость (по эффекту Доплера), то окажется, что она не остается постоянной, а меняется с тем же периодом, что и видимая звездная величина. Это говорит о том, что звезды попеременно то расширяются (тогда атмосфера звезды, в которой образуются спектральные линии, приближается к нам), то сжимаются (тогда атмосфера удаляется, и мы наблюдаем “красное” смещение спектральных линий). Цефеиды, таким образом, оказались пульсирующими газовыми шарами. Изменение размеров цефеиды сопровождается изменением ее температуры (когда звезда больше, она холоднее). В результате меняется и светимость звезды, что и объясняет пе-

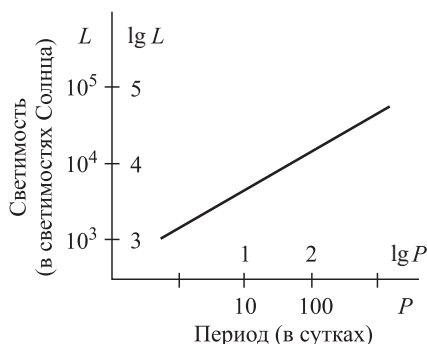


Рис. 25.3. Зависимость период – светимость для цефеид

ременность цефеид. Периоды цефеид составляют от нескольких часов до нескольких недель.

В § 23 уже говорилось, что в звездах достигается устойчивое равновесие между силами упругости горячего газа, с одной стороны, и силами гравитации, сжимающей звезду, — с другой. Но на определенной стадии жизни массивной звезды равновесие может нарушиться, и звезда начнет колебаться под действием этих двух противоположно направленных сил по тем же причинам, по которым происходят колебания выведенного из равновесия маятника. Чем выше средняя плотность звезды, тем короче ее период. В цефеидах большую роль играет также сила давления света, направленная наружу, которая регулярно меняется в процессе расширения (сжатия) звезды.

Изучение цефеид сыграло исключительно важную роль в астрономии. Оказалось, что период колебаний цефеиды зависит от ее средней светимости (рис. 25.3). Чем больше светимость цефеиды (а также ее радиус), тем медленнее совершает она свои пульсации (подобно тому, как у маятника большей длины больше период колебаний). Эта зависимость дает возможность, измеряя период колебаний звезды, оценивать расстояние до нее. Сначала по известному периоду находят, какая светимость звезды ему должна соответствовать. Затем, считая светимость и среднюю видимую звездную величину цефеиды известными, вычисляют расстояние до нее (см. формулу 22.8).

Цефеиды, как правило, имеют большие массы и светимости, и в крупные телескопы их наблюдают даже в других галактиках, с расстояния в десятки миллионов световых лет. Поэтому с помощью цефеид можно определять расстояния до далеких звездных скоплений и галактик, в которых их удалось найти.

25.2. Типовая задача. Определение расстояния до цефеиды.

Условие. Оцените (приблизительно) расстояние до звездного скопления, в котором наблюдается цефеида, если известно, что ее звездная величина меняется от 8^m до $8,8^m$ с периодом $T = 3$ сут.

Решение. По графику (см. рис. 25.3) находим, что периоду T соответствует светимость около $10^3 L_{\odot}$, т. е. $\lg L/L_{\odot} = 3$. Средняя звездная величина звезды $m = 8,4^m$. Используя полученные значения $\lg L$ и m , из формулы (22.8) получаем

$$\lg D_{\text{а.е.}} = 0,5 \cdot 3 + 0,2 \cdot (8,4 + 26,6) = 8,5.$$

Таким образом, $D = 10^{8,5}$ а. е. $\approx 3 \cdot 10^8$ а. е. или $\approx 1,5$ кпк.

25.3. Вспыхивающие звезды и новые звезды. Среди сотен тысяч известных в настоящее время звезд, меняющих свою светимость, большинство не относится ни к цефеидам, ни к затменным переменным. Колебания их излучения носят случайный, нерегулярный характер и невелики по амплитуде. Такие звезды называются *неправильными переменными*. Но изредка наблюдаются звезды, которые внезапно увеличивают свою светимость во много раз. Они называются *вспыхивающими звездами*. Явления особенно сильных вспышек звезд получили название *новых*, потому что раньше такую вспышку считали свидетельством рождения действительно новой звезды. **Новые звезды** (или просто новые) — это звезды, которые **за несколько дней увеличивают свою светимость в несколько тысяч раз**.

Вспышки новых — редкие события: на всем небе они наблюдаются в среднем один раз в несколько лет. Чаще всего даже во время вспышки новые звезды можно видеть только в телескоп. Но в отдельных случаях они все же бывают заметны невооруженным глазом. Например, очень яркая новая вспыхнула в августе 1975 г. в созвездии Лебедя. Несколько дней звезда была в числе ярчайших звезд этого созвездия, затем светимость ее постепенно уменьшилась во много тысяч раз.

Подробное изучение новых звезд до вспышки и после нее привело к выводу о том, что все они являются тесными двойными звездами. Оказалось, что причина вспышки связана со взаимодействием двух очень близких друг к другу звезд, одна из которых — большая, с невысокой плотностью, другая — плотная звезда из вырожденного газа (белый карлик). Вещество гигантской звезды под действием притяжения белого карлика перетекает на него. Такое перетекание газа, называемое аккрецией, уже

рассматривалось ранее (см. п. 24.2) как причина возникновения мощных рентгеновских источников. В случае новых звезд аккреция происходит не на нейтронную звезду, а на белый карлик. Падая на поверхность плотной звезды, газ накапливается на ней, и это приводит к нагреву ее вырожденного газа до такой температуры, при которой происходит сильный термоядерный взрыв. При взрыве часть вещества навсегда покидает звезду, образуя быстро расширяющуюся оболочку. Этот процесс взрыва и наблюдается как вспышка новой. Через много лет вновь накапливается большое количество упавшего газа, и взрывы могут повторяться.

25.4. Сверхновые звезды. Очень редко, раз в несколько сотен лет, в нашей Галактике наблюдаются взрывы звезд, сопровождающиеся такой длительной и мощной световой вспышкой, по сравнению с которой меркнут вспышки новых звезд. При взрыве на небе появляется необычно яркая звезда там, где никаких звезд раньше не было, и ее высокая яркость сохраняется в течение целого ряда ночей. Такие явления получили название взрывов *сверхновых звезд* (или просто — *сверхновых*). Последний раз вспышку сверхновой звезды в нашей Галактике наблюдали в 1604 г. — всего за несколько лет до начала телескопических наблюдений. С помощью телескопов за год можно обнаружить несколько десятков вспышек сверхновых, но не в нашей, а в других галактиках, на очень больших расстояниях от нас.

Вспышки сверхновых звезд — это грандиознейшие явления природы. При взрыве сверхновой в течение нескольких недель может выделяться энергия, которую Солнце способно излучить лишь за миллиарды лет! Одна сверхновая звезда в максимуме своей светимости иногда излучает больше света, чем вся остальная галактика — светимость ее может превысить $10^{10} L_{\odot}$.

Согласно современным представлениям, вспышка сверхновой звезды чаще всего вызывается взрывом ядра массивной звезды, в котором водород и гелий успели полностью “выгореть”. При достаточно большой массе, значительно превышающей массу Солнца, на конечной стадии эволюции звезды ее внутренняя область — ядро — теряет свою устойчивость, и происходит мощный термоядерный взрыв. Часть вещества звезды разлетается в межзвездное пространство со скоростями в тысячи км/с. Остаток звезды быстро сжимается (коллапсирует) под действием собственного тяготения и превращается в нейтронную звезду (см. п. 24.2). Расчеты показывают, что при рождении нейтронной звезды должно возникать множество легких частиц — нейтрино,

которые очень слабо взаимодействуют с веществом. Именно эти частицы уносят основную энергию взорвавшейся звезды.

Наиболее яркая сверхновая звезда, наблюдавшаяся с помощью современной техники, появилась на небе в 1987 г. Она вспыхнула в ближайшей галактике — в Большом Магеллановом Облаке, — удаленной от нас примерно на 150 тыс. световых лет. В максимуме своего блеска она была видна невооруженным глазом как звезда 4-й звездной величины. На photographиях, полученных до вспышки, впервые удалось увидеть звезду, взорвавшуюся как сверхновая. До взрыва это был голубой сверхгигант 16-й звездной величины.

После взрыва светимость сверхновой 1987 г. постепенно ослабевала, уменьшаясь вдвое за несколько десятков суток. Основным источником энергии излучения через некоторое время после взрыва оказался распад атомных ядер радиоактивного кобальта, при котором атомные ядра этого элемента превращаются в ядра атомов железа.

Одновременно с наблюдавшейся оптической вспышкой сверхновой 1987 г. в физических нейтринных лабораториях были зарегистрированы потоки нейтрино, дошедшие до Земли вместе со светом вспышки. Это подтвердило, что в соседней галактике действительно произошел коллапс ядра звезды и возникла еще одна нейтронная звезда. При взрыве сверхновой звезды в ее недрах вещество на короткое время нагревается до столь высоких температур (миллиарды кельвинов), что ядерные взаимодействия приводят к образованию ядер наиболее тяжелых химических элементов таблицы Менделеева.

Вещество сверхновой, сброшенное при взрыве, образует вокруг нее быстро расширяющуюся газовую оболочку. Такие оболочки называют *остатками сверхновых звезд*. В нашей Галактике их известно несколько десятков. Самая молодая из них, возникшая несколько сотен лет назад, наблюдается в созвездии Кассиопеи как мощный космический радиоисточник.

С появлением радиотелескопов выяснилось, что остатки сверхновых звезд излучают мощные потоки радиоволн. Это своего рода гигантские радиостанции, созданные самой природой. Анализ их радиоизлучения позволил обнаружить новый природный механизм излучения радиоволн. Он показал, что излучение рождается очень энергичными электронами, летящими в магнитном поле газовых оболочек с околосветовыми скоростями. Излучение такой природы раньше наблюдалось лишь в созданных физиками ускорителях электронов — в *синхротронах*, и поэтому оно получило название *синхротронного излучения*.

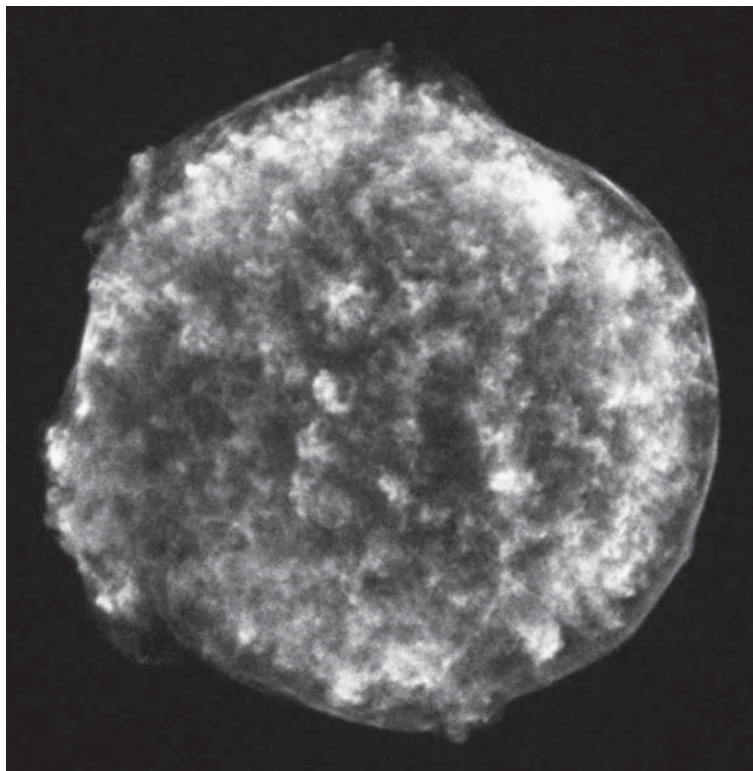


Рис. 25.4. Изображение остатка сверхновой звезды Тихо в рентгеновских лучах: расширяющееся облако газа с температурой около миллиона градусов (НАСА). Вспышка сверхновой наблюдалась в 1572 г.

Наиболее известный и хорошо изученный остаток сверхновой звезды — Крабовидная туманность (рис. 25.4), находящаяся в созвездии Тельца. Она образовалась в результате взрыва, который наблюдался на Земле 9,5 столетий назад — в 1054 г. Там, где сейчас находится туманность, китайские и японские летописцы зарегистрировали внезапное появление звезды такой яркости, что ее можно было видеть даже днем, при свете Солнца. За несколько недель свечение звезды ослабело и она исчезла. Об этом событии надолго забыли.

Сейчас на месте этой когда-то вспыхнувшей звезды наблюдается газовое облако, которое быстро расширяется. Скорость расширения, измеренная по эффекту Доплера, составляет около 1000 км/с. Это означает, что каждую секунду размер облака возрастает на 2000 км. Но из-за большого расстояния до него

кажется, что это расширение происходит очень медленно. Лишь сравнивая фотографии, сделанные с промежутками 15–20 лет, можно заметить, что размер облака слегка увеличился.

В самом центре Крабовидной туманности наблюдается “ущевший” остаток вспыхнувшей звезды — слабенькая звездочка с необычным спектром, в котором нет никаких линий. Это нейтронная звезда (пульсар). Ее излучение регистрируется во всех спектральных диапазонах — от радиоволн до гамма-лучей, и на любой длине волны излучение носит прерывистый, пульсирующий характер: звезда “мигает” с частотой около 30 Гц и почти совсем исчезает между вспышками. Такая особенность пульсаров связана с быстрым вращением и направленным характером излучения нейтронной звезды (см. п. 25.2).

Не все остатки сверхновых похожи на Крабовидную туманность. В созвездии Кассиопеи расположен очень мощный радиоисточник — Кассиопея А. От него на метровых радиоволнах приходит к нам почти такой же поток радиоволн, как и от нашего Солнца. Кассиопея А — это тоже остаток сверхновой звезды. В отличие от Крабовидной туманности, остаток вспыхнувшей звезды в ней не виден в оптическом диапазоне. Однако наблюдается расширяющаяся газовая туманность, значительно менее яркая и компактная, чем Крабовидная туманность.

25.5. Вопросы

1. Чем отличаются затменные переменные звезды от цефеид?
2. Что такое синхротронное излучение?
3. Как можно доказать, что: а) затменная переменная звезда — это двойная звезда, хотя звезды и не видны по отдельности; б) изменение светимости цефеиды связано с изменением ее размеров?
- 4*. Почему в спектре сверхновых звезд линии излучения всегда очень широкие?

25.6. Упражнения

1. Новые звезды при вспышке увеличивают свою светимость примерно в 10 000 раз. На сколько меняется звездная величина звезды при вспышке? Какую звездную величину должна иметь звезда до вспышки, чтобы она стала заметной для невооруженного глаза?
2. За сколько лет Солнце излучает столько же энергии, сколько выделяется при вспышке типичной новой звезды за один день? (Светимость новой принять равной $10^4 L_{\odot}$.)

- 3*. На каком расстоянии от нас должна вспыхнуть сверхновая, чтобы на нашем небе она была такой же яркой, как полная Луна? (Светимость звезды $10^{10}L_{\odot}$, звездная величина Луны $m_L = -12^m$.)

§ 26. Солнце — ближайшая к нам звезда

26.1. Общие сведения. Солнце — рядовая и ближайшая к нам звезда, находящаяся на расстоянии около 150 млн км от нас. Масса Солнца, его светимость и другие характеристики довольно типичны для звезд (см. § § 22, 23).

Солнце нагревает Землю своим излучением. На площадку размером в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно лучам Солнца, каждую секунду приходит около $1,4 \cdot 10^3$ Дж световой энергии (реально некоторая часть этой энергии поглощается атмосферой). Эту величину называют *солнечной постоянной*. Иными словами, мощность солнечного излучения, падающего на 1 м^2 за пределами атмосферы, составляет 1,4 кВт, а на 1 км^2 — 1400 МВт! Это значительная величина. Использование солнечного излучения для выработки электроэнергии в будущем может сыграть очень важную роль, частично заменяя невозобновляемые природные энергетические ресурсы нашей планеты (газ, нефть, уголь и др.).

Относительная близость к нам Солнца позволяет детально исследовать его и наблюдать на нем такие детали, которые недоступны при изучении других звезд, что помогает лучше понять их природу.

Самые заметные детали на *солнечном диске* — темные пятна (рис. 26.1, 26.2). Их систематическое изучение началось лишь после изобретения телескопа, хотя изредка, когда небо покрыто сильной дымкой, ослабляющей солнечный свет, большие пятна бывают заметны и невооруженным глазом. Вид солнечных пятен не остается постоянным. Крупные пятна могут прожить несколько месяцев, после чего исчезают. Бывают периоды, когда на Солнце вообще нет пятен, а в некоторые дни количество их (включая и мелкие) измеряется десятками.

Еще Г. Галилей в начале XVII в. обратил внимание на перемещение пятен по диску Солнца и правильно объяснил его как результат вращения светила вокруг оси. Скорость вращения Солнца можно определить не только по перемещению пятен, но и посредством эффекта Доплера, измеряя лучевые скорости различных частей диска. Оказалось, что период вращения Солнца

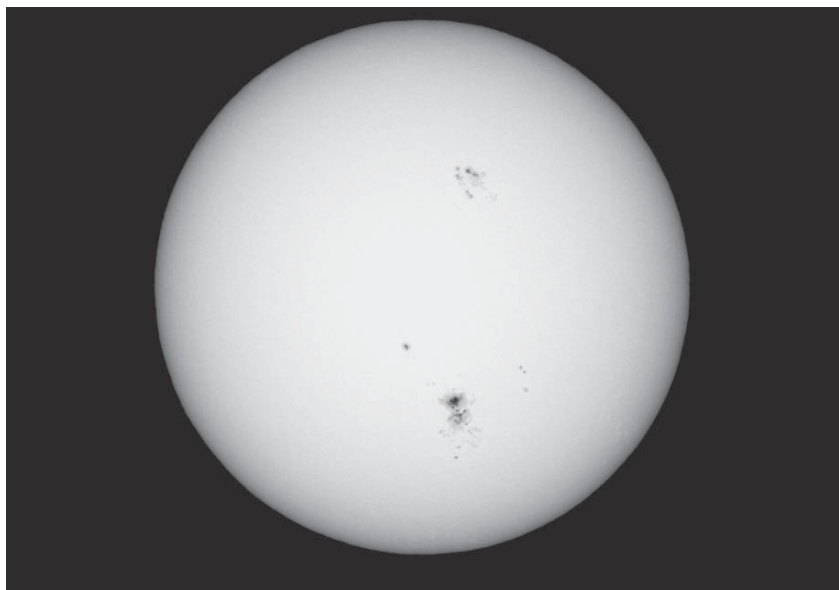


Рис. 26.1. Фотография Солнца с крупным пятном

относительно Земли (т. е. синодический период) составляет около 29 сут. Вследствие перемещения наблюдателя, обусловленного вращением Земли вокруг Солнца, истинный период вращения Солнца (сидерический, или звездный) несколько короче синодического.

Рассчитайте, на сколько сидерический период обращения Солнца короче наблюдаемого с Земли (синодического). (Воспользуйтесь соотношениями, выведенными в § 8.2.)

Как и большинство нетвердых тел, Солнце вращается неоднородно, одни его части быстрее, другие медленнее. Наибольшая угловая скорость вращения Солнца на экваторе, а к полюсам она постепенно уменьшается. Максимальное различие угловых скоростей составляет около 20 %.

В телескоп край диска Солнца кажется резким. В действительности же, поскольку Солнце — газовый шар, резких границ у него нет и плотность солнечного вещества возрастает вглубь постепенно. В центре Солнца, там, где происходят термоядерные реакции, температура достигает 14–15 млн кельвинов. От центра наружу энергию переносит излучение, “просачивающееся” сквозь плотный непрозрачный газ, и только во внешнем слое толщиной около 200 000 км она передается движением самого

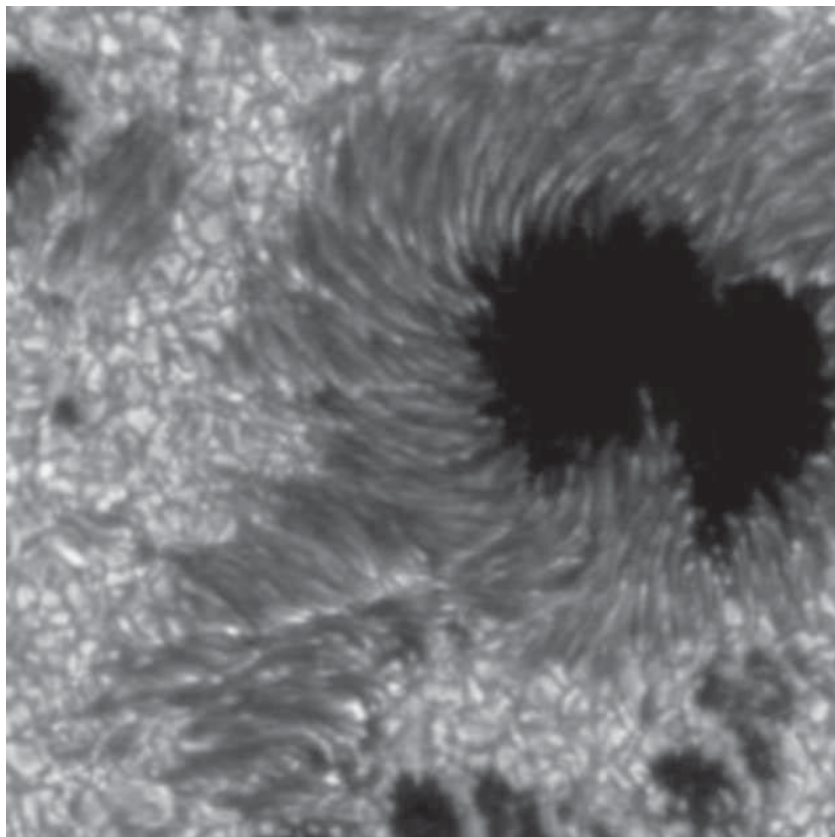


Рис. 26.2. Солнечное пятно и фотосферная грануляция

вещества. В этом слое потоки горячего газа поднимаются в наружные слои Солнца со скоростью нескольких километров в секунду. Здесь газ излучает свет и охлаждается. С уменьшением температуры он становится плотнее и возникают его потоки вниз, вглубь Солнца, где газ вновь нагревается. Эти циклические движения вещества называются *конвекцией*, а тот слой Солнца, где она происходит, — *конвективной зоной*.

Наблюдаемые слои Солнца, свет от которых приходит к нам на Землю, находятся непосредственно над конвективной зоной. Самый глубокий видимый слой называется *фотосферой*, что в переводе с греческого означает “сфера света”. Ее толщина всего 200–300 км (т.е. менее 0,1% от радиуса Солнца). Тем не менее от фотосферы исходит подавляющая часть всей энер-

гии, излучаемой Солнцем. По этой причине фотосферу часто условно называют “поверхностью” Солнца. Спектральный анализ показал, что газ в фотосфере в тысячи раз разреженнее воздуха у поверхности Земли. Его плотность составляет одну десятиллионную часть плотности воды. На фотографиях Солнца видно (см. рис. 26.2), что вся фотосфера выглядит как совокупность ярких пятнышек — *гранул*, разделенных узкими темными дорожками. Размеры гранул в среднем около тысячи километров. Образованная ими картина непрерывно меняется. За 5–10 мин они успевают появиться и исчезнуть, дав место новым. Гранулы связаны с конвективными потоками под фотосферой, которые выносят наружу все новые и новые порции горячего газа.

Солнечные пятна резко очерчены и темнее окружающей фотосферы. На ее ослепительно ярком фоне они кажутся совсем черными. В действительности же их яркость примерно лишь в пять раз меньше, чем у фотосферы. Так как температура фотосферы около 6000 К, а яркость светящегося тела, согласно закону Стефана–Больцмана, пропорциональна четвертой степени температуры, получается, что отношение температур примерно равно $\sqrt[4]{5} \approx 1,5$ и температура пятен порядка 3–4 тыс К.

Образование пятен связано с магнитным полем Солнца. Солнце в целом — слабо намагниченная звезда. Измерения показали, что индукция магнитного поля в фотосфере в среднем лишь вдвое больше, чем у поверхности Земли. Однако в солнечной конвективной зоне магнитные поля постоянно усиливаются, особенно в нижних ее слоях. Проникая в фотосферу, магнитные поля образуют отдельные области высокой магнитной индукции (в тысячи раз более высокой, чем вокруг них). В этих областях возникают темные пятна. **Солнечные пятна — это своего рода острова очень сильного магнитного поля на Солнце, окруженные “морем” обычной невозмущенной фотосферы.**

Причина понижения температуры в пятнах связана с влиянием магнитного поля на конвективные движения газа. Ведь газ фотосферы — это плазма, которая хорошо проводит электрический ток. Поэтому магнитное поле Солнца там, где оно особенно сильное, создает индукционные токи в газе, которые тормозят движение конвективных потоков. В результате в области с сильным магнитным полем конвекция ослабляется и переносит меньше энергии, из-за чего температура фотосферы понижается. Так возникают солнечные пятна.

26.2. Внешняя атмосфера Солнца: хромосфера и корона.

Газ, расположенный над фотосферой, прозрачен для видимых лучей света — иначе сквозь него фотосфера не была бы видна. Этот газ образует внешние слои солнечной атмосферы — *хромосферу* и *корону*. Между ними нет резкой границы.

Слой хромосферы имеет толщину в несколько тысяч километров. Спектр хромосферы не такой, как у фотосферы (непрерывный с линиями поглощения), а линейчатый, каким и должен быть спектр разреженного газа. Газ хромосферы неоднороден по плотности и находится в постоянном движении. Струи, петли и отдельные сгустки плазмы размером с целые земные континенты непрерывно возникают и рассасываются в хромосфере за десятки минут.

Хромосферу можно наблюдать через специальные светофильтры, которые пропускают свет в узких интервалах длин волн, соответствующих отдельным спектральным линиям. Наиболее яркие линии в оптическом спектре хромосферы — красная линия водорода с длиной волны 656 нм, а также ультрафиолетовая линия ионизованного кальция (393 нм). Поэтому во время полной фазы солнечных затмений хромосфера видна в виде фиолетоватопрозрачного кольца непосредственно вокруг темного диска Луны.

Внешние слои солнечной атмосферы, расположенные над хромосферой и простирающиеся на десятки радиусов Солнца, называются *солнечной короной*. Во время полных солнечных затмений корона всегда видна как серебристое жемчужное сияние (рис. 26.3). Ее плотность очень медленно уменьшается с расстоянием от Солнца. Вдали от него она постепенно переходит в свое динамическое продолжение — солнечный ветер, составляющий межпланетную газовую среду.

Спектральные наблюдения, проводимые во время солнечных затмений, показали, что линейчатый спектр излучения короны очень необычен. В нем нет спектральных линий водорода или других элементов, присутствующих в спектрах фотосферы или хромосферы. Зато были обнаружены не встречающиеся в лабораторных условиях яркие линии, которые долгое время не удавалось отождествить ни с одним из известных химических элементов. Позднее установили, что эти линии принадлежат атомам железа, никеля и других химических элементов, лишенным многих электронов. Чтобы “оторвать” у этих атомов электроны, среда, в которой они находятся, должна быть нагрета до 1–2 млн К. Следовательно, причина необычного спектра короны — высокая температура. Дальнейшие измерения яркости

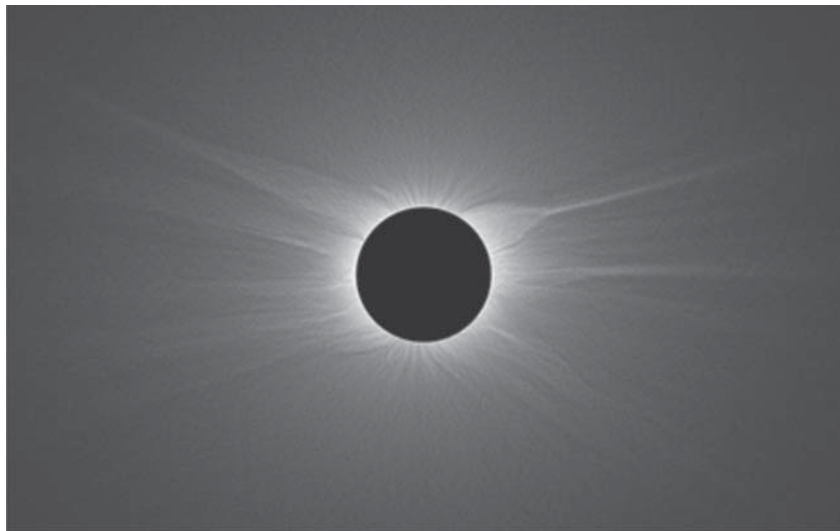


Рис. 26.3. Солнечная корона: вид во время полного солнечного затмения

и спектра рентгеновского и радио излучения короны подтвердили вывод о ее высокой температуре.

Изредка в слабо намагниченном газе вблизи границы хромосферы и короны возникают сложные плазменные структуры, приводящие в отдельных областях к взрывному выделению колоссальной энергии — до 10^{25} Дж (это эквивалентно энергии примерно миллиарда атомных бомб). Такие явления носят название *солнечных вспышек*. Это самое мощное проявление солнечной активности. Яркость Солнца в области вспышки в линиях излучения газа, а иногда и в непрерывном спектре, внезапно возрастает во много раз. Возникает мощное рентгеновское излучение, по которому можно определить, что газ в результате взрыва за несколько минут нагревается до температуры 10–30 млн К. Потoki горячего газа с большой скоростью распространяются вдоль линий магнитной индукции в нижние слои солнечной атмосферы, заставляя их ярко светиться. Ускоряются и покидают Солнце мощные потоки заряженных частиц — протонов и электронов. Рентгеновское излучение и быстрые частицы — *солнечные космические лучи*, сопровождающие вспышку, резко увеличивают поле радиации в межпланетном пространстве. Также значительно возрастает интенсивность солнечного ветра. К счастью, атмосфера Земли и ее магнитное поле защищают

земную поверхность от губительной радиации, связанной с солнечными вспышками.

Очень мощные вспышки с энергией более 10^{25} Дж происходят редко, но более слабые иногда наблюдаются на Солнце почти ежедневно. Вспышки — это мощный разряд в плазме, а энергия вспышек — преобразованная энергия магнитного поля, которая частично переходит в тепловую энергию газа и в кинетическую энергию потоков быстрых заряженных частиц.

Самыми яркими и заметными структурами во внутренних слоях короны являются *протуберанцы*. Они обычно наблюдаются вместе с хромосферой в спектральных линиях водорода и ионизованного кальция и выглядят как огненные дуги или языки “пламени”, поднимающиеся над Солнцем (рис. 26.4). **Протуберанцы — это большие, сложные по форме облака ионизованного газа**, движущегося в короне. Они плотнее вещества короны и значительно холоднее его (их температура в 100 раз ниже, чем в короне, и составляет около 10 000 К). Хотя протуберанцы могут подниматься на многие десятки тысяч километров над хромосферой, газ протуберанцев по всем своим характеристикам подобен газу хромосферы. Иногда возникают протуберанцы, которые движутся так быстро, что их вещество может навсегда покинуть Солнце. Но столь быстрые протуберанцы — большая редкость. Обычно газ в них движется медленно и чаще не вверх, а вниз, т. е. из короны — в солнечную хромосферу. Такие протуберанцы представляют собой уплотнившийся и охлаждавшийся газ короны, “стекающий” к Солнцу под действием его притяжения.

Солнечные пятна, вспышки, структурные детали хромосферы и короны — все это следствие сложных взаимодействий электропроводящего газа (плазмы) солнечной атмосферы с магнитными полями на Солнце.

Газ солнечной короны настолько горяч, что гравитационное поле Солнца не может удержать тепловых движений частиц. Вещество внешней части солнечной короны, состоящее из свободных электронов, протонов и ионов различных элементов, непрерывно удаляется от Солнца по всем направлениям. Корона как бы испаряется в окружающее межпланетное пространство. Со скоростью в сотни километров в секунду ее плазма движется через всю планетную систему. Как уже упоминалось, этот поток вещества, распространяющийся от Солнца, называется *солнечным ветром*.

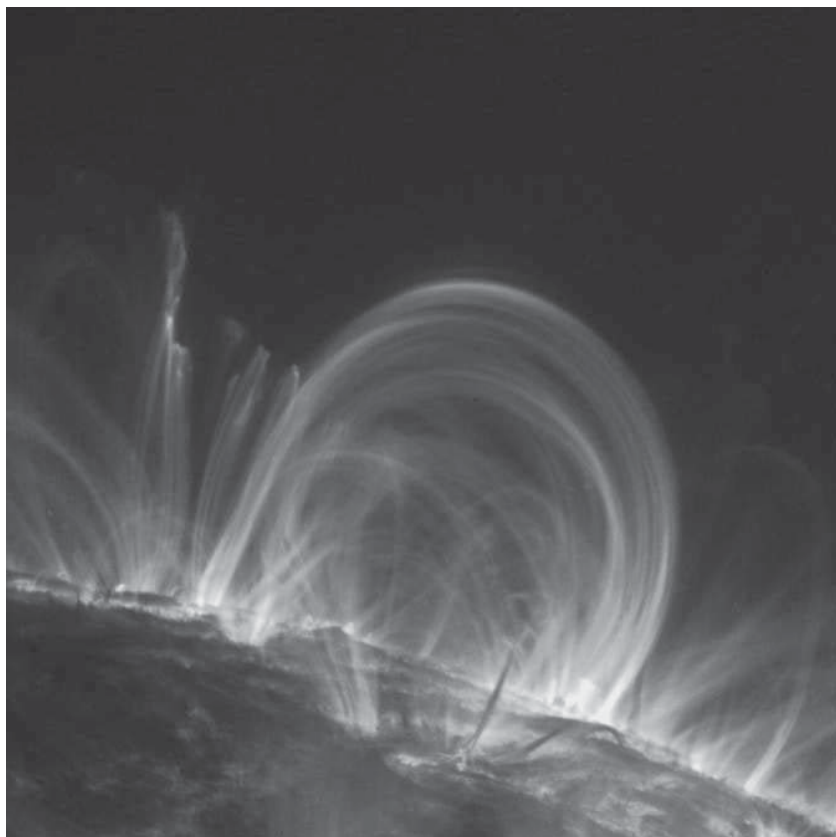


Рис. 26.4. Плазменные арки в солнечной хромосфере (КА “Трейс”, НАСА)

26.3. Гелиосейсмология. В состоянии равновесия общая фигура Солнца почти не отличается от сферической (сжатие у полюсов из-за медленного вращения составляет лишь одну сотысячную долю радиуса). Однако в мелких масштабах постоянно происходят движения вещества в конвективной зоне и в атмосфере. Нарушение равновесия в любой области Солнца вызывает волны, распространяющиеся в солнечном веществе по всем направлениям. Возвращающие силы, которые рождают эти колебания, — это сила газового давления и сила тяжести. Метод изучения внутреннего строения Солнца на основании измерения и анализа частот и амплитуд колебаний отдельных его областей, равно как и Солнца в целом, называется *гелиосейсмологией*.

Колебания Солнца можно наблюдать по относительным изменениям яркости или лучевых скоростей газа в отдельных участках фотосферы. Обычно измеряют периодические доплеровские смещения спектральных линий в различных точках солнечного диска при помощи очень точного спектрометра. Удаётся выделить колебания скоростей и яркостей с очень малой амплитудой. Значения периодов этих колебаний составляют от 3 до 15 минут. Наибольшей амплитудой изменения скорости (до 20 см/с) обладают колебания с периодами около пяти минут (пятиминутные колебания). Наблюдения позволяют зарегистрировать множество различных частот колебаний Солнца, амплитуды которых зависят от физических характеристик слоев солнечного вещества на различных глубинах под фотосферой. При этих колебаниях меняются локальные значения температуры, плотности, скорости, напряженности магнитного поля и другие параметры плазмы.

Анализируя частоты отдельных колебаний, можно определить зависимость скорости звука в газе (а следовательно, и температуры) от расстояния до центра Солнца и тем самым уточнить модели его внутреннего строения. Полученные результаты подтвердили правильность существующей теоретической модели внутреннего строения. При этом был получен ряд новых результатов. Например, гелиосейсмология позволила уточнить глубину конвективной зоны (200 тыс. км под фотосферой). Было также показано, что неоднородный характер вращения Солнца на уровне фотосферы сохраняется и в конвективной зоне. При этом более глубокие слои, напротив, вращаются почти как твердое тело, т. е. с одним периодом.

Вспомните, какие процессы вызывают колебания Земли, регистрируемые специальными приборами — сейсмометрами.

26.4. Активность Солнца и ее влияние на Землю. Наблюдения показывают, что в атмосфере Солнца постоянно происходят изменения. Из месяца в месяц, из года в год меняется среднее число солнечных пятен и больших протуберанцев, частота появления солнечных вспышек и связанных с ними явлений. Эти изменения характеризуют степень *активности Солнца* и обладают определенной периодичностью.

Активность Солнца достигает максимума в среднем через каждые 11 лет. Очередной максимум ожидается около 2011 г.

Изменение солнечной активности хорошо согласуется по фазе с очень слабой вариацией общей светимости Солнца, которая наблюдается как колебание солнечной постоянной в пределах

0,1 %. Однако такое изменение светимости Солнца слишком мало, чтобы заметно влиять на энергетический баланс Земли. Тем не менее Земля чутко реагирует на проявления солнечной активности. Самым ярким примером может служить увеличение числа полярных сияний и магнитных бурь (т. е. быстрых изменений земного магнитного поля) в годы максимума солнечной активности, связанное с влиянием солнечных космических лучей и солнечного ветра на магнитосферу и атмосферу нашей планеты. С солнечной активностью меняется плотность верхних слоев земной атмосферы. Обнаружено влияние активности Солнца и на живую природу: на рост деревьев, миграцию некоторых животных и насекомых и даже на состояние здоровья людей, подверженных некоторым, в том числе сердечным, заболеваниям. Все это свидетельствует о чрезвычайной важности исследования и прогнозирования солнечной активности.

Механизм, связывающий активные процессы на Солнце со многими земными явлениями, еще не вполне ясен. Полярные сияния, магнитные бури и некоторые другие земные “проявления” активности Солнца вызваны взаимодействием магнитного поля Земли и ее атмосферы с частицами солнечного ветра. Большую роль играют и потоки очень быстрых протонов и электронов (солнечных космических лучей), которые ускоряются во время солнечных вспышек до многих тысяч километров в секунду. С повышением активности Солнца число таких частиц и их энергия возрастают. Но непосредственно до поверхности Земли они не доходят. Магнитное поле нашей планеты меняет направление их движения так, что поток частиц как бы обтекает Землю, а те частицы, которым удается прорваться через магнитный “заслон”, поглощаются в атмосфере, непроницаемой даже для самых быстрых из них. Лишь в районе магнитных полюсов частицы проникают в верхние слои атмосферы, вызывая их свечение — полярные сияния.

Благодаря атмосфере и магнитному полю все живое на Земле защищено от непосредственного губительного влияния космических лучей и солнечного ветра. Но за пределами Земли с существованием быстрых частиц приходится считаться. Они могут представлять угрозу для космонавтов, находящихся в полете, и вывести из строя сложную электронную аппаратуру, работающую в космосе. Запуски космических кораблей и аппаратов приходится проводить с учетом прогнозов солнечной активности, которые специально составляются в ряде стран, в том числе и в России.

26.5. Вопросы

1. В каком (примерно) году был последний минимум солнечной активности? Когда ожидается следующий?
2. Что можно увидеть на Солнце в телескоп?
3. Откуда стало известно расстояние до Солнца?
4. Почему нельзя увидеть невооруженным глазом солнечную корону с Земли, загородив диск Солнца непрозрачным экраном?

26.6. Упражнения

1. Зная расстояние до Солнца, оцените размер солнечного пятна, если оно видно под углом $1'$.
2. На лучших фотографиях Солнца видны детали в его атмосфере с угловым размером около $0,5''$. Каков линейный размер этих деталей?
3. Зная размер Солнца и период его осевого вращения, оцените линейную скорость его вращения на экваторе.
4. Какую скорость должно иметь вещество солнечных протуберанцев, чтобы оно никогда не упало на Солнце? (Воспользоваться значениями массы и радиуса Солнца и выражением для второй космической скорости.)
- 5*. Известно, что частицы солнечного ветра проходят земную орбиту со скоростью около 500 км/с , при этом концентрация этих частиц примерно соответствует 5 протонам в 1 см^3 . Зная массу протона ($1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), определите массу вещества, которую Солнце теряет каждую секунду из-за солнечного ветра. Сравните с оценкой потери массы на излучение.
- 6 На какую долю процента возрастает мощность излучения Солнца, когда на нем происходит мощная вспышка, если во время наиболее мощных вспышек за 5 минут может выделяться световая энергия 10^{25} Дж .

§ 27. Эволюция звезд

27.1. “Старение” звезд. За все время существования цивилизации на небе не исчезло и не появилось ни одной заметной глазу звезды (если не считать кратковременных вспышек новых и сверхновых звезд). Но это не означает, что звезды неизменны. Необратимые процессы происходят и в них. Термоядерное топливо — водород — постепенно исчерпывается, звезда “стареет”. Меняется ее температура, светимость, химический состав. Про-

цесс этот очень медленный, он может занимать миллиарды лет. Поэтому мы не в состоянии проследить за эволюцией какой-либо одной выбранной звезды. О том, как эволюционируют звезды, удалось узнать, сопоставляя между собой характеристики звезд различного возраста и массы. Ожидаемые изменения, которые должны происходить со звездами в процессе эволюции, в настоящее время можно рассчитать теоретически, основываясь на физических законах и на знаниях тех процессов, которые происходят внутри звезд.

Теория и наблюдения хорошо согласуются друг с другом. Они привели к следующим важнейшим выводам, касающимся процесса эволюции звезд.

1. Чем больше масса звезды, тем быстрее происходит ее эволюция и тем короче время ее существования. Причина этого в том, что время существования любой звезды определяется запасом ее ядерной энергии и темпами расходования на излучение. Начальное содержание водорода пропорционально массе звезды, а скорость его расхода пропорциональна светимости, так как ядерная энергия звезд в конечном счете превращается в энергию излучения. Поэтому время существования звезды t пропорционально отношению M/L (массы к светимости). Из п. 22.7 мы знаем, что для большинства звезд справедливо соотношение $L \sim M^4$. Эта зависимость выполняется для звезд с водородным источником энергии. Таким образом, $t \sim M/L \sim M^{-3}$, т. е. время существования звезд обратно пропорционально кубу их массы. Звезды с массой как у Солнца, “живут” 11–13 млрд лет, а наиболее массивные из наблюдаемых звезд — всего лишь несколько миллионов лет.

2. Процесс “старения” звезд происходит неравномерно. Почти 90% своей жизни звезды остаются практически неизменными, находясь на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рассела (п. 22.8, рис. 22.3). Все это время в их недрах выделяется термоядерная энергия за счет превращения водорода в гелий. Как только запасы водорода в центральной области звезды оказываются исчерпанными, звезда начинает сравнительно быстро меняться.

3. Когда запасы ядерной энергии в центре звезды подходят к концу, ее размеры и светимость начинают расти, а температура атмосферы — уменьшаться. Звезда начинает превращаться в огромную красноватую звезду высокой светимости и очень низкой плотности (*красный гигант*, или *сверхгигант*).

В недрах красного гиганта (сверхгиганта) образуется небольшое по размеру, но плотное и горячее *гелиевое ядро*. Как только

температура в нем поднимается примерно до сотни миллионов кельвинов, начинается взаимодействие между ядрами гелия, и превращение их в углерод. Этот процесс также сопровождается выделением большого количества энергии. При этом в слое газа вокруг гелиевого ядра, где температура не столь высока, как в ядре, продолжается выделение энергии за счет “обычной” реакции превращения водорода в гелий. Таким образом, гигантские стареющие звезды имеют иное внутреннее строение и иные источники энергии, чем звезды главной последовательности, из которых они возникли.

Возраст нашего Солнца — около 5 млрд лет. Через 6–7 млрд лет в его недрах также будет исчерпан весь водород, и примерно через 100 млн лет после этого Солнце превратится в красный гигант, его размеры увеличатся в десятки раз, а светимость возрастет настолько, что жизнь на раскаленной поверхности Земли станет невозможной.

27.2. Конечные стадии эволюции звезд. Что же происходит со звездами после завершения их эволюции?

В самых маломассивных звездах, меньше 0,08 масс Солнца, термоядерные реакции так и не зажигаются (для этого температура в их недрах недостаточно высока), и они медленно остывают, превращаясь в тела, более похожие на планеты-гиганты, чем на звезды. Их называют коричневыми карликами. Таких звезд в природе много, но открыто лишь небольшое количество, поскольку их трудно обнаружить из-за очень низкой светимости.

Более массивные звезды после исчерпания главного ядерного “топлива” — водорода — проходят стадию красного гиганта или сверхгиганта, и сбрасывают часть своей массы, тем большую, чем выше начальная масса звезды. Оболочка звезды постепенно рассеивается в пространстве, а эволюция плотного звездного ядра продолжается и может происходить разными путями в зависимости от начальной массы звезды. Оказалось, что конечная стадия эволюции звезд зависит от их начальной массы.

Звезды примерно той же массы, что и Солнце, после стадии красного гиганта и сброса небольшой части вещества сжимаются до размеров, типичных для планет. Они превращаются в вырожденные звезды — белые карлики, которые затем очень медленно остывают, пока через многие миллиарды лет не превратятся в холодные и плотные шары из вырожденного газа.

Если звезда обладает начальной массой в несколько раз больше солнечной, то она теряет в процессе эволюции основную часть своей массы. В итоге она, как и Солнце, только за меньшее

время, в конце концов превращается в белый карлик с массой меньше солнечной.

В звездах наибольших масс (по расчетам — 10 и более масс Солнца) даже после сброса вещества остается очень массивное ядро. После истощения запасов термоядерного топлива оно сжимается под действием собственного веса, и этот процесс сопровождается мощным взрывом сверхновой. Остаток звезды, если его масса не превышает примерно три массы Солнца, превращается в компактную нейтронную звезду. Масса наблюдаемых нейтронных звезд никогда не превышает 2,5–3 массы Солнца.

Менее изучен тот вариант, когда после всех потерь вещества в ядре остается масса, превышающая три массы Солнца. Под действием собственной гравитации в этом случае ядро начинает безудержно сжиматься. Его мощное гравитационное поле так сильно сдавливает вещество, что оно не может остановить сжатие ни на стадии белого карлика, ни на стадии нейтронной звезды. Конечной стадией такого сжатия неизбежно явится возникновение поразительного объекта с фантастической плотностью и размерами в несколько километров. Вблизи него гравитационное поле усиливается до значений, предельно допустимых законами физики. В столь сильных полях скорость “убегания” (вторая космическая скорость, равная $\sqrt{2GM/R}$, см. § 10), достигает скорости света — максимальной скорости движения, возможной в природе. Это означает, что ни свет, ни любое другое излучение не могут вырваться из гравитационного поля таких объектов, и они невидимы! Поэтому такие объекты получили название *черных дыр*.

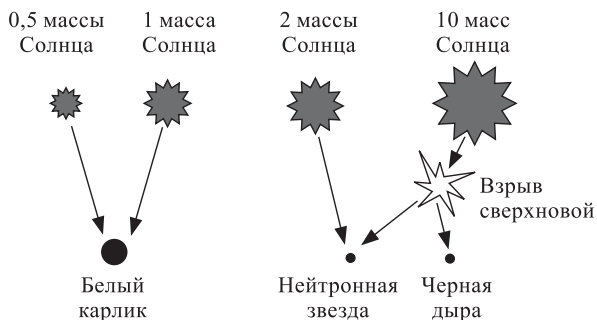


Рис. 27.1. Конечные стадии существования звезд с различной массой в конце эволюции

Тела-невидимки — черные дыры — это особые образования. Из физической теории гравитации следует, что вблизи них должны меняться свойства пространства и замедляться темпы течения времени, что делает их необычными по своим свойствам. Обнаружить такие объекты можно только по их гравитационному воздействию на окружающее вещество, например на близко расположенные звезды или разреженный газ, в котором они находятся. Любое вещество, попавшее в окрестность черной дыры, с какой бы скоростью оно ни двигалось, будет падать на нее, образуя вокруг черной дыры очень горячий газовый диск, похожий на тот, который возникает вокруг нейтронных звезд в тесных парах с нормальными звездами (§ 24.2). Благодаря очень высокой температуре, такие диски должны быть мощными рентгеновскими источниками. По-видимому, среди многих обнаруженных рентгеновских источников, образующих тесные пары с обычными звездами, некоторые действительно возникают при перетекании газа от звезды на близко расположенную черную дыру. Это должно относиться к тем тесным двойным системам, где масса невидимых рентгеновских компонентов превышает 3 массы Солнца, т.е. теоретически возможную массу нейтронных звезд. Такие системы действительно были обнаружены. Их рассматривают как “кандидаты” в черные дыры.

27.3. Вопросы

1. Какая судьба ожидает Солнце через многие миллиарды лет?
2. Какую (примерно) продолжительность существования можно ожидать у звезд с массой $0,5M_{\odot}$? $5M_{\odot}$? $50M_{\odot}$?
3. Объясните, почему более массивные звезды эволюционируют быстрее, чем менее массивные.
4. Перечислите, какие объекты рассматриваются как конечные стадии эволюции звезд, если на этой стадии эволюции звезда: а) в 10 раз массивнее Солнца; б) в 2 раза массивнее Солнца; в) по массе равна Солнцу; г) имеет массу, равную половине массы Солнца; д) в 20 раз “легче” Солнца.

27.4. Упражнения

1. Считая, что светимость Солнца остается примерно постоянной, определите, какую долю массы потеряет Солнце за свою жизнь за счет излучения света.
- 2*. Определите размер и плотность черной дыры, имеющей массу $30M_{\odot}$.

Основные выводы

Измерения расстояний до звезд, их температур, светимостей и других характеристик показали, что звезды состоят из горячего ионизованного газа (в основном — водорода и гелия), удерживаемого от расширения собственным гравитационным полем. Звезды — это газовые шары, находящиеся в равновесном состоянии.

Излучение звезд объясняется высокой температурой их видимых слоев — фотосфер. Оно поддерживается благодаря термоядерным реакциям в недрах звезд. Вещество звезды на любом расстоянии от центра находится в равновесии между силами гравитации, стремящимися сжать звезду, и силами давления горячего газа, расширяющими ее изнутри.

По своим характеристикам многие звезды близки к Солнцу, хотя известны и такие, которые по светимости или плотности отличаются от Солнца как в большую, так и в меньшую сторону во многие тысячи раз.

Наиболее плотные звезды — белые карлики, вещество которых остается газом, но с весьма необычными свойствами, а также нейтронные звезды, состоящие в основном из нейтронов. Плотность нейтронных звезд приближается к плотности атомных ядер, а их радиус составляет всего лишь около 10 км.

Многие звезды являются переменными. Причина изменений их видимой яркости может быть различна: затмения звезд двойных систем, пульсации относительно положения равновесия, а также внутренние процессы, приводящие к резкому возрастанию светимости или взрыву звезды. Наиболее мощные взрывы наблюдаются как сверхновые звезды. На месте взрыва сверхновой образуется расширяющееся газовое облако (остаток сверхновой), обладающее сильным радиоизлучением благодаря магнитному полю, в котором движутся высокоэнергичные электроны.

Солнце — звезда, которую можно исследовать значительно подробнее остальных, в частности, изучать отдельные детали в ее атмосфере. Внешняя область солнечной атмосферы — корона — расширяется и представляет собой непрерывный поток вещества (ядер атомов и электронов), уходящего от Солнца, — солнечный ветер. Частота появления солнечных пятен и других образований на Солнце, например солнечных вспышек, меняется с периодом, составляющим в среднем около 11 лет (период активности). Активность Солнца отражается на многих земных явлениях.

Солнце, как и другие звезды, не может существовать вечно. Звезды рождаются, изменяются со временем (эволюционируют), вырабатывая энергию, пока в их недрах имеются запасы ядерного “топлива”. Время существования звезды тем короче, чем больше ее масса.

Звезды с массой, не превышающей солнечную, излучают свет за счет термоядерной энергии, почти не меняясь миллиарды лет. Когда кончаются запасы водородного топлива, они сначала увеличивают свой размер, становясь красными гигантами, а затем сильно сжимаются, превращаясь в белые карлики. Более массивные звезды завершают свою эволюцию в виде нейтронных звезд, а некоторые, возможно, становятся черными дырами. “Кандидатами” в черные дыры можно считать невидимые спутники некоторых звезд, если массы этих спутников превышают 3–4 массы Солнца. Поиски черных дыр — очень сложная задача. Она решается путем анализа наблюдений тесных двойных звездных систем, в которых одна звезда — обычная, а вторая — невидимый компактный объект.

Глава 7

НАША ГАЛАКТИКА

§ 28. Состав и структура Галактики

28.1. Млечный Путь и структура Галактики. Уже к началу XX века было известно, что те звезды, которые наблюдаются *невооруженным глазом или в небольшой телескоп*, образуют в пространстве огромный сплюснутый звездный диск. Позднее удалось показать, что его толщина составляет несколько тысяч световых лет, а диаметр превышает толщину более чем в десять раз. Это главный компонент нашей звездной системы — Галактики. Мы находимся внутри звездного диска и поэтому вблизи его плоскости видим очень много далеких звезд. Совокупность этих звезд сливается для нас в светящуюся полосу Млечного Пути. Раньше полагали, что Солнце расположено вблизи центра Галактики, потому что яркость Млечного Пути примерно одинакова во всех направлениях, хотя в нем и существуют отдельные более яркие участки.

Полоса Млечного Пути имеет очень неровные очертания, даже раздваивается на одном участке. С чем это может быть связано?

Сейчас мы знаем, что свет самой яркой центральной области Галактики сильно ослаблен из-за поглощения межзвездной пылью. Лишь наблюдения в инфракрасных лучах, которые испытывают меньшее поглощение, позволили “увидеть” наиболее плотную центральную область нашей Галактики. Она расположена в созвездии Стрельца на расстоянии около 25 тысяч световых лет от нас. Центральная, наиболее компактная область Галактики называется ее звездным ядром. Наша Галактика имеет довольно сложную структуру. Часть ее звезд не входит в состав диска, а образует так называемую сферическую составляющую, внутренняя область которой носит название балдж (от англ. *bulge*, вздутие) (рис. 28.1). Звезды сферической составляющей концен-

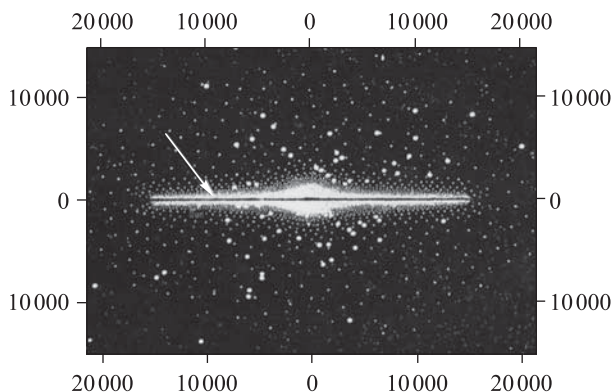


Рис. 28.1. Схема Галактики (вид с ребра). Отмечено положение Солнца. Шкала в парсеках

трируются не к плоскости диска, а к ядру Галактики. Диск и сферическая составляющая — основные элементы структуры нашей Галактики.

Полное число звезд в Галактике можно оценить только ориентировочно. Оно составляет несколько сотен миллиардов. Лишь незначительная доля всех этих звезд доступна наблюдениям даже при помощи крупнейших телескопов.

Галактика — это огромный звездный “остров”, диаметр которого превышает 100 000 световых лет, объединяющий сотни миллиардов звезд различной массы, возраста и светимости. Помимо звезд, в Галактике содержится много тел небольшой массы (например, планет) и очень неоднородная по плотности межзвездная среда (разреженный газ, пыль, космические лучи). Несмотря на большую массу, Галактика — очень разреженная система: расстояния между соседними звездами, как правило, измеряются световыми годами.

28.2. Звездные скопления. Внутри Галактики звезды распределены неоднородно. Даже невооруженным глазом легко заметить, что звезды неравномерно распределены по небу. Это проявляется не только в концентрации слабых звезд к середине Млечного Пути, но и в существовании отдельных групп из большого числа звезд, называемых *звездными скоплениями*.

Примером звездных скоплений, ярчайшие звезды которых хорошо видны невооруженным глазом, являются скопления Плеяды и Гиады (оба в созвездии Тельца). В Плеядах нормальный глаз видит 5–7 слабых звездочек, располагающихся в виде маленького ковшика (по этому скоплению удобно

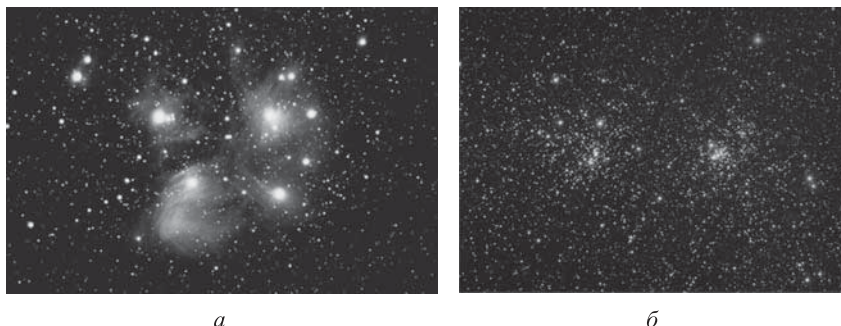


Рис. 28.2. Рассеянное скопление Плеяды в созвездии Тельца (а), рассеянные скопления χ и η Персея (б)

проверять остроту зрения, нормальное зрение позволяет различить не менее 5 звезд). В телескоп в Плеядах заметны сотни звезд (рис. 28.2). Гиады — скопление не столь компактное, как Плеяды, но оно содержит более яркие звезды. Рядом с Гиадами — красноватый Альдебаран — ярчайшая звезда в созвездии Тельца. С помощью хорошего бинокля можно увидеть немало других скоплений звезд, едва заметных невооруженным глазом. В небольшой телескоп прекрасно видны два близких друг к другу скопления в созвездии Персея, обозначаемые греческой буквой χ (хи) и латинской η (аш) — χ и η Персея.

Измеряя температуры и светимости звезд скоплений и сравнивая их положение на диаграмме Герцшпрунга–Рессела с положением звезд известных масс и возрастов, удастся оценить их возраст. Оказалось, что для различных скоплений он не одинаков: некоторые скопления состоят из сравнительно молодых (возраст — десятки миллионов лет), а другие — из старых звезд (возраст — миллиарды лет). При этом **звезды внутри скопления имеют близкий возраст и, следовательно, связаны общим происхождением.**

Наблюдаются два типа скоплений: *рассеянные* и *шаровые*. Рассеянные скопления содержат десятки, сотни, а наиболее крупные — тысячи звезд и выглядят в телескоп сверкающей россыпью. Плеяды, Гиады, χ и η Персея относятся к этому типу. Среди рассеянных скоплений встречаются как сравнительно старые, с возрастом в несколько миллиардов лет, так и очень молодые, в которых еще сохранилось много голубых горячих звезд (сверхгигантов) высокой светимости. Эти звезды значительно массивнее Солнца, и поэтому, как мы уже знаем,

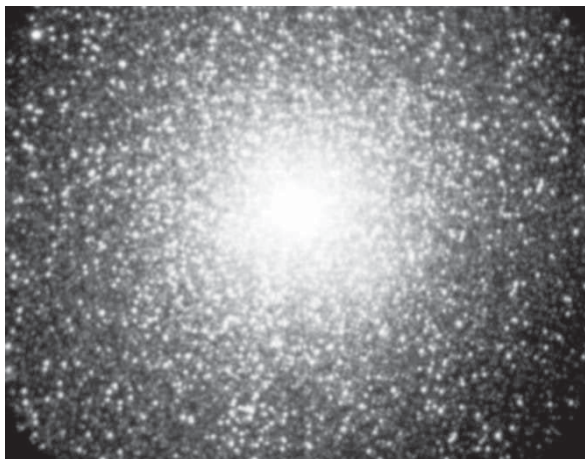


Рис. 28.3. Шаровое скопление

продолжительность их жизни меньше, чем у звезд других типов. Существование в рассеянных скоплениях таких звезд говорит о том, что образование скоплений продолжается и в наше время. Сравнительно молодым скоплением являются Плеяды: его возраст около ста миллионов лет. Солнце в 50 раз старше.

Рассеянные скопления можно найти не в любой части неба. Почти все они наблюдаются вблизи Млечного Пути. Именно там, вблизи плоскости диска Галактики, наиболее активно происходит звездообразование.

Шаровые скопления по размеру, как правило, значительно больше рассеянных и содержат сотни тысяч звезд. Все они очень далеки от нас. Только одно-два можно заметить в бинокль, но даже они из-за громадного расстояния видны лишь как крошечные светящиеся пятнышки. На фотографиях шаровые скопления обычно выглядят как целый рой огромного числа звезд (рис. 28.3). Кажется, что в центре скопления звезды сливаются в сплошную светлую массу. На самом деле даже там между звездами достаточно много свободного пространства, чтобы они двигались, не сталкиваясь друг с другом. В отличие от рассеянных скоплений, в шаровых мы не наблюдаем молодых звезд. Это очень старые звездные системы. Основываясь на теории звездной эволюции, астрономы оценивают возраст наиболее старых скоплений в 12–15 млрд лет (с точностью до нескольких млрд лет).

Всего в нашей Галактике известно более 150 шаровых скоплений. В отличие от рассеянных звездных скоплений, шаровые скопления слабо концентрируются к полосе Млечного Пути. Зато практически все они наблюдаются в одной половине неба, там, где находится центр Галактики, к которому они концентрируются. Шаровые скопления, в отличие от рассеянных, относятся к сферической составляющей Галактики.

28.3. Вопросы

1. Чем отличаются шаровые скопления от рассеянных?
2. Как можно доказать, что Млечный Путь состоит из звезд?
3. Перечислите основные типы объектов, входящих в состав Галактики.
4. В каком созвездии находится центр Галактики? Как высоко он поднимается над горизонтом в той местности, где Вы живете? (Склонение центра Галактики $\delta = -29^\circ$.)

28.4. Упражнения

1. Во сколько раз диаметр Галактики больше: а) Солнечной системы; б) расстояния до ближайшей к Солнцу звезды; в) отдельных звездных скоплений (характерный размер последних — 10 пк)?
2. Если уменьшить все расстояния так, что расстояние от Земли до Солнца будет равно 1 м, то каким окажется в таком масштабе размер диска Галактики и его толщина?

§ 29. Движение звезд

29.1. Тангенциальные и лучевые скорости звезд. Звезды в Галактике непрерывно движутся. Если бы они хоть на мгновение остановились, то из-за взаимного притяжения начали бы падать к центру Галактики и оказались бы там через несколько сотен миллионов лет. Этого не происходит по той же причине, по которой планеты не падают на притягивающее их Солнце. Скорости, с которыми движутся звезды, составляют десятки и сотни километров в секунду, но из-за больших расстояний до звезд обнаружить их относительное движение по небу очень трудно.

О движении в космическом пространстве любого тела, излучающего свет или другие электромагнитные волны, можно узнать двумя способами.

Первый способ — наблюдение за перемещением источника на фоне очень далеких звезд. Он дает оценку не полной скоро-

сти объекта, а только проекции вектора скорости на плоскость, перпендикулярную лучу зрения (рис. 29.1). Эту составляющую называют *тангенциальной скоростью* v_t . Ее можно измерить лишь для сравнительно близких звезд по медленному изменению их положения на небе.

Первый каталог, в котором были приведены относительные положения ярких звезд, был составлен древнегреческим ученым Гиппархом еще во II в. до н.э. Этим каталогом пользовался Клавдий Птолемей — автор геоцентрической системы мира. В начале XVIII в. английский астроном Эдмонд Галлей сравнил наблюдавшиеся в его время положения звезд с теми, которые были приведены у Птолемея. Для нескольких ярких звезд он обнаружил заметное перемещение относительно остальных. Так впервые было обнаружено, что звезды перемещаются по небу относительно более слабых, т.е. имеют *собственные движения*.

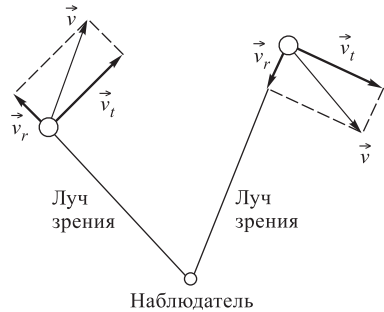


Рис. 29.1. Лучевая и тангенциальная скорости

Зависит ли собственное движение звезды от того, как направлен вектор ее скорости?

Чтобы измерить тангенциальную скорость какой-нибудь звезды, сравнивают изображения одного и того же участка неба, сделанные на одном и том же телескопе с промежутком времени в несколько лет или десятилетий. За этот промежуток времени близкие звезды слегка смещаются на фоне слабых, более далеких звезд, которые практически неподвижны для наблюдателя. Такое смещение очень мало и лишь у нескольких сравнительно близких звезд превышает одну угловую секунду в год. Это очень медленное перемещение: при скорости в одну угловую секунду в год звезде понадобится 1800 лет, чтобы сдвинуться на то расстояние, которое соответствует видимому размеру лунного диска. Однако современная техника измерений позволяет оценивать движения в сотни раз более медленные.

Зная расстояние до звезды, легко по угловому смещению найти ее тангенциальную скорость v_t . Пусть, например, звезда, расстояние D до которой 30 световых лет, или около $3 \cdot 10^{17}$ м, перемещается на угол $\alpha = 0,2''$ в год. Тогда ее смещение за

год равно отрезку длины $D \cdot \sin \alpha = 3 \cdot 10^{11}$ м. Заменяя $\sin \alpha$ значением угла α в радианах, получаем, что тангенциальная скорость составляет $3 \cdot 10^{11}$ м в год, или около 10 км/с.

Второй способ оценки скорости звезд основан на измерении смещения спектральных линий, вызванного эффектом Доплера (см. п. 14.2). Этот способ позволяет найти проекцию вектора скорости звезды на луч зрения, или *лучевую скорость* звезды v_r (см. рис. 29.1).

Полная скорость звезды вычисляется через тангенциальную v_t и лучевую v_r скорости по теореме Пифагора: $v = \sqrt{(v_t)^2 + (v_r)^2}$. Измерения показали, что скорости большинства звезд, сравнительно близких к Солнцу, не очень велики и редко превышают 30–40 км/с. Нужны многие сотни лет, чтобы перемещение даже ближайших звезд стало заметным на глаз. Значения собственных движений и лучевых скоростей некоторых ярких звезд приведены в табл. III

29.2. Вращение Галактики. Когда удалось измерить скорости движения большого числа звезд, наблюдаемых в различных участках неба — как близких к Солнцу, так и далеких от него, — выяснилась общая картина их движения. Оказалось, что **звезды галактического диска обращаются вокруг ядра Галактики в одну и ту же сторону по орбитам, близким к круговым.** Практически все звезды, видимые глазом на небе, — это звезды диска. Скорость их движения вокруг ядра в окрестности Солнца составляет около 220 км/с. Вместе с ними движется и Солнце. Разделив длину окружности, имеющей радиус, равный расстоянию до центра Галактики, на скорость движения звезды по окружности, легко найти, что **полный период обращения Солнца в Галактике составляет примерно 200 млн лет.**

Зная скорость обращения и радиус круговой орбиты, можно вычислить массу внутренней части Галактики, используя формулу для круговой скорости (10.5):

$$M = v^2 R / G. \quad (29.1)$$

Подставляя известные нам числовые значения $v = 2 \cdot 10^5$ м/с, $R = 2,5 \cdot 10^{20}$ м и $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², получаем, что $M = 1,5 \cdot 10^{41}$ кг, или около 75 млрд масс Солнца. Это грубая оценка полной массы той части Галактики, которая находится ближе к ее центру, чем Солнце.

Звезды и скопления звезд, относящиеся к сферической составляющей, движутся по-иному, не так, как звезды диска. Их орбиты сильно вытянуты и наклонены к плоскости диска

под всевозможными углами (рис. 29.2). Такие звезды имеют очень большие скорости (до 200–300 км/с) относительно Солнца. Но относительно центра Галактики средние скорости звезд, как сферической составляющей, так и диска приблизительно одинаковы.

Как мы видим, движение звезд в Галактике напоминает движение тел Солнечной системы. Действительно, звезды диска, как и планеты, движутся вокруг центра в одну сторону и примерно в одной плоскости, а звезды сферической составляющей, как и кометы, движутся по вытянутым орбитам в различных плоскостях. Среди ярких звезд неба лишь немногие принадлежат сферической составляющей. Примером таких звезд является Арктур.

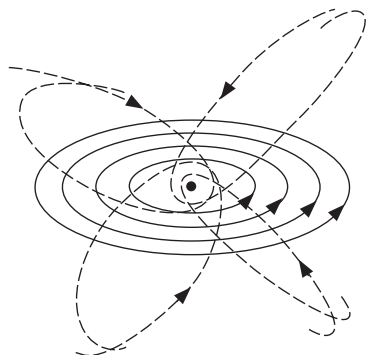


Рис. 29.2. Траектории звезд диска (сплошные линии) и сферической составляющей (штриховые линии)

29.3. Вопросы

1. Как было доказано, что звезды движутся?
2. У каких звезд (диска или сферической составляющей) наблюдается большая скорость движения относительно Солнца?
3. Как бы стало двигаться Солнце в Галактике, если бы удалось остановить его орбитальное движение вокруг галактического центра?
4. Как объяснить, почему средняя скорость, с которой движутся относительно Солнца сравнительно близкие к нему звезды (20 км/с), значительно меньше средней скорости обращения звезд вокруг центра Галактики (более 200 км/с)?
- 5*. Движения звезд в Галактике не подчиняются законам Кеплера, которые описывают движение планет в Солнечной системе. Попробуйте объяснить почему.

29.4. Упражнения

1. Звезда, расстояние до которой равно 10 пк, имеет тангенциальную скорость 20 км/с. За сколько лет она переместится по небу на угловой размер Луны ($0,5^\circ$)?

2. Найдите полную скорость звезды, лучевая скорость которой 10 км/с, а перемещение на фоне далеких звезд составляет 0,1'' в год. Расстояние до звезды 60 св. лет.
3. Сколько раз за свою жизнь Солнце успело обернуться вокруг центра Галактики?
4. На расстоянии 15 кпк от центра Галактики скорость обращения звезд по круговым орбитам вокруг центра примерно такая же, как и в окрестности Солнца. Используя выражение для круговой скорости, оцените примерное значение массы Галактики в пределах радиуса 15 кпк.
5. За какое время звезда, имеющая скорость 30 км/с, пройдет путь, равный среднему расстоянию между звездами в окрестности Солнца (около 1 парсека)?

§ 30. Межзвездная среда

30.1. Межзвездный газ. В состав нашей Галактики входят не только звезды. Наблюдения показали, что межзвездное пространство нельзя считать абсолютно пустым. На фотографиях неба, сделанных даже с помощью небольшого телескопа, вблизи Млечного Пути видны многочисленные светящиеся газовые облака и темные прожилки, связанные с межзвездной пылью.

Основная масса *межзвездной среды* приходится на *разреженный газ*. Этот газ обладает способностью слабо светиться, когда горячие звезды освещают его ультрафиолетовым светом. Кроме того, газ, если он нагрет, излучает потоки радиоволн, которые можно уловить радиотелескопами.

Межзвездный газ хорошо изучен. Он имеет примерно такой же химический состав, как и большинство наблюдаемых звезд, и состоит преимущественно из легких газов (водорода и гелия), т. е. из того же вещества, что и звезды. Это связано с тем, что звезды образуются в результате уплотнения облаков межзвездного газа.

Большая часть межзвездного газа сосредоточена в пределах диска Галактики, где межзвездная среда образует (вблизи плоскости симметрии диска) *газопылевой слой* толщиной в несколько сотен световых лет. В пределах этого слоя находится и наше Солнце с окружающими его звездами, а также основное количество наблюдаемых газовых облаков.

Газопылевой слой вместе со звездами диска принимает участие во вращении Галактики.

Даже вблизи плоскости звездного диска концентрация частиц газа очень мала. В межзвездном газе в среднем один атом газа приходится на два кубических сантиметра (сравните: у поверхности Земли в 1 см^3 содержится примерно $3 \cdot 10^{19}$ молекул воздуха). Однако межзвездный газ занимает такие большие объемы пространства, что его полная масса в Галактике достигает нескольких процентов от суммарной массы всех звезд.

Наблюдения в радио и оптическом диапазонах спектра показали, что газ в межзвездном пространстве в зависимости от плотности и температуры может находиться в одном из трех состояний: ионизованном, атомарном или молекулярном.

Ионизованный газ. Горячие звезды своим мощным ультрафиолетовым излучением нагревают и ионизуют окружающий их межзвездный газ. Такой газ излучает свет (за счет энергии, получаемой от звезд), и потому области, где он находится, наблюдаются как светящиеся облака. Они называются *светлыми газовыми туманностями*. Температура газа в них составляет около 10 000 К.

Самая заметная светлая газовая туманность расположена в созвездии Ориона и называется туманностью Ориона. Она была открыта еще в начале XVII в., на заре телескопических наблюдений. В сильный бинокль или небольшой телескоп туманность Ориона видна как бесформенное облачко со слабым зеленоватым свечением. Эта туманность образована горячим ионизованным газом, масса которого оценивается примерно в тысячу масс Солнца. Спектр светлых газовых туманностей — линейчатый, он состоит из отдельных линий излучения, принадлежащих различным химическим элементам (водороду, кислороду, натрию, сере и др.).

Атомарный газ. Основная масса межзвездного газа в диске Галактики удалена от горячих звезд и поэтому не ионизована и не излучает свет. Но такой “невидимый” газ все же можно наблюдать радиоастрономическими методами. Было доказано (вначале теоретически, а затем подтверждено наблюдениями), что атомы водорода в условиях очень низкой плотности межзвездного пространства обладают способностью излучать радиоволны с длиной волны 0,21 м (частота 1420 МГц).

Радиоизлучение нейтрального межзвездного водорода было обнаружено в 1951 г. Многочисленные измерения его интенсивности позволили установить общую массу газа в Галактике и его распределение в пространстве.

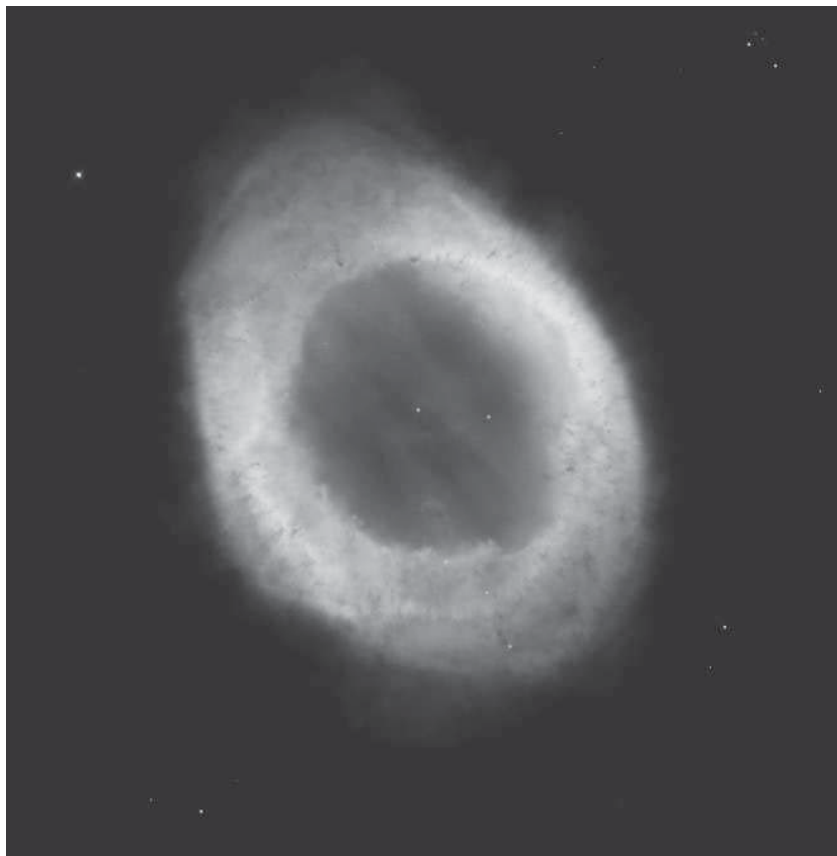


Рис. 30.1. Планетарная туманность в созвездии Лиры (космический телескоп “Хаббл”, НАСА)

Атомарный газ распределен в пространстве весьма неоднородно. Он образует различные по плотности, часто волокнистые по структуре, облака, между которыми газ более разрежен. Типичные размеры облаков достигают нескольких десятков световых лет, а средняя концентрация частиц в них — несколько атомов в 1 см^3 . Концентрация атомов между облаками в десятки раз меньше.

Молекулярный газ. Радионаблюдения обнаружили в межзвездном пространстве в тысячи раз более плотные облака, чем те, которые выявлены в радиолинии $0,21 \text{ м}$. Они состоят из очень холодного газа, температура которого не превыша-

ет 10–20 К. Как и всюду в межзвездной среде, преобладающим элементом является водород. Из-за низкой температуры и повышенной плотности атомы водорода и других элементов в этих облаках объединены в молекулы. Поэтому их называют *молекулярными*. Таким образом, в основном они состоят из молекул H_2 . Молекулы водорода, в отличие от атомов, не испускают радиоизлучения. Зато многие другие молекулы, входящие в состав облаков, излучают радиоволны на определенных частотах. По радиоизлучению в молекулярных облаках было найдено несколько десятков молекулярных соединений, например CO, CO_2 , OH, H_2O , NH_3 . Имеются и более сложные молекулы: формальдегида, этилового и метилового спиртов, простейшие органические соединения. Так, в инфракрасном диапазоне, на длинах волн в несколько мкм, обнаружены линии излучения сложных молекул полиароматических гидрокарбонатов.

Молекулы могут возникать и существовать только в наиболее плотных и непрозрачных для ультрафиолетового излучения газовых облаках. Иначе под действием коротковолнового излучения звезд они быстро распадутся.

Среди молекулярных облаков встречаются облака-гиганты, масса которых превышает 100 тысяч масс Солнца. Это самые массивные образования в диске Галактики.

Наблюдения показывают, что в массивных молекулярных облаках зарождаются звезды. Существует и обратный процесс — в межзвездную среду непрерывно поступает газ, “сбрасываемый” звездами. Мы уже знаем, что звезды, вспыхивающие как новые и сверхновые, теряют часть своей массы. К тому же и у обычных звезд, таких как Солнце, на определенном этапе эволюции (после превращения в красный гигант) происходит отделение газовой оболочки, которая, медленно расширяясь, “растворяется” в межзвездном пространстве. Такие расширяющиеся оболочки довольно ярко светятся и обнаружены у сотен звезд. Они называются *планетарными туманностями* (рис. 30.1). В центре планетарной туманности всегда наблюдается породившая ее звезда. Причина свечения этих объектов та же, что и у светлых газовых туманностей, — ионизирующее ультрафиолетовое излучение горячей звезды.

Почему молекулярный водород отсутствует в облаках ионизованного газа?

30.2. Межзвездная пыль. В середине XIX века известный русский астроном В. Я. Струве обосновал предположение о том, что межзвездное пространство не абсолютно прозрачно; свет

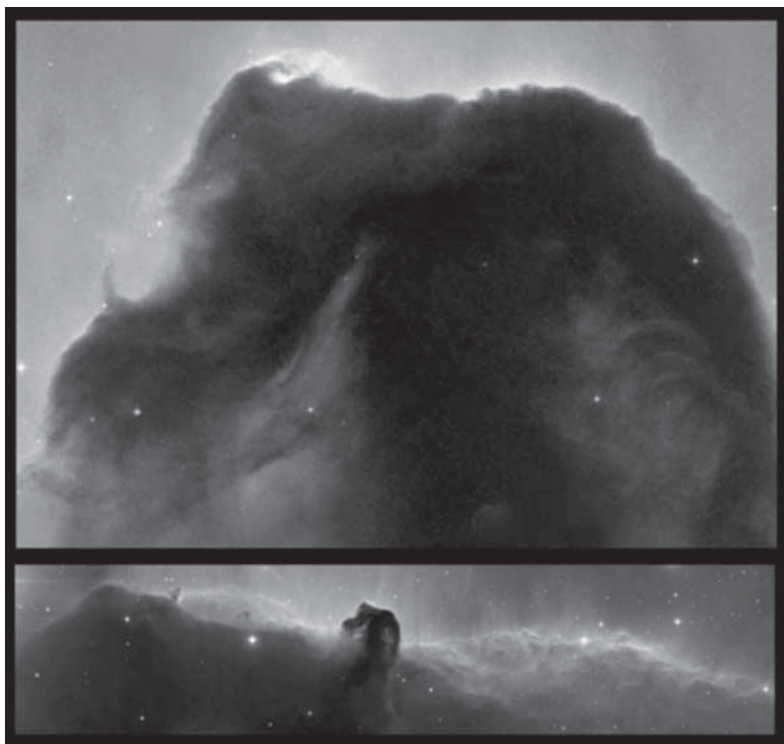


Рис. 30.2. Темная туманность “Конская голова” (космический телескоп “Хаббл”, НАСА)

в нем может поглощаться и рассеиваться, вследствие чего далекие звезды выглядят слабее, чем можно ожидать, если бы их свет не ослаблялся на пути к нам. Газ практически не поглощает видимого излучения. Поэтому помимо газа межзвездная среда должна содержать частицы пыли.

Окончательно существование поглощения света в межзвездной среде было доказано в 30-е годы XX века. В случае сравнительно близких звезд поглощение почти незаметно: чтобы световой поток был ослаблен межзвездной средой всего лишь на один процент, свету требуется пройти расстояние в несколько десятков световых лет. Но на расстояниях в тысячи световых лет межзвездная среда ослабляет проходящий через нее свет в несколько раз.

Межзвездная среда не только ослабляет свет далеких звезд, но еще и вызывает изменение его цвета. **Звезды, свет которых испытал сильное ослабление, кажутся нам более красными.**



Рис. 30.3. Туманность Ориона

Это происходит потому, что красные лучи меньше поглощаются и рассеиваются межзвездными пылинками, чем синие. Измеряя ослабление света звезд на различных длинах волн, можно судить о свойствах межзвездной пыли. Выяснилось, что межзвездные пылинки, вызывающие поглощение света, очень мелкие — размером в несколько десятых долей мкм, что сопоставимо с длиной волны видимого света (хотя есть и еще более мелкие пылинки). Они состоят в основном из углерода, кремния и “намерзших” на них молекул межзвездного газа.

В межзвездном пространстве пыль везде сопутствует газу. На ее долю приходится примерно 0,5–1% массы газа. Поэтому концентрация пыли всегда выше, а прозрачность среды ниже там, где больше газа и пыли. Это хорошо видно на примере молекулярных облаков — самых плотных газовых облаков в межзвездной среде. Из-за присутствующей в них пыли они практически непрозрачны и выглядят на небе как темные области, почти лишенные звезд. Редкие звездочки, просвечивающие сквозь менее плотные их части, кажутся сильно покрасневшими. Газопылевые образования, которые из-за низкой прозрачности выглядят как темные области, называются *темными туманностями*.

В ясную ночь, наблюдая Млечный Путь невооруженным глазом, можно заметить, что он имеет неровные очертания, а в созвездии Лебедя даже разделяется на два параллельно идущих рукава. Это наглядный результат проекции на Млечный Путь темных туманностей, большая часть которых находится вблизи плоскости Галактики.

Происхождение пыли не вполне еще ясно. Теоретические расчеты и наблюдения показали, что пылинки могут конденсироваться в разреженных атмосферах сравнительно холодных звезд, откуда давление излучения, как и потоки газа, выбрасываемого звездами, должны выталкивать их в межзвездное пространство. Еще в больших масштабах то же самое происходит при взрывах сверхновых.

30.3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле.

Помимо разреженного газа и пыли, в межзвездном пространстве с огромной скоростью, близкой к скорости света (300 000 км/с), по всем направлениям движется множество элементарных частиц и ядер различных атомов. В основном это протоны, альфа-частицы (ядра атома гелия) и электроны. Они называются *космическими лучами*.

Частицы космических лучей удастся регистрировать непосредственно при помощи специальных физических приборов — счетчиков быстрых частиц, устанавливаемых на космических аппаратах. Сквозь атмосферу Земли космические лучи сразу пробиться не могут. Сталкиваясь с молекулами и атомами земной атмосферы, они разбивают их, рождая целые ливни из элементарных частиц, которые могут регистрироваться на поверхности Земли. Лишь ничтожная доля “первичных” космических частиц избегает столкновений в атмосфере и достигает Земли высоко в горах. Поэтому в различных странах организованы специальные высокогорные станции по наблюдению и исследованию космических лучей.

Не все космические частицы приходят к нам из межзвездных глубин. Частицы с более низкой энергией имеют солнечное происхождение. Они рождаются, главным образом, во время солнечных вспышек (§ 26). Однако самые быстрые частицы, летящие практически со скоростью света и обладающие огромной энергией, приходят в Солнечную систему издалека, из межзвездного пространства Галактики. Их энергия достигает 10^{18} – 10^{20} электронвольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), хотя столь энергичные частицы регистрируются крайне редко.

Основными источниками космических лучей в Галактике считаются остатки сверхновых звезд и быстро вращающиеся и сильно намагниченные нейтронные звезды (см. п. 24.2).

Мы уже знаем, что остатки сверхновых звезд являются мощными источниками синхротронного радиоизлучения, которое возникает при движении быстрых электронов в магнитном поле. Наблюдения показали, что синхротронное излучение приходит к нам из тех областей межзвездного пространства, где остатков сверхновых звезд нет. Следовательно, и между звездами существует магнитное поле, заставляющее быстрые электроны космических лучей излучать радиоволны.

Измерения показали, что магнитная индукция межзвездного магнитного поля невелика: в среднем она в сто тысяч раз меньше, чем у поверхности Земли. Это поле охватывает весь межзвездный газ. Газ обладает вполне определенной электрической проводимостью, поэтому движение газа в магнитном поле рождает индукционные токи. Подобно тому, как магнитное поле влияет на движение проводника в лабораторных физических экспериментах, межзвездное магнитное поле сказывается на движении разреженного межзвездного газа. Это взаимодействие между полем и газом учитывается при исследовании характера движения межзвездной среды. Мы уже знаем, что аналогичная ситуация имеет место и в солнечной атмосфере, где солнечное магнитное поле влияет на движение газовых потоков (см. § 26).

30.4. Вопросы

1. Как различаются по температуре и концентрации частиц ионизованный, молекулярный и атомарный газы в межзвездном пространстве?
2. Из каких наблюдений можно сделать вывод о существовании межзвездной пыли?
3. Если в направлении на темную туманность наблюдается очень мало звезд, то откуда следует, что это вызвано поглощением света, а не действительным отсутствием звезд в этом направлении?
4. Частицы космических лучей в межзвездном пространстве движутся не прямолинейно, а по запутанным траекториям. Почему?

30.5. Упражнения

1. Какая масса газа в среднем содержится в межзвездном пространстве в объеме, равном объему земного шара (радиус Земли 6400 км)?

2. Какова масса молекулярного облака диаметром 2 световых года с концентрацией частиц 10^4 молекул в 1 см^3 ? (Считать, что все молекулы — это H_2 .)

§ 31. Образование звезд. Проблема возникновения жизни

31.1. Образование звезд и планетных систем. В § 27 говорилось, что наиболее массивные звезды живут сравнительно недолго — несколько миллионов лет. Если такие звезды наблюдаются, значит, образование звезд не завершилось миллиарды лет тому назад, а происходит и в настоящую эпоху.

Звезды, масса которых многократно превышает массу Солнца, большую часть своей сравнительно короткой жизни обладают огромными размерами, высокой светимостью и температурой. Из-за высокой температуры они имеют голубоватый цвет, и поэтому их называют *голубыми сверхгигантами*. Мы уже знаем, что такие звезды, нагревая окружающий межзвездный газ, заставляют его светиться, что приводит к образованию светлых газовых туманностей. Типичные значения скоростей движения сверхгигантов относительно окружающей их межзвездной среды составляют около 10 км/с , или около 10 парсеков за миллион лет. За свою короткую жизнь массивные звезды не успевают очень далеко уйти от тех мест, где они родились. Поэтому светлые газовые туманности и голубые сверхгиганты указывают нам на положение тех мест в Галактике, где образование звезд происходило недавно или даже происходит сейчас.

Оказалось, что молодые звезды распределены в пространстве неслучайным образом. Существуют обширные области, где они полностью отсутствуют, и районы, где их сравнительно много. Больше всего голубых сверхгигантов наблюдается в области Млечного Пути, т.е. вблизи плоскости Галактики, там, где концентрируется газопылевая межзвездная среда.

Но и вблизи плоскости Галактики молодые звезды распределены неравномерно. Они почти никогда не встречаются поодиночке. Чаще всего эти звезды образуют рассеянные скопления и более разреженные звездные группировки больших размеров, названные *звездными ассоциациями*, которые насчитывают десятки, а иногда и сотни голубых сверхгигантов. Самые молодые из звездных скоплений и ассоциаций имеют возраст менее 10 млн лет. Почти во всех случаях эти молодые образования

наблюдаются в областях повышенной плотности межзвездного газа, где концентрируются молекулярные облака. Это указывает на то, что процесс звездообразования связан с уплотнением межзвездной среды.

Примером обширной области звездообразования является гигантский газовый комплекс в созвездии Ориона. Он занимает на небе практически всю площадь этого созвездия и включает в себя большую массу нейтрального и молекулярного газа, пыли и целый ряд светлых газовых туманностей. Образование звезд в нем продолжается и в настоящее время. Туманность Ориона — лишь небольшая, но наиболее яркая часть этого комплекса.

Считается установленным, что звезды возникают путем сжатия газа в холодных и плотных молекулярных облаках под действием сил гравитации. Это сложный процесс, и пока еще не создано завершенной физической теории образования звезд, которая смогла бы описывать все его этапы. Ученые интенсивно работают над этой проблемой. Познакомимся с основными принципами, на которых базируются представления о формировании звезд из газопылевой среды.

Конденсация газа в звезды в определенном смысле напоминает другой физический процесс: конденсацию водяного пара в капельки воды при его охлаждении. И в том и в другом случае происходит многократное увеличение плотности вещества, его переход в качественно новое состояние. Но если конденсация пара совершается в результате взаимодействия молекул, то межзвездный газ сжимается, прежде всего благодаря действию сил гравитации. Поэтому конденсация газа в звезды называется *гравитационной конденсацией*.

Сила гравитационного притяжения между отдельными частицами (атомами, молекулами) всегда стремится сжать газ. Сжатию обычно препятствует сила внутреннего давления газа, связанного с хаотическими тепловыми движениями его частиц. Чем меньше температура газа, тем меньше его давление и тем большую роль может играть притяжение отдельных частиц друг к другу. В обычных облаках межзвездного газа силы гравитации очень малы по сравнению с силами внутреннего давления. Но в холодных плотных молекулярных облаках гравитация оказывается сильнее, и, как показывают расчеты, отдельные наиболее плотные сгустки газовой среды должны сжиматься, увеличивая свою плотность. Конечным результатом такого сжатия и является образование звезд. В молекулярном облаке возникают холодные и плотные области — “ядра”, в которых со временем

образуются звезды и звездные скопления. Рождающаяся звезда сначала представляет собой громадный медленно сжимающийся газовый шар — протозвезду, который разогревается вследствие перехода части потенциальной энергии в тепловую. Сжатие газа полностью прекратится только тогда, когда в центре протозвезды температура и давление станут настолько высокими, что начнутся термоядерные реакции. В результате образуется звезда.

Первое время свет молодой звезды будет очень сильно поглощаться окружающей ее плотной газопылевой оболочкой, нагревая ее. Такие звезды могут наблюдаться как *инфракрасные источники*; они действительно были обнаружены в областях звездообразования. Когда окружающая оболочка рассеивается или сжимается в диск, звезда становится ярким источником света и считается окончательно сформировавшейся. В газопылевых дисках, если они возникли вокруг формирующихся звезд, могут со временем образоваться более мелкие тела — планеты, которые будут обращаться вокруг центральной звезды. Газопылевые диски действительно были обнаружены у многих молодых звезд.

Планеты (сравнимые по массе с Юпитером или более массивные) были найдены у многих звезд типа нашего Солнца — главным образом по периодическому изменению наблюдаемой лучевой скорости звезды, вокруг которой они обращаются. Эти изменения, как правило, не превышают нескольких десятков м/с и измерить их оказалось непростой задачей, доступной только современной технике наблюдений. Из-за большого расстояния пока мы не можем непосредственно наблюдать планеты типа Земли даже у ближайших звезд. Неожиданным оказалось то, что если в солнечной системе планеты-гиганты расположены далеко от Солнца, то в других планетных системах они почти всегда наблюдаются вблизи звезды. Так что наша планетная система, по-видимому, не совсем типична.

Планеты и малые тела Солнечной системы сформировались в газопылевом *протопланетном диске*, окружавшем молодое Солнце (см. § 16). Вместе с другими планетами возникла и Земля. Первоначально ее атмосфера и физические условия на поверхности были совсем не такими, как сейчас. Температура была значительно выше, а атмосфера содержала очень много углекислого газа. Значительно чаще, чем в наше время, Земля испытывала удары падающих на нее малых тел солнечной системы. Никакой жизни на Земле в то время не могло существо-

вать. Только по истечении нескольких миллиардов лет атмосфера по составу и плотности стала похожей на современную.

Почему звезды не могут возникнуть из газа, образующего туманность Ориона или аналогичные ей туманности, а рождаются в молекулярных облаках?

31.2. Проблема жизни во Вселенной. Физические условия на древней Земле оказались такими, что смогли возникнуть сложные белковые молекулы, а затем и простейшие самовоспроизводящиеся организмы — живые клетки. В течение дальнейшего существования Земли формы жизни на нашей планете постепенно усложнялись — от одноклеточных до современного животного мира. За несколько миллиардов лет видоизменения организмов эволюция привела к появлению млекопитающих и человека.

До сих пор остается неизвестным, как часто подобные события могут происходить во Вселенной. В Солнечной системе признаки существующей жизни в настоящее время или в прошлом не были найдены ни на одном из тел помимо Земли, хотя поиски таких признаков еще не завершены.

С астрономической точки зрения ни Земля как планета, ни Солнце как звезда не представляют ничего исключительного. Следовательно, **можно предположить, что жизнь существует не только на Земле.** Очаги жизни могут возникнуть на планетных системах других звезд, но насколько редки эти события — неизвестно.

Проблема возникновения жизни и ее распространенности во Вселенной остается одной из наиболее сложных и важных проблем, решаемых астрономией совместно с другими естественными науками. Было бы особенно важным для всего человечества обнаружить присутствие разумной жизни во Вселенной, следы высокоразвитых внеземных цивилизаций. Неоднократно предпринимались и предпринимаются попытки уловить из космоса радио- или иные сигналы разумного происхождения. Есть надежда, что они когда-нибудь завершатся успехом.

31.3. Вопросы

1. Опишите предполагаемую последовательность событий, которые привели к образованию Земли и возникновению на ней жизни.
2. Какие силы играют основную роль при формировании звезд и планет?

Основные выводы

Звезды распределены в пространстве не равномерно. Наблюдается много скоплений из сотен, тысяч и более звезд, которые удерживаются вместе благодаря силам взаимного притяжения. Среди скоплений встречаются как очень старые, возрастом более 10 млрд лет, так и сравнительно недавно возникшие.

Совокупность наблюдаемых вокруг нас звезд образует гигантский звездный “остров” — Галактику, размеры которой превышают сотни тысяч световых лет. Подчиняясь закону всемирного тяготения, звезды, и в том числе Солнце, движутся вокруг центра Галактики со скоростями в сотни километров в секунду. Солнце вместе с планетами совершает полный оборот в Галактике примерно за 200 млн лет. Помимо звезд, в состав Галактики входит разреженная межзвездная среда — газ, пыль и космические лучи, движущиеся в слабом магнитном поле.

Вещество в межзвездном пространстве может находиться в различных состояниях: твердом, атомарном, молекулярном и ионизованном (плазменном). Каждое из них исследуется с использованием различных методов наблюдений. Между звездами и газом постоянно происходит обмен веществом. Звезды образуются из газа и сами в процессе эволюции возвращают часть своей массы в межзвездную среду. Вместе со звездами могут возникать и планетные системы. При определенных условиях на некоторых из них должна зарождаться жизнь. Однако вне Земли обнаружить ее пока не удалось.

ЗА ПРЕДЕЛАМИ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

§ 32. Галактики

32.1. Открытие галактик. Давно, еще в XVIII в., высказывалось предположение, что наша Галактика — это еще не вся Вселенная, что помимо нее должно существовать много других крупных звездных систем. Их следует искать среди слабосветящихся пятен — туманностей, которые были обнаружены при телескопических наблюдениях в самых различных областях неба. Правда, с появлением спектрального анализа выяснилось, что некоторые туманности имеют линейчатый спектр излучения. Мы уже знаем, что это области ионизованного межзвездного газа. Но есть и такие, у которых спектр оказался похож на спектр звезд. Это действительно далекие звездные системы. В некоторых из них отчетливо наблюдается спиральная структура. Самым заметным из подобных объектов на северном небе является туманность Андромеды. Темной ясной ночью ее можно найти в созвездии Андромеды с помощью бинокля и даже невооруженным глазом (см. рис. 25.2).

Чтобы узнать, находятся ли эти “звездные острова” в нашей Галактике или являются самостоятельными, надо было определить расстояние хотя бы до нескольких из них. Это удалось сделать лишь в 20-х годах XX в., когда американский астроном Э. Хаббл, используя самый большой в то время рефлектор с зеркальным объективом диаметром 2,5 м, смог выделить изображения наиболее ярких звезд на фотографиях туманности Андромеды и нескольких других галактик и обнаружил среди них переменные звезды — цефеиды. К тому времени был уже известен способ определения расстояний до цефеид (см. п. 25.1), а следовательно, и до той звездной системы, в которой они наблюдаются. Расстояние до туманности Андромеды и других подобных ей объектов оказалось настолько большим, что сразу стало ясно: они не принадлежат нашей Галактике.

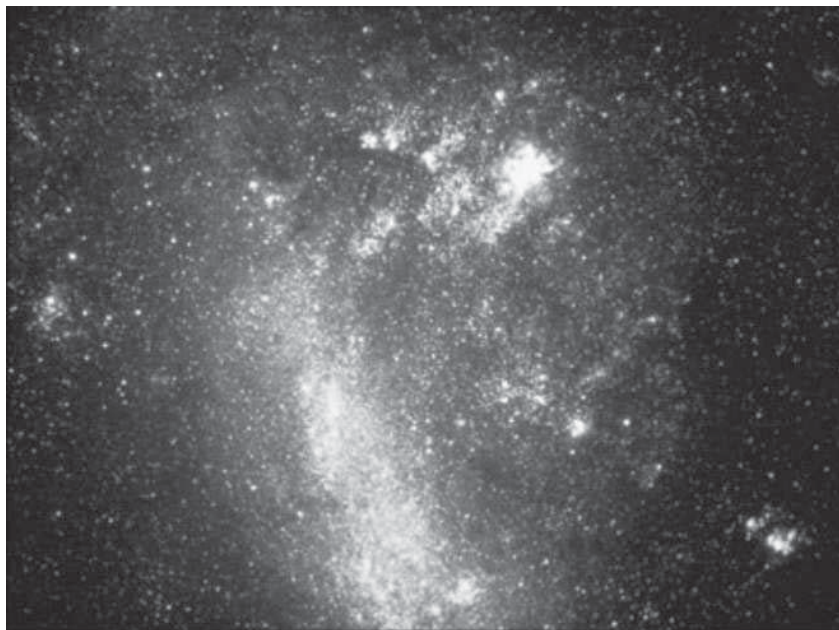


Рис. 32.1. Большое Магелланово Облако

По своей природе эти системы аналогичны Галактике, поэтому их стали называть *галактиками* (с маленькой буквы).

Большинство галактик — очень слабые объекты. Всего три галактики заметны невооруженным глазом. Это Большое (рис. 32.1) и Малое Магеллановы Облака (в южном полушарии неба) и туманность Андромеды, находящаяся более чем вдесятеро дальше. В небольшой телескоп с объективом диаметром 10–15 см на темном безлунном небе можно увидеть несколько десятков галактик, причем большинство из них будут едва заметны. При помощи крупных телескопов доступны наблюдениям сотни миллионов отдельных галактик, вплоть до самых слабых 26–29-й видимой звездной величины. Но даже на лучших фотографиях большинство из них выглядит как маленькие пятнышки, во многих случаях с трудом отличимые от изображений звезд. Такими слабыми галактиками буквально усеяно все небо, они наблюдаются в любом направлении. Лишь на фоне Млечного Пути и вблизи него практически не видно далеких галактик из-за поглощения света в межзвездном пространстве нашей Галактики. Пространство же между галактиками, в отличие от межзвездной среды, оказалось совершенно прозрачным. Именно

поэтому наблюдениям доступно так много далеких галактик. Вдали от полосы Млечного Пути с помощью наиболее крупных инструментов на каждом квадратном градусе неба можно насчитать десятки тысяч отдельных очень слабых галактик.

32.2. Расстояния до галактик. Несмотря на то что крупные телескопы позволяют получать изображения сотен миллионов отдаленных галактик, почти все, что мы знаем об их природе, составе и физических характеристиках, основано на более подробном изучении нескольких десятков тысяч самых ярких из них.

Ближайшие к нам галактики — это Магеллановы Облака. В южном полушарии они видны невооруженным глазом как два облачка, словно “оторвавшиеся” от Млечного Пути. Свое название Магеллановы Облака получили в связи с тем, что в Европе о них узнали от участников кругосветного путешествия Магеллана. На фотографиях Магеллановых Облаков видно очень много отдельных звезд и звездных скоплений, принадлежащих этим галактикам.

Наблюдения цефеид в Магеллановых Облаках показали, что расстояния до них составляют около 150 000 световых лет. С такого расстояния звезды, подобные Солнцу, можно наблюдать лишь на пределе возможностей современных телескопов. Зато горячие голубые сверхгиганты, которых очень много в этих галактиках, видны прекрасно.

Туманность Андромеды значительно дальше от нас, чем Магеллановы Облака. Расстояние до нее — около 2,3 млн световых лет. Но и с такого расстояния с помощью больших телескопов можно наблюдать много звезд высокой светимости, в том числе звезды-сверхгиганты, красные гиганты и цефеиды.

Расстояние до более далеких галактик, где цефеиды уже невозможно увидеть, определяется по другим объектам, например по самым ярким звездам, наблюдаемым в галактике (по голубым сверхгигантам или красным гигантам, если сверхгиганты отсутствуют), по яркости новых или сверхновых звезд во время вспышки или по наблюдениям шаровых звездных скоплений. Чем дальше галактика, тем слабее кажутся эти объекты. Это и позволяет сделать приблизительную оценку расстояния до нее. До еще более далеких галактик, в которых отдельные объекты плохо различимы или вообще не видны (а таких галактик большинство), расстояние определяется *методом красного смещения*, предложенного американским астрономом Э. Хабблом. Он обнаружил, что **в спектрах далеких галактик линии всех**

элементов смещены относительно их нормального положения в красную сторону, и установил, определив расстояние до галактик по ярчайшим звездам, что относительное увеличение длин волн спектральных линий пропорционально расстоянию до галактики D . Эта зависимость получила название *закона Хаббла*. Позднее выяснилось, что красное смещение связано с эффектом Доплера (далекие галактики удаляются от нас). Причина этого явления связана с расширением Вселенной и будет подробнее рассматриваться в гл. 9.

Зависимость между красным смещением и расстоянием до далеких галактик, полученная по данным современных наблюдений, показана на рис. 32.2.

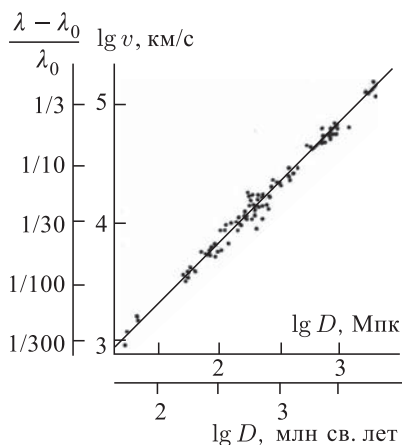


Рис. 32.2. Зависимость красного смещения от расстояния до отдельных галактик (масштаб логарифмический)

как линейную зависимость между скоростью v_r и расстоянием D до галактики:

$$v_r = H \cdot D. \quad (32.1)$$

Коэффициент пропорциональности H , называемый постоянной Хаббла, показывает, на сколько километров в секунду возрастает скорость наблюдаемых галактик с увеличением расстояния до них на 1 Мпк. Определение величины H оказалось исключительно трудной задачей. По современным данным H составляет (с точностью до нескольких процентов) около $75 \text{ км} / (\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Тогда удаление галактики со скоростью

Красное смещение обычно измеряется величиной относительного изменения длины волны спектральных линий $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$. Мы знаем (см. п. 14.2), что лучевая скорость v_r , с которой источник света удаляется от нас, равна скорости света, умноженной на это отношение: $v_r = c(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$. (Заметим, что при очень высоких скоростях, приближающихся к скорости света, зависимость между скоростью и изменением длин волн спектральных линий становится более сложной.) Так как по закону Хаббла расстояние D пропорционально $(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, то этот закон можно записать

15 000 км/с соответствует расстоянию до нее $D = v/H = 200$ Мпк, или около 600 млн световых лет.

Закон Хаббла выполняется только в среднем, и только для далеких галактик, расстояние до которых превышает 5–10 Мпк. Ближайшие к нам галактики ему не подчиняются. Некоторые из них (в том числе туманность Андромеды) даже приближаются к нам, т.е. имеют не красное, а фиолетовое смещение линий в спектре. Причина этого в том, что туманность Андромеды и наша Галактика связаны друг с другом силами гравитации. Поэтому они не принимают участия в расширении Вселенной. По той же причине не расширяются отдельные галактики, где звезды притягивают друг друга.

В настоящее время красные смещения измерены у десятков тысяч галактик. Самые далекие из них расположены на таком большом расстоянии от нас, что длины волн линий в их спектрах увеличены в 5–7 раз. Свету потребовалось не менее 10 млрд лет, чтобы его преодолеть. Число известных галактик с таким красным смещением невелико, но не потому что их мало в природе, а потому что поиски и получение спектров таких объектов — это очень трудная задача даже для современной техники наблюдений. Они настолько слабы, что ни в один телескоп их невозможно увидеть глазом. Их излучение регистрируется фотоэлектрическими приемниками.

32.3. Типовая задача. Определение расстояния до галактики и ее размера.

Условие. Найти расстояние до галактики и ее линейный размер, если известно, что длины волн всех спектральных линий в ее спектре увеличены из-за эффекта Доплера на 10 %. Угловой размер галактики составляет 1'.

Решение. По закону Хаббла

$$D = v_r/H = c \cdot \Delta\lambda/H \cdot \lambda_0.$$

Подставляя в полученную формулу значения величин

$c = 3 \cdot 10^5$ км/с, $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0,1$ и $H = 75$ км/(с·Мпк), получим

$$D = (3 \cdot 10^5 \text{ км/с}) \cdot 0,1 / (75 \text{ км/(с·Мпк)}) = 400 \text{ Мпк.}$$

Линейный размер

$$d = D \sin(1') = 400 \text{ Мпк} / 3438 = 0,116 \text{ Мпк} = 116 \text{ кпк.}$$

32.4. Типы галактик. Большинство наблюдаемых галактик можно отнести по внешнему виду к одному из трех типов.

Первый тип — эллиптические галактики. Они напоминают шаровые звездные скопления, только имеют несравненно большие размеры и, как правило, более сплюснуты. Примером эллиптической галактики гигантского размера может служить галактика в созвездии Девы. Расстояние до нее — около 40 млн световых лет. Эта галактика — одна из самых массивных среди нам известных. По массе и числу звезд она в несколько десятков раз больше, чем наша Галактика. Но такие гигантские галактики встречаются очень редко. Гораздо чаще наблюдаются небольшие эллиптические галактики, такие как спутники туманности Андромеды, которые хорошо видны на фотографии этой галактики, или еще более мелкие, называемые *карликовыми эллиптическими* галактиками.

Второй тип — спиральные галактики (рис. 32.3). Как говорит само название, в этих галактиках наблюдаются спиральные ветви. К ним относится ближайшая к нам спиральная галактика — туманность Андромеды. **Наша Галактика тоже спиральная**, хотя, находясь внутри нее, непосредственно ее спиральных ветвей мы не видим. Однако об их существовании стало известно из радионаблюдений межзвездного газа в галактическом диске, благодаря тому что его плотность в спиральных ветвях максимальна.

Третий тип — неправильные галактики. Они получили свое название из-за своей неправильной, несимметричной формы. Спиральных ветвей у них нет, зато, как правило, наблюдается много межзвездного газа и областей ионизованного водорода. К числу галактик этого типа относится Большое Магелланово Облако (см. рис. 32.1).

32.5. Состав и структура галактик. Галактики — это самые крупные звездные системы в природе. Звезды в них притягивают друг друга, поэтому каждая галактика может существовать как изолированный звездный остров. Если бы звезды в любой галактике хоть на мгновение остановились, то из-за взаимного притяжения они начали бы падать по направлению к центру масс системы. Но этого не происходит, потому что звезды внутри галактики непрерывно движутся со скоростями в десятки или сотни км/с.

Наблюдаемые галактики различаются по составу и структуре. Большинство спиральных галактик похоже на нашу Галактику. Звезды в них также образуют массивный диск и сферическую составляющую, концентрирующуюся к центру. Эти две звездные составляющие особенно хорошо видны, когда мы наблюдаем

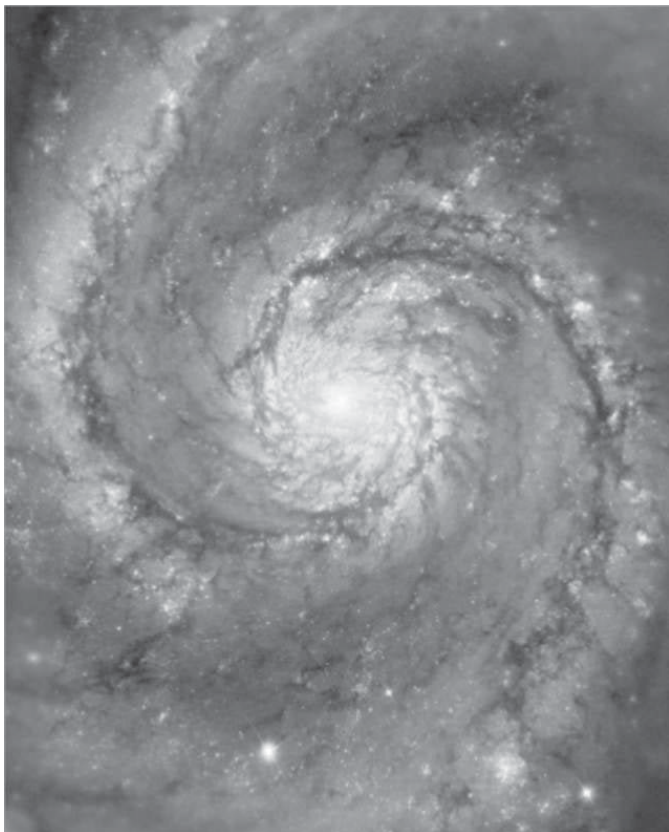


Рис. 32.3. Спиральная галактика в созвездии Гончих Псов (телескоп “Хаббл”, НАСА)

диск галактики с “ребра”. Примером может служить галактика Сомбреро, находящаяся в созвездии Девы (см. фото на вклейке).

Спиральные ветви — это структурные детали во вращающихся дисках галактик. Они выделяются на фоне диска обычно из-за того, что в них много молодых, недавно возникших ярких звезд. Как и в нашей Галактике, звезды в других галактиках образуются преимущественно в спиральных ветвях. Здесь же концентрируются и облака межзвездного газа.

В эллиптических галактиках нет массивных звездных дисков, (в некоторых случаях небольшие диски обнаружены, но они очень слабы, и их нелегко выявить). Потому у этих галактик нет и спиральных ветвей. Эллиптические галактики как бы состоят из одной сферической составляющей.

В неправильных галактиках, напротив, сферическая составляющая почти незаметна. Большинство звезд находится в звездном диске, только спиральных ветвей в нем нет. В этих галактиках газ и молодые звезды не образуют упорядоченной структуры — самые яркие области звездообразования могут быть как в центре галактики, так и на краю диска.

Диски всех галактик вращаются. Измерив скорости их вращения с помощью эффекта Доплера, вычисляют массы галактик примерно так же, как это было сделано для нашей Галактики (см. п. 29.2). Большинство наблюдаемых галактик имеет массу в десятки и сотни миллиардов масс Солнца.

Во многих галактиках скорость вращения диска на большом расстоянии от центра оказалась существенно более высокой, чем можно было бы ожидать, если считать, что вся масса галактики сосредоточена только в звездах и газе. Так родилась идея о “темной” массе, преобладающей на периферии галактик. Частично эта невидимая масса связана со слабыми и трудно учитываемыми звездами малых масс, но их все же слишком мало для объяснения “темной” массы. Основной вклад в массу галактики принадлежит веществу, природа которого остается неизвестной. Предполагается, что эта несветящаяся масса представляет собой сплошную среду, состоящую не из атомов, а из еще не открытых в физических лабораториях элементарных частиц, слабо взаимодействующих с обычным веществом. Такая темная материя может влиять на движение газа и звезд только посредством создаваемого ею гравитационного поля. Масса темной материи в галактике может в несколько раз превышать суммарную массу обычных звезд.

Помимо звезд, в галактиках присутствует межзвездная среда — газ и пыль, хотя полная масса этой разреженной среды, как правило, во много раз меньше, чем масса звезд. Межзвездная пыль лучше всего заметна в галактиках, диск которых виден нам с “ребра”. Пыль, находящаяся в плоскости диска, поглощает свет звезд. Из-за этого галактика кажется пересеченной по середине темной полосой. Но основная масса межзвездной среды всегда приходится не на пыль, а на газ.

Газ в других галактиках исследуется теми же методами, что и в нашей Галактике. Нейтральный водород наблюдается по его излучению на волне 0,21 м (или несколько большей, если спектр галактики обладает заметным красным смещением, так как оно увеличивает длины волн любого излучения, в том числе и радиоволн). Если в галактике есть ионизованный газ, нагретый горячими звездами, то в ее спектре присутствуют линии

излучения этого газа. Самые крупные области ионизованного газа видны на фотографиях ближайших галактик как светлые клочковатые облака.

Межзвездный газ в галактиках обычно составляет несколько процентов от общей массы звезд. Больше всего газа встречается в неправильных галактиках (иногда до 50 % по массе), меньше всего — в эллиптических галактиках, где в большинстве случаев заметных следов газа или пыли вообще нет.

Как и в нашей Галактике, из холодного газа в других галактиках рождаются звезды. Среди молодых звезд большой светимости всегда присутствуют голубые сверхгиганты. Поэтому галактики, в которых интенсивно возникают звезды, отличаются голубым цветом, а галактики, где звездообразование отсутствует (прежде всего, эллиптические) имеют красноватый цвет.

Наблюдения подтвердили, что существует связь между массой межзвездного газа и количеством молодых звезд в галактиках: **там, где газа очень мало (прежде всего, в эллиптических галактиках), молодых звезд почти или совсем нет.** Это не удивительно, поскольку звезды образуются из межзвездной среды.

32.6. Вопросы

1. Чем галактики отличаются от звездных скоплений?
2. Перечислите ближайшие к нам галактики, которые можно наблюдать невооруженным глазом. К каким типам они принадлежат? К какому типу относится наша Галактика?
3. С помощью эффекта Доплера измерили лучевую скорость туманности Андромеды. Оказалось, что она приближается к нам. Означает ли это, что обязательно произойдет столкновение?
4. Мы видим туманность Андромеды, какой она была около 2 млн лет назад. Какие изменения в принципе мы могли бы в ней заметить, если бы сумели увидеть, какой она является сейчас?
5. Почему галактики, наблюдаемые вблизи Млечного Пути, имеют в среднем более красный цвет, чем вдали от него?
6. Почему спиральные ветви обычно отличаются от остальных областей галактик более голубым цветом?

32.7. Упражнения

1. Галактика удаляется со скоростью 10 000 км/с и имеет размер $1'$. Сколько времени потребуется лучу света, чтобы пересечь ее по диаметру?

2. На какой длине волны приходит к нам излучение атомов межзвездного водорода от галактики, удаленной на расстояние 1300 Мпк? Постоянную Хаббла считать равной $75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Длина волны излучения неподвижного источника 0,21 м.
3. Из-за красного смещения длины волн спектральных линий галактики увеличены в 1,2 раза. Каково расстояние до галактики в пк и световых годах?
4. Чему приблизительно равна масса галактики, если наиболее далекие от ее центра звезды движутся в ее диске со скоростью 200 км/с вокруг центра? Радиус диска 20 000 световых лет.

§ 33. Необычные галактики

33.1. Взаимодействующие галактики. Галактики, как и звезды, далеко не всегда бывают одиночными. Они часто образуют системы различного масштаба: пары, группы или обширные скопления, содержащие до нескольких тысяч отдельных галактик (рис. 33.1). Например, наша Галактика вместе с Магеллановыми Облаками, туманностью Андромеды и несколькими десятками более мелких галактик образует небольшое скопление — так называемую *Местную группу*.

Большие расстояния до галактик не дают возможности наблюдать их перемещения друг относительно друга. Однако эффект Доплера позволяет измерить скорости приближения или

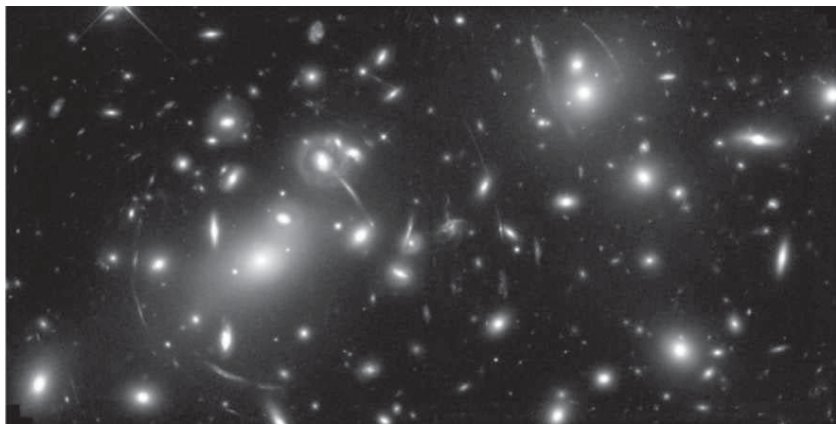


Рис. 33.1. Далекое скопление галактик (космический телескоп “Хаббл”, НАСА)

удаления от нас отдельных галактик и оценить среднюю скорость относительно центра масс той системы, которую они образуют. Скорости движения галактик в системах составляют, как правило, сотни километров в секунду. В отличие от звезд, которые практически никогда, даже в самых плотных скоплениях, не сталкиваются друг с другом, многие галактики, входящие в состав систем, из-за своих больших размеров время от времени неизбежно “задевают” друг друга и даже проходят друг сквозь друга. Звезды в галактиках располагаются достаточно редко, поэтому эти события не вызывают столкновений звезд. Однако близкие прохождения и столкновения галактик сопровождаются другими явлениями, происходящими из-за мощных приливных взаимодействий между ними. Напомним, что силы, вызывающие приливы и деформирующие объект, возникают тогда, когда он находится в неоднородном гравитационном поле, так что его разные области стремятся двигаться с различным ускорением.

В результате приливных взаимодействий между галактиками происходят искажения их форм, иногда очень сильные, потери части звезд и межзвездного газа, а часто и усиление звездообразования. В некоторых случаях соседние галактики бывают окутаны общей оболочкой из покинувших их звезд. Иногда между близкими галактиками возникают перемычки из звезд или газа и наблюдаются длинные “хвосты”, уходящие от них далеко в межгалактическое пространство. Близкие галактики с заметным искажением их форм получили название *взаимодействующих* (рис. 33.2).



Рис. 33.2. Взаимодействующие галактики “Мышки” (космический телескоп “Хаббл”, НАСА)

Основная причина, приводящая к необычным формам взаимодействующих галактик, связана с их гравитационным воздействием друг на друга. При сближении галактик возникают явления, аналогичные земным приливам, но только более мощные. Под действием гравитационного поля соседней галактики меняется форма объекта. Приливные искажения взаимодействующих галактик могут быть очень сильными и даже привести к частичному их разрушению или слиянию двух или нескольких галактик в одну систему. Небольшие спутники, попадая внутрь галактики-гиганта, могут полностью разрушиться и раствориться в ней.

Наша Галактика вместе с ее ближайшими спутниками — Магеллановыми Облаками — также образует взаимодействующую систему. Радионаблюдения на длине волны излучения нейтрального водорода 0,21 м обнаружили, что от Магеллановых Облаков в сторону нашей Галактики движется поток газа, полная масса которого составляет не менее 100 млн масс Солнца. На небе этот поток образует длинную неровную полосу, протянувшуюся более чем на 90° из южного небесного полушария в северное. Он получил название *Магелланова Потока*. Ни в какие оптические телескопы его не видно. Этот пример показывает, что взаимодействие между галактиками затрагивает не только звезды, но и большие массы межзвездной среды.

33.2. Галактики с активными ядрами. Напомним, что ядром называется центральная, наиболее яркая и плотная часть галактики. Как и ядро нашей Галактики, ядра других галактик состоят в основном из звезд. Присутствует в них и обычная для галактик межзвездная среда. Казалось бы, ничего неожиданного в них встретиться не может. Однако в середине прошлого века астрономы столкнулись с необычными явлениями в ядрах некоторых массивных галактик, которые нельзя было объяснить известными процессами в звездах или межзвездном газе. В самом центре многих галактик (как спиральных, так и эллиптических), в крошечных по размеру областях, в сотни тысяч раз меньших, чем сама галактика, наблюдается выделение колоссального количества энергии, слишком большой, чтобы ее можно было объяснить излучением или взрывами обычных звезд. Такие галактики получили название галактик с *активными ядрами*.

Активные ядра галактик проявляют себя неодинаково, их энергия может выделяться в самых различных формах. Перечислим основные признаки активности, с которыми встретились наблюдатели.

1. В центре галактики может наблюдаться источник исчезающе малого углового размера, который часто даже невозможно непосредственно измерить, обладающий очень мощным излучением в различных диапазонах спектра (видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом, а иногда — в радио- и рентгеновском диапазонах). Его светимость может составлять заметную долю от светимости галактики в целом. Собственно, этот источник и называют активным ядром галактики. Его спектр сильно отличается от спектра звездных систем, что говорит о совершенно иной природе его излучения. Во многих галактиках мощность излучения активного ядра непостоянна, оно может заметно изменять свою видимую яркость за месяцы или недели, а небольшие колебания яркости регистрируются даже за доли суток.

2. В центре галактики иногда присутствует газ, излучающий яркие и необычно широкие спектральные линии, по которым можно определить, что он очень быстро движется в разных направлениях — со скоростями в несколько тысяч километров в секунду, т.е. в десятки раз быстрее, чем отдельные звезды.

3. Из ядра может происходить выброс мощных потоков космических лучей, чаще всего в двух противоположных направлениях. Удаляясь от ядра галактики, электроны космических лучей порождают мощное синхротронное излучение. Вблизи таких галактик образуются радиоисточники колоссальных размеров, часто во много раз больше самой галактики. Как правило, они располагаются симметрично по обе стороны от нее. В подобных случаях галактики называют *радиогалактиками*.

Почти во всех случаях радиогалактики — это гигантские эллиптические галактики. Примером может служить уже упоминавшаяся эллиптическая галактика в созвездии Девы, с которой связан радиоисточник Дева А (ярчайший радиоисточник в созвездии Девы). Мощность ее излучения составляет около 10^{35} Вт. Это в сто тысяч раз больше, чем у обычных галактик, таких как наша. Ближайшей к нам радиогалактикой является галактика Центавр А.

Галактики с высокой активностью ядер составляют несколько процентов от числа всех наблюдаемых галактик. Среди наиболее близких к нам галактик их нет. Наша Галактика также не относится к их числу. Однако слабо выраженную активность ядра можно найти в большинстве обычных галактик, в том числе и в нашей Галактике.

33.3. Квazarы. В 1960-х годах были обнаружены необычные объекты, по своим наблюдаемым свойствам родственные

активным ядрам галактик. Об их существовании ранее никто не подозревал. Это так называемые *квазизвездные объекты*, т.е. объекты, похожие на звезды. Часто их также называют *квазарами*. Слово “квазар” образовано от слов “квазизвездные радиоисточники”. Такое название связано с тем, что квазизвездные объекты впервые были обнаружены по их радиоизлучению (хотя впоследствии оказалось, что большинство из них не являются сильными радиоисточниками). На photographиях они выглядят как ничем не примечательные слабые голубоватые звездочки, и их легко можно спутать со звездами Галактики. Но первые же спектральные наблюдения показали всю их необычность. Спектры квазаров оказались совсем непохожими на спектры звезд. В отличие от последних они всегда содержат яркие и широкие эмиссионные линии. Но самым странным было то, что эти линии не отождествлялись ни с какими известными химическими элементами. Вскоре оказалось, что спектральные линии квазаров принадлежат обычным химическим элементам, но они сильно смещены в красную сторону спектра, как у очень далеких галактик, а следовательно, расстояние до них можно оценить по закону Хаббла. Наиболее яркий квазар доступен даже любительскому телескопу, хотя длины волн его спектральных линий увеличены почти на 16%, что соответствует расстоянию примерно в два миллиарда световых лет! Расстояния, определенные по красному смещению, для многих квазаров оказались еще в несколько раз большими. Они уверенно наблюдаются только благодаря тому, что светимость их невероятно высока — до 10^{12} – 10^{13} светимостей Солнца. Это в десятки и сотни раз выше, чем светимость нормальных галактик, подобных нашей. **Квазары — самые мощные источники излучения, наблюдаемые во Вселенной.**

По своим свойствам квазары оказались похожими на активные ядра галактик, хотя они превосходят их по мощности излучения. В квазарах также наблюдается излучение горячего и быстро движущегося газа, скорость которого измеряется тысячами километров в секунду. Подобно активным ядрам, многие квазары беспорядочно изменяют свою яркость со временем. Наконец, изображения многих квазаров, полученные с помощью космического телескопа Хаббла, подтвердили, что они действительно находятся внутри галактик (спиральных или эллиптических, иногда со следами сильного взаимодействия). Это подтвердило предположение о том, что квазары являются ядрами галактик, наблюдаемыми на стадии очень высокой активности.

Природа различных форм активности ядер галактик и квазаров, их происхождение и источники энергии до сих пор точно не установлены. Эта одна из наиболее актуальных проблем астрономии, решаемых сегодня. По-видимому, выделение энергии связано не с ядерными превращениями, а с падением газа на очень массивные черные дыры, которые, как оказалось, находятся в ядрах многих (если не всех) галактик — независимо от того, проявляют ли они заметную активность или нет. Во многих случаях массу ядер удалось измерить по скоростям движения газа и звезд в их окрестности, и она оказалась действительно больше, чем масса звезд и газа в центральной области галактик. Это говорит в пользу гипотезы о массивных черных дырах. В ядре нашей Галактики черная дыра с массой в несколько миллионов масс Солнца обнаружена по наблюдаемому перемещению близких к ней звезд.

Мы уже знаем, что черные дыры возникают при безудержном сжатии ядер массивных звезд, потерявших устойчивость в конце своей жизни. Черные дыры в ядрах галактик имеют иное происхождение, и их масса значительно больше — от нескольких миллионов масс Солнца до нескольких миллиардов (как в радиогалактике Дева А).

Предполагается, что ядро галактики становится активным тогда, когда в силу тех или иных причин на центральную черную дыру начинают падать достаточно интенсивные потоки межзвездного газа. Они разгоняются под действием ее притяжения до скоростей, сравнимых со скоростью света, и их энергия преобразуется в энергию активности ядра. Как и в случае перетекания газа на компактную звезду в тесной двойной системе, падающее на черную дыру вещество должно закрутиться, образуя очень горячий аккреционный диск вокруг нее. Излучение этого диска и дает основной вклад в оптическую и рентгеновскую светимость активного ядра. Для объяснения энергии активных ядер достаточно, чтобы на черную дыру ежегодно падало вещество с массой в несколько масс Солнца. Предложено несколько теоретических схем, объясняющих такое преобразование энергии. Они проверяются и уточняются астрономическими наблюдениями.

33.4. Вопросы

1. Радиоизлучение радиогалактик имеет синхротронную природу. Вспомните, какие обсуждавшиеся нами ранее объекты также обладают синхротронным радиоизлучением.
2. По каким наблюдаемым признакам можно отличить звезды от квазаров?

3. О большой скорости, с которой по различным направлениям движется газ в активных ядрах галактик и квазарах, свидетельствует необычный вид линий излучения в их спектрах: они очень широкие. Объясните причину этого.
4. Вывод о том, что источники мощного излучения в активных ядрах галактик и квазаров имеют размеры существенно меньше 1 светового года, был сделан на основании того, что их яркость может заметно меняться за время меньше года. На чем основано это заключение?

33.5. Упражнения

1. Самый яркий и один из самых близких квазаров выглядит как звездочка 12-й звездной величины. Будет ли он виден в телескоп с диаметром объектива 10 см?
2. Квазар, рассмотренный в предыдущей задаче, имеет красное смещение $\Delta\lambda/\lambda = 0,16$. Определите скорость удаления квазара, расстояние до него (в метрах и парсеках) и светимость (в L_{\odot}).

Основные выводы

Современные телескопы дают возможность наблюдать многие миллионы далеких звездных островов — галактик. До сравнительно близких галактик расстояния можно определить по отдельным наблюдаемым в них звездам, а до далеких — по смещению линий в их спектрах.

Различают эллиптические, спиральные и неправильные галактики. Они отличаются друг от друга по форме, звездному составу и массе межзвездного газа. В спиральных и неправильных галактиках звезды и газ образуют вращающийся диск очень больших размеров (обычно десятки тысяч световых лет). В этих галактиках, наряду со старыми, содержится много молодых, недавно сформировавшихся звезд.

Во внутренних, наиболее плотных областях галактик — в их ядрах — во многих случаях наблюдаются процессы выделения огромной энергии, не связанные с излучением обычных звезд. Предполагается, что выделение энергии связано падению газа на очень массивные черные дыры в ядрах галактик.

Объектами, родственными по природе активным ядрам галактик, являются квазизвездные объекты (квазары). Они внешне похожи на звезды, однако анализ спектров показал, что квазары находятся далеко за пределами нашей Галактики, на расстояниях в миллиарды световых лет. Это самые мощные источники энергии, известные в природе.

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 34. Расширяющаяся Вселенная

34.1. Красное смещение и расширение Вселенной. Самое общее свойство Вселенной — это ее нестационарность (непрерывная изменчивость во времени), которая прежде всего проявляется в ее расширении. *Расширением Вселенной* называется непрерывное увеличение средних расстояний между всеми далекими объектами — галактиками, их скоплениями, квазарами. Прямым доказательством существования такого процесса служат наблюдаемые смещения линий в спектрах далеких галактик в сторону более длинных волн (красное смещение). Этот сдвиг пропорционален расстоянию до галактик (см. п. 32.2). Согласно эффекту Доплера, такие смещения линий указывают на удаление галактик от нас. На первый взгляд может показаться, что наша Галактика занимает какое-то особое положение, если другие объекты от нее удаляются. В действительности это не так: одинаковым образом растёт расстояние и между другими галактиками, поэтому если бы мы проводили наблюдения с любой из них, то все равно обнаружили бы такую же картину: скорости удаления объектов тем выше, чем они дальше от наблюдателя (рис. 34.1). Сами галактики не расширяются: сила гравитации удерживает их звезды вместе.

Закон пропорциональности между скоростью удаления и расстоянием до галактик, называемый *законом Хаббла*, давно уже используется для определения расстояний до далеких объектов (см. п. 32.2).

Само по себе удаление далеких галактик друг от друга не является результатом непрерывного действия каких-то сил отталкивания между ними. Это следствие того, что быстро расширялась та среда, из которой возникли галактики. Можно считать, что они продолжают удаляться друг от друга по инерции, хотя их относительное движение оказалось не столь простым. Например,

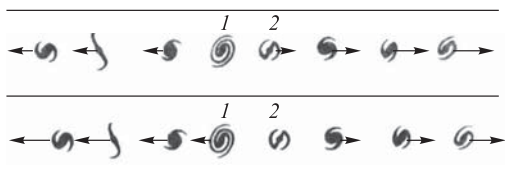


Рис. 34.1. Схема взаимного удаления галактик. Длина стрелок показывает для каждой галактики ее скорость относительно галактики 1 (вверху), 2 (внизу)

по современным данным, расширение Вселенной в современную эпоху очень медленно ускоряется.

Чтобы примерно оценить, когда началось расширение, достаточно знать значение постоянной Хаббла H . Далекие объекты, находящиеся на расстоянии D от нашей Галактики (или любой другой), удаляются со скоростью $H \cdot D$. Значит, если их скорость существенно не менялась со временем, рядом друг с другом они были $D/(H \cdot D) = H^{-1}$ лет назад. Если $H \approx 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$, то, учитывая, что $1 \text{ Мпк} \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ км}$, получаем: $H^{-1} \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с}$, или немногим более 10 млрд лет. Но эта оценка лишь приближительна. Принято считать, что расширение Вселенной началось 13–15 миллиардов лет тому назад.

34.2. Необратимые изменения во Вселенной. Во Вселенной медленно и непрерывно происходят изменения, которые имеют необратимый характер. Расширение Вселенной — это лишь одно из них. Меняются не только расстояния между галактиками, но и сами галактики. Существующие звезды медленно стареют, в природе все больше становится белых карликов и нейтронных звезд. Рождаются новые поколения звезд, но этот процесс постепенно замедляется — ведь запасы вещества, из которого образуются звезды (межзвездный газ), в каждой галактике ограничены. В большинстве эллиптических галактик образование звезд уже давно прекратилось, хотя в таких галактиках, как наша, существующих запасов газа хватит на то, чтобы этот процесс продолжался еще многие миллиарды лет. Возраст старейших звезд нашей Галактики и других наблюдаемых галактик составляет 10–15 млрд лет. Это примерно соответствует времени расширения Вселенной. Значит, когда-то в прошлом была эпоха формирования этих звездных систем, а еще раньше их не существовало.

Другой пример изменений касается химической эволюции вещества. В звездах водород превращается в другие, более тяжелые элементы, которые частично остаются в них, а частично

выбрасываются звездами в окружающее пространство. Следовательно, постепенно изменяется химический состав вещества во Вселенной. Этот процесс также необратим. **Вселенная медленно меняется и не всегда была такой, какой мы ее наблюдаем сейчас.**

Астрономические наблюдения дают уникальную возможность видеть объекты в далеком прошлом. Из-за того что скорость света и других электромагнитных волн конечна, мы видим источники излучения такими, какими они были в прошлом, когда испустили дошедшие до нас световые волны.

Специально проводившиеся на ограниченных участках неба подсчеты очень слабых и далеких галактик и измерение их спектров согласуются с предположением о том, что галактики раньше были ближе друг к другу, чем сейчас, и содержали больше молодых (голубых) звезд. Поскольку Вселенная расширяется, в еще более далеком прошлом галактики должны были находиться совсем близко друг от друга, а еще раньше они вообще не могли существовать обособленно. Еще ближе к началу расширения не могло существовать вообще никаких тел, в том числе и звезд. Вещество, которое сейчас входит в состав звезд и галактик, представляло собой в то время сплошную быстро расширяющуюся горячую газовую среду, состоящую из ядер двух самых легких элементов (водорода и гелия), а также электронов, фотонов и некоторых других элементарных частиц, включая частицы той “темной массы”, которая в настоящее время присутствует в галактиках и их скоплениях. Химических элементов тяжелее гелия в то время в природе практически не существовало. И действительно, в наиболее старых звездах их оказалось во много раз меньше, чем в звездах, образовавшихся позднее.

Узнать о том, каким была Вселенная в этом далеком “до-звездном” прошлом и как возник наблюдаемый мир галактик, помогают математические расчеты, базирующиеся на данных астрономических наблюдений, с одной стороны, и на известных физических законах природы — с другой. Вырисовывается сложная картина эволюции материи.

В общих чертах, появление звезд и галактик произошло в первые миллиард лет после начала расширения в результате роста неоднородностей плотности в среде. Расчеты показали, что с расширением первичной горячей среды она быстро охлаждалась, и на определенной стадии расширения первоначально за пределами высокая температура упала до нескольких тысяч кельвинов. При этом газ стал нейтральным (электроны оказались захвачен-

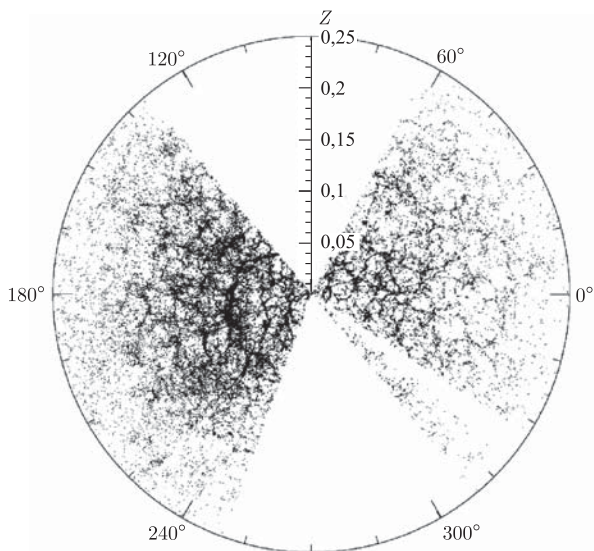


Рис. 34.2. Крупномасштабное распределение галактик в пространстве в двух противоположных секторах неба по данным обзора SDSS (США). Каждая точка представляет собой отдельную галактику, их полное число на схеме — около 150 тысяч. Положение нашей Галактики соответствует геометрическому центру окружности. Вдоль вертикальной оси отложены значения красного смещения $Z = \Delta\lambda/\lambda$. Расстояние до самых далеких галактик на схеме — около 1 тыс. Мпк.

ными ядрами атомов) и он, оказавшись практически прозрачным для излучения, перестал взаимодействовать с квантами света. По мере расширения стали возрастать неоднородности плотности среды, и начали постепенно развиваться крупномасштабные уплотнения, содержащие газ и “темную массу”. Из-за сил тяготения расширение отдельных уплотнений со временем замедлилось и в конце концов сменилось сжатием. В наиболее плотных областях впоследствии образовались звездные острова — галактики — и их системы (скопления галактик). Галактики непрерывно взаимодействовали друг с другом. Небольшие системы, состоящие из газа и звезд, сливались в более крупные, а крупные росли за счет “поглощения” более мелких. Параллельно возникали и обширные области, где плотность вещества оставалась низкой, и там галактики не образовывались. Во Вселенной появились чередующиеся области, как содержащие много галактик, так и почти не содержащие их.

Наблюдения действительно показывают, что галактики и их скопления распределены в пространстве неравномерно. Области с повышенной концентрацией галактик чередуются с обширными “пустотами”. Характерные размеры таких крупномасштабных неоднородностей в распределении галактик составляют в настоящее время 200–300 млн световых лет.

Процесс формирования наблюдаемой крупномасштабной структуры в расширяющейся Вселенной удалось в общих чертах смоделировать на компьютерах, однако процесс образования галактик еще далек от полной ясности.

34.3. Модели расширяющейся Вселенной. В астрономии, как и в других науках, для изучения того или иного объекта или сложного явления создается его физическая модель, опирающаяся на данные, полученные в результате экспериментов или наблюдений. Так, создаются и совершенствуются модели строения Земли, планет, звезд и галактик, описывающие основные физические свойства этих объектов. Рассчитываются модели образования и модели эволюции различных астрономических объектов и их систем. Любая модель — это только приближение к действительности, она не может учесть всех особенностей протекающих процессов. По мере развития науки, накопления новых данных, модели могут уточняться, более детально разрабатываться или же заменяться новыми, если они вошли в прямой конфликт с наблюдениями.

Неоднократно предпринимались попытки построить модель всего окружающего мира. Древние геоцентрические модели, помещавшие Землю в центр мироздания, — это также модели мира, но опирались они на скудные данные и довольно примитивные представления того времени и не могли воссоздать физическую картину явлений. Первые физически обоснованные модели всей безграничной Вселенной, широко используемые и в настоящее время, были разработаны советским физиком А. А. Фридманом в 1920-е годы на основе незадолго до этого созданной теории гравитации (общей теории относительности) А. Эйнштейна. В этих моделях не рассматривалось ни звезд, ни галактик, ни каких-либо сил, кроме гравитации. Изучалось только, каково может быть поведение безграничной однородной среды заданной плотности и как свойства этой среды связаны с геометрическими свойствами самого пространства. При этом принималось, что во Вселенной все области и направления совершенно равноправны. Поэтому такие модели называются *однородными* и *изотропными*. Но даже в этой упрощенной постановке задачи решить ее

оказалось очень нелегко. Реальная Вселенная сложнее любой модели. Если бы вещество в ней действительно представляло собой идеальную однородную среду, то откуда бы взялись такие сгущения вещества, как звезды или галактики? Наблюдения далеких галактик и их скоплений показывают, что в больших масштабах (несколько сотен миллионов световых лет) вещество действительно распределено более или менее однородно. Поэтому модели Фридмана описывают поведение материи только в больших масштабах. Они дали возможность математически рассчитать, как должны изменяться средняя плотность материи в безграничной Вселенной и геометрические свойства пространства начиная с состояния очень высокой (но не бесконечно высокой) плотности.

Самым важным выводом, который следует из этих расчетов, стал вывод о том, что из-за существования гравитации Вселенная не может оставаться неизменной, стационарной. Такое состояние было бы неустойчивым. Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Как следствие этого, средняя плотность вещества должна падать или возрастать. Во времена Фридмана ничего не было известно о движении галактик. Но вскоре Э. Хаббл обнаружил зависимость красного смещения линий в спектрах галактик от расстояния до них (закон Хаббла), которая свидетельствовала об удалении галактик друг от друга. Именно такой закон следовал из моделей Фридмана, описывающих расширяющуюся Вселенную. Поэтому можно сказать, что возможность расширения Вселенной была теоретически предсказана до его открытия.

Модели Фридмана характеризуются такими параметрами, как средняя плотность вещества и значение постоянной Хаббла в современную эпоху. Эти величины известны не очень точно (особенно первая), что не позволяет надежно выбрать более “правильную” модель. Но все однородные изотропные модели Вселенной дают различные предсказания лишь для очень далекого будущего: в некоторых моделях расширение Вселенной должно происходить вечно, в некоторых — смениться сжатием. По какому пути развивается реальный мир — вопрос, окончательно не решенный. На основании даже хорошо известных законов физики предсказать будущее Мира на несколько десятков миллиардов лет вперед — задача пока невыполнимая. Можно говорить лишь о различных возможностях. Однако современные исследования все же позволяют отдать предпочтение первому варианту неограниченного расширения (причем, как показывают наблюдения далеких галактик, это расширение, по-видимому,

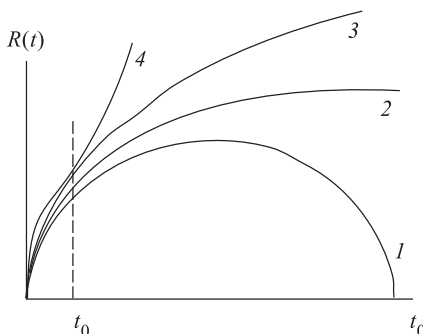


Рис. 34.3. Характер зависимости расстояний от времени для различных моделей Вселенной. Наилучшее согласие с наблюдениями дает зависимость 4. Здесь t_0 — современный возраст Вселенной

ускоряется со временем). Что касается прошлого, то тут выводы всех моделей одинаковы: расширение Вселенной началось с состояния очень большой плотности вещества, при которой немыслимо было существование не только звезд или галактик, но даже отдельных атомов. При этом расширение в самом начале происходило настолько быстро, что плотность, температура и другие свойства материи могли меняться во много раз за малые доли секунды.

На основании моделей Фридмана была разработана физическая картина эволюции вещества начиная с очень высоких плотностей, когда вещество в любом объеме пространства представляло собой быстро возникающие, распадающиеся и взаимодействующие друг с другом элементарные частицы. Чем ближе к началу расширения — тем выше энергия этих частиц. Удалось рассчитать, какие химические элементы могли возникнуть в результате этих взаимодействий на начальном этапе расширения Вселенной. Образование атомов могло длиться всего несколько минут (спустя 2–3 минуты после начала расширения), после чего температура среды упала ниже тех значений, при которых могут происходить термоядерные реакции. За это короткое время, помимо ядер атомов водорода (протонов), успели появиться только ядра атомов гелия (примерно 1 атом He на 10 атомов H), и — в очень небольшом количестве — атомы дейтерия (изотоп водорода с атомным весом, равным 2). Все остальные элементы образовались позднее (как мы уже знаем — в результате ядерных реакций в недрах звезд и при взрыве звезд). Такая картина оказалась очень хорошо согласующейся с измерениями химического состава звезд и галактик, которые, с поправкой на

эволюцию, действительно содержат водород и гелий в ожидаемой пропорции. Таким образом, два самых распространенных элемента Вселенной (водород и большая часть гелия) имеют не звездное, а до-звездное происхождение.

34.4. Фоновое реликтовое излучение. Очень важное подтверждение правильности нестационарных моделей Вселенной было получено с открытием *реликтового излучения*, исследование которого существенно обогатило наши представления о ранних этапах расширения Вселенной.

В 60-е годы XX в. при проверке работы приемников радиоизлучения в сантиметровом диапазоне для связи с искусственными спутниками, т. е. в значительной степени случайно, было обнаружено, что из космического пространства непрерывно приходит радиоизлучение на сантиметровых длинах волн. Оно исходит не из отдельных источников, а отовсюду, из любой точки неба с одинаковой интенсивностью.

Распределение энергии в спектре этого излучения показало, что по своей природе оно тепловое, т. е. подобно излучению непрозрачных нагретых тел или газов (см. § 14). Его основная энергия приходится на диапазон сантиметровых и миллиметровых радиоволн. Такой спектр имеет излучение непрозрачной среды, нагретой до 2,7 К. Поэтому обнаруженное радиоизлучение часто называют *трехградусным фоновым излучением*.

Это излучение не связано ни с какими наблюдаемыми объектами и существует практически независимо от них. Радиоволны фонового излучения распространяются по всем направлениям между звездами и галактиками, и заключенная в них энергия значительно больше, чем энергия квантов видимого света, рожденных звездами. Даже если бы все существующие или когда-либо существовавшие в галактиках звезды вдруг разом отдали бы свои запасы термоядерной энергии, то вся выделившаяся энергия осталась бы во много раз меньше той, которая заключена в фоновом излучении в том же объеме пространства. Следовательно, его природа не связана с активностью наблюдаемых звезд или галактик.

Существование подобного излучения было предсказано физиками еще до его открытия (Г. Гамов, США) на основании моделей расширяющейся Вселенной. Согласно современным представлениям, оно возникло на том этапе расширения, когда еще не существовало ни звезд, ни галактик. Поэтому фоновое излучение получило название *реликтовое*, т. е. древнее, остаточное. Как говорилось выше, среда, заполнявшая такую “беззвездную”

Вселенную, представляла собой быстро расширяющийся горячий газ (плазму), излучавший электромагнитные волны по всем направлениям. Кванты излучения непрерывно поглощались плазмой, и тут же вновь излучались ею. Но процессы поглощения и излучения могли компенсировать друг друга лишь до тех пор, пока среда была непрозрачной для этих квантов. Со временем, вследствие расширения, плотность газа уменьшилась, и он стал нейтральным и прозрачным, как рассеявшийся туман. С тех пор рожденное им излучение, практически перестав поглощаться, со скоростью света продолжает распространяться по всей безграничной Вселенной. На Земле принимаются сейчас потоки реликтового излучения, которые возникли в горячей среде более 10 млрд лет назад. Мы можем до сих пор их наблюдать, потому что они приходят с очень больших расстояний, для преодоления которых потребовалось именно столько времени. Вспомним: чем больший путь проделывают электромагнитные волны, которые мы улавливаем, тем в более далеком прошлом они были испущены.

Первичный газ, “породивший” наблюдаемое реликтовое излучение, имел температуру в тысячи кельвинов, и максимум в спектре его излучения в соответствии с законом Вина (§ 14) должен был приходиться на оптическую область спектра. Но красное смещение, связанное с расширением Вселенной, “сдвинуло” этот максимум в радиодиапазон, увеличив длины волн света почти в тысячу раз. Вот почему спектр реликтового излучения соответствует сейчас температуре всего около 3 К. Очень важную информацию о “ранней” Вселенной дали поиски и измерения слабых неоднородностей яркости фонового излучения, не превышающие одной стотысячной доли ее среднего значения. Эти неоднородности (флуктуации) яркости отражают самое начало формирования тех структур в распределении материи в пространстве, которые в наше время мы наблюдаем как крупномасштабные неоднородности в распределении галактик (см. п. 34.2).

Исследования реликтового излучения помогают лучше понять те сложные процессы, которые происходили во Вселенной миллиарды лет назад. Но пока нет ясного однозначного ответа на важнейший вопрос: с какой плотности вещества началось расширение Вселенной, что тогда представляла собой Вселенная и что существовало до этого, если только возможна такая постановка вопроса. Модели Фридмана, как и более рафинированные, разработанные позднее, не могут предложить однозначного ответа. Формально они дают для нулевого, начального момента бесконечные значения плотности, что не имеет физического

смысла и отражает лишь неполноту существующих физических теорий, которые не пригодны для описания состояния сверхвысокой плотности и сверхвысоких энергий. Очевидно только, что эта начальная плотность была несравненно выше плотности атомных ядер. Важно также, что расширение Вселенной неправильно представлять как взрыв в какой-то точке пространства. Пространство расширялось вместе материей, и на любой стадии расширения у Вселенной не существовало границ.

Закключение. Начало расширения часто условно называют моментом “рождения” Вселенной, подразумевая под этим появление Мира с теми фундаментальными свойствами пространства, времени, элементарных частиц и силовых полей, которыми оперирует современная физика. Заглянуть “за” этот момент “начала начал” — дело науки будущего. Современные физические теории непригодны для описания материи в состоянии, очень близком к “начальному” моменту, здесь требуются иные представления о времени, пространстве, взаимодействии частиц и полей. Создаются более общие физические теории, активно развиваются смелые идеи о тех процессах, которые положили начало наблюдаемому Миру. Но их содержание выходит далеко за рамки школьных курсов. Для проверки различных возможностей требуются не только новые астрономические исследования, но и дальнейшее развитие теоретической физики, изучающей фундаментальные свойства материи и элементарных частиц. Важным оказалось и другое: характер расширения Вселенной оказался связанным со свойствами того пространства, которое в физике принято называть пустотой или физическим вакуумом. Неожиданно подтвердилось то, что раньше обычно игнорировалось: даже вакуум может обладать такими свойствами, как плотность энергии, давление или гравитационное поле. Из-за исчезающе малых значений этих величин они никак не проявляют себя в обычных физических экспериментах, но могут влиять на характер расширения Вселенной, средняя плотность которой в настоящее время очень низка. По современным оценкам, она составляет лишь около $2 \cdot 10^{-26}$ кг/м³. Будь она существенно выше, расширение Вселенной уже миллиарды лет назад сменилось бы сжатием, и вместо красного смещения наблюдалось бы фиолетовое.

Современные данные наблюдений приводят к выводу о том, что расширение Вселенной никогда не кончится, и более того, скорость расширения медленно нарастает. Однако, не исключается возможность существования других “вселенных” с иными

свойствами пространства, времени и материи, и с иным характером эволюции.

Оценка средней плотности материи, полученная по наблюдениям далеких галактик, привела к проблеме фундаментальной важности. Дело в том, что средняя плотность вещества, состоящего из атомов, определяемая независимо, составляет всего несколько процентов от действительной средней плотности Вселенной. Все остальное, очевидно, приходится не на знакомые нам формы вещества (звезды, пыль, газ), а на иные формы материи, никак не проявляющие себя в наблюдениях непосредственно. Исследование их природы и роли в эволюции наблюдаемой Вселенной — это актуальные задачи современной фундаментальной физики и астрономии.

Таким образом, объяснение происхождения наблюдаемого мира звезд и галактик, как и мира элементарных частиц, — это целый комплекс сложнейших задач, относящихся в равной степени к физике и астрономии. Над их решением работают наши современники.

34.5. Вопросы

1. Как объясняется красное смещение, о чем оно свидетельствует?
2. Какой физический смысл имеет постоянная Хаббла?
3. Перечислите основные аргументы, говорящие о том, что окружающая нас Вселенная медленно меняется со временем.
4. Если бы Вселенная не расширялась, а бесконечное множество галактик — таких, как мы наблюдаем сейчас, — существовало вечно, то все небо от них ярко бы светило (см. п. 1.1). Объясните почему.
5. Какому значению постоянной Хаббла соответствуют расстояния до галактик, принятые при построении диаграмм на рис. 32.3?

34.6. Упражнения

1. Первые грубые оценки постоянной Хаббла привели к ошибочному значению $H = 530 \text{ км/с·Мпк}$. Как давно должно было начаться расширение Вселенной при таком значении H ?
- 2*. Действительно ли постоянная Хаббла H постоянна во времени? Предполагая, что скорости далеких галактик друг относительно друга не меняются со временем, найдите, че-

му было равно значение H 6 млрд лет назад. (Современное значение H принять равным $75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$.)

Основные выводы

Красное смещение линий в спектрах далеких галактик интерпретируется как постепенное увеличение расстояний между удаленными друг от друга галактиками или их скоплениями. Расширение — это важнейшее свойство окружающей нас безграничной Вселенной. По существующим оценкам, расширение Вселенной началось между 13 и 15 млрд лет назад с состояния сверхвысоких плотностей и температур. На ранней стадии расширения еще не могло существовать отдельных звезд и галактик. Вещество представляло собой первоначально очень плотную горячую среду, которая постепенно расширялась и остывала. Подтверждением этого вывода явилось открытие фонового реликтового излучения Вселенной, рожденного первичной горячей средой, когда она перешла из состояния ионизованного газа в нейтральное состояние. По современным представлениям, после остывания расширяющейся среды в ней начали расти неоднородности плотности. Наиболее плотные области со временем сменили расширение на сжатие. Именно они породили наблюдаемые галактики и их скопления в расширяющейся Вселенной. Как оказалось, Вселенная обладает очень низкой средней плотностью, причем среда, состоящая из обычных атомов, составляет лишь ее небольшую часть. Изучение других форм материи представляет актуальную задачу современной физики и астрономии.

Исследование безграничного мира, окружающего нашу крошечную планету, его происхождения и эволюции расширяет кругозор человека, дает ему представление о роли фундаментальных законов природы, которым подчиняется материя как здесь, на Земле, так и на невообразимо больших расстояниях от нее.

Ответы к упражнениям

1.7 1. $2,8 \cdot 10^8$ с. 2. $4,2 \cdot 10^{-8}$ световых лет; $1,6 \cdot 10^{-5}$ световых лет; $6,2 \cdot 10^{-4}$ световых лет.

3.7 2. К югу от надира $h = -90^\circ - \delta - \varphi$; к северу от надира $h = \varphi + \delta - 90^\circ$.

4.6 1. $h = 90^\circ - \varphi + \delta$. 2. Никогда. 3. 28 октября; 15 февраля. 4. Нет.

6.6 2. На 117 с. 3. 7 августа 1839 г.

8.7 1. $P = 2T_3$, Марс. 2. 467 сут. 3. 14 лет.
4. $1,3 \cdot 10^6$ км; 3400 км. 5. $1,2''$

9.4 2. Модуль скорости остается постоянным, а ее направление изменяется; движение равноускоренное.
4. $5,9 \times 10^{-3}$ м/с²; $1,8 \cdot 10^{-8}$ м/с².

10.4 1. 11,2 км/с. 2. 1,8 км/с; 2,5 км/с. 3. 7,3 ч.
4. 3,6 сут.

11.4 1. $\approx 36\,000$ км; 3 км/с.

13.7 3. Увеличение $> D/d$. 4. От 20^\times до 40^\times . 5. $20''$.
6. $103''$. 7. $(3,2 \cdot 10^{-4})''$.

14.5 1. 10 000 К. 2. 25 000 км/с. 3. В точках эклиптики, удаленных на 90° от Солнца; смещение $\pm 0,05$ нм.

15.3 1. $95,2 M_\oplus = 5,7 \cdot 10^{26}$ кг. 2. $M_{\text{зв}} = M_\odot/2$.

18.5 1. 12,6 м/с. 2. $2,7 \cdot 10^{-6}$ рад/с. 3. $T_{\text{синод.}} - T_{\text{вр.}} = 53$ ч. 4. В 6 раз.

19.9 1. $3,7 \text{ м/с}^2$; $8,7 \text{ м/с}^2$; $3,7 \text{ м/с}^2$. 2. $59''$; $47''$; $19''$.
3. В 2,25 и в 1560 раз. 4. $49''$.

20.6 1. $r(\text{а.е.}) = (30 \text{ км/с} / v)^2$. 2. $2 \cdot 10^8$ Дж.

21.3 1. В 6,3 раза. 2. $-26,5^m$. 3. $7,5^m$; 5^m ; $2,5^m$; -5^m ; $-7,5^m$. 4. $m_{\text{ск}} = m - 2,5 \lg N$. 5. Примерно в 630 раз; около 1 фот/с. 6. $3,2 \cdot 10^{-14}$ Дж.

22.10 1. 402 км. 2. 29 000 К. 4. $26 R_\odot$. 5. $260\,000 L_\odot$.
6. $4,8^m$; $-0,2^m$; $7,3^m$.

23.5 1. 10^{-10} м; $2,6 \cdot 10^{-12}$ м. 2. $3,5 \cdot 10^{16}$ Па. 3. 340 км/с; 7 км/с. 4. $4,4 \cdot 10^9$ кг/с; $7 \cdot 10^{-3}$ %.

24.4 1. 468 км; 0,1 км. 2. $0,07 L_{\odot}$. 3. $2,7 \cdot 10^{11}$ кг; $2,3 \cdot 10^8$ м/с. 4. 126 км/с. 5. $2 \cdot 10^3$.

25.6 1. 10^m ; 16^m . 2. 27 лет. 3. 380 пк.

26.6 1. 50 000 км. 2. 360 км. 3. 2 км/с. 4. 620 км/с. 5. $4,2 \cdot 10^9$ кг/с.

27.4 1. 0,03%. 2. 89 км; $2 \cdot 10^{16}$ кг/м³.

28.4 1. а) в $1,6 \cdot 10^8$ раз; б) в $2,4 \cdot 10^4$ раз; в) в $3,1 \cdot 10^3$ раз.

29.4 1. 4300 лет. 2. 13,3 км/с. 3. 25 раз. 4. Около $3 \cdot 10^{41}$ кг или 150 млрд масс Солнца; 5. 67 тыс. лет.

30.5 1. 1 кг. 2. 10^{32} кг.

32.7 1. 130 тыс. лет. 2. 0,282 м. 3. 800 Мпк. 4. 10^{41} кг.

33.5 1. Предельная звездная величина $m = 2,5 + 5 \lg D(\text{мм}) = 12,5^m$. 2. 640 Мпк; $2 \cdot 10^{25}$ м; $2,1 \cdot 10^{12} L_{\odot}$.

34.7 1. $5,7 \cdot 10^{16}$ с = 1,8 млрд лет. 2. Около 130 км/(с \times Мпк).

Приложение

Важнейшие открытия и события в истории астрономии

Годы до н. э.	
Около 4000	Создание гигантской мегалитической обсерватории Стоунхендж (Англия)
3000–2000	Изобретение солнечных часов
Около 2500	Разработка солнечного календаря, в котором год продолжался в среднем 365,25 суток (Египет)
Около 1100	Измерение наклона эклиптики к плоскости экватора (Китай)
585	Первое солнечное затмение, предсказанное заранее (Фалес Милетский, Греция)
280–265	Выдвижение идеи о движении Земли и планет вокруг Солнца (Аристарх Самосский, Греция)
Около 230	Первое определение размеров земного шара (Эратосфен, Александрия)
150–123	Выдающиеся работы Гиппарха: открытие явления прецессии, обнаружение неодинаковой продолжительности времен года, составление звездного каталога с указанием координат и видимых яркостей 850 звезд
46	Введение в Риме календаря Юлием Цезарем
Годы н. э.	
140	Создание математической теории движения планет по эпициклам в рамках геоцентрической системы мира (Клавдий Птолемей, Александрия)
1515	Первая публикация с изложением гелиоцентрической системы мира и определение относительных расстояний планет от Солнца (Николай Коперник)
1543	Выход в свет основного труда Коперника
1582	Введение 15 октября григорианского календаря (новый стиль)

1609–1611	Начало телескопических наблюдений; открытие гор на Луне, фаз Венеры, солнечных пятен, вращения Солнца, спутников Юпитера (Галилео Галилей, Италия)
1609–1619	Открытие законов движения планет (И. Кеплер)
1668–1671	Создание первого телескопа-рефлектора (И. Ньютон)
1676	Измерение скорости света по наблюдениям движения спутников Юпитера (О. Ремер, Дания)
1687	Публикация Ньютоном основ механики и закона всемирного тяготения
1717–1718	Обнаружение собственных движений звезд (Э. Галлей)
1761	Открытие атмосферы на Венере (М. Ломоносов)
1781	Открытие планеты Уран (У. Гершель)
1783	Открытие движения Солнца среди звезд (У. Гершель)
1800	Открытие У. Гершелем невидимого глазом (инфракрасного) излучения Солнца
1814	Первое описание и измерение длин волн многочисленных линий поглощения в спектре Солнца (Й. Фраунгофер)
1837–1839	Первые измерения расстояний до нескольких ближайших звезд (В. Струве, Ф. Бессель, Т. Гендерсон)
1842	Открытие эффекта Доплера — изменения длин волн излучения источников при их приближении или удалении (Х. Доплер, Австрия)
1846	Открытие планеты Нептун на основе предварительных вычислений его положения на небе, проведенных У. Леверье (И. Галле, Германия)
1860–1862	Разработка спектрального анализа — метода дистанционного определения химического состава источников света (Р. Бунзен и Г. Кирхгоф, Германия) и начало его использования при исследовании спектров звезд (А. Секки, Италия, Д. Донати, Италия, У. Хеггинс, Англия)
1868	Г. Швабе обнаружил периодичность появления солнечных пятен
1905–1916	Создание А. Эйнштейном специальной теории относительности и общей теории относительности (теории гравитации)
1908	Обнаружение зависимости период–светимость у цефеид (Г. Ливитт)
1915	Открытие первого белого карлика — Сириуса В (У. Адамс, США)

1916	Первая оценка расстояния от Солнца до центра Галактики (Х. Шепли, США)
1923	Первые определения расстояний до ближайших галактик (Э. Хаббл, США)
1926–1927	Открытие вращения Галактики (Б. Линблад, Швеция и Ян Оорт, Голландия)
1929	Открытие закона расширения Вселенной (Э. Хаббл, США)
1931	Открытие космического радиоизлучения, положившее начало радиоастрономии (К. Янский, США)
1930–1938	Установление ядерной природы энергии звезд и первые расчеты их эволюции
1944	Разработка основ теории формирования Земли и планет из холодного газопылевого облака вокруг Солнца (О. Ю. Шмидт, СССР)
1948–1951	Начало использования электронных приборов для регистрации излучения астрономических объектов
1948–1952	Открытие и начало исследований группировок молодых звезд — звездных ассоциаций, свидетельствующих о том, что звезды рождаются и в современную эпоху (В. А. Амбарцумян, Б. Е. Маркарян, СССР)
1951	Обнаружение радиоизлучения нейтрального водорода из межзвездного пространства на длине волны 0,21 м
1957	Запуск в СССР первого в мире ИСЗ, ознаменовавший начало космической эры
1959	Первый облет и фотографирование обратной стороны Луны космическим аппаратом (СССР)
1961	Первый полет человека в околоземном космическом пространстве (Ю. Гагарин)
1963–1965	Открытия и начало исследований квазаров — наиболее активных ядер галактик, являющихся самыми мощными источниками оптического и инфракрасного излучения
1965	Открытие теплового (реликтового) радиоизлучения Вселенной (А. Пензиас, Р. Уилсон, США)
1966	Первая мягкая посадка космического аппарата на поверхность небесного тела (Луны) и передача изображения с его поверхности (КА “Луна-9”)
1967	Открытие первых пульсаров (нейтронных звезд) по их пульсирующему радиоизлучению
1969	Первая высадка астронавтов на поверхность Луны (“Аполлон-11”, США)

1987	Впервые зарегистрирован поток нейтрино от сверхновой звезды, вспыхнувшей в соседней галактике
1994	Наблюдение редчайшего события — столкновения кометы с Юпитером
1995	Первое открытие планеты у нормальной звезды типа Солнца по колебаниям лучевой скорости звезды (М. Майор и Д. Квелотц, Швейцария)
1990-е годы	Подтверждение существования в космическом пространстве массивных объектов, не излучающих света (“черных дыр”) с массами от нескольких масс Солнца (в межзвездном пространстве) до сотен миллионов масс Солнца (в ядрах галактик)
Конец XX — начало XXI в.	Получение уникальных результатов исследований Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна с близкого расстояния методами космической техники. Массовые исследования космических объектов — от Солнца до далеких галактик — в диапазонах спектра, недоступных для наблюдения с Земли (гамма-, рентгеновский, далекий ультрафиолетовый, далекий инфракрасный диапазоны). Первые наблюдения молодых галактик на больших расстояниях
Начало XXI в.	Первые посадки космических аппаратов на малые тела Солнечной системы: астероид Эрос (2000 г.) и спутник Сатурна Титан (2005 г.). Доставка на Землю образцов кометного вещества (КА “Stardust”, 2006 г.)

Таблица 2. Данные о планетах Солнечной системы, Плуtone, Луне и Солнце

Астро- номиче- ские объекты	Среднее расстоя- ние от Солнца, а. е.	Звездный период обращения, сутки, годы	Сино- дичес- кий период обра- щения, сутки	Период осевого вращения, сутки “_” знак <i>обратное вращение</i>	Радиус, в ра- диусах Земли	Масса, в массах Земли	Число известных спутников	Наи- меньшая видимая звездная величи- на
Мерку- рий	0,4	88	0,24	58,6	0,38	0,055	–	–2
Венера	0,7	225	0,62	–243,0	0,95	0,815	–	–4,7
Земля	1,0	365	1,0	0,997	1,00	1,000	1	–
Марс	1,5	687	1,88	1,03	0,53	0,107	2	–2,0
Юпитер	5,2	4335	11,87	0,41	11,2	318	Более 60	–2,7
Сатурн	9,6	10835	29,67	0,44	9,4	95,2	Более 50	+0,7
Уран	19,2	30698	84,0	–0,72	4,0	14,5	Около 30	+5,5
Нептун	30,1	60079	164,5	0,67	3,9	17,2	13	+7,8
Плутон	39,5	89752	245,7	–6,39 сут.	0,19	0,002	3	+15,1
Луна	1,0	27,3 (вокруг Земли)	–	27,3	0,27	0,0123	0	–12,7
Солнце	–	–	–	25,4 сут.	109,1	333 000	Более 10 больших и карликовых планет и десятки тысяч малых тел	–26,7

Таблица 3. Характеристики некоторых ярких звезд

Звезды	α	δ	m	μ	v_r	D	L	T
Полярная (α М. Медведицы)	$1^h 49^m$	$+89,0^\circ$	2,3	$0,05''$ в год	-17 км/с	780 св. л.	$6 \cdot 10^3 L_\odot$	$6 \cdot 10^3$ К
Альдебаран (α Тельца)	$4^h 33^m$	$+16,3$	0,8	0,20	54	65	160	$3,8 \cdot 10^3$
Ригель (β Ориона)	$5^h 12^m$	$-8,2$	0,1	0,001	+21	815	$45 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$
Бетельгейзе (α Ориона)	$5^h 52^m$	$+7,5$	0,8	0,03	+21	400	$8,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
Сириус (α Б. Пса)	$6^h 43^m$	$-16,6$	-1,5	1,3	-8	8,5	21	$9,6 \cdot 10^3$
Вега (α Лиры)	$18^h 35^m$	$+38,7$	0,0	0,34	-14	25	50	$9,9 \cdot 10^3$
Арктур (α Волопаса)	$14^h 13^m$	$+19,5$	-0,1	2,3	-5	36	110	$4 \cdot 10^3$
Денеб (α Лебедя)	$20^h 40^m$	$+45,1$	1,2	0,003	-5	3000	$270 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$
Солнце	—	—	-26,7	—	—	$1,5 \cdot 10^{11}$ м	1	$5,8 \cdot 10^3$