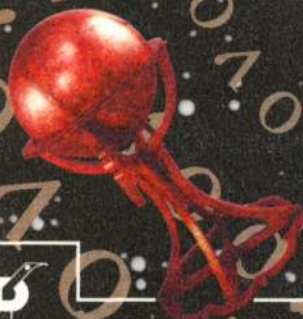


Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут

АСТРОНОМИЯ

11

К Л А С С



Д Р О Ф А

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я721
В75

АСТРОНОМИЯ

Воронцов-Вельяминов Б. А.

В75 Астрономия. 11 кл.: Учеб. для общеобразоват. учеб. заведений / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. — 4-е изд., стереотип. — М.: Дрофа, 2003. — 224 с.: ил., 8 л. цв. вкл.

ISBN 5—7107—6750—6

Настоящая книга является переработанным вариантом широко известного учебника Б. А. Воронцова-Вельяминова «Астрономия. 11 класс». В нем полностью сохранены структура и методология изложения материала. Содержание учебника соответствует действующей программе по курсу «Астрономия», подготовленной Е. К. Страутом.

В книге в доступной для учащихся форме на современном уровне излагаются все основные вопросы курса астрономии.

Учебник одобрен Федеральным экспертным советом, рекомендован к изданию Министерством образования РФ и включен в Федеральный перечень учебников.

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я721

ISBN 5—7107—6750—6

© ООО «Дрофа», 2000



I. ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

1. Что изучает астрономия. Ее значение и связь с другими науками

Астрономия является одной из древнейших наук, истоки которой относятся к каменному веку (VI—III тысячелетия до н. э.).

Астрономия¹ изучает движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем.

Человека всегда интересовал вопрос о том, как устроен окружающий мир и какое место он в нем занимает. У большинства народов еще на заре цивилизации были сложены особые — космологические мифы, повествующие о том, как из первоначального хаоса постепенно возникает космос (порядок), появляется все, что окружает человека: небо и земля, горы, моря и реки, растения и животные, а также сам человек. На протяжении тысячелетий шло постепенное накопление сведений о явлениях, которые происходили на небе.

Оказалось, что периодическим изменениям в земной природе сопутствуют изменения вида звездного неба и видимого движения Солнца. Высчитать наступление определенного времени года было необходимо для того, чтобы в срок провести те или иные сельскохозяйственные работы: посев, полив, уборку урожая. Но это можно было сделать лишь при использовании календаря, составленного по многолетним наблюдениям положения и движения Солнца и Луны. Так не-

¹ Это слово происходит от двух греческих слов: astron — звезда, светило и nómos — закон).

обходимость регулярных наблюдений за небесными светилами была обусловлена практическими потребностями счета времени. Строгая периодичность, свойственная движению небесных светил, лежит в основе основных единиц счета времени, которые используются до сих пор, — сутки, месяц, год.

Простое созерцание происходящих явлений и их наивное толкование постепенно сменялись попытками научного объяснения причин наблюдаемых явлений. Когда в Древней Греции (VI в. до н. э.) началось бурное развитие философии как науки о природе, астрономические знания стали неотъемлемой частью человеческой культуры. Астрономия — единственная наука, которая получила свою музу-покровительницу — Уранию.

С самых древних времен развитие астрономии и математики было тесно связано между собой. Вы знаете, что в переводе с греческого название одного из разделов математики — геометрии — означает «землемерие». Первые измерения радиуса земного шара были проведены еще в III в. до н. э. на основе астрономических наблюдений за высотой Солнца в полдень. Необычное, но ставшее привычным деление окружности на 360° имеет астрономическое происхождение: оно возникло тогда, когда считалось, что продолжительность года равна 360 суткам, а Солнце в своем движении вокруг Земли каждые сутки делает один шаг — градус.

Астрономические наблюдения издавна позволяли людям ориентироваться в незнакомой местности и на море. Развитие астрономических методов определения координат в XV—XVII вв. в немалой степени было обусловлено развитием мореплавания и поисками новых торговых путей. Составление географических карт, уточнение формы и размеров Земли на долгое время стало одной из главных задач, которые решала практическая астрономия. Искусство прокладывать путь по наблюдениям за небесными светилами, получившее название *навигация*, используется теперь не только в мореходном деле и авиации, но и в космонавтике.

Астрономические наблюдения за движением небесных тел и необходимость заранее вычислять их расположение сыграли важную роль в развитии не только математики, но и очень важного для практической деятельности человека раздела физики — механики. Выросшие из единой когда-то науки о природе — философии — астрономия, математика и фи-

зика никогда не теряли тесной связи между собой. Взаимосвязь этих наук нашла непосредственное отражение в деятельности многих ученых. Далеко не случайно, например, что *Галилео Галилей* и *Исаак Ньютон* известны своими работами и по физике, и по астрономии. К тому же Ньютон является одним из создателей дифференциального и интегрального исчисления. Сформулированный им же в конце XVII в. закон всемирного тяготения открыл возможность применения этих математических методов для изучения движения планет и других тел Солнечной системы. Постоянное совершенствование способов расчета на протяжении XVIII в. вывело эту часть астрономии — *небесную механику* — на первый план среди других наук той эпохи.

Вопрос о положении Земли во Вселенной, о том, неподвижна она или движется вокруг Солнца, в XVI—XVII вв. приобрел важное значение как для астрономии, так и для миропонимания. Гелиоцентрическое учение *Николая Коперника* явилось не только важным шагом в решении этой научной проблемы, но и способствовало изменению стиля научного мышления, открыв новый путь к пониманию происходящих явлений.

Много раз в истории развития науки отдельные мыслители пытались ограничить возможности познания Вселенной. Пожалуй, последняя такая попытка случилась незадолго до открытия спектрального анализа. «Приговор» был суров: «Мы представляем себе возможность определения их (небесных тел) форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими способами мы не сможем изучить их химический состав...» (*О. Конт*).

Открытие спектрального анализа и его применение в астрономии положило начало широкому использованию физики при изучении природы небесных тел и привело к появлению нового раздела науки о Вселенной — *астрофизики*. В свою очередь, необычность с «земной» точки зрения условий, существующих на Солнце, звездах и в космическом пространстве, способствовала развитию физических теорий, описывающих состояние вещества в таких условиях, которые трудно создать на Земле.

Более того, в XX в., особенно во второй его половине, достижения астрономии снова, как и во времена Коперника, привели к серьезным изменениям в научной картине мира, к становлению представлений об эволюции Вселенной. Оказа-

лось, что Вселенная, в которой мы сегодня живем, несколько миллиардов лет тому назад была совершенно иной — в ней не существовало ни галактик, ни звезд, ни планет. Для того чтобы объяснить процессы, происходившие на начальной стадии ее развития, понадобился весь арсенал современной теоретической физики, включая теорию относительности, атомную физику, квантовую физику и физику элементарных частиц.

Развитие ракетной техники позволило человечеству выйти в космическое пространство. С одной стороны, это существенно расширило возможности исследования всех объектов, находящихся за пределами Земли, и привело к новому подъему в развитии небесной механики, которая успешно осуществляет расчеты орбит автоматических и пилотируемых космических аппаратов различного назначения. С другой стороны, методы дистанционного исследования, пришедшие из астрофизики, ныне широко применяются при изучении нашей планеты с искусственных спутников и орбитальных станций. Результаты исследований тел Солнечной системы позволяют лучше понять глобальные, в том числе эволюционные процессы, происходящие на Земле. Вступив в космическую эру своего существования и готовясь к полетам на другие планеты, человечество не вправе забывать о Земле и должно в полной мере осознать необходимость сохранения ее уникальной природы.

2. Структура и масштабы Вселенной

Вы уже знаете, что наша Земля со своим спутником Луной, другие планеты и их спутники, кометы и малые планеты обращаются вокруг Солнца, что все эти тела составляют *Солнечную систему*. В свою очередь, Солнце и все другие звезды, видимые на небе, входят в огромную звездную систему — нашу *Галактику*. Самая близкая к Солнечной системе звезда находится так далеко, что свет, который распространяется со скоростью 300 000 км/с, идет от нее до Земли более четырех лет. Звезды являются наиболее распространенным типом небесных тел, в одной только нашей Галактике их насчитывается несколько сотен миллиардов. Объем, занимаемый этой звездной системой, так велик, что свет может пересечь его только за 100 тыс. лет.

Во *Вселенной* существует множество других галактик, подобных нашей. Именно расположение и движение галактик определяет строение и структуру Вселенной в целом. Галактики так далеки друг от друга, что невооруженным глазом можно видеть лишь три ближайшие: две — в Южном полушарии, а с территории России всего одну — туманность Андромеды. От наиболее удаленных галактик свет доходит до Земли за 10 млрд лет. Значительная часть вещества звезд и галактик находится в таких условиях, создать которые в земных лабораториях невозможно. Все космическое пространство заполнено электромагнитным излучением, гравитационными и магнитными полями, между звездами в галактиках и между галактиками находится очень разреженное вещество в виде газа, пыли, отдельных молекул, атомов и ионов, атомных ядер и элементарных частиц.

Как известно, расстояние до ближайшего к Земле небесного тела — Луны составляет примерно 400 000 км. Наиболее удаленные объекты располагаются от нас на расстоянии, которое превышает расстояние до Луны более чем в 10^{16} раз.

Попробуем представить размеры небесных тел и расстояния между ними во Вселенной, воспользовавшись хорошо известной моделью — школьным глобусом Земли, который в 50 млн раз меньше нашей планеты. В этом случае мы должны изобразить Луну шариком диаметром примерно 7 см, находящимся от глобуса на расстоянии около 7,5 м. Модель Солнца будет иметь диаметр 28 м и находиться на расстоянии 3 км, а модель Плутона — самой далекой планеты Солнечной системы — будет удалена от нас на 120 км. Ближайшая к нам звезда при таком масштабе модели будет располагаться на расстоянии примерно 800 000 км, т. е. в 2 раза дальше, чем Луна. Размеры нашей Галактики сократятся примерно до размеров Солнечной системы, но самые далекие звезды все же будут находиться за ее пределами.



ЗАДАНИЕ 1

Вспомните, какие объекты в окружающей местности расположены на таких расстояниях, которые приведены для тел Солнечной системы в описанной выше модели. Какой из них имеет те же размеры, что и модель Солнца (в предлагаемом масштабе)?

§ 2. НАБЛЮДЕНИЯ — ОСНОВА АСТРОНОМИИ

1. Особенности астрономии и ее методов

Огромные пространственно-временные масштабы изучаемых объектов и явлений определяют отличительные особенности астрономии.

Сведения о том, что происходит за пределами Земли в космическом пространстве, ученые получают главным образом на основе приходящего от этих объектов света и других видов излучения. Наблюдения — основной источник информации в астрономии. Эта *первая особенность* астрономии отличает ее от других естественных наук (например, физики или химии), где значительную роль играют опыты, эксперименты. Возможности проведения экспериментов за пределами Земли появились лишь благодаря космонавтике. Но и в этих случаях речь идет о проведении экспериментальных исследований небольшого масштаба, таких, например, как изучение химического состава лунных или марсианских пород. Трудно представить себе эксперименты над планетой в целом, звездой или галактикой.

Вторая особенность объясняется значительной продолжительностью целого ряда изучаемых в астрономии явлений (от сотен до миллионов и миллиардов лет). Поэтому непосредственно наблюдать происходящие изменения невозможно. Когда изменения происходят особенно медленно, приходится проводить наблюдения многих родственных между собой объектов, например звезд. Основные сведения об эволюции звезд получены именно таким способом. Более подробно об этом будет рассказано далее.

Третья особенность астрономии обусловлена необходимостью указать положение небесных тел в пространстве (их координаты) и невозможностью различить, какое из них находится ближе, а какое дальше от нас. На первый взгляд все наблюдаемые светила кажутся нам одинаково далекими.

Люди в древности считали, что все звезды располагаются на небесной сфере, которая как единое целое вращается вокруг Земли. Уже более 2000 лет тому назад астрономы стали применять способы, которые позволяли указать расположе-

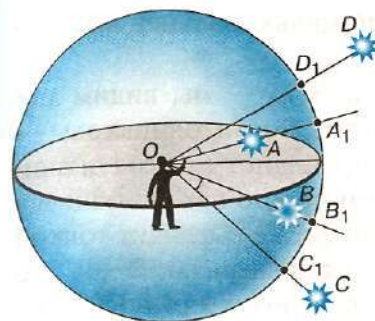


Рис. 1.1. Небесная сфера

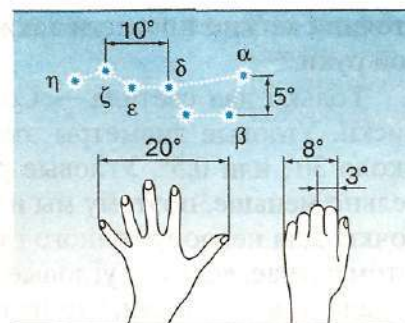


Рис. 1.2. Оценка угловых расстояний на небе

ние любого светила на небесной сфере по отношению к другим космическим объектам или наземным ориентирам. Представлением о небесной сфере удобно пользоваться и теперь, хотя мы знаем, что этой сферы реально не существует.

Построим небесную сферу и проведем из ее центра луч по направлению к звезде *A* (рис. 1.1). Там, где этот луч пересечет поверхность сферы, поместим точку *A*₁, изображающую эту звезду. Звезда *B* будет изображаться точкой *B*₁. Повторив подобную операцию для всех наблюдаемых звезд, мы получим на поверхности сферы изображение звездного неба — звездный глобус. Ясно, что если наблюдатель находится в центре этой воображаемой сферы, то для него направление на сами звезды и на их изображения на сфере будут совпадать. Расстояния между звездами на небесной сфере можно выражать только в угловой мере. Эти угловые расстояния измеряются величиной центрального угла между лучами, направленными на одну и другую звезду, или соответствующими им дугами на поверхности сферы.

Для приближенной оценки угловых расстояний на небе полезно запомнить такие данные: угловое расстояние между двумя крайними звездами ковша Большой Медведицы (α и β) составляет около 5° (рис. 1.2), а от α Большой Медведицы до α Малой Медведицы (Полярной звезды) — в 5 раз больше — примерно 25° . Простейшие глазомерные оценки угловых рас-

стояний можно провести также с помощью пальцев вытянутой руки.

Только два светила — Солнце и Луну — мы видим как диски. Угловые диаметры этих дисков почти одинаковы — около $30'$, или $0,5^\circ$. Угловые размеры планет и звезд значительно меньше, поэтому мы их видим просто как светящиеся точки. Для невооруженного глаза объект не выглядит точкой в том случае, если его угловые размеры превышают $2-3'$. Это означает, в частности, что наш глаз различает каждую по отдельности светящуюся точку (звезду) в том случае, если угловое расстояние между ними больше этой величины. Иначе говоря, мы видим объект не точечным лишь в том случае, если расстояние до него превышает его размеры не более чем в 1700 раз.

О том, как на основании угловых измерений определяют расстояния до небесных тел и их линейные размеры, будет рассказано далее.

Чтобы отыскать на небе светило, надо указать, в какой стороне горизонта и как высоко над ним оно находится. С этой целью используется *система горизонтальных координат* — *азимут* и *высота*. Для наблюдателя, находящегося в любой точке Земли, нетрудно определить вертикальное и горизонтальное направления. Первое из них определяется с помощью отвеса и изображается на чертеже (рис. 1.3) отвесной линией ZZ' , проходящей через центр сферы (точку O). Точка Z , расположенная прямо над головой наблюдателя, называется *зенитом*. Плоскость, которая проходит через центр сферы перпендикулярно отвесной линии, образует при пересечении со сферой окружность — *истинный*, или *математический*, *горизонт*. *Высота* светила отсчитывается по окружности, проходящей через зенит и светило M , и выражается длиной дуги этой окружности от горизонта до светила. Эту дугу и соответствующий ей угол принято обозначать буквой h . Высота светила, которое находится в зените, равна 90° , на горизонте — 0° . Положение светила относительно сторон горизонта указывает его вторая координата — *азимут*, обозначаемый буквой A . Азимут отсчитывается от точки юга в направлении движения часовой стрелки, так что азимут точки юга равен 0° , точки запада — 90° и т. д.

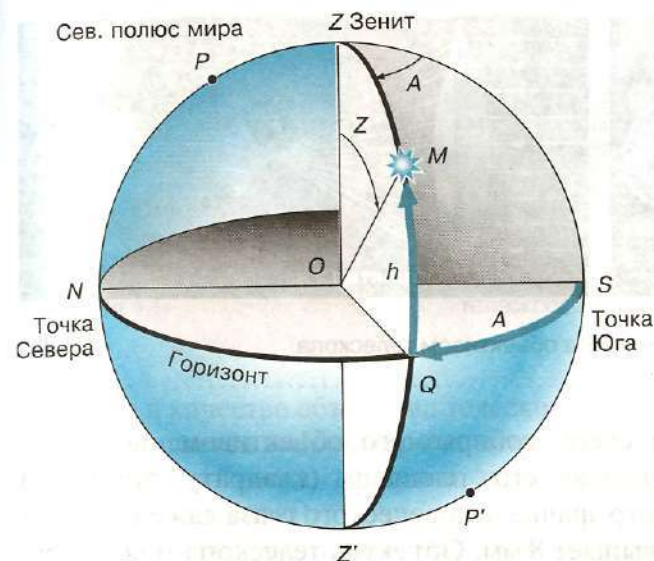


Рис. 1.3.
Система
горизонтальных
координат

Горизонтальные координаты указывают положение светила на небе в данный момент и вследствие вращения Земли непрерывно меняются. На практике, например в геодезии, высоту и азимут измеряют специальными угломерными оптическими приборами — *теодолитами*.

2. Телескопы

Основным прибором, который используется в астрономии для наблюдения небесных тел, приема и анализа приходящего от них излучения, является *телескоп*. Слово это происходит от двух греческих слов: *tele* — далеко и *skoréo* — смотрю.

Телескоп применяют, во-первых, для того, чтобы собрать как можно больше света, идущего от исследуемого объекта, а во-вторых, чтобы обеспечить возможность изучать его мелкие детали, недоступные невооруженному глазу. Чем более слабые объекты дает возможность увидеть телескоп, тем больше его *проницающая сила*. Возможность различать мелкие детали характеризует *разрешающую способность* телескопа. Обе эти характеристики телескопа зависят от диаметра его объектива.

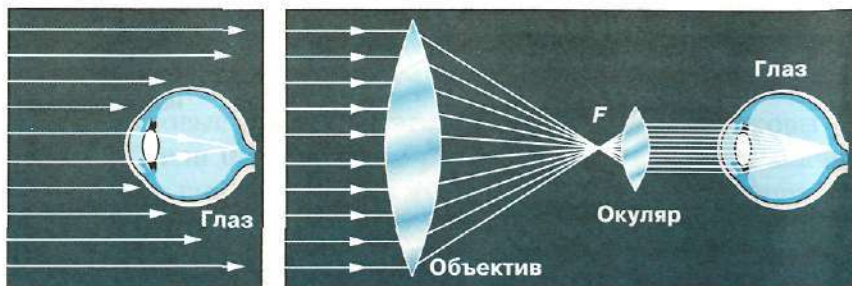


Рис. 1.4. Собираение света объективом телескопа

Количество света, собираемого объективом, возрастает пропорционально его площади (квадрату диаметра) (рис. 1.4). Диаметр зрачка человеческого глаза даже в полной темноте не превышает 8 мм. Объектив телескопа может превышать по диаметру зрачок глаза в десятки и сотни раз. Это позволяет с помощью телескопа обнаружить звезды и другие объекты, которые в 100 млн раз слабее объектов, видимых невооруженным глазом.

Чем меньше размер изображения светящейся точки (звезды), которое дает объектив телескопа, тем лучше его разрешающая способность. Если расстояние между изображениями двух звезд меньше размера самого изображения, то они сливаются в одно. Минимальный размер изображения звезды (в секундах дуги) можно рассчитать по формуле:

$$\alpha = \frac{206\,265 \cdot \lambda}{D},$$

где λ — длина световой волны, а D — диаметр объектива. У школьного телескопа, диаметр объектива которого составляет 60 мм, теоретическая разрешающая способность будет равна примерно 2". Напомним, что это превышает разрешающую способность невооруженного глаза (2') в 60 раз. Реальная разрешающая способность телескопа будет меньше, поскольку на качество изображения существенно влияет состояние атмосферы, движение воздуха.

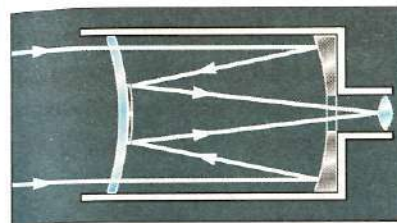


Рис. 1.5. Менисковый телескоп

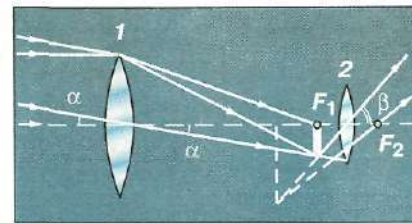


Рис. 1.6. Построение изображения в телескопе

Если в качестве объектива телескопа используется линза, то он называется *рефрактор* (от латинского слова *refracto* — преломляю), а если вогнутое зеркало, — то *рефлектор* (*reflecto* — отражаю).

Помимо рефракторов и рефлекторов в настоящее время используются различные типы зеркально-линзовых телескопов, один из которых — менисковый — представлен на рисунке 1.5.

Школьные телескопы по большей части являются рефракторами, их объективом, как правило, служит двояковыпуклая собирающая линза. Как известно, если предмет находится дальше двойного фокусного расстояния, она дает уменьшенное, перевернутое и действительное его изображение. Это изображение располагается между точками фокуса и двойного фокуса линзы. Расстояния до Луны, планет, а тем более звезд так велики, что лучи, приходящие от них, можно считать параллельными. Следовательно, изображение объекта будет располагаться в фокальной плоскости.

Построим изображение Луны, которое дает объектив 1 с фокусным расстоянием F (рис. 1.6). Из рисунка видно, что угловых размеров наблюдаемого объекта — угол α — объектив не изменяет. Воспользуемся теперь еще одной линзой — окуляром 2, поместив ее от изображения Луны (точка F_1) на расстоянии, равном фокусному расстоянию этой линзы — f , в точку F_2 . Фокусное расстояние окуляра должно быть меньше, чем фокусное расстояние объектива. Построив изображение, которое дает окуляр, мы убедимся, что он увеличивает угловые размеры Луны: угол β заметно больше угла α .

Увеличение, которое дает телескоп, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$W = \frac{F}{f}.$$

Телескоп увеличивает видимые угловые размеры Солнца, Луны, планет и деталей на них, но звезды из-за их колоссальной удаленности все равно видны в телескоп, как светящиеся точки.

Имея сменные окуляры, можно с одним и тем же объективом получать различное увеличение. Поэтому возможности телескопа в астрономии принято характеризовать не увеличением, а диаметром его объектива. В астрономии, как правило, используют увеличения менее 500 раз. Применять большие увеличения мешает атмосфера Земли. Движение воздуха, незаметное невооруженным глазом (или при малых увеличениях), приводит к тому, что мелкие детали изображения становятся нерезкими, размытыми. Астрономические обсерватории, на которых используются крупные телескопы с диаметром зеркала 2—3 м, стараются разместить в районах с хорошим астроклиматом: большим количеством ясных дней и ночей, с высокой прозрачностью атмосферы.

Крупнейший в России телескоп-рефлектор, который имеет зеркало диаметром 6 м, сконструирован и построен Ленинградским оптико-механическим объединением (рис. 1.7). Его огромное вогнутое зеркало, которое имеет массу около 40 т, отшлифовано с точностью до долей микрометра. Фокусное расстояние зеркала 24 м. Масса всей установки телескопа более 850 т, а высота 42 м. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительное время удерживать его в поле зрения, плавно поворачивая телескоп вслед за вращением Земли. Телескоп входит в состав Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук и установлен на Северном Кавказе (близ станции Зеленчукская в Кабардино-Балкарии) на высоте 2100 м над уровнем моря.

В настоящее время появилась возможность использовать в наземных телескопах не монолитные зеркала, а зеркала, со-

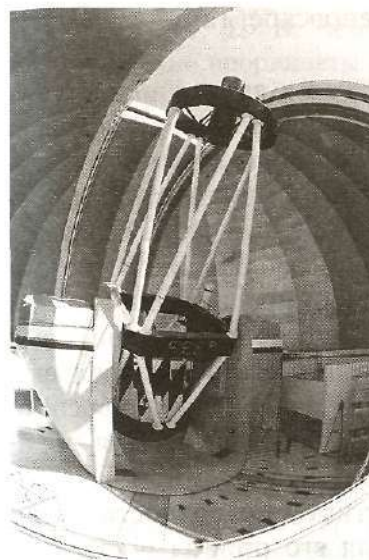


Рис. 1.7. Шестиметровый телескоп-рефлектор

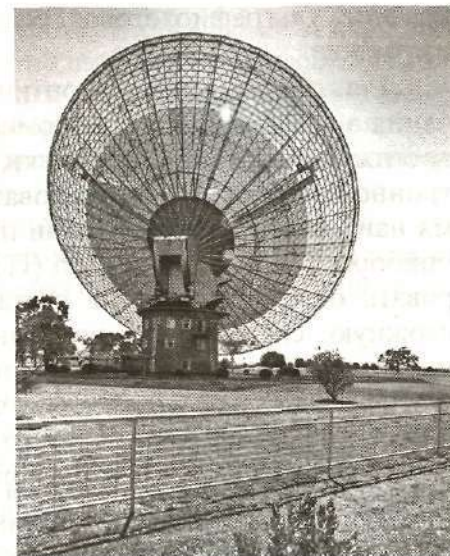


Рис. 1.8. Радиотелескоп

стоящие из отдельных фрагментов. Уже построены и работают два телескопа, каждый из которых имеет объектив диаметром 10 м, состоящий из 36 отдельных зеркал шестиугольной формы. Управляя этими зеркалами с помощью компьютера, можно всегда расположить их так, чтобы все они собирали свет от наблюдаемого объекта в едином фокусе. Предполагается создать телескоп с составным зеркалом диаметром 32 м, работающим по тому же принципу.

Современные телескопы часто используются для того, чтобы сфотографировать изображение, которое дает объектив. Именно так получены те фотографии Солнца, галактик и других объектов, которые вы увидите на страницах учебника, в популярных книгах и журналах.

В настоящее время астрономию называют всеволновой, поскольку наблюдения за объектами ведутся не только в оптическом диапазоне. Для этой цели используются различные приборы, каждый из которых способен принимать излучение в определенном диапазоне электромагнитных волн: инфра-

красное, ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма- и радиоизлучение.

Для приема и анализа оптического и других видов излучения в современной астрономии используется весь арсенал достижений физики и техники — фотоумножители, электронно-оптические преобразователи и др. В настоящее время наиболее чувствительными приемниками света являются приборы с зарядовой связью (ПЗС), позволяющие регистрировать отдельные кванты света. Они представляют собой сложную систему полупроводников (полупроводниковые матрицы), в которых используется внутренний фотоэффект. В этом и в других случаях полученные данные можно воспроизвести на дисплее компьютера или представить для обработки и анализа в цифровой форме.

Радиоизлучение из космоса достигает поверхности Земли без значительного поглощения. Для его приема построены самые крупные астрономические инструменты — радиотелескопы (рис. 1.8). Их металлические зеркала-антенны, которые достигают в диаметре нескольких десятков метров, отражают радиоволны и собирают их подобно оптическому телескопу-рефлектору. Для регистрации радиоизлучения используются особые чувствительные радиоприемники.

Приборы для исследования остальных видов излучения обычно тоже называют телескопами, хотя по своему устройству они порой значительно отличаются от оптических телескопов. Как правило, они устанавливаются на искусственных спутниках, орбитальных станциях и других космических аппаратах, поскольку сквозь земную атмосферу эти излучения практически не проникают. Она их рассеивает и поглощает.

Даже оптические телескопы, находящиеся на орбите, имеют определенные преимущества по сравнению с наземными. Наиболее крупному из них космическому телескопу им. Хаббла, созданному в США, с зеркалом диаметром 2,4 м доступны объекты, которые в 10—15 раз слабее, чем такому же телескопу на Земле. Его разрешающая способность составляет 0,1", что недостижимо даже для более крупных наземных телескопов. На снимках туманностей и других далеких объектов видны мелкие детали, неразличимые при наблюдениях с Земли (см. рис. 3 на цветной вклейке XV).



ВОПРОСЫ

1. В чем состоят особенности астрономии?
2. Какие координаты светил называются горизонтальными?
3. Опишите, как координаты Солнца будут меняться в процессе его движения над горизонтом в течение суток.
4. По своему линейному размеру диаметр Солнца больше диаметра Луны примерно в 400 раз. Почему их угловые диаметры почти равны?
5. Для чего используется телескоп?
6. Что считается главной характеристикой телескопа?
7. Почему при наблюдениях в школьный телескоп светила уходят из поля зрения?



УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Каково увеличение телескопа, если в качестве его объектива используется линза, оптическая сила которой 0,4 дптр, а в качестве окуляра линза с оптической силой 10 дптр?
2. Во сколько раз больше света, чем школьный телескоп-рефрактор (диаметр объектива 60 мм), собирает крупнейший российский телескоп-рефлектор (диаметр зеркала 6 м)?



ЗАДАНИЕ 2

- Измерив оптическую силу объектива и окуляра школьного телескопа, определите увеличение, которое он дает.



II. ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ

§ 3. ЗВЕЗДЫ И СОЗВЕЗДИЯ

Вероятно, еще на заре цивилизации люди, стремясь как-то разобраться во множестве звезд и запомнить их расположение, мысленно объединяли их в определенные фигуры. Вспомните, как часто мы находим в контурах облаков, гор или деревьев очертания людей, животных или даже фантастических существ. Многие характерные «звездные фигуры» уже в глубокой древности получили имена героев греческих мифов и легенд, а также тех мифических существ, с которыми эти герои сражались. Так появились на небе Геркулес, Персей, Орион, Андромеда и т. д., а также Дракон, Телец, Кит и т. п. Некоторые из этих созвездий упоминаются в древнегреческих поэмах «Илиада» и «Одиссея». Их изображения можно видеть в старинных звездных атласах, на глобусах и картах звездного неба (рис. 2.1).

В наши дни созвездиями называют определенные участки звездного неба, разделенные между собой строго установленными границами.

Среди всех 88 созвездий известное каждому Большая Медведица — одно из самых крупных.

Видимые на небе невооруженным глазом звезды астрономы еще до нашей эры разделили на шесть величин. Самые яркие (их на небе менее 20) стали считать звездами первой величины. Чем слабее звезда, тем больше число, обозначающее ее *звездную величину*. Наиболее слабые, едва различимые невооруженным глазом — это звезды шестой величины. В каждом созвездии звезды обозначаются буквами греческого алфавита (приложение II), как правило, в порядке убывания их яркости. Наиболее яркая в этом созвездии звезда обозначается буквой α ,



Рис. 2.1. Звездное небо на старинных картах

вторая по яркости — β и т. д. Кроме того, примерно 300 звезд получили собственные имена арабского и греческого происхождения. Это либо самые яркие звезды, либо наиболее интересные объекты из числа более слабых звезд. Так, например, средняя звезда в ручке ковша Большой Медведицы называется Мицар, что по-арабски означает «конь». Эта звезда второй величины обозначается ζ Большой Медведицы. Рядом с Мицаром можно видеть более слабую звездочку четвертой величины, которую называли Алькор — «всадник». По этой звезде проверяли качество зрения у арабских воинов несколько веков тому назад.

Как отыскать на небе Полярную звезду — α Малой Медведицы, напоминает рисунок 2.2.

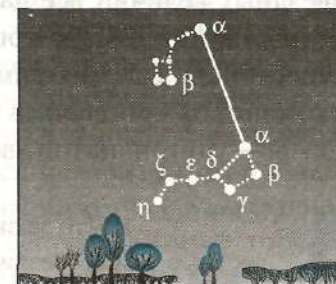


Рис. 2.2. Способ отыскания Полярной звезды

В этом созвездии, которое нередко называют «Малый Ковш», она является самой яркой. Но так же, как и большинство звезд ковша Большой Медведицы, Полярная — звезда второй величины.

Когда ученые стали располагать приборами для измерения величины потока света, приходящего от звезд, оказалось, что от звезды первой величины света приходит в 2,5 раза больше, чем от звезды второй величины, от звезды второй величины в 2,5 раза больше, чем от звезды третьей величины, и т. д. Несколько звезд были отнесены к звездам нулевой величины, потому что от них света приходит в 2,5 раза больше, чем от звезд первой величины. А самая яркая звезда всего неба — Сириус (α Большого Пса) получила даже отрицательную звездную величину $-1,5$. Список наиболее ярких звезд с указанием их названия и звездной величины приведен в приложении V.

Измерения светового потока от звезд позволяют теперь определить их звездные величины с точностью до десятых и сотых долей.

Было установлено, что поток энергии от звезды первой величины в 100 раз больше, чем от звезды шестой величины. К настоящему времени звездные величины определены для многих сотен тысяч звезд.

С изобретением телескопа ученые получили возможность увидеть более слабые звезды, от которых приходит света гораздо меньше, чем от звезд шестой величины. Шкала звездных величин все дальше и дальше уходит в сторону их возрастания по мере того, как увеличиваются возможности телескопов. Так, например, хаббловский космический телескоп позволил получить изображение предельно слабых объектов — до тридцатой звездной величины.



Вопросы

1. Что называется созвездием?
2. Перечислите известные вам созвездия.
3. Как обозначаются звезды в созвездиях?
4. Звездная величина Веги равна 0,14, а звездная величина Денеба составляет 1,33. Какая из этих звезд ярче?
5. Какая из звезд, помещенных в приложении V, является са-

мой слабой? 6*¹. Как вы думаете, почему на фотографии, полученной с помощью телескопа, видны более слабые звезды, чем те, которые можно увидеть, глядя непосредственно в тот же телескоп?



УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Рассчитайте, во сколько раз звезда второй звездной величины ярче звезды четвертой величины.
2. Проведите такой же расчет для звезд первой и шестой величины. *Указание.* Используйте при этом более точное значение отношения светового потока от звезд двух соседних величин: 2,512. Округлите полученное в результате число до целого и запомните его.
3. Считая, что разница в звездных величинах Солнца и Сириуса составляет 25, рассчитайте, во сколько раз от Солнца приходит больше энергии, чем от самой яркой звезды.



ЗАДАНИЕ 3

Найдите в библиотеке и прочитайте мифы о происхождении названий созвездий.

ЗАДАНИЕ 4

Найдите на небе звезды: Арктур, Бетельгейзе и Сириус. Какого они цвета?

§ 4. НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ И ЗВЕЗДНЫЕ КАРТЫ

Невооруженным глазом на всем небе можно видеть примерно 6000 звезд, но мы видим лишь половину из них, потому что другую половину звездного неба закрывает от нас Земля. Вследствие ее вращения вид звездного неба меняется. Одни звезды только еще появляются из-за горизонта (восходят) в восточной его части, другие в это время находятся высоко над головой, а третьи уже скрываются за горизонтом в западной стороне (заходят). При этом нам кажется, что звездное небо вращается как единое целое. Теперь каждому хорошо известно, что вращение небосвода — явление кажущееся, вызванное вращением Земли.

¹ Звездочкой отмечены вопросы и задачи повышенной трудности.

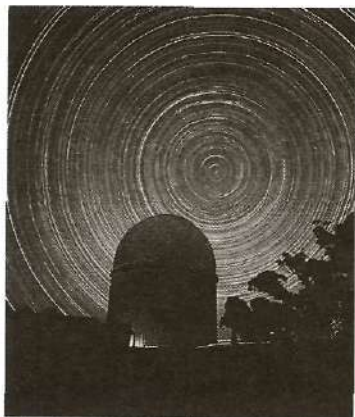


Рис. 2.3. Фотография
суточного вращения неба

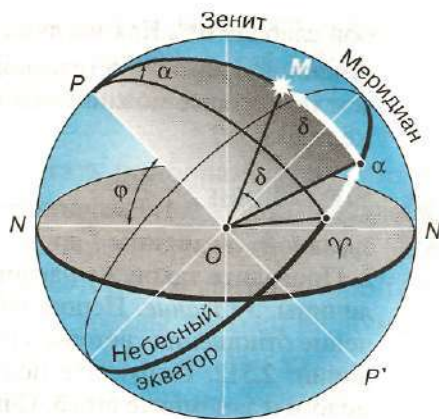


Рис. 2.4. Система экваториальных
координат

Картину того, что в результате суточного вращения Земли происходит со звездным небом, позволяет запечатлеть фотоаппарат.

На полученном снимке каждая звезда оставила свой след в виде дуги окружности (рис. 2.3). Общий центр всех этих концентрических дуг находится на небе неподалеку от Полярной звезды. Эта точка, в которую направлена ось вращения Земли, получила название **северный полюс мира**. Дуга, которую описала Полярная звезда, имеет наименьший радиус. Но и эта дуга, и все остальные — независимо от их радиуса и кривизны — составляют одну и ту же часть окружности. Если бы удалось сфотографировать пути звезд на небе за целые сутки, то на фотографии получились бы полные окружности — 360° . Ведь сутки — это период полного оборота Земли вокруг своей оси. За час Земля повернется на $1/24$ часть окружности, т. е. на 15° . Следовательно, длина дуги, которую звезда опишет за это время, составит 15° , а за полчаса — $7,5^\circ$.

Для указания положения светил на небе используют систему координат, аналогичную той, которая используется в географии, — **систему экваториальных координат**.

Как известно, положение любого пункта на земном шаре можно указать с помощью географических координат — широты и долготы. Географическая долгота (λ) отсчитывается вдоль экватора от начального (Гринвичского) меридиана, а географическая широта (ϕ) — по меридианам от экватора к полюсам Земли. Так, например, Москва имеет следующие координаты: $37^\circ 30'$ восточной долготы и $55^\circ 45'$ северной широты.

Введем систему экваториальных координат, которая указывает положение светил на небесной сфере относительно друг друга. Проведем через центр небесной сферы (рис. 2.4) линию, параллельную оси вращения Земли, — **ось мира**. Она пересечет небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках, которые называются **полюсами мира** — P и P' . Северным полюсом мира называют тот, вблизи которого находится Полярная звезда. Плоскость, проходящая через центр сферы параллельно плоскости экватора Земли, в сечении со сферой образует окружность, называемую **небесным экватором**. Небесный экватор (подобно земному) делит небесную сферу на два полушария: Северное и Южное. Угловое расстояние светила от небесного экватора называется **склонением**, которое обозначается буквой δ . Склонение отсчитывается по кругу, проведенному через светило и полюса мира, оно аналогично географической широте. Склонение считается положительным у светил, расположенных к северу от небесного экватора, отрицательным — у расположенных к югу.

Вторая координата, которая указывает положение светила на небе, аналогична географической долготе. Эта координата называется **прямым восхождением** и обозначается буквой α . Прямое восхождение отсчитывается по небесному экватору от точки весеннего равноденствия γ' , в которой Солнце ежегодно бывает 21 марта (в день весеннего равноденствия). Отсчет прямого восхождения ведется в направлении, противоположном видимому вращению небесной сферы. Поэтому светила восходят (и заходят) в порядке возрастания их прямого восхождения. В астрономии принято выражать прямое восхождение не в градусной мере, а в часовой. Вы помните, что вследствие вращения Земли 15° соответствуют 1 ч, а 1° — 4 мин. Следовательно, прямое восхождение,

равное, например, 12 ч, составляет 180° , а 7 ч 40 мин соответствует 115° .

Принцип создания карты звездного неба весьма прост. Спроектируем сначала все звезды на глобус: там, где луч, направленный на звезду, пересечет поверхность глобуса, будет находиться изображение этой звезды. Обычно на звездном глобусе изображаются не только звезды, но и сетка экваториальных координат. По сути дела, звездным глобусом является модель небесной сферы, которая используется на уроках астрономии в школе. На этой модели нет изображений звезд, но зато представлены ось мира, небесный экватор и другие круги небесной сферы.

Пользоваться звездным глобусом не всегда удобно, поэтому в астрономии (как и в географии) широкое распространение получили карты и атласы. Карту земной поверхности можно получить, если все точки глобуса Земли спроектировать на плоскость (поверхность цилиндра или конуса). Проведя ту же операцию со звездным глобусом, можно получить карту звездного неба. Познакомимся с простейшей звездной картой, помещенной в «Школьном астрономическом календаре».

Расположим плоскость, на которой мы хотим получить карту, так, чтобы она касалась поверхности глобуса в точке, где находится северный полюс мира. Теперь надо спроектировать все звезды и сетку координат с глобуса на эту плоскость. Получим карту, подобную географическим картам Арктики или Антарктики, на которых в центре располагается один из полюсов Земли. В центре нашей звездной карты будет располагаться северный полюс мира, рядом с ним Полярная звезда, чуть дальше остальные звезды Малой Медведицы, а также звезды Большой Медведицы и других созвездий, которые находятся неподалеку от полюса мира. Сетка экваториальных координат представлена на карте радиально расходящимися от центра лучами и концентрическими окружностями. На краю карты против каждого луча написаны числа, обозначающие прямое восхождение (от 0 до 23 ч). Луч, от которого начинается отсчет прямого восхождения, проходит через точку весеннего равноденствия, обозначенную Υ . Склонение отсчитывается по этим лучам от окружности, которая изображает небесный экватор и имеет обозначение 0° . Остальные окружности

также имеют оцифровку, которая показывает, какое склонение имеет объект, расположенный на этой окружности.

В зависимости от звездной величины звезды изображают на карте кружками различного диаметра. Те из них, которые образуют характерные фигуры созвездий, соединены сплошными линиями. Границы созвездий обозначены пунктиром.



ВОПРОСЫ

1. Какие координаты светила называются экваториальными? 2. Меняются ли экваториальные координаты звезды в течение суток? 3. Какие особенности суточного движения светил позволяют использовать систему экваториальных координат? 4. Почему на звездной карте не показано положение Земли? 5. Почему на звездной карте изображены только звезды, но нет ни Солнца, ни Луны, ни планет? 6. Какое склонение — положительное или отрицательное — имеют звезды, находящиеся к центру карты ближе, чем небесный экватор?



УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Выразите в часовой мере 90° , 103° . 2. Выразите в угловой мере прямое восхождение, равное 5 ч 24 мин, 18 ч 36 мин. 3. Угловое расстояние Сириуса (α Большого Пса) от Полярной звезды составляет 106° . Положительное или отрицательное склонение имеет Сириус? 4. По координатам, приведенным в списке ярких звезд (приложение V), найдите некоторые из них на звездной карте. 5. Определите по карте координаты нескольких ярких звезд. Сравните полученные данные с координатами, приведенными в их списке.



ЗАДАНИЕ 5

Сделайте снимок звездного неба. Для фотографирования выберите ясную безлунную ночь. Поставьте диафрагму, соответствующую полностью открытому объективу, сфокусируйте его на бесконечность и направьте фотоаппарат на Полярную звезду. Надежно укрепив его в таком положении, откройте затвор на полчаса или час.

ЗАДАНИЕ 6

Найдите на модели небесной сферы ее основные круги, линии и точки: горизонт, небесный экватор, небесный меридиан, отвесную линию, ось мира, зенит, юг, запад, север, восток.

§ 5. ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗД НА РАЗЛИЧНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ШИРОТАХ

1. Высота полюса мира над горизонтом

Рассмотрим, какова высота полюса мира над горизонтом по рисунку 2.5, где часть небесной сферы и земной шар изображены в проекции на плоскость небесного меридиана. Пусть OP — ось мира, параллельная оси Земли; OQ — проекция части небесного экватора, параллельного экватору Земли; OZ — отвесная линия. Тогда высота полюса мира над горизонтом $h_p = \angle PON$, а географическая широта $\varphi = \angle Q_1O_1O$. Очевидно, что эти углы (PON и Q_1O_1O) равны между собой, поскольку их стороны взаимно перпендикулярны ($OO_1 \perp ON$, а $OQ \perp OP$). Отсюда следует, что *высота полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения*: $h_p = \varphi$. Таким образом, географическую широту пункта наблюдения можно определить, если измерить высоту полюса мира над горизонтом.

В зависимости от места наблюдателя на Земле меняется вид звездного неба и характер суточного движения звезд.

Проще всего разобраться в том, что и как происходит, на полюсах Земли. Полюс — такое место на земном шаре, где ось мира совпадает с отвесной линией, а небесный экватор — с горизонтом (рис. 2.6). Для наблюдателя, находящегося на Север-

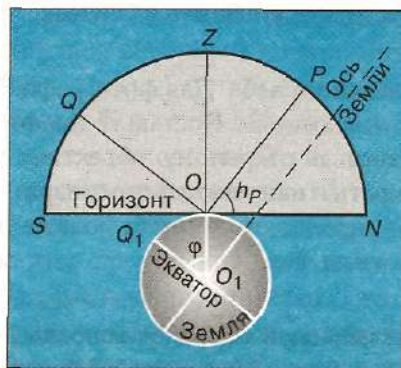


Рис. 2.5. Высота полюса мира над горизонтом

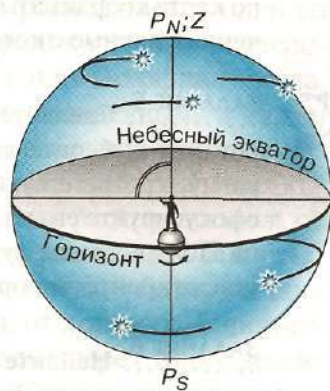


Рис. 2.6. Суточное движение светил на полюсе Земли



Рис. 2.7. Суточное движение светил в средних широтах

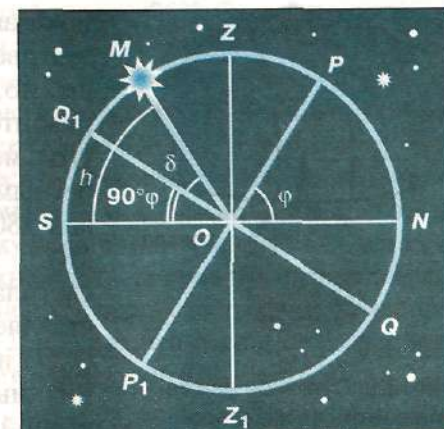


Рис. 2.8. Высота светила в кульминации

ном полюсе, Полярная звезда видна близ зенита. Здесь над горизонтом находятся только звезды Северного полушария небесной сферы (с положительным склонением). На Южном полюсе, наоборот, видны только звезды с отрицательным склонением. В обоих случаях, двигаясь вследствие вращения Земли параллельно небесному экватору, звезды остаются на неизменной высоте над горизонтом, не восходят и не заходят.

Отправимся с Северного полюса в привычные средние широты. Высота Полярной звезды над горизонтом будет постепенно уменьшаться, одновременно угол между плоскостями горизонта и небесного экватора будет увеличиваться. Как видно из рисунка 2.7, в средних широтах (в отличие от Северного полюса) лишь часть звезд Северного полушария неба никогда не заходит. Все остальные звезды как Северного, так и Южного полушария восходят и заходят.

2. Высота светила в кульминации

При своем суточном движении светила дважды пересекают небесный меридиан — над точками юга и севера. Момент пересечения небесного меридиана называется *кульминацией светила*. В момент верхней кульминации над точкой юга светило достигает наибольшей высоты над горизонтом. На рисунке 2.8



Рис. 2.9. Суточное движение светил на экваторе

показано положение светила в момент верхней кульминации. Как известно, высота полюса мира над горизонтом (угол PON): $h_p = \varphi$. Тогда угол между горизонтом (NS) и небесным экватором (QQ_1) будет равен $180^\circ - \varphi - 90^\circ = 90^\circ - \varphi$. Угол MOS , который выражает высоту светила M в кульминации, представляет собою сумму двух углов: Q_1OS и MOQ_1 . Величину первого из них мы только что определили, а второй является не чем иным, как склонением светила M , равным δ .

Таким образом, мы получаем следующую формулу, связывающую высоту светила в кульминации с его склонением и географической широтой места наблюдения:

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

Зная склонение светила и определив из наблюдений его высоту в кульминации, можно узнать географическую широту места наблюдения.

Продолжим наше воображаемое путешествие и отправимся из средних широт к экватору, географическая широта которого 0° . Как следует из только что выведенной формулы, здесь ось мира располагается в плоскости горизонта, а небесный экватор проходит через зенит. На экваторе в течение суток все светила побывают над горизонтом (рис. 2.9).



Вопросы

1. В каких точках небесный экватор пересекается с линией горизонта? 2. Как располагается ось мира относительно оси вращения Земли? относительно плоскости небесного меридиана? 3. Какой круг небесной сферы все светила пересекают дважды в сутки? 4. Как располагаются суточные пути звезд относительно небесного экватора? 5. Как по виду звездного неба и его вращению установить, что наблюдатель находится на Северном полюсе Земли? 6. В каком пункте земного шара не видно ни одной звезды Северного небесного полушария?



Упражнение 4

1. Географическая широта Киева 50° . На какой высоте в этом городе происходит верхняя кульминация звезды

Антарес, склонение которой равно -26° ? Сделайте соответствующий чертеж. 2. Высота звезды Альтаир в верхней кульминации составляла 12° , склонение этой звезды равно $+9^\circ$. Какова географическая широта места наблюдения? Сделайте необходимый чертеж. 3. Определите склонение звезды, верхняя кульминация которой наблюдалась в Москве (географическая широта 56°) на высоте 47° над точкой юга. 4. Каково склонение звезд, которые в вашем городе кульминируют в зените? в точке юга? 5*. Какому условию должно удовлетворять склонение звезды, чтобы она была незаходящей для места с географической широтой φ ? невосходящей? 6*. Докажите, что высота светила в нижней кульминации выражается формулой $h = \varphi + \delta - 90^\circ$.

§ 6. ГОДИЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА ПО НЕБУ. ЭКЛИПТИКА

Еще в глубокой древности, наблюдая за Солнцем, люди обнаружили, что его полуденная высота в течение года меняется, как меняется и вид звездного неба: в полночь над южной частью горизонта в различное время года видны звезды разных созвездий — те, которые видны летом, не видны зимой, и наоборот. На основе этих наблюдений был сделан вывод о том, что Солнце перемещается по небу, переходя из одного созвездия в другое, и завершает полный оборот в течение года. Круг небесной сферы, по которому происходит видимое годовое движение Солнца, назвали *эклиптикой*.

Созвездия, по которым проходит эклиптика, получили название *зодиакальных* (от греческого слова «зоон» — животное). Каждое зодиакальное созвездие Солнце пересекает примерно за месяц. В XX в. к их числу добавилось еще одно — Змееносец.

Как вы уже знаете, перемещение Солнца на фоне звезд — явление кажущееся. Происходит оно вследствие годового обращения Земли вокруг Солнца (рис. 2.10).

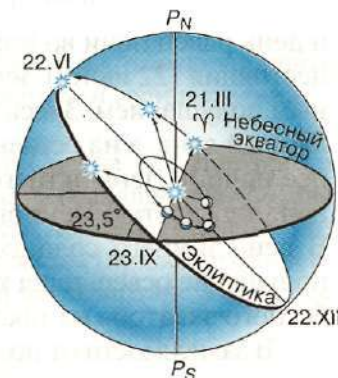


Рис. 2.10. Движение Солнца по эклиптике

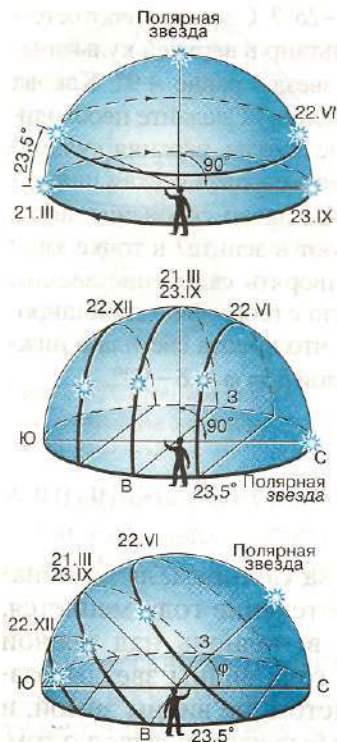


Рис. 2.11. Суточное движение Солнца на различных широтах

и день равен ночи во всех пунктах Земли. В день летнего солнцестояния (22 июня) Земля повернута к Солнцу своим Северным полушарием. Здесь стоит лето, на Северном полюсе — полярный день, а на остальной территории полушария дни длиннее ночи. В день летнего солнцестояния Солнце поднимается над плоскостью земного (и небесного) экватора на $23^{\circ}30'$. В день зимнего солнцестояния (22 декабря), когда Северное полушарие освещается хуже всего, Солнце находится ниже небесного экватора на такой же угол $23^{\circ}30'$.

В зависимости от положения Солнца на эклиптике меняется его высота над горизонтом в полдень — момент верхней кульминации. Измерив полуденную высоту Солнца и зная его склонение в этот день, можно вычислить географическую широту

Поэтому эклиптика представляет собой тот круг небесной сферы, по которому она пересекается с плоскостью земной орбиты. За сутки Земля проходит примерно $1/365$ часть своей орбиты. Вследствие этого Солнце перемещается на небе примерно на 1° за каждые сутки. Промежуток времени, в течение которого оно обходит полный круг по небесной сфере, назвали *годом*.

Из курса географии вам известно, что ось вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты под углом $66^{\circ}30'$. Следовательно, земной экватор имеет по отношению к плоскости орбиты наклон, равный $23^{\circ}30'$. Таков наклон эклиптики к небесному экватору, который она пересекает в двух точках: весеннего и осеннего равноденствий. В эти дни (обычно — 21 марта и 23 сентября) Солнце находится на небесном экваторе и имеет склонение 0° . Оба полушария Земли освещаются Солнцем одинаково: граница дня и ночи проходит точно через полюса,

места наблюдения. Этот способ издавна использовался для определения местоположения наблюдателя на суше и на море.

Суточные пути Солнца в дни равноденствий и солнцестояний на полюсе Земли, на ее экваторе и в средних широтах показаны на рисунке 2.11.



ВОПРОСЫ

1. Почему полуденная высота Солнца в течение года меняется? 2. В каком направлении происходит видимое годовое движение Солнца относительно звезд?



УПРАЖНЕНИЕ 5

1. На какой высоте Солнце бывает 22 июня на Северном полюсе? 2. На какой географической широте Солнце бывает в полдень в зените 21 марта? 22 июня? 3. В какой день года проводились наблюдения, если полуденная высота Солнца на географической широте 49° была равна $17^{\circ}30'$? 4. Полуденная высота Солнца равна 30° , а его склонение равно -19° . Определите географическую широту места наблюдения. 5. Определите полуденную высоту Солнца в Архангельске (географическая широта 65°) и Ашхабаде (географическая широта 38°) в дни летнего и зимнего солнцестояния. Каковы различия высоты Солнца: а) в один и тот же день в этих городах; б) в каждом из городов в дни солнцестояний? Какие выводы можно сделать из полученных результатов?



ЗАДАНИЕ 7

Найдите на звездной карте, помещенной в «Школьном астрономическом календаре», эклиптику и проследите, по каким созвездиям она проходит.

ЗАДАНИЕ 8

Составьте в тетради таблицу, в которую запишите координаты Солнца в дни равноденствий и солнцестояний.

ЗАДАНИЕ 9

Определите положение Солнца на эклиптике и его экваториальные координаты на сегодняшний день. Для этого достаточно мысленно провести прямую от полюса мира к соответствующей дате на краю карты (приложить линейку). Солнце должно располагаться на эклиптике в точке ее пересечения с этой прямой.

ЗАДАНИЕ 10

Установите звездную карту на полночь того числа, когда выполняется это задание. Запишите несколько созвездий, которые будут видны в это время в южной, запад-

ной, северной и восточной стороне над горизонтом. Затем установите звездную карту на полночь той даты, которая отличается от первой ровно на полгода. Снова запишите созвездия, видимые в различных сторонах горизонта. Сравнивая эти две записи, укажите, какие изменения произошли в положении созвездий. Чем можно объяснить эти изменения?

§ 7. Движение и фазы Луны

Луна — ближайшее к Земле небесное тело, ее единственный естественный спутник. Находясь на расстоянии около 380 тыс. км от Земли, Луна обращается вокруг нее в том же направлении, в котором Земля вращается вокруг своей оси. За каждые сутки она перемещается относительно звезд примерно на 13° , совершая полный оборот за 27,3 суток. Этот промежуток времени — период обращения Луны вокруг Земли в системе отсчета, связанной со звездами, — называется *звездным* или *сидерическим* (от лат. *sidus* — звезда) *месяцем*.

Собственного свечения Луна не имеет, а Солнце освещает только половину лунного шара. Поэтому по мере ее движения по орбите вокруг Земли происходит изменение вида Луны — *смена лунных фаз*. В какое время суток Луна бывает над горизонтом, каким мы видим обращенное к Земле полушарие Луны — полностью освещенным или освещенным частично — все это зависит от положения Луны на орбите (рис. 2.12).

Если она расположена так, что обращена к Земле своей темной, неосвещенной стороной (положение 1), то мы не можем видеть Луну, но знаем, что она находится на небе где-то рядом с Солнцем. Эта фаза Луны называется *новолунием*. Двигаясь по орбите вокруг Земли,

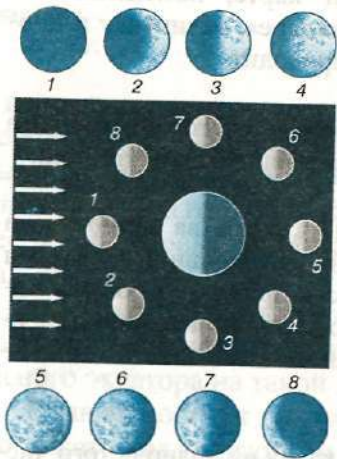


Рис. 2.12. Смена лунных фаз

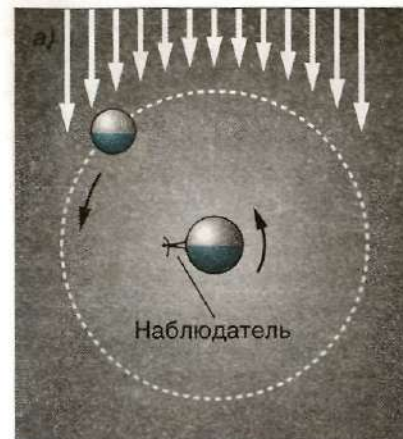


Рис. 2.13. Вечерняя видимость Луны

Луна примерно через трое суток придет в положение 2. В это время ее можно будет видеть по вечерам неподалеку от заходящего Солнца в виде узкого серпа, обращенного выпуклостью вправо (рис. 2.13). При этом нередко бывает видна и остальная часть Луны, которая светится значительно слабее, так называемым пепельным светом. Это наша планета, отражая солнечные лучи, освещает ночную сторону своего спутника.

День ото дня серп Луны увеличивается по ширине, и его угловое расстояние от Солнца возрастает. Через неделю после новолуния мы видим половину освещенного полушария Луны — наступает фаза, называемая *первой четвертью* (рис. 2.12, положение 3).

В дальнейшем доля освещенного полушария Луны, видимая с Земли, продолжает увеличиваться до тех пор, пока не наступит *полнолуние* (положение 5). В этой фазе Луна находится на небе в стороне, противоположной Солнцу, и видна над горизонтом всю ночь — от его захода до восхода. После полнолуния фаза Луны начинает уменьшаться. Сокращается и ее угловое расстояние от Солнца. Сначала на правом крае лунного диска появляется небольшой ущерб, который имеет форму серпа. Постепенно этот ущерб растет (положение 6), а через неделю после полнолуния наступает фаза *последней четверти* (положение 7). В этой фазе, как и в первой четвер-

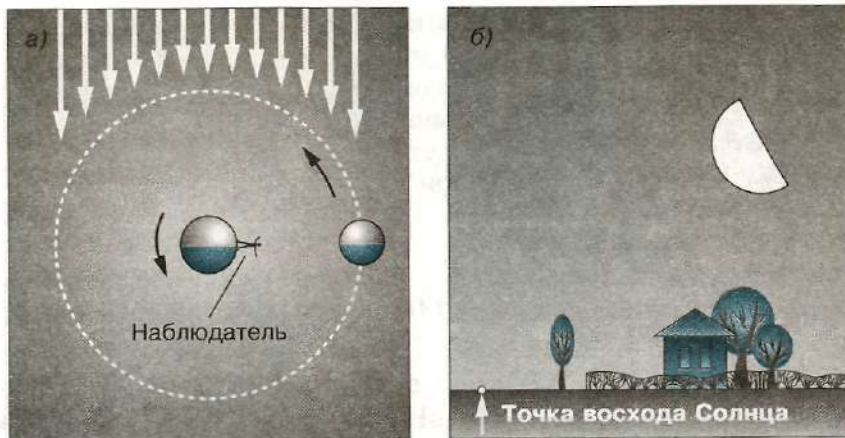


Рис. 2.14. Утренняя видимость Луны

ти, мы снова видим половину освещенного полушария Луны, но теперь уже другую, которая в первой четверти была неосвещенной. Луна восходит поздно и видна в этой фазе по утрам (рис. 2.14). В последующем ее серп, обращенный теперь выпуклостью влево, становится все более и более узким (рис. 2.12, положение 8), постепенно сближаясь с Солнцем. В конце концов он скрывается в лучах восходящего Солнца — снова наступает новолуние.

Полный цикл смены лунных фаз составляет 29,5 суток. Этот промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами называется **синодическим месяцем** (от греч. synodos — соединение). Еще в глубокой древности у многих народов месяц, наряду с сутками и годом, стал одной из основных календарных единиц.

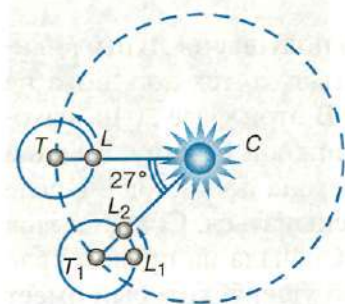


Рис. 2.15. Соотношение сидерического и синодического месяцев

Понять, почему синодический месяц длиннее сидерического, нетрудно, если вспомнить, что Земля движется вокруг Солнца. На рисунке 2.15 взаимное расположение Земли T и Луны L соответствует новолунию. Через 27,3 суток

Луна займет на небе прежнее положение относительно звезд и будет находиться в точке L_1 . За это время Земля, перемещаясь на 1° в сутки, пройдет по орбите дугу в 27° и окажется в точке T_1 . Луне, для того чтобы снова оказаться в новолунии L_2 , придется пройти по орбите такую же дугу (27°). На это потребуется немногим более двух суток, поскольку за сутки Луна смещается на 13° .

С Земли видна лишь одна сторона Луны, однако это не означает, что она не вращается вокруг своей оси. Проведем опыт с глобусом Луны, перемещая его вокруг глобуса Земли так, чтобы к нему всегда была обращена одна сторона лунного глобуса. Этого можно достичь лишь в том случае, если мы будем его поворачивать по отношению ко всем другим предметам, находящимся в классе. Полный оборот глобуса Луны вокруг оси завершится одновременно с тем, как завершится один оборот вокруг глобуса Земли. Это доказывает, что период вращения Луны вокруг своей оси равен сидерическому периоду ее обращения вокруг Земли — 27,3 суток.



ВОПРОСЫ

1. В каких пределах изменяется угловое расстояние Луны от Солнца?
2. Как по фазе Луны определить ее примерное угловое расстояние от Солнца?
3. На какую примерно величину меняется прямое восхождение Луны за неделю?
4. Какие наблюдения необходимо провести, чтобы заметить движение Луны вокруг Земли?
5. Какие наблюдения доказывают, что на Луне происходит смена дня и ночи?
6. Почему пепельный свет Луны слабее, чем свечение остальной части Луны, видимой вскоре после новолуния?



УПРАЖНЕНИЕ 6

1. Нарисуйте вид Луны между первой четвертью и полнолунием. В какое время суток она видна в такой фазе?
2. Луна видна вечером как серп, который обращен выпуклостью вправо и расположен невысоко над горизонтом. В какой стороне горизонта находится Луна?
3. Утром перед восходом Солнца виден серп Луны. Увеличится или уменьшится его ширина на следующие сутки?
4. Сегодня была видна полная Луна. В какое время суток она будет видна через неделю? Нарисуйте, как она будет выглядеть в это время.
- 5*. Сколько времени для наблюдателя, находящегося на Луне, проходит от одной кульминации звезды до следующей?

§ 8. ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА И ЛУНЫ

Если бы плоскость орбиты, по которой Луна движется вокруг Земли, совпадала с плоскостью орбиты, по которой Земля обращается вокруг Солнца, то ежемесячно в момент новолуния происходило бы солнечное затмение, а в момент полнолуния — лунное. Этого не случается потому, что плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости орбиты Земли под углом около 5° .

Именно поэтому, как показано на переднем плане рисунка 2.16, тень Луны в новолуние может пройти выше Земли, а в полнолуние сама Луна может пройти ниже земной тени. В это время положение орбиты Луны таково, что она пересекает плоскость орбиты Земли в фазах первой и последней четверти. В каких же случаях затмения Солнца и Луны могут произойти?

Вы уже знаете, что направление оси вращения Земли в пространстве остается при движении нашей планеты вокруг

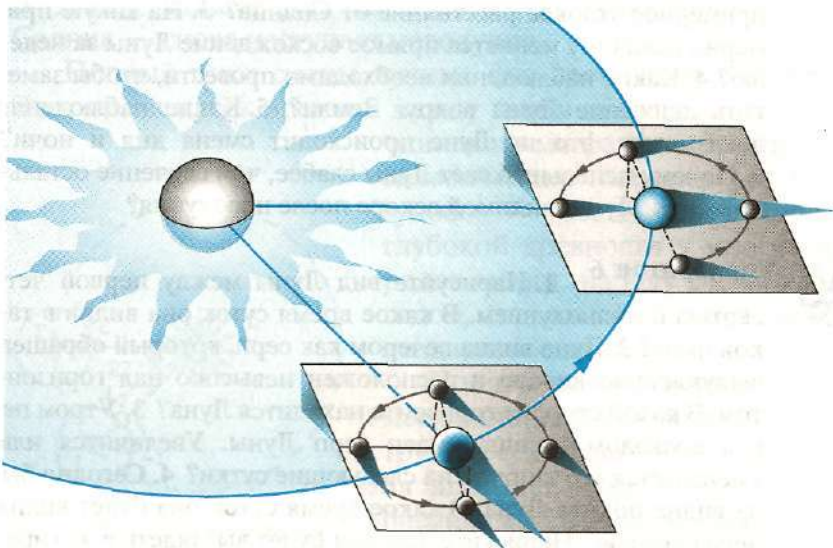


Рис. 2.16. Периодичность затмений Солнца и Луны

Солнца неизменным. Практически не меняется в течение года и положение плоскости лунной орбиты. Рассмотрим, как это повлияет на возможность наступления затмений. За три месяца Земля пройдет четверть своего пути вокруг Солнца и займет положение, показанное в правой части рисунка 2.16. Теперь плоскость лунной орбиты будет расположена так, что линия ее пересечения с плоскостью земной орбиты направлена на Солнце. Поэтому Луна будет пересекать плоскость орбиты Земли (или находиться близ нее) в новолуние и полнолуние. Иначе говоря, двигаясь по небу, Луна приходит в ту точку эклиптики, где в этот момент находится Солнце, и загораживает его от нас. В том случае, если Солнце целиком закрыто Луной, затмение называется **полным**. Если же случится так, что она закроет лишь часть Солнца, то затмение будет **частным**. Когда Луна пересекает эклиптику в точке, диаметрально противоположной Солнцу, она сама полностью или частично скрывается в тени Земли. Лунные затмения, как и солнечные, могут быть полными или частными.

Условия, благоприятные для наступления затмений, сохраняются примерно на протяжении месяца. За это время может произойти по крайней мере одно солнечное затмение или два солнечных и одно лунное. Следующее необходимое для наступления затмений расположение лунной орбиты повторится снова лишь спустя примерно полгода (177—178 суток), когда Земля пройдет половину своего пути вокруг Солнца. В течение года на Земле обычно происходит два-три солнечных затмения и одно-два лунных. Максимальное число затмений за год — семь.

Лунные затмения, хотя и происходят реже солнечных, но видны чаще. Луна, попавшая при затмении в земную тень, видна на всем полушарии Земли, где она в это время находится над горизонтом. Погружаясь в земную тень, Луна приобретает красноватую окраску различных оттенков. Цвет зависит от состояния земной атмосферы, которая, преломляя лучи Солнца и рассеивая их, все же пропускает красные лучи внутрь конуса тени. Несколько часов затрачивает Луна, чтобы пересечь тень Земли. Полная фаза затмения длится около полутора часов.

Полное затмение Солнца можно наблюдать лишь там, где на Землю падает небольшое по размерам (диаметром не



Рис. 2.17. Полоса полного солнечного затмения 3 марта 1997 г.

более 270 км) пятно лунной тени. Тень Луны со скоростью примерно 1 км/с движется по земной поверхности с запада на восток, поэтому в каждом пункте Земли полное затмение продолжается лишь несколько минут (на экваторе максимальная продолжительность составляет 7 мин 40 с). Путь, который проходит тень Луны, называется *полосой полного солнечного затмения* (рис. 2.17). В разные годы лунная тень пробегает по различным районам земного шара, поэтому полные солнечные затмения видны реже лунных. Так, например, в окрестностях Москвы в последний раз затмение было 19 августа 1887 г., а в следующий раз произойдет только 16 сентября 2126 г. Полутень Луны имеет диаметр значительно больше тени — около 6000 км. Там, куда попала полутень Луны, происходит частное затмение Солнца. Их можно видеть каждые два-три года.

Через каждые 6585,3 суток (18 лет 11 суток 8 часов) затмения повторяются в прежнем порядке. Таков промежуток времени, в течение которого плоскость лунной орбиты делает полный оборот в пространстве. Знание закономерностей движения Луны и Земли позволяет ученым с высокой степенью точности на сотни лет вперед вычислять моменты на-

ступления затмений и знать, где на земном шаре они будут видны. Сведения о затмениях на ближайший год и условия их видимости содержатся, в частности, в «Школьном астрономическом календаре».

Располагая необходимыми данными о предстоящих затмениях, ученые получают возможность организовать экспедиции в полосу полного солнечного затмения. В момент полной фазы можно наблюдать внешние, наиболее разреженные слои атмосферы Солнца — *солнечную корону*, которая в обычных условиях не видна. В прошлом многие важные сведения о природе Солнца были получены именно во время полных затмений.



ВОПРОСЫ

1. Почему затмения Луны и Солнца не происходят каждый месяц?
2. Каков минимальный промежуток времени между солнечным и лунным затмениями?
3. Можно ли с обратной стороны Луны видеть полное солнечное затмение?
4. Какое явление будут наблюдать находящиеся на Луне космонавты, когда с Земли видно лунное затмение?



УПРАЖНЕНИЕ 7

1. Можно ли с Северного полюса Земли наблюдать солнечное затмение 15 октября? 15 апреля? Ответ поясните.
2. Можно ли с Северного полюса видеть лунные затмения, происходящие в июне? в ноябре? Ответ поясните.
3. Укажите три признака, по которым можно отличить фазу затмения Луны от ее обычных фаз.

§ 9. ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ

1. Точное время и определение географической долготы

Солнце всегда освещает только половину земного шара: на одном полушарии — день, а на другом в это время ночь, соответственно всегда есть точки, где в данный момент полдень, и Солнце находится в верхней кульминации. По мере того как Земля вращается вокруг оси, полдень наступает в тех местах, которые лежат западнее. По положению Солнца

(или звезд) на небе определяется местное время для любой точки земного шара. Местное время в двух пунктах (T_1 и T_2) отличается ровно на столько, на сколько отличается их географическая долгота:

$$T_1 - T_2 = \lambda_1 - \lambda_2.$$

Ясно, что полдень наступает в данном пункте Земли позже, чем в другом, ровно на столько, сколько времени нужно планете, чтобы повернуться на угол, соответствующий разности их долгот. Так, например, в Санкт-Петербурге, который находится на $8^\circ 45'$ западнее Москвы, полдень наступает на 35 минут позднее.

Определив из наблюдений местное время в данном пункте и сравнив его с местным временем другого, географическая долгота которого известна, можно вычислить географическую долготу пункта наблюдения. Условились отсчитывать долготу от начального (нулевого) меридиана, проходящего через Гринвичскую обсерваторию. Местное время этого меридиана называют всемирным временем — Universal Time (UT). Тогда

$$T_1 = UT + \lambda_1,$$

иначе говоря, местное время любого пункта равно всемирному времени в этот момент плюс долгота данного пункта от начального меридиана, выраженная в часовой мере.

Точный счет времени осложняется тем, что его прежний эталон — период вращения Земли — оказался не вполне надежным. Одной из основных единиц времени уже давно были избраны солнечные сутки — промежуток времени, который проходит от одной верхней кульминации Солнца до другой. Но по мере возрастания точности астрономических наблюдений стало очевидно, что продолжительность суток не остается постоянной. Скорость вращения нашей планеты меняется на протяжении года, а кроме того, происходит, хотя и очень медленно, замедление ее вращения. Поэтому понятно, что определение секунды как единицы времени, составляющей $1/86\,400$ часть суток, потребовало уточнения. Современное определение секунды вам известно из курса физики. Использование атомных часов, которыми располагают службы точного времени и государственный эталон времени и часто-

ты, обеспечивает исключительно малую погрешность в счете времени (около $5 \cdot 10^{-9}$ с за сутки). Транслируемые по радио сигналы точного времени передаются именно с атомных часов.

Принимая эти сигналы и определяя местное время по наблюдениям моментов кульминации звезд, можно вычислить точные координаты любого пункта земной поверхности. Эти пункты служат опорными точками при составлении карт, прокладке трасс газопроводов, автомобильных и железных дорог, строительстве крупных объектов и ряде других работ. Сигналы точного времени, наряду с другими средствами (радиомаяками, навигационными спутниками и т. п.) необходимы в авиационной и морской навигации.

Если бы в своей повседневной жизни мы пользовались местным временем, то по мере передвижения на запад или восток приходилось бы непрерывно передвигать стрелки часов. Возникающие при этом неудобства столь очевидны, что в настоящее время практически все население земного шара пользуется *поясным временем*.

Поясная система счета времени была предложена в 1884 г. Согласно этой системе весь земной шар был разделен по долготе на 24 часовых пояса (по числу часов в сутках), каждый из которых занимает примерно 15° . По сути дела, счет времени по этой системе ведется только на 24 основных меридианах, отстоящих друг от друга на 15° по долготе. Время на этих меридианах, которые расположены примерно посередине каждого часового пояса, отличается ровно на один час. Местное время основного меридиана данного пояса называется *поясным временем*. По нему ведется счет времени на всей территории, относящейся к этому часовому поясу. Поясное время, которое принято в конкретном пункте, отличается от всемирного на число часов, равных номеру его часового пояса:

$$T = UT + n,$$

где UT — всемирное время, а n — номер часового пояса.

Границами часовых поясов являются линии, которые идут от Северного полюса Земли до Южного и отстоят приблизительно на $7,5^\circ$ от основных меридианов. Эти границы



Рис. 2.18. Карта часовых поясов

далеко не всегда проходят строго по меридианам, а проведены по административным границам областей или других регионов так, чтобы на всей их территории действовало одно и то же время (рис. 2.18). Естественно, например, что Москва живет по времени одного (второго) часового пояса. Если же формально следовать принятому правилу деления на часовые пояса, то нужно было бы провести границу пояса так, что город оказался бы разделенным на две неравные части.

В нашей стране поясное время было введено с 1 июля 1919 г. С тех пор границы часовых поясов неоднократно пересматривались и изменялись.

С января 1992 г., когда в России часы были переведены на один час вперед, мы живем по так называемому декретному времени, которое было введено в СССР еще в 1930 г. В конце марта страна переходит на летнее время, стрелки часов переводятся еще на один час вперед. Отменяется летнее время в конце сентября, стрелки возвращают на один час назад. Дни, когда вводится и отменяется летнее время, ежегодно устанавливаются распоряжением правительства.

Московское декретное время, которое показывают часы не только в Москве, но также в Санкт-Петербурге и центральных областях России, отличается от всемирного времени на 3 часа зимой и на 4 часа летом.

2. Календарь

Система счета длительных промежутков времени, согласно которой устанавливается определенная продолжительность месяцев, их порядок в году и начальный момент отсчета лет, называется *календарем*. Календарь, которым мы пользуемся в настоящее время, создан в результате длительных поисков наиболее удобной для этих целей системы. На протяжении истории человечества существовало более 200 различных календарей.

Уже на первом этапе развития цивилизации некоторые народы стали пользоваться лунными календарями. В этих календарях чередовались месяцы продолжительностью 29 и 30 суток. Началом месяца всегда считалось новолуние. Но дело в том, что от одного новолуния до следующего проходит примерно 29,5 суток — такова периодичность смены фаз Луны, связанная с ее обращением вокруг Земли. При таком календаре не получается полного согласования с продолжительностью года, которая составляет приблизительно 365,25 суток. Ведь 12 лунных месяцев содержат всего 354 дня. Для устранения несогласованности между лунным и солнечным годом в различных лунных календарях были предложены необходимые поправки.

В солнечном календаре за основу берется продолжительность тропического года, который представляет собой промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Тропический год составляет 365 суток 5 часов 48 минут 46,1 секунды. Поскольку число суток в году не может быть дробным, во всех календарях большая часть лет содержит 365 суток и вводится правило, по которому определенные годы имеют продолжительность на сутки больше. В зависимости от этого средняя продолжительность года по тому или иному календарю в большей или меньшей степени приближается к продолжительности тропического года.

В Древнем Египте в V тысячелетии до н. э. был введен календарь, который состоял из 12 месяцев по 30 дней в каждом и дополнительных 5 дней в конце года. Такой календарь давал ежегодно отставание в 0,25 суток, или 1 год за 1460 лет.

Непосредственный предшественник современного календаря был разработан в Древнем Риме по приказу императора Юлия Цезаря и потому получил название *юлианского*. Год, согласно этому календарю, состоял из 12 месяцев и содержал 365 или 366 суток. Лишние сутки добавлялись каждые четыре года: такие годы, номер которых делится на четыре, получили название *високосных*.

Это название происходит от латинского слова *bissexus* (второй шестой). Отсюда пошло греческое слово «бисокос», которое в русском языке постепенно превратилось в «високос», «високосный». Дело в том, что тогда считали, сколько дней осталось до первого дня следующего месяца. Дополнительный день в високосном году добавлялся в феврале, после шестого дня перед началом марта и считался не пятым, а еще раз шестым.

С учетом високосных лет продолжительность года по юлианскому календарю (старому стилю) отличалась от продолжительности тропического года всего на 11 минут 14 секунд, что давало ошибку в 1 сутки за 128 лет, или 3 суток примерно за 400 лет. Юлианский календарь был принят в качестве христианского в 325 г. н. э., и ко второй половине XVI в. расхождение достигло уже 10 суток.

Для того чтобы исправить расхождение, папа римский Григорий XIII в 1582 г. ввел новый стиль, календарь, названный по его имени *григорианским*. Для того чтобы уменьшить отличие календарного года от тропического, было решено каждые 400 лет выбрасывать из счета 3 суток путем сокращения числа високосных лет. Простыми, невисокосными условились считать все годы столетий, за исключением тех, у которых число столетий делится на 4 без остатка. Високосным считались 1600 и 2000 гг. В то же время 1700, 1800 и 1900 гг. были простыми.

В России новый стиль был введен только с 1 февраля 1918 г. К этому времени между ним и старым стилем накопилась разница в 13 дней. Эта разница сохранится до 2100 г., который по старому стилю должен был бы считаться висо-

косным, а по новому — простым. Различие между старым и новым стилем обычно указывается, когда мы имеем дело с событиями, относящимися к прошлому. Так, например, мы говорим, что К. Э. Циолковский родился 5 (17) сентября 1857 г.

Год по григорианскому календарю оказывается в среднем на полминуты длиннее тропического, так что расхождение за 400 лет составляет всего 2 часа 53 минуты, или сутки за 3300 лет.

Нумерация лет как по новому, так и по старому стилю ведется от года Рождества Христова, наступления новой эры. В России новая эра была введена указом Петра I, согласно которому после 31 декабря 7208 г. «от сотворения мира» наступило 1 января 1700 г. от Рождества Христова.



ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется введение поясной системы счета времени? 2. Почему в качестве единицы времени используется атомная секунда? 3. В чем заключаются трудности составления точного календаря? 4. Чем отличается счет високосных лет по старому и новому стилю?



УПРАЖНЕНИЕ 8

1. На какую величину отличается время на ваших часах от всемирного времени? 2. Определите по карте географическую долготу вашей школы. Вычислите местное время для этой долготы. На сколько оно отличается от времени, по которому вы живете? 3. Дата рождения Исаака Ньютона по новому стилю — 4 января 1643 г. Какова дата его рождения по старому стилю?



ЗАДАНИЕ 11

Подготовьте доклад об истории календаря.



III. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система — это прежде всего Солнце и девять больших планет, к числу которых относится и Земля.

Кроме больших планет со спутниками, вокруг Солнца обращаются малые планеты (астероиды), которых в настоящее время известно более 6000, и еще большее число комет. Диаметр самых крупных астероидов не превышает 1000 км, а ядра комет еще меньше. Вокруг Солнца движутся также тела размером в десятки и сотни метров, глыбы и камни, множество мелких камешков и пылинок. Чем меньше размеры этих частиц, тем их больше. Межпланетная среда — это крайне разреженный газ, состояние которого определяется излучением Солнца и растекающимися от него потоками вещества.

Движением всех больших и малых тел Солнечной системы управляет Солнце, масса которого в 333 000 раз превышает массу Земли и в 750 раз суммарную массу всех планет.

§ 10. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МИРА

1. Геоцентрическая система мира

Путь к пониманию положения нашей планеты и живущего на ней человечества во Вселенной был очень непростым и подчас весьма драматичным. В древности было естественным считать, что Земля является неподвижной, плоской и находится в центре мира. Казалось, что вообще весь мир создан ради человека. Подобные представления получили название *антропоцентризма* (от греч. *antropos* — человек).

Многие идеи и мысли, которые в дальнейшем отразились в современных научных представлениях о природе, в частности в астрономии, зародились в Древней Греции, еще за несколько веков до нашей эры. Трудно перечислить имена всех мыслителей и их гениальные догадки. Выдающийся математик *Пифагор* (VI в. до н. э.) был убежден, что «в мире правит число». Считается, что именно Пифагор первым высказал мысль о том, что Земля, как и все другие небесные тела, имеет шарообразную форму и находится во Вселенной без всякой опоры.

Другой не менее известный ученый древности, *Демокрит* — основоположник представлений об атомах, живший за 400 лет до нашей эры, — считал, что Солнце во много раз больше Земли, что Луна сама не светится, а лишь отражает солнечный свет, а Млечный Путь состоит из огромного количества звезд.

Обобщить все знания, которые были накоплены к IV в. до н. э., смог выдающийся философ античного мира *Аристотель* (384—322 до н. э.). Его деятельность охватывала все естественные науки — сведения о небе и Земле, о закономерностях движения тел, о животных и растениях и т. д. Главной заслугой Аристотеля как ученого-энциклопедиста было создание единой системы научных знаний.

На протяжении почти двух тысячелетий его мнение по многим вопросам не подвергалось сомнению.

Согласно Аристотелю, все тяжелое стремится к центру Вселенной, где скапливается и образует шарообразную массу — Землю. Планеты размещены на особых сферах, которые вращаются вокруг Земли. Такая система мира получила название *геоцентрической* (от греческого названия Земли — *Гейя*). Аристотель не случайно предложил считать Землю неподвижным центром мира. Если бы Земля перемещалась, то, по справедливому мнению Аристотеля, было бы заметно регулярное изменение взаимного расположения звезд на небесной сфере. Но ничего подобного никто из астрономов не наблюдал. Только в начале XIX в. было наконец-то обнаружено и измерено смещение звезд (*параллакс*), происходящее вследствие движения Земли вокруг Солнца.

Многие обобщения Аристотеля были основаны на таких умозаключениях, которые в то время не могли быть проверены опытом. Так, он утверждал, что движение тела не может

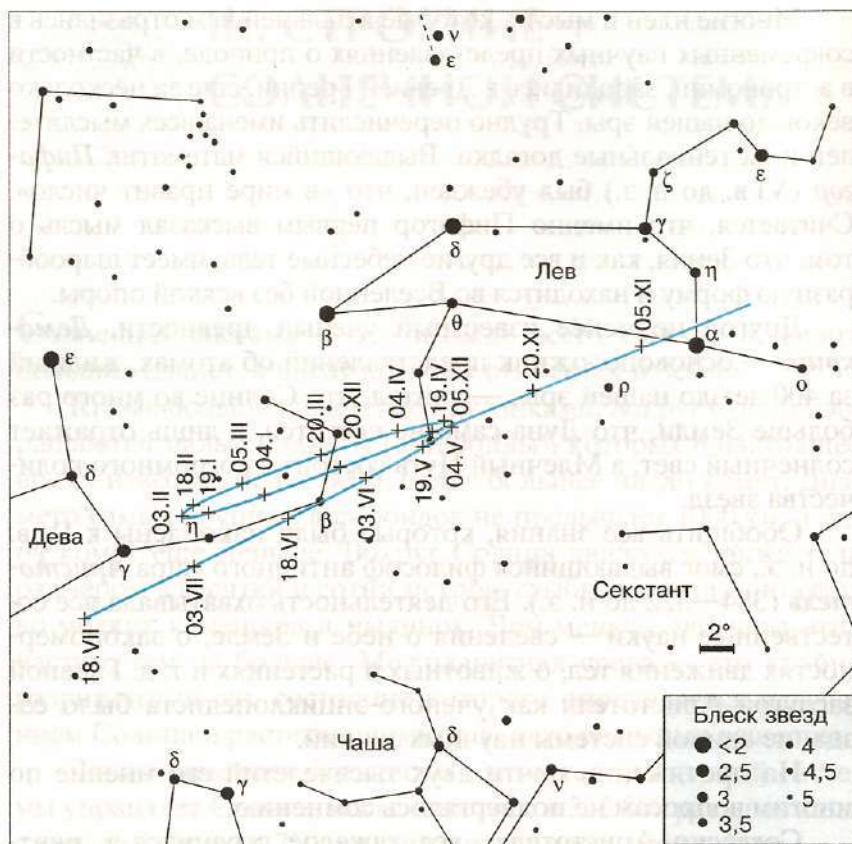


Рис. 3.1. Видимое петлеобразное движение Марса

происходить, если на него не действует сила. Как вы знаете из курса физики, эти представления были опровергнуты только в XVII в. во времена Галилея и Ньютона.

Среди ученых древности выделяется смелостью своих догадок **Аристарх Самосский**, живший в III в. до н. э. Он первым определил расстояние до Луны, вычислил размеры Солнца, которое, по его данным, оказалось в 300 с лишним раз больше Земли по объему. Вероятно, эти данные стали одним из оснований для вывода о том, что Земля вместе с другими планетами движется вокруг этого самого крупного тела. В наши дни Аристарха Самосского стали называть «Коперником античного мира».

К сожалению, труды этого замечательного ученого до нас практически не дошли, и более полутора тысяч лет человечество было уверено, что Земля — это неподвижный центр мира. В немалой степени этому способствовало математическое описание видимого движения светил, которое разработал для геоцентрической системы мира один из выдающихся математиков древности — **Клавдий Птолемей** во II в. н. э. Наиболее сложной задачей оказалось объяснение петлеобразного движения планет (рис. 3.1).

Птолемей в своем знаменитом сочинении «Математический трактат по астрономии» (оно более известно как «Альмагест») утверждал, что каждая планета равномерно движется по *эпициклу* — малому кругу, центр которого движется вокруг Земли по *деференту* — большому кругу (рис. 3.2). Тем самым ему удалось объяснить особый характер движения планет, которым они отличались от Солнца и Луны. Система Птолемея давала чисто кинематическое описание движения планет — иного наука того времени предложить не могла.



Рис. 3.2. Система Птолемея

2. Гелиоцентрическая система мира

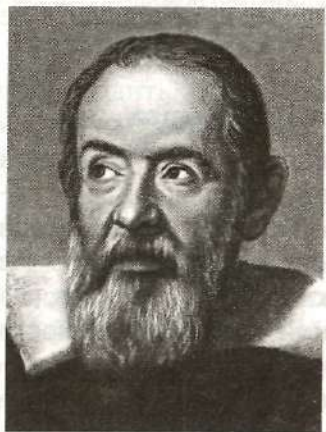
Вы уже убедились, что использование модели небесной сферы при описании движения Солнца, Луны и звезд позволяет вести многие полезные для практических целей расчеты, хотя реально такой сферы не существует. То же справедливо и в отношении эпициклов и деферентов, на основе которых можно с определенной степенью точности рассчитывать положение планет. Однако с течением времени требования к точности этих расчетов постоянно возрастали, приходилось добавлять все новые и новые эпициклы для каждой планеты. Все это усложняло систему



Николай Коперник

Птолемея, делая ее излишне громоздкой и неудобной для практических расчетов. Тем не менее геоцентрическая система оставалась незыблемой еще около 1000 лет. Ведь после расцвета античной культуры в Европе наступил длительный период, в течение которого не было сделано ни одного существенного открытия в астрономии и многих других науках.

Только в эпоху Возрождения начинается подъем в развитии наук, в котором астрономия становится одним из лидеров. В 1543 г. была издана книга выдающегося польского ученого **Николая Коперника** (1473—1543), в которой он обосновал новую — **гелиоцентрическую** — систему мира. Коперник показал, что суточное движение всех светил можно объяснить вращением Земли вокруг оси, а петлеобразное движение планет — тем, что все они, включая Землю, обращаются вокруг Солнца. На рисунке 3.3 показано движение Земли и Марса в тот период, когда, как нам кажется, планета описывает на небе петлю.



Галилео Галилей

Создание гелиоцентрической системы ознаменовало новый этап в развитии не только астрономии, но и всего естествознания. Особо важную роль сыграла идея Коперника о том, что за видимой картиной происходящих явлений, которая кажется нам истинной, надо искать и находить недоступную для непосредственного наблюдения сущность этих явлений.

Гелиоцентрическая система мира, обоснованная, но не доказанная Коперником, получила свое подтверждение и развитие в трудах

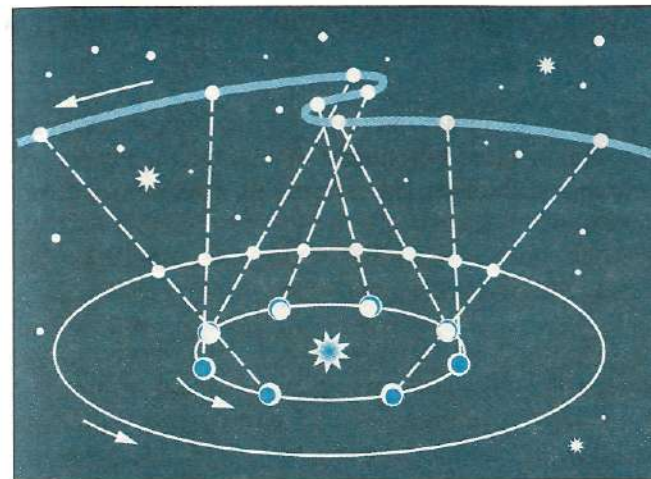


Рис. 3.3. Положения Земли и Марса на орбитах

таких выдающихся ученых, как **Галилео Галилей** и **Иоганн Кеплер**.

Галилей (1564—1642), одним из первых направивший телескоп на небо, истолковал сделанные при этом открытия как доводы в пользу теории Коперника. Открыв смену фаз Венеры, он пришел к выводу, что такая их последовательность может наблюдаться только в случае ее обращения вокруг Солнца. Обнаруженные им четыре спутника планеты Юпитер также опровергали представления о том, что Земля является единственным в мире центром, вокруг которого может происходить вращение других тел. Галилей не только увидел горы на Луне, но даже измерил их высоту. Наряду с несколькими другими учеными он также наблюдал пятна на Солнце и заметил их перемещение по солнечному диску. На этом основании он заключил, что Солнце вращается и, следовательно, имеет такое движение, которое Коперник приписывал нашей планете. Так был сделан вывод о том, что Солнце и Луна имеют определенное сходство с Землей. Наконец, наблюдая в Млечном Пути и вне его множество слабых звезд, недоступных невооруженному глазу, Галилей сделал вывод о том, что расстояния до звезд различны и никакой «сферы неподвижных звезд» не существует. Все эти от-

крытия стали новым этапом в осознании положения Земли во Вселенной.



ВОПРОСЫ

1. В чем отличие системы Коперника от системы Птолемея? 2. Какие выводы в пользу гелиоцентрической системы Коперника следовали из открытий, сделанных с помощью телескопа?

§ 11. КОНФИГУРАЦИЯ ПЛАНЕТ.

СИНОДИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

1. Конфигурация планет и условия их видимости

Условия видимости планет¹ меняются по-разному: если Меркурий и Венеру можно видеть только утром или вечером, то остальные — Марс, Юпитер и Сатурн — бывают видны также и ночью. По временам одна или несколько планет могут быть вовсе не видны, поскольку они располагаются на небе поблизости от Солнца. В этом случае говорят, что планета находится в *соединении* с Солнцем. Если же планета располагается на небе вблизи точки, диаметрально противоположной Солнцу, то она находится в *противостоянии*. В этом случае планета появляется над горизонтом в то время, когда Солнце заходит, а заходит она одновременно с восходом Солнца. Следовательно, всю ночь планета находится над горизонтом.

Соединение и противостояние, а также другие характерные расположения планеты относительно Солнца называются *конфигурациями*. Внутренние планеты (Меркурий и Венера), которые всегда находятся внутри земной орбиты, и внешние, которые движутся вне ее (все остальные планеты), меняют свои конфигурации по-разному. Названия различных конфигураций внутренних и внешних планет, кото-

¹ Подробные сведения о положении планет и условиях их видимости даются в «Школьном астрономическом календаре» на каждый учебный год.

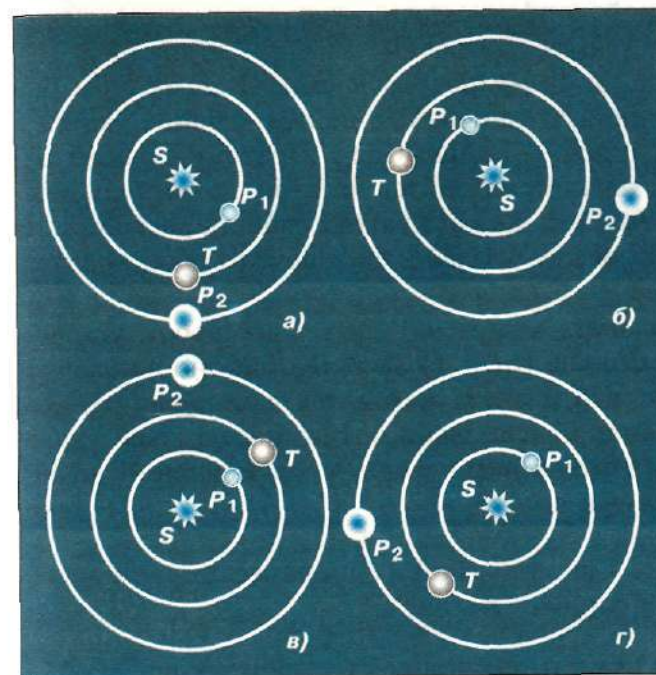


Рис. 3.4. Конфигурации внутренней и внешней планеты

рые характеризуют расположение планеты относительно Солнца на небе, приведены в таблице и на рисунке 3.4.

Рисунок	Внутренняя планета	Внешняя планета
3.4, а	Западная элонгация	Противостояние
3.4, б	Восточная элонгация	Верхнее соединение
3.4, в	Нижнее соединение	Западная квадратура
3.4, г	Верхнее соединение	Восточная квадратура

Ясно, что условия видимости планеты в той или иной конфигурации зависят от ее расположения по отношению к Солнцу, которое планету освещает, и Земли, с которой мы ее наблюдаем. На рисунке 3.4 показано, каково при различных конфигурациях взаимное расположение Земли T , планеты P_1 , P_2 и Солнца S в пространстве.

Единственной конфигурацией, в которой может находиться любая планета, независимо от того, внутренняя она или внешняя, является *верхнее соединение*. В этом случае она находится на линии, соединяющей центры Солнца, Земли и планеты, за Солнцем — «выше» него. Поэтому Солнце, рядом с которым планета находится на небе, не дает возможности ее увидеть. Если же внутренняя планета расположена на той же линии между Землей и Солнцем, то происходит ее *нижнее соединение* с Солнцем.

Внешняя планета может находиться на любом угловом расстоянии от Солнца (от 0 до 180°). Когда оно составляет 90°, то говорят, что планета находится в *квадратуре*. Для внутренних планет максимально возможное угловое удаление от Солнца (в *элонгации*) невелико: для Венеры — до 48°, а для Меркурия — всего 28°.

2. Синодический и сидерический периоды обращения планет

Конфигурации планеты периодически повторяются.

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными конфигурациями планеты (например, верхними соединениями) называется ее синодическим периодом.

Еще в глубокой древности, когда считалось, что планеты обращаются вокруг Земли, для каждой из них на основе многолетних наблюдений был определен синодический период обращения.

Согласно гелиоцентрической системе, сама Земля обращается вокруг Солнца с периодом, равным году. Это ее движение необходимо учитывать, чтобы узнать периоды обращения планет в невращающейся инерциальной системе отсчета, или, как принято говорить, по отношению к звездам.

Период обращения планеты вокруг Солнца по отношению к звездам называется звездным (или сидерическим) периодом.

Очевидно, что по своей продолжительности синодический период планеты не совпадает ни с ее сидерическим периодом, ни с годом, который является звездным периодом обращения Земли.

Рассмотрим, как связан синодический период планеты со звездными периодами Земли и самой планеты. Пусть звездный период обращения внешней планеты равен P , звездный период Земли — T , а синодический период — S . Тогда угловые скорости их движения по орбитам будут равны соответственно $360^\circ/P$ и $360^\circ/T$. От момента какой-либо конфигурации (например, противостояния) до следующей такой же конфигурации планета пройдет дугу своей орбиты, равную $\frac{360^\circ}{P} \cdot S$. За этот же промежуток времени (за синодический период) Земля пройдет дугу на 360° большую, которая равна $\frac{360^\circ}{T} \cdot S$. Тогда:

$$\frac{360^\circ}{T} \cdot S - \frac{360^\circ}{P} \cdot S = 360^\circ,$$

или

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{P} = \frac{1}{S}.$$

Почти такой же будет формула для внутренней планеты:

$$\frac{1}{P} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S}.$$

Следовательно, зная синодический период планеты, можно вычислить ее звездный период обращения вокруг Солнца.



ВОПРОСЫ

1. Что называется конфигурацией планеты?
2. Какие планеты считаются внутренними, какие — внешними?
3. В какой конфигурации может находиться любая планета?
4. Какие планеты могут находиться в противостоянии? Какие — не могут?
5. Назовите планеты, которые могут наблюдаться рядом с Луной во время ее полнолуния.



УПРАЖНЕНИЕ 9

1. Нарисуйте, как будут располагаться на своих орбитах Земля и планета: а) Меркурий — в нижнем соединении; б) Венера — в верхнем соединении; в) Юпитер — в противостоянии; г) Сатурн — в верхнем соединении.
2. В какое время суток (утром или вечером) будет видна Венера, если она расположена так, как показано на рисунке 3.3, а?
3. Сравните условия видимости Марса в положениях, показанных на рисунках 3.4, а и 3.4, б.
4. Оцените, сколько при-

мерно времени и когда (утром или вечером) может наблюдаться Венера, если она удалена к востоку от Солнца на 45° . 5. Через какой промежуток времени встречаются на циферблате часов минутная и часовая стрелки? 6. Звездный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния?

§ 12. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Важную роль в формировании представлений о строении Солнечной системы сыграли также законы движения планет, которые были открыты Иоганном Кеплером (1571—1630) и стали первыми естественнонаучными законами в их современном понимании. Работы Кеплера создали возможность для обобщения знаний по механике той эпохи в виде законов динамики и закона всемирного тяготения, сформулированных позднее Исааком Ньютоном. Многие ученые вплоть до начала XVII в. считали, что движение небесных тел должно быть равномерным и происходить по «самой совершенной» кривой — окружности. Лишь Кеплеру удалось преодолеть этот предрассудок и установить действительную форму планетных орбит, а также закономерность изменения скорости движения планет при их обращении вокруг Солнца.



Иоганн Кеплер

В своих поисках Кеплер исходил из убеждения, что «в мире правит число», высказанного еще Пифагором. Он искал соотношения между различными величинами, характеризующими движение планет, — размеры орбит, период обращения, скорость. Кеплер действовал фактически вслепую, чисто эмпирически. Он пытался сопоставить характеристики движения планет с закономерностями музыкальной гаммы, длинной сторон описанных и вписанных в орбиты планет многоугольников и т. д.

Кеплеру необходимо было построить орбиты планет, перейти от экваториальной системы координат, указывающих положение планеты на небесной сфере, к системе координат, указывающих ее положение в плоскости орбиты. Он воспользовался при этом собственными наблюдениями планеты Марс, а также многолетними определениями координат и конфигураций этой планеты, проведенными его учителем *Тихо Браге*.

Орбиту Земли Кеплер считал (в первом приближении) окружностью, что не противоречило наблюдениям. Для того чтобы построить орбиту Марса, он применил способ, который показан на рисунке 3.5.

Пусть нам известно угловое расстояние Марса от точки весеннего равноденствия во время одного из противостояний планеты — его прямое восхождение α_1 , которое выражается углом $\angle T_1 M_1$, где T_1 — положение Земли на орбите в этот момент, а M_1 — положение Марса. Очевидно, что спустя 687 суток (таков звездный период обращения Марса) планета придет в ту же точку своей орбиты. Если определить прямое восхождение Марса на эту дату, то, как видно из рисунка 3.5, можно указать положение планеты в пространстве, точнее, в плоскости ее орбиты. Земля в этот момент находится в точке T_2 , и, следовательно, угол $\angle T_2 M_1$ есть не что иное, как прямое восхождение Марса — α_2 . Повторив подобные операции для нескольких других противостояний Марса, Кеплер получил еще целый ряд точек и, проведя по ним плавную кривую, построил орбиту этой планеты.

Изучив расположение полученных точек, он обнаружил, что скорость движения планеты по орбите меняется, но при этом

радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.

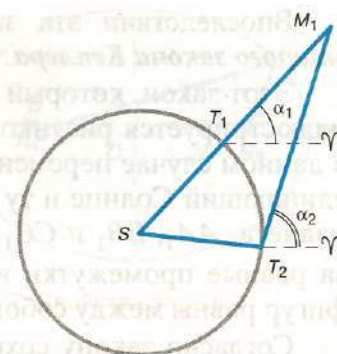


Рис. 3.5. Построение орбиты Марса Кеплером

Впоследствии эта закономерность получила название **второго закона Кеплера**.

Этот закон, который часто называют законом площадей, иллюстрируется рисунком 3.6. Радиусом-вектором называют в данном случае переменный по своей величине отрезок, соединяющий Солнце и ту точку орбиты, в которой находится планета. AA_1 , BB_1 и CC_1 — дуги, которые проходит планета за равные промежутки времени. Площади заштрихованных фигур равны между собой.

Согласно закону сохранения энергии, полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют силы тяготения, остается неизменной при любых движениях тел этой системы. Поэтому сумма кинетической и потенциальной энергий планеты, которая движется вокруг Солнца, неизменна во всех точках орбиты и равна полной энергии. По мере приближения планеты к Солнцу возрастает ее скорость — увеличивается кинетическая энергия, но вследствие уменьшения расстояния до Солнца уменьшается энергия потенциальная.

Установив закономерность изменения скорости движения планет, Кеплер задался целью определить, по какой кривой происходит их обращение вокруг Солнца. Он был поставлен перед необходимостью сделать выбор одного из двух возможных решений: 1) считать, что орбита Марса представляет собой окружность, и допустить, что на некоторых участках орбиты вычисленные координаты планеты расходятся с наблюдениями (из-за ошибок наблюдений) на $8'$; 2) считать, что наблюдения таких ошибок не содержат, а орбита не является окружностью. Будучи уверенным в точности наблюдений Тихо Браге, Кеплер выбрал второе решение и установил, что наилучшим образом положения Марса на орбите совпадают с кривой, которая называется **эллипсом**, при этом Солнце не располагается в центре эллипса. В результате был сформулирован закон, который называется **первым законом Кеплера**.

Каждая планета обращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Как известно, эллипсом называется кривая, у которой сумма расстояний от любой точки P до его фокусов есть ве-

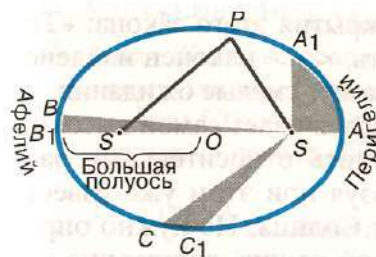


Рис. 3.6. Второй закон Кеплера

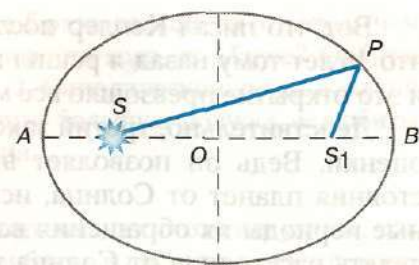


Рис. 3.7. Свойства эллипса

личина постоянная. На рисунке 3.7 обозначены: O — центр эллипса; S и S_1 — фокусы эллипса; AB — его большая ось. Половина этой величины (a), которую обычно называют **большой полуосью**, характеризует размер орбиты планеты. Ближайшая к Солнцу точка A называется **перигелий**, а наиболее удаленная от него точка B — **афелий**. Отличие эллипса от окружности характеризуется величиной его эксцентриситета: $e = OS/OA$. В том случае, когда эксцентриситет равен 0, фокусы и центр сливаются в одну точку — эллипс превращается в окружность.

Примечательно, что книга, в которой в 1609 г. Кеплер опубликовал первые два открытых им закона, называлась «Новая астрономия, или Физика небес, изложенная в исследованиях движения планеты Марс...».

Оба этих закона, опубликованные в 1609 г., раскрывают характер движения каждой планеты в отдельности, что не удовлетворило Кеплера. Он продолжил поиски «гармонии» в движении всех планет, и спустя 10 лет ему удалось сформулировать **третий закон Кеплера**.

Квадраты звездных периодов обращения планет относятся между собой, как кубы больших полуосей их орбит.

Формула, выражающая третий закон Кеплера, такова:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет; a_1 и a_2 — большие полуоси их орбит.

Вот что писал Кеплер после открытия этого закона: «То, что 16 лет тому назад я решил искать, <...> наконец найдено, и это открытие превзошло все мои самые смелые ожидания...»

Действительно, третий закон заслуживает самой высокой оценки. Ведь он позволяет вычислить относительные расстояния планет от Солнца, используя при этом уже известные периоды их обращения вокруг Солнца. Не нужно определять расстояние от Солнца каждой из них, достаточно измерить расстояние от Солнца хотя бы одной планеты. Величина большой полуоси земной орбиты — *астрономическая единица* (а. е.) — стала основой для вычисления всех остальных расстояний в Солнечной системе.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Противостояния некоторой планеты повторяются через 2 года. Чему равна большая полуось ее орбиты?

Дано:

$$S = 2 \text{ г.}$$

$$T_1 = 1 \text{ г.}$$

$$a_1 = 1 \text{ а. е.}$$

$$a_2 = ?$$

Формула

Решение:

Большую полуось орбиты планеты можно определить из третьего закона Кеплера:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, a_2^3 = \frac{a_1^3 T_2^2}{T_1^2}.$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$$

используется для вычисления ее звездного периода:

$$T_2 = \frac{T_1 S}{S - T_1}, T_2 = \frac{2}{2 - 1} = 2 \text{ г.}$$

$$\text{Тогда } a_2 = \sqrt[3]{2^2} \approx 1,59 \text{ а. е.}$$

$$\text{Ответ: } a_2 = 1,59 \text{ а. е.}$$



ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы Кеплера.
2. Как меняется скорость планеты при ее перемещении от афелия к перигелию?
3. В какой точке орбиты планета обладает максимальной кинетической энергией? максимальной потенциальной энергией?



УПРАЖНЕНИЕ 10

1. Марс в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Какова продолжительность года на Марсе? Орбиты планет считать круговыми.
2. Синодический период малой планеты 500 суток. Определите большую полуось ее орбиты и звездный период обращения.



ЗАДАНИЕ 12

Выполнение этого задания позволит узнать, как располагаются планеты на орбитах в настоящее время, и научиться самостоятельно отыскивать их на небе.

1) Нарисуйте в своей тетради орбиты четырех ближайших к Солнцу планет: Меркурия, Венеры, Земли и Марса. Для того чтобы наибольшая из орбит — орбита Марса — уместилась на листе тетради, следует выбрать масштаб, при котором 1 см соответствует 30 млн км (1 : 3 000 000 000 000). Рассчитайте размеры орбит планет и с помощью циркуля проведите окружности соответствующего радиуса. Необходимые данные возьмите из приложения VI.

2) Используйте данные таблицы гелиоцентрических долгот¹ планет из «Школьного астрономического календаря» для ответа на следующие вопросы:

- а) У какой планеты: Меркурия, Венеры, Земли или Марса — эксцентриситет орбиты наибольший?
- б) На какие (примерно) даты приходятся прохождения Меркурия через перигелий? через афелий?
- в) Найдите в таблице даты, на которые приходятся соединения планет с Солнцем, а также их противостояний.

3) Пользуясь таблицей гелиоцентрических долгот планет, на орбите каждой планеты отметьте ее положения в сентябре — декабре текущего года. Для этого проведите из центра орбит в произвольном направлении луч, который будет указывать направление на точку весеннего равноденствия. От этого луча на каждой орбите в направлении, противоположном движению часовой стрелки, отложите дуги, соответствующие гелиоцентрической долготе данной планеты, и отметьте эти положения.

Для того чтобы узнать, где по отношению к Солнцу располагается на небе та или иная планета, ориентируйте нарисован-

¹ Гелиоцентрической долготой называется угол при центре (Солнце) между направлениями на точку весеннего равноденствия и на планету.

ный план так, чтобы линия, соединяющая на плане положение Земли на данные сутки и Солнца, была направлена в момент наблюдения на Солнце. Те планеты, которые согласно их положению на плане оказываются слева от направления на Солнце, заходят позже него. Планеты, которые находятся справа от этого направления, заходят раньше Солнца, но и восходят раньше него. Для того чтобы узнать, можно ли будет увидеть планеты, необходимо определить, как далеко от Солнца на небе они находятся. Если на плане угол между направлениями с Земли на Солнце и на планету менее 15° , то скорее всего планету нельзя будет наблюдать. Она либо зайдет прежде, чем стемнеет, либо взойдет уже после того, как станет светло. Если же планета удалена от Солнца более чем на 15° , то ее следует поискать на небе на соответствующем угловом расстоянии от него.

§ 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ И РАЗМЕРОВ ТЕЛ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

1. Форма и размеры Земли

Представление о Земле как о шаре, который свободно, без всякой опоры находится в космическом пространстве, является одним из величайших достижений науки древнего мира.

Считается, что первое достаточно точное определение размеров Земли провел греческий ученый **Эратосфен** (276—194 до н. э.), живший в Египте. Идея, положенная в основу измерений Эратосфена, весьма проста: измерить длину дуги земного меридиана в линейных единицах и определить, какую часть полной окружности эта дуга составляет. Получив эти данные, можно вычислить длину дуги в 1° , а затем длину окружности и величину ее радиуса, т. е. радиуса земного шара. Очевидно, что длина дуги меридиана в градусной мере равна разности географических широт двух пунктов: $\varphi_B - \varphi_A$.

Для того чтобы определить эту разность, Эратосфен сравнил полуденную высоту Солнца в них в один и тот же день. Измерив высоту Солнца h_B (рис. 3.8) в полдень 22 июня в Александрии, где он жил, Эратосфен установил, что Солнце отстоит от зенита на $7,2^\circ$. В этот день в полдень в городе

Сиена (ныне Асуан) Солнце освещает дно самых глубоких колодезев, т. е. находится в зените h_A . Следовательно, длина дуги составляет $7,2^\circ$. Расстояние между Сиеной (А) и Александрией (В) около 5000 греческих стадий — l .

Стадией в Древней Греции считалось расстояние, которое проходит легко вооруженный греческий воин за тот промежуток времени, в течение которого Солнце, коснувшееся горизонта своим нижним краем, целиком скроется за горизонт.

Несмотря на кажущееся неудобство такой единицы и достаточную громоздкость словесного определения, ее введение выглядело вполне оправданным, учитывая, что строгая периодичность небесных явлений позволяла использовать их движение для счета времени.

Обозначив длину окружности земного шара через L , получим такое выражение:

$$\frac{L}{5000} = \frac{360^\circ}{7,2^\circ},$$

откуда следует, что длина окружности земного шара равняется 250 000 стадий.

Точная величина стадии в современных единицах неизвестна, но, зная, что расстояние между Александрией и Асуаном составляет 800 км, можно полагать, что 1 стадия = 160 м. Это означает, что результат, полученный Эратосфеном, практически не отличается от современных данных, согласно которым длина окружности Земли составляет 40 000 км.

Эратосфен ввел в практику использование терминов «широта» и «долгота». Видимо, появление этих терминов связано с особенностями формы карт того времени: они повторяли по очертаниям побережье Средиземного моря, которое длиннее по направлению запад—восток (по долготе), чем с севера на юг (по широте).

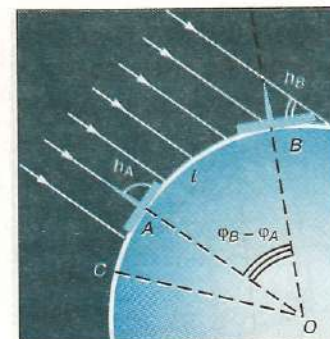


Рис. 3.8. Способ Эратосфена

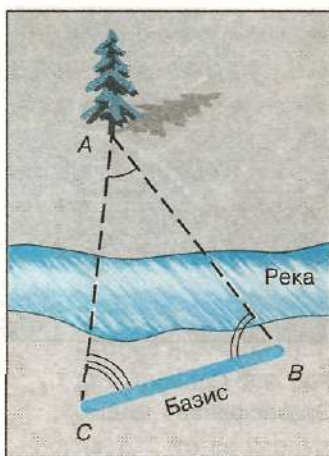


Рис. 3.9. Параллактическое смещение

Определить географическую широту двух пунктов оказывается гораздо проще, чем измерить расстояние между ними. Зачастую непосредственное измерение кратчайшего расстояния между этими пунктами оказывается невозможным из-за различных естественных препятствий (гор, рек и т. п.). Поэтому применяется способ, основанный на явлении *параллактического смещения* и предусматривающий вычисление расстояния на основе измерений длины одной из сторон (базиса — BC) и двух углов B и C в треугольнике ABC (рис. 3.9).

Параллактическим смещением называется изменение направления на предмет при перемещении наблюдателя.

Чем дальше расположен предмет, тем меньше его параллактическое смещение, и чем больше перемещение наблюдателя (базис измерения), тем больше параллактическое смещение.

Для определения длины дуги используется система треугольников — *способ триангуляции*, который впервые был применен еще в 1615 г. Пункты в вершинах этих треугольников выбираются по обе стороны дуги на расстоянии 30—40 км друг от друга так, чтобы из каждого пункта были видны по крайней мере два других. Основой для вычисления длин сторон во всех этих треугольниках является размер базиса AC (рис. 3.10). Точность измерения базиса длиной в 10 км составляет около 1 мм. Во всех пунктах устанавливают геодезические сигналы — вышки высотой в несколько десятков метров. С вершины сигнала с помощью угломерного инструмента (*теодолита*) измеряют углы между направлениями на два-три соседних пункта. Измерив углы в треугольнике, одной из сторон которого является базис, геодезисты получают возможность вычислить длину двух других его сторон. Проводя затем измерение углов из пунктов, расстояние между

которыми вычислено, можно узнать длину двух очередных сторон в треугольнике. Зная длину сторон этих треугольников, можно определить длину дуги AB .

В какой степени форма Земли отличается от шара, выяснилось в конце XVIII в. Для уточнения формы Земли Французская академия наук снарядила сразу две экспедиции. Одна из них работала в экваториальных широтах Южной Америки в Перу, другая — вблизи Северного полярного круга на территории Финляндии и Швеции. Измерения показали, что длина одного градуса дуги меридиана на севере больше, чем вблизи экватора. Последующие исследования подтвердили, что длина дуги одного градуса меридиана увеличивается с возрастанием географической широты. Это означало, что форма Земли — не идеальный шар: она сплюснута у полюсов. Ее полярный радиус на 21 км короче экваториального.

Для школьного глобуса масштаба 1 : 50 000 000 отличие этих радиусов будет всего 0,4 мм, т. е. совершенно незаметно.

Отношение разности величин экваториального и полярного радиусов Земли к величине экваториального называется *сжатием*. По современным данным оно составляет $1/298$, или 0,0034. Это означает, что сечение Земли по меридиану будет не окружностью, а эллипсом, у которого большая ось проходит в плоскости экватора, а малая совпадает с осью вращения.

В XX в. благодаря измерениям, точность которых составила 15 м, выяснилось, что земной экватор также нельзя считать окружностью. Сплюснутость экватора составляет всего $1/30\,000$ (в 100 раз меньше сплюснутости меридиана). Более точно форму нашей планеты передает фигура, называемая

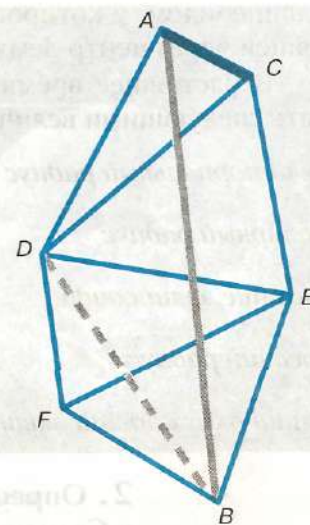


Рис. 3.10. Схема триангуляции

эллипсоидом, у которого любое сечение плоскостью, проходящей через центр Земли, не является окружностью.

В настоящее время форму Земли принято характеризовать следующими величинами:

экваториальный радиус	— 6378,160 км;
полярный радиус	— 6356,777 км;
сжатие эллипсоида	— 1 : 298,25;
средний радиус	— 6371,032 км;
длина окружности экватора	— 40075,696 км.

2. Определение расстояний в Солнечной системе.

Горизонтальный параллакс

Измерить расстояние от Земли до Солнца удалось лишь во второй половине XVIII в., когда был впервые определен *горизонтальный параллакс* Солнца. По сути дела, при этом измеряется параллактическое смещение объекта, находящегося за пределами Земли, а базисом является ее радиус.

Горизонтальным параллаксом (p) называется угол, под которым со светила виден радиус Земли, перпендикулярный лучу зрения (рис. 3.11).

Из треугольника OAS можно выразить величину — расстояние $OS = D$:

$$D = \frac{R}{\sin p},$$

где R — радиус Земли. По этой формуле можно вычислить расстояние в радиусах Земли, а зная его величину, — выразить расстояние в километрах.

Очевидно, что чем дальше расположен объект, тем меньше его параллакс. Наибольшее значение имеет параллакс Луны, который меняется в связи с тем, что Луна обращается по эллиптической орбите, и в среднем составляет $57'$. Параллакс планет и Солнца значительно меньше. Так, параллакс Солнца $8,8''$. Такому значению параллакса соответствует рас-

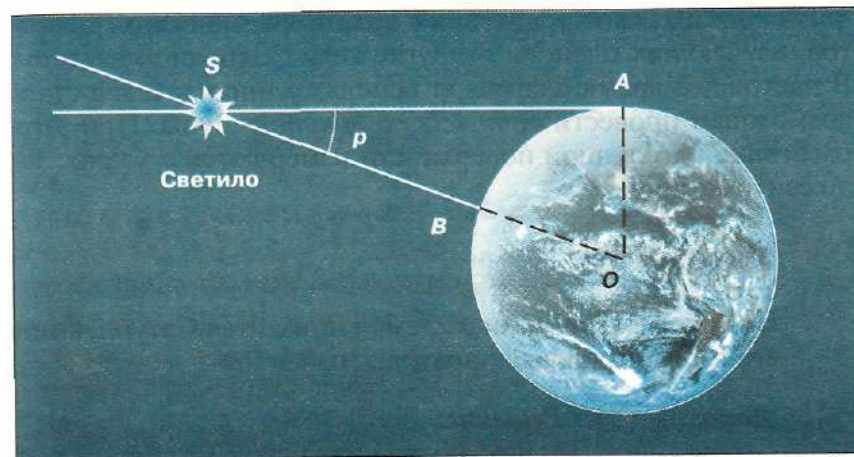


Рис. 3.11. Горизонтальный параллакс светила

стояние до Солнца, примерно равное 150 000 000 км. Это расстояние принимается за одну астрономическую единицу (1 а. е.) и используется при измерении расстояний между телами Солнечной системы.

Известно, что для малых углов $\sin p \approx p$, если угол p выражен в радианах. В одном радиане содержится 206 265". Тогда, заменяя $\sin p$ на p и выражая этот угол в радианной мере, получаем формулу в виде, удобном для вычислений:

$$D = \frac{206\,265''}{p} R,$$

или (с достаточной точностью)

$$D = \frac{(2 \cdot 10^5)''}{p} R.$$

Во второй половине XX в. развитие радиотехники позволило определять расстояния до тел Солнечной системы посредством *радиолокации*. Первым объектом среди них стала Луна. Затем радиолокационными методами были уточнены расстояния до Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера. На основе радиолокации Венеры величина астрономической единицы определена с точностью порядка километра. Столь высокая точность определения расстояний — необходимое ус-

ловие для расчетов траекторий полета космических аппаратов, изучающих планеты и другие тела Солнечной системы. В настоящее время благодаря использованию лазеров стало возможным провести *оптическую локацию* Луны. При этом расстояния до лунной поверхности измеряются с точностью до сантиметров.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На каком расстоянии от Земли находится Сатурн, когда его горизонтальный параллакс равен $0,9''$?

Дано:

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,9'' \\ D_{\odot} &= 1 \text{ а. е.} \\ p_{\odot} &= 8,8'' \end{aligned}$$

D_1 — ?

Решение:

Известно, что параллакс Солнца на расстоянии в 1 а. е. равен $8,8''$. Тогда, написав формулы для расстояния до Солнца и до Сатурна и поделив их одна на другую, получим:

$$\frac{D_1}{D_{\odot}} = \frac{p_{\odot}}{p_1}.$$

Откуда

$$D_1 = \frac{D_{\odot} p_{\odot}}{p_1} = \frac{1 \text{ а. е.} \cdot 8,8''}{0,9''} = 9,8 \text{ а. е.}$$

Ответ: $D_1 = 9,8 \text{ а. е.}$

3. Определение размеров светил

Зная расстояние до светила, можно определить его линейные размеры, если измерить его угловой радиус ρ (рис. 3.12). Формула, связывающая эти величины, аналогична формуле для определения параллакса:

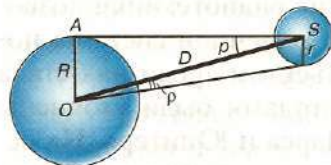


Рис. 3.12. Угловые размеры светила

$$D = \frac{r}{\sin \rho}.$$

Учитывая, что угловые диаметры даже Солнца и Луны составляют примерно $30'$, а все планеты видны невооруженному гла-

зу как точки, можно воспользоваться соотношением: $\sin \rho \approx \rho$. Тогда:

$$D = \frac{R}{\rho} \text{ и } D = \frac{r}{\rho}.$$

Следовательно,

$$r = \rho R.$$

Если расстояние D известно, то

$$r = D\rho,$$

где величина ρ выражена в радианах.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Чему равен линейный диаметр Луны, если она видна с расстояния $400\,000 \text{ км}$ под углом примерно $30'$?

Дано:

$$\begin{aligned} D &= 400\,000 \text{ км} \\ \rho &= 30' \end{aligned}$$

d — ?

Решение:

Если ρ выразить в радианах, то

$$d = D\rho.$$

Следовательно,

$$d = \frac{400\,000 \text{ км} \cdot 30' \cdot 3600''}{296265''} = 3490 \text{ км.}$$

Ответ: $d = 3490 \text{ км.}$



ВОПРОСЫ

1. Какие измерения, выполненные на Земле, свидетельствуют о ее сжатии?
2. Меняется ли и по какой причине горизонтальный параллакс Солнца в течение года?
3. Каким методом определяется расстояние до ближайших планет в настоящее время?



УПРАЖНЕНИЕ 11

1. Чему равен горизонтальный параллакс Юпитера, наблюдаемого с Земли в противостоянии, если Юпитер в 5 раз дальше от Солнца, чем Земля?
2. Расстояние Луны от Земли в ближайшей к Земле точке орбиты (перигее) $363\,000 \text{ км}$, а в наиболее удаленной (апогее) — $405\,000 \text{ км}$. Определите горизонтальный параллакс Луны в этих положениях.
3. Во сколько раз Солнце больше, чем Луна, если их угловые диаметры одинаковы, а горизонтальные параллаксы равны $8,8''$ и $57'$ соответственно?
4. Чему равен угловой диаметр Солнца, видимого с Плутона?

§ 14. ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ТЯГОТЕНИЯ

1. Закон всемирного тяготения

Согласно закону всемирного тяготения, изученному в курсе физики,

все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 и m_2 — массы тел; r — расстояние между ними; G — гравитационная постоянная.

Открытию закона всемирного тяготения во многом способствовали законы движения планет, сформулированные Кеплером, и другие достижения астрономии XVII в. Так, знание расстояния до Луны позволило Исааку Ньютону (1643—1727) доказать тождественность силы, удерживающей Луну при ее движении вокруг Земли, и силы, вызывающей падение тел на Землю.

Ведь если сила тяжести меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения, то Луна, находящаяся от Земли на рас-

стоянии примерно 60 ее радиусов, должна испытывать ускорение в 3600 раз меньшее, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли, равное $9,8 \text{ м/с}^2$. Следовательно, ускорение Луны должно составлять $0,0027 \text{ м/с}^2$.

В то же время Луна, как любое тело, равномерно движущееся по окружности, имеет ускорение

$$a = \omega^2 r,$$

где ω — ее угловая скорость, r — радиус ее орбиты. Если считать,

что радиус Земли равен 6400 км, то радиус лунной орбиты будет составлять $r = 60 \cdot 6\,400\,000 \text{ м} = 3,84 \cdot 10^6 \text{ м}$. Звездный период обращения Луны $T = 27,32$ суток, в секундах составляет $2,36 \cdot 10^6 \text{ с}$. Тогда ускорение орбитального движения Луны

$$a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = \frac{2 \cdot 3,14}{2,36 \cdot 10^6 \text{ с}} \cdot 3,84 \cdot 10^6 \text{ м} = 0,0027 \text{ м/с}^2.$$

Равенство этих двух величин ускорения доказывает, что сила, удерживающая Луну на орбите, есть сила земного притяжения, ослабленная в 3600 раз по сравнению с действующей на поверхности Земли.

Можно убедиться и в том, что при движении планет, в соответствии с третьим законом Кеплера, их ускорение и действующая на них сила притяжения Солнца обратно пропорциональны квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения. Действительно, согласно третьему закону Кеплера отношение кубов больших полуосей орбит d и квадратов периодов обращения T есть величина постоянная:

$$\frac{d_1^3}{T_1^2} = \frac{d_2^3}{T_2^2} = \frac{d_3^3}{T_3^2} = \dots = \text{const.}$$

Ускорение планеты равно

$$a = \frac{v^2}{d} = \left(\frac{2\pi d}{T}\right)^2 \frac{1}{d} = 4\pi^2 \frac{d}{T^2}.$$

Из третьего закона Кеплера следует

$$\frac{d}{T^2} = \frac{\text{const}}{d^2},$$

поэтому ускорение планеты равно

$$a = 4\pi^2 \cdot \text{const} \frac{1}{d^2}.$$

Итак, сила взаимодействия планет и Солнца удовлетворяет закону всемирного тяготения.



Исаак Ньютон

2. Возмущения в движении тел Солнечной системы

Законы Кеплера строго выполняются, если рассматривается движение двух изолированных тел (Солнце и планета) под действием их взаимного притяжения. Однако в Солнечной системе планет много, все они взаимодействуют не только с Солнцем, но и между собой. Поэтому движение планет и других тел не в точности подчиняется законам Кеплера. Отклонения тел от движения по эллипсам называют **возмущениями**.

Возмущения эти невелики, так как масса Солнца гораздо больше массы не только отдельной планеты, но и всех планет в целом. Наибольшие возмущения в движении тел Солнечной системы вызывает Юпитер, масса которого в 300 раз превышает массу Земли. Особенно заметны отклонения астероидов и комет при их прохождении вблизи Юпитера.

В настоящее время возмущения учитываются при вычислении положения планет, их спутников и других тел Солнечной системы, а также траекторий космических аппаратов, запускаемых для их исследования. Но еще в XIX в. расчет возмущений позволил сделать одно из самых известных в науке открытий «на кончике пера» — открытие планеты Нептун.

Проводя очередной обзор неба в поиске неизвестных объектов, **Вильям Гершель** в 1781 г. открыл планету, названную впоследствии Ураном. Спустя примерно полвека стало очевидно, что наблюдаемое движение Урана не согласуется с расчетным даже при учете возмущений со стороны всех известных планет. На основе предположения о наличии еще одной «заурановой» планеты были сделаны вычисления ее орбиты и положения на небе. Независимо друг от друга эту задачу решили **Джон Адамс** в Англии и **Урбен Леверье** во Франции. На основе расчетов Леверье немецкий астроном **Йоганн Галле** 23 сентября 1846 г. обнаружил в созвездии Водолея неизвестную ранее планету — Нептун. Это открытие стало триумфом гелиоцентрической системы, важнейшим подтверждением справедливости закона всемирного тяготения. В дальнейшем в движении Урана и Нептуна были замечены возмущения, которые стали основанием для предположения о существовании в Солнечной системе еще одной пла-

неты. Ее поиски увенчались успехом лишь в 1930 г., когда после просмотра большого количества фотографий звездного неба была открыта самая далекая от Солнца планета — Плутон.

3. Масса и плотность Земли

Закон всемирного тяготения позволил определить массу нашей планеты. Исходя из закона всемирного тяготения, ускорение свободного падения можно выразить так:

$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Подставим в формулу известные значения этих величин: $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $R = 6370 \text{ км}$ — и получим, что масса Земли $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Зная массу и объем земного шара, можно вычислить его среднюю плотность: $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. С глубиной за счет увеличения давления и содержания тяжелых элементов плотность возрастает.

4. Определение массы небесных тел

Более точная формула третьего закона Кеплера, которая была получена Ньютоном, дает возможность определить одну из важнейших характеристик любого небесного тела — массу. Выведем эту формулу, считая (в первом приближении) орбиты планет круговыми.

Пусть два тела, взаимно притягивающиеся и обращающиеся вокруг общего центра масс, имеющие массы m_1 и m_2 , находятся от центра масс на расстоянии r_1 и r_2 и обращаются вокруг него с периодом T . Расстояние между их центрами $R = r_1 + r_2$. На основании закона всемирного тяготения ускорение каждого из этих тел равно:

$$a_1 = G \frac{m_2}{R^2}, \quad a_2 = G \frac{m_1}{R^2}.$$

Угловая скорость обращения вокруг центра масс составляет $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Тогда центростремительное ускорение выразится для каждого тела так:

$$a_1 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_1, a_2 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_2.$$

Приравняв полученные для ускорений выражения, выразив из них r_1 и r_2 и сложив их почленно, получаем:

$$G = \frac{(m_1 + m_2)}{R^2} = \frac{4\pi^2}{T} (r_1 + r_2),$$

откуда

$$\frac{T^2(m_1 + m_2)}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G}.$$

Поскольку в правой части этого выражения находятся только постоянные величины, оно справедливо для любой системы двух тел, взаимодействующих по закону тяготения и обращающихся вокруг общего центра масс, — Солнце и планета, планета и спутник. Определим массу Солнца, для этого запишем выражение:

$$\frac{T_1^2(M + m_1)}{a_1^3} = \frac{T_2^2(m_1 + m_2)}{a_2^3},$$

где M — масса Солнца; m_1 — масса Земли; m_2 — масса Луны; T_1 и a_1 — период обращения Земли вокруг Солнца (год) и большая полуось ее орбиты; T_2 и a_2 — период обращения Луны вокруг Земли и большая полуось лунной орбиты.

Пренебрегая массой Земли, которая ничтожно мала по сравнению с массой Солнца, и массой Луны, которая в 81 раз меньше массы Земли, получим:

$$\frac{M}{m_1} = \frac{a_1^3 \cdot T_2^2}{a_2^3 \cdot T_1^2}.$$

Подставив в формулу соответствующие значения и приняв массу Земли за 1, мы получим, что Солнце примерно в 333 000 раз по массе больше нашей планеты.

Массы планет, не имеющих спутников, определяют по тем возмущениям, которые они оказывают на движение астероидов, комет или космических аппаратов, пролетающих в их окрестностях.

5. Приливы

Под действием взаимного притяжения частиц тело стремится принять форму шара. Если эти тела вращаются, то они деформируются, сжимаются вдоль оси вращения.

Кроме того, изменение их формы происходит и под действием взаимного притяжения, которое вызывают явления, называемые *приливами*. Давно известные на Земле, они получили объяснение только на основе закона всемирного тяготения.

Рассмотрим ускорения, создаваемые притяжением Луны в различных точках земного шара (рис. 3.13). Поскольку точки A , B и O находятся на различных расстояниях от Луны, ускорения, создаваемые ее притяжением, будут различны.

Разность ускорений, вызываемых притяжением другого тела в данной точке и в центре планеты, называется приливным ускорением.

Приливные ускорения в точках A и B направлены от центра Земли. В результате Земля, и в первую очередь ее водная оболочка, вытягивается в обе стороны по линии, соединяющей центры Земли и Луны. В точках A и B наблюдается прилив, а вдоль круга, плоскость которого перпендикулярна этой линии, на Земле происходит отлив.

Тяготение Солнца также вызывает приливы, но из-за большей его удаленности они меньше, чем вызванные Луной. Приливы наблюдаются не только в гидросфере, но и в атмосфере и в литосфере Земли и других планет.



Рис. 3.13. Схема лунных приливов

Вследствие суточного вращения Земля стремится увлечь за собой приливные горбы, в то же время вследствие тяготения Луны, которая обращается вокруг Земли за месяц, полоса приливов должна перемещаться по земной поверхности значительно медленнее. В результате между огромными массами воды, участвующей в приливных явлениях, и дном океана возникает приливное трение. Оно тормозит вращение Земли и вызывает увеличение продолжительности суток, которые в прошлом были значительно короче (5—6 ч). Вместе с тем приливы, вызываемые Землей на Луне, затормозили ее вращение, и она теперь обращена к Земле одной стороной. Такое же медленное вращение характерно для многих спутников Юпитера и других планет. Сильные приливы, вызываемые на Меркурии и Венере Солнцем, по-видимому, являются причиной их крайне медленного вращения вокруг оси.

6. Движение искусственных спутников Земли и космических аппаратов к планетам Солнечной системы

Возможность создания искусственного спутника Земли теоретически обосновал еще Ньютон. Он показал, что существует такая горизонтально направленная скорость $\vec{v}_1$, при которой тело, падая на Землю, тем не менее на нее не упадет, а будет двигаться вокруг Земли, оставаясь от нее на одном и том же расстоянии. При такой скорости тело будет приближаться к Земле вследствие ее притяжения как раз на столько, на сколько из-за кривизны поверхности нашей планеты оно будет от нее удаляться (рис. 3.14). Эту скорость, которую называют первой космической (или круговой), известны вам из курса физики:

$$v_1 = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

Практически осуществить запуск искусственного спутника Земли оказалось возможно лишь через два с половиной столетия после открытия Ньютона — 4 октября 1957 г. За сорок с

лишним лет, прошедшие с этого дня, который нередко называют началом космической эры человечества, во многих странах мира запущено около 4000 спутников различного устройства и назначения. Созданы орбитальные станции, на которых длительное время, сменяя друг друга, работают экипажи, состоящие из космонавтов разных стран. Американские астронавты неоднократно посещали Луну, автоматические межпланетные станции исследовали все планеты Солнечной системы, за исключением самой отдаленной планеты Плутона.

Космические аппараты (КА), которые направляются к Луне и планетам, испытывают притяжение со стороны Солнца и согласно законам Кеплера так же, как и сами планеты, движутся по эллипсам. Скорость движения Земли по орбите составляет около 30 км/с. Если геометрическая сумма скорости космического аппарата, которую ему сообщили при запуске, и скорости Земли будет больше этой величины, то КА будет двигаться по орбите, лежащей за пределами земной орбиты. Если меньше — внутри ее. В первом случае, когда он полетит к Марсу или другой внешней планете, энергетические затраты будут наименьшими, если КА достигнет орбиты



Рис. 3.14. Орбита искусственного спутника Земли



Рис. 3.15. Траектория полета КА к Марсу

Рис. 3.16. Траектория полета КА к Венере

этой планеты при своем максимальном удалении от Солнца — в афелии (рис. 3.15). Кроме того, необходимо так рассчитать время старта КА, чтобы к этому моменту в ту же точку своей орбиты пришла планета. Иначе говоря, начальная скорость и день запуска КА должны быть выбраны таким образом, чтобы КА и планета, двигаясь каждый по своей орбите, одновременно подошли к точке встречи. Во втором случае — для внутренней планеты — встреча с КА должна произойти в перигелии его орбиты (рис. 3.16). Такие траектории полетов называются *полуэллиптическими*. Большие оси этих эллипсов проходят через Солнце, которое находится в одном из фокусов, как и полагается по первому закону Кеплера.



ВОПРОСЫ

1. Почему движение планет происходит не в точности по законам Кеплера? 2. Как было установлено местоположение планеты Нептун? 3. Какая из планет вызывает наибольшие возмущения в движении других тел Солнечной системы и почему? 4. Какие тела Солнечной системы испытывают наибольшие возмущения и почему? 5. По каким траекториям движутся космические аппараты к Луне? к планетам? 6*. Объясните причину и периодичность приливов и отливов. 7*. Будут ли одинаковы периоды обращения искусственных спутников Земли и Луны, если эти спутники находятся на одинаковых расстояниях от них?



УПРАЖНЕНИЕ 12

1. Определите массу Юпитера, зная, что его спутник, который отстоит от Юпитера на 422 000 км, имеет период обращения 1,77 сут. Для сравнения используйте данные для системы Земля—Луна. 2. Ускорение силы тяжести на Марсе составляет $3,7 \text{ м/с}^2$, на Юпитере — 25 м/с^2 . Рассчитайте первую космическую скорость для этих планет. 3. Сколько суток (примерно) продолжается полет КА до Марса, если он проходит по эллипсу, большая полуось которого равна 1,25 а. е.?



IV. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 15. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ

Познакомимся с основными физическими характеристиками больших планет, которые представлены в приложении VI.

Как видно из таблицы, по физическим характеристикам восемь больших планет (исключая Плутон) можно разделить на две группы. Одну из них — планеты земной группы — составляют Земля и сходные с ней Меркурий, Венера и Марс (см. цветную вклейку II). Во вторую входят планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (см. рис. 2 на цветной вклейке VII). Разделение планет на группы прослеживается сразу по трем характеристикам (размерам, плотности и массе), причем по плотности — наиболее четко.

Планеты каждой из групп по плотности мало различаются между собой, но средняя плотность планет земной группы примерно в 5 раз больше средней плотности планет-гигантов. Различие плотности тел в окружающей нас природе может объясняться как различием их химического состава, так и различием агрегатного состояния. Большая часть массы планет земной группы приходится на долю твердого состояния вещества — оксидов и других соединений тяжелых химических элементов: железа, магния, алюминия и других металлов, а также кремния и других неметаллов. На долю четырех наиболее обильных в твердой оболочке нашей планеты (литосфере) элементов — железа, кислорода, кремния и магния — приходится свыше 90% ее массы. Самыми многочисленными являются атомы кислорода.

Малая плотность планет-гигантов (у Сатурна она меньше плотности воды) объясняется тем, что основная часть их массы находится в газообразном и жидком состояниях. В составе

планет-гигантов преобладают водород и гелий. Этим они похожи на Солнце и многие другие звезды, у которых водород и гелий составляют примерно 98% массы. Разумеется, в планетах-гигантах есть и те вещества, которые составляют основу планет типа Земли. Например, на одном только Юпитере их больше, чем во всех планетах земной группы, вместе взятых, однако они составляют примерно лишь 1% его массы. Атмосфера планет-гигантов содержит различные соединения водорода, в частности метан и аммиак.

Отличия между планетами двух групп проявляются и в том, что планеты-гиганты быстрее вращаются вокруг оси, и в числе спутников: на четыре планеты земной группы приходится всего 3 спутника, на четыре планеты-гиганта — 54. Число спутников у каждой планеты приведено в приложении VI.

Столь значительные различия двух групп планет можно объяснить только на основе современных представлений о формировании Солнечной системы.



ВОПРОСЫ

По каким характеристикам прослеживается разделение планет на две группы?



ЗАДАНИЕ 13

На основе данных приложения VI:

1) определите, по какой из физических характеристик планеты наиболее четко разделяются на две группы; 2) сформулируйте основные отличительные особенности каждой группы планет.

§ 16. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА КАК КОМПЛЕКС ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ ОБЩЕЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ

Согласно наиболее разработанной гипотезе, Солнечная система сформировалась в результате длительной эволюции огромного холодного газопылевого облака. Подобные идеи высказывались учеными еще в XVII в. В 40-х гг. XX в. эти идеи легли в основу гипотезы об образовании Земли и других планет из холодных твердых допланетных тел — *планетезималей*, выдвинутой академиком *Отто Юльевичем Шмидтом*.

В дальнейшем она получила развитие в работах его учеников в России, а также зарубежных ученых.

В пользу этой гипотезы свидетельствуют многие научные данные. Так, в последние годы вокруг нескольких звезд были обнаружены газопылевые облака, из вещества которых могут образовываться планеты. Исследования далекого прошлого Земли говорят о том, что наша планета никогда не была полностью расплавленной. Метеоритная «бомбардировка» планет по сути дела является продолжением того процесса, который в прошлом привел к их образованию. В настоящее время, когда в межпланетном пространстве метеоритного вещества остается все меньше и меньше, этот процесс идет значительно менее интенсивно, чем на начальных стадиях формирования планет.

Возраст наиболее древних пород, которые обнаружены в составе метеоритов, составляет примерно 4,5 млрд лет. Породы такой же древности обнаружены в доставленных на Землю образцах лунного грунта. Расчеты возраста Солнца дали близкую величину — 5 млрд лет. На основании этих данных принято считать, что все тела, которые в настоящее время составляют Солнечную систему, образовались примерно 4,5—5 млрд лет тому назад. Облако, из которого они образовались, представляло собой смесь частиц, которые относились к трем компонентам: *скальному*, *ледяному* и *летучему*. Именно из этих трех компонентов в различных соотношениях и состоят все тела Солнечной системы.

В течение нескольких миллиардов лет само облако и входящее в его состав вещество значительно изменялись. Разумеется, далеко не все детали процессов, которые произошли за это время, поддаются точным расчетам, тем не менее современная наука позволила составить общую картину формирования Солнечной системы.

Вначале сжатие облака гравитационными силами привело к образованию центрального горячего ядра — будущего Солнца. Оно захватило себе основную часть массы облака — примерно 90%. Тяготение образовавшегося Солнца воздействовало на форму оставшейся части облака: оно становилось все более и более плоским диском. Частицы этого диска, обращаясь вокруг Солнца по самым различным орбитам, сталкивались между собой. В результате одних столкновений частицы разрушались, а при других объединялись в более крупные. Возника-

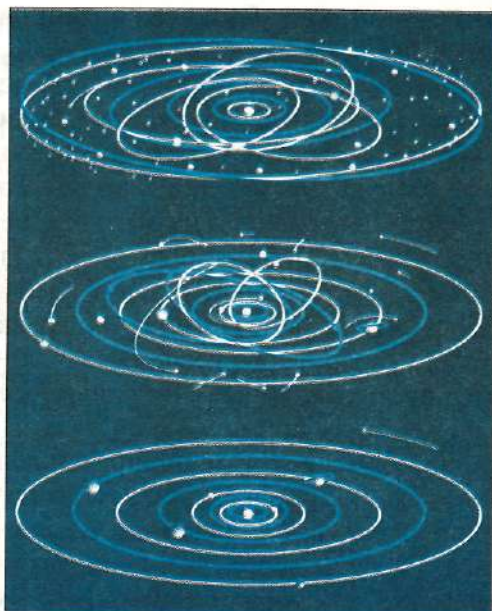


Рис. 4.1. Образование планет по теории О. Ю. Шмидта

ли зародыши будущих планет и других тел. Считается, что число таких допланетных тел достигало многих миллионов. Но в конце концов эволюция облака привела к тому, что основная масса вещества оказалась сосредоточенной в немногих крупных телах — больших планетах (рис. 4.1).

Однако прежде, чем эти допланетные тела образовались и стали расти, произошло перераспределение вещества внутри облака, его дифференциация, и химический состав частиц в различных его частях стал неодинаковым. Под влиянием сильного нагрева из окрестностей Солнца улетучивались газы (в основном это самые распространенные во Вселенной — водород и гелий) и оставались лишь твердые тугоплавкие частицы. Из этого вещества впоследствии сформировались Земля, ее спутник — Луна, а также другие планеты земной группы.

Вдали от Солнца летучие вещества намерзали на твердые частицы, относительное содержание водорода и гелия оказалось повышенным. Объем периферийных частей облака был больше, а стало быть больше и масса вещества, из которого образовались далекие от Солнца планеты.

В ходе формирования планет и позднее на протяжении миллиардов лет в их недрах и на поверхности происходили процессы плавления, кристаллизации, окисления и другие физико-химические процессы. Это привело к существенному изменению первоначального состава и строения вещества, из которого образованы все ныне существующие тела Солнечной системы.

Однако не все вещество протопланетного облака вошло в состав планет и их спутников. Многие его сгустки остались как внутри планетной системы в виде астероидов и еще более мелких тел, так и за ее пределами в виде ядер комет.

Согласно современным представлениям, образование протопланетного облака связано с процессом формирования звезд.



Вопросы

1. Каков возраст планет Солнечной системы? 2. Какие процессы происходили в ходе формирования планет?

§ 17. СИСТЕМА ЗЕМЛЯ — ЛУНА

Землю с ее спутником Луной нередко называют двойной планетой. Этим подчеркивается как общность их происхождения, так и редкостное для планет соотношение масс центрального тела и спутника. Масса Луны составляет $1/81$ массы Земли. Спутники других планет (исключая Плутон) имеют по сравнению с самими планетами значительно меньшую массу. Вероятно, Луна образовалась примерно в то же время, что и Земля. Расстояние между ними было в несколько раз меньше, чем теперь. С той поры Луна постепенно удаляется от нашей планеты с очень малой скоростью (около 4 см за год).

1. Земля

Природа Земли достаточно подробно изучается в курсе географии. Напомним вкратце лишь те сведения, которые необходимы для ее сравнения с другими планетами.

Строение. Основными оболочками земного шара являются *атмосфера, гидросфера и литосфера*. Соответствующие



Рис. 4.2. Внутреннее строение планет земной группы и Луны:

1 — кора;
2 а, б, в — мантия;
3 — ядро

единением, вода на других телах Солнечной системы встречается главным образом в твердой фазе: в виде снега, инея и льда.

Литосфера. На протяжении миллиардов лет существования Земли в твердом теле планеты происходили процессы, существенно изменившие первоначальный состав вещества и его распределение в литосфере. За счет энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных элементов, происходило расплавление и дифференциация вещества. В результате легкие соединения, в основном силикаты, оказались наверху и образовали *кору Земли*, а более тяжелые остались в центральной части — *ядре*.

Толщина коры относительно невелика и меняется от 4—10 км под океанами до 30—70 км под материками. Радиус ядра составляет примерно половину радиуса планеты, причем в его внутренней части вещество находится в твердом состоянии, а во внешней — в жидком. Между ядром и корой располагается промежуточная оболочка — *мантия*. Плотность вещества по мере удаления от центра планеты уменьшается от $17\,000\text{ кг/м}^3$ (в ядре) до 2700 кг/м^3 (в коре).

этим оболочкам три агрегатных состояния вещества — газообразное, жидкое и твердое — являются привычными для нас, жителей Земли. Атмосферой обладает большинство больших планет Солнечной системы, твердая оболочка характерна для планет земной группы, спутников планет и астероидов. Гидросфера же Земли — уникальное явление в Солнечной системе, никакая другая из известных планет ею не располагает. Вода в жидком виде может существовать лишь при определенных значениях температуры и давления газовой среды. Будучи весьма распространенным во Вселенной химическим соединением,

Результаты исследований, выполненных с помощью космических аппаратов, показали, что внутреннее строение планет земной группы и Луны в общих чертах такое же (рис. 4.2).

Атмосфера. Определенное сходство свойственно также и атмосферам планет земной группы, среди которых атмосфера Земли выделяется своим уникальным химическим составом (см. приложение IV).

Атмосфера рассеивает и поглощает солнечное излучение, она во многом определяет тепловой баланс планеты благодаря так называемому парниковому эффекту. Так, нагретая солнечным излучением поверхность суши и океана Земли сама излучает инфракрасное излучение. Оно поглощается углекислым газом и парами воды земной атмосферы, которая тем самым удерживает тепло (рис. 4.3). На протяжении миллионов лет существования Земли установилось равновесие между потоком энергии, поступающей от Солнца, и потоком энергии, излучаемой планетой обратно в космическое пространство. Чем плотнее атмосфера планеты и чем больше в ней содержится углекислого газа и водяных паров, тем сильнее проявляется парниковый эффект и меньше амплитуда изменения температуры от дня к ночи. Эта закономерность хорошо прослеживается у планет земной группы. На Земле равновесие установилось при средней температуре около $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (290 K), а на Венере — при значительно более высокой — около $+470\text{ }^{\circ}\text{C}$ (740 K). Не случайно высказываются опасения, что повышение содержания углекислого газа в земной атмосфере вследствие возрастания объема сжигаемого человечеством топлива может привести к росту температуры на Земле и изменению ее климата.

Проявление парникового эффекта можно наблюдать в пасмурную погоду. Облачность задерживает тепловое излучение, поэтому почва и воздух ночью охлаждаются не так интенсивно,



Рис. 4.3. Схема парникового эффекта

как при ясном безоблачном небе, когда могут случиться ночные заморозки.

Нижний слой атмосферы, который называется *тропосферой*, в средних широтах имеет высоту 10—12 км, а в экваториальных — 16—17 км (см. цветную вклейку I). В тропосфере содержится более 90% всей массы атмосферы и практически все водяные пары. Именно здесь в основном происходят явления, которые определяют погоду. По мере удаления от земной поверхности температура снижается и на верхней границе тропосферы составляет примерно -50°C .

Над тропосферой до высоты 50—55 км простирается *стратосфера*, в которой находится слой озона (O_3). Здесь, начиная с высоты около 25 км, температура атмосферы растет за счет поглощения озоном ультрафиолетового излучения Солнца. Выше — в *мезосфере* — температура снова уменьшается и на высоте около 75 км достигает абсолютного минимума -90°C .

Плотность атмосферы с высотой уменьшается: на высоте 6 км она вдвое меньше, чем у поверхности, а на высоте порядка 100 км в миллион раз меньше. Примерно до этих высот состав атмосферы остается неизменным — смесь газов, получившая название воздуха. На больших высотах, в *термосфере* (80—800 км) состав атмосферы существенно меняется. Основными ее компонентами становятся гелий и водород. За счет поглощения ультрафиолетового излучения Солнца температура значительно возрастает (до 1500°C на высоте 600 км). Поглощение излучения вызывает диссоциацию молекул, а также ионизацию молекул и атомов с образованием свободных электронов. Таким образом, термосфера планеты является вместе с тем ее *ионосферой*. Самый внешний слой атмосферы называется *экзосферой*, откуда нейтральные частицы могут беспрепятственно ускользать в космическое пространство.

Магнитосфера Земли. На высотах более 1000 км поведение и распределение заряженных частиц неразрывно связано с магнитным полем Земли. В околоземном космическом пространстве существует область, которую называют магнитосферой, хотя по своей форме она вовсе не является сферой. Структура геомагнитного поля на дневной и ночной стороне

Земли благодаря наличию «солнечного ветра» существенно отличается. Этот поток плазмы, непрерывно обдувающий Землю, имеет собственное магнитное поле, которое взаимодействует с геомагнитным полем и вызывает его значительную деформацию. При набегании потоков солнечного ветра на магнитное поле Земли они прежде всего тормозятся, и в результате возникает ударная волна. В целом магнитосфера принимает форму цилиндра с выпуклым в сторону Солнца дном. Она сжата с дневной стороны и вытянута в виде сигарообразного шлейфа с ночной. Этот шлейф диаметром немногим менее 250 тыс. км простирается за Землей на 5,6 млн км.

Небольшая часть захваченных геомагнитным полем заряженных частиц образует вокруг нашей планеты *пояс радиации*. Здесь находятся обладающие наиболее высокой энергией ионы (в основном протоны) и электроны. Эти частицы, попадая из радиационного пояса в верхние слои атмосферы в районе полюсов, заставляют светиться ее основные составляющие — азот и кислород, вызывая полярные сияния.

2. Луна

По своей природе Луна относится к телам планетного типа. Ее радиус составляет около 1700 км, масса в 81 раз меньше земной, а средняя плотность примерно 3300 кг/м^3 .

Несмотря на общность происхождения, природа Луны существенно отличается от земной. Из-за того что сила тяжести на поверхности Луны в 6 раз меньше, чем на поверхности Земли, молекулам газа гораздо легче покинуть Луну. Для этого достаточно скорости примерно 2,4 км/с, поэтому на нашем спутнике нет и не было ни гидросферы, ни атмосферы. Луна не имеет также заметного магнитного поля.

Медленное вращение вокруг оси приводит к тому, что в течение дня поверхность Луны нагревается до $+130^{\circ}\text{C}$ (400 K), а в течение ночи остывает до -170°C (100 K). Из-за отсутствия атмосферы лунная поверхность подвержена непосредственному воздействию всех видов излучения, а также постоянной «бомбардировке» метеоритами и более мелкими

частицами — микрометеоритами, которые падают на нее с космическими скоростями (десятки километров в секунду). В результате вся Луна покрыта слоем мелкораздробленного вещества — *реголита*, толщина которого в ряде случаев превышает 10—12 м (см. рис. 2 на цветной вклейке III). Теплопроводность реголита очень мала (примерно в 10 раз меньше теплопроводности окружающего нас воздуха), поэтому уже на глубине нескольких десятков сантиметров колебания температуры практически отсутствуют.

Даже невооруженным глазом видно, что на Луне есть светлые области — *материки* и более темные — *моря* (см. рис. 1 на цветной вклейке III). Современные исследования показали, что они отличаются не только по внешнему виду, но также по рельефу, геологической истории и химическому составу покрывающего их вещества. Луна является единым материковым щитом, на котором в виде отдельных вкраплений располагаются пониженные участки поверхности, покрытые застывшей лавой, — моря. Они занимают примерно 40% площади видимой стороны Луны (рис. 4.4). Самая крупная равнина получила название Океан Бурь, следом идет Море Дождей, Море Холода, Море Спокойствия и др. Так их называли еще в начале XVII в. Море Дождей окружают горные хребты высотой 3—5 км, получившие такие же названия, как и земные горные массивы, — Кавказ, Альпы, Апеннины и т. п. Все эти горы сбросового типа. Вероятно, складчатых гор, характерных для нашей планеты, на Луне нет. В различных частях Луны заметны такие формы рельефа, как борозды и трещины, по которым происходило смещение отдельных участков лунной коры по вертикали и горизонтали.

Наиболее характерными формами рельефа Луны являются *кратеры* самого различного размера. Они получили имена в честь известных ученых — Коперника, Кеплера, Птолемея и др. При наблюдениях с Земли в телескоп можно различить кратеры диаметром не менее 1 км. Их насчитывается около 300 тыс. Множество кратеров метрового и сантиметрового размеров видны на снимках лунной поверхности, полученных космическими аппаратами. На более древней поверхности материков на единицу площади приходится примерно в 30 раз больше кратеров, чем на относительно молодой по-

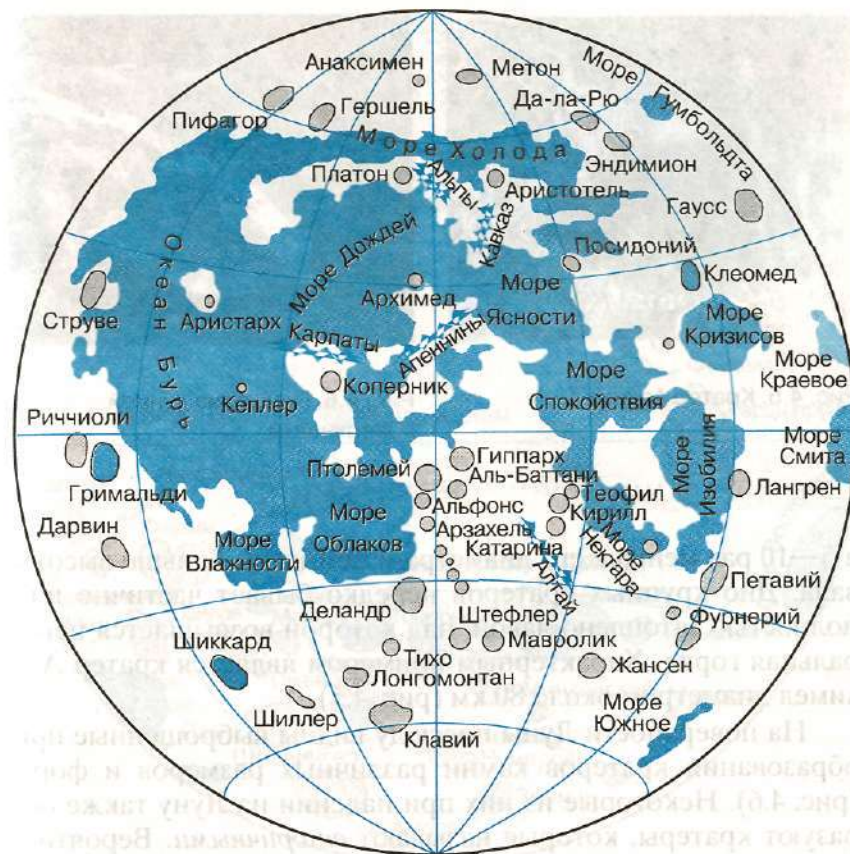


Рис. 4.4. Карта видимого полушария Луны

верхности морей. Именно поэтому поверхность материков выглядит такой неровной. Кратеры образуются при падении на Луну тел из космического пространства. При ударе о поверхность Луны этих тел, обладающих значительной кинетической энергией, происходит взрыв. В результате разрушаются и само тело, и лунные породы, их обломки и пыль разлетаются во все стороны, а на месте взрыва образуется углубление — кратер.

Самые крупные кратеры (100 км и более в диаметре) окружены возвышающимся на 2—3 км над окружающей местностью валом с пологими склонами. Глубина кратера обычно



в 5—10 раз меньше его диаметра и немногим больше высоты вала. Дно крупных кратеров нередко бывает частично или полностью затоплено лавой, над которой возвышается центральная горка. Характерным примером является кратер Архимед диаметром около 80 км (рис. 4.5).

На поверхности Луны повсюду видны выброшенные при образовании кратеров камни различных размеров и форм (рис. 4.6). Некоторые из них при падении на Луну также образуют кратеры, которые называют *вторичными*. Вероятно, множество таких кратеров и мелкораздробленное вещество образуют светлые лучи, которые прослеживаются на поверхности вокруг некоторых кратеров иногда на расстоянии до 1500 км. Так далеко разлетаются продукты мощных взрывов вследствие малой силы тяжести и отсутствия атмосферы на Луне.

Исследования Луны с помощью космических аппаратов начались еще в 1959 г. Тогда советская автоматическая станция «Луна-3» впервые сфотографировала обратную сторону Луны. По традиции находящиеся на ней кратеры получили имена ученых — Джордано Бруно, Ломоносова, Жюлио-Кюри, Королева и др., а также космонавтов — Гагарина, Комарова и др. Оказалось, что практически все моря находятся на видимой стороне Луны, а впадины, которые есть на ее обратной стороне (рис. 4.7), в большинстве своем не заполнены ла-

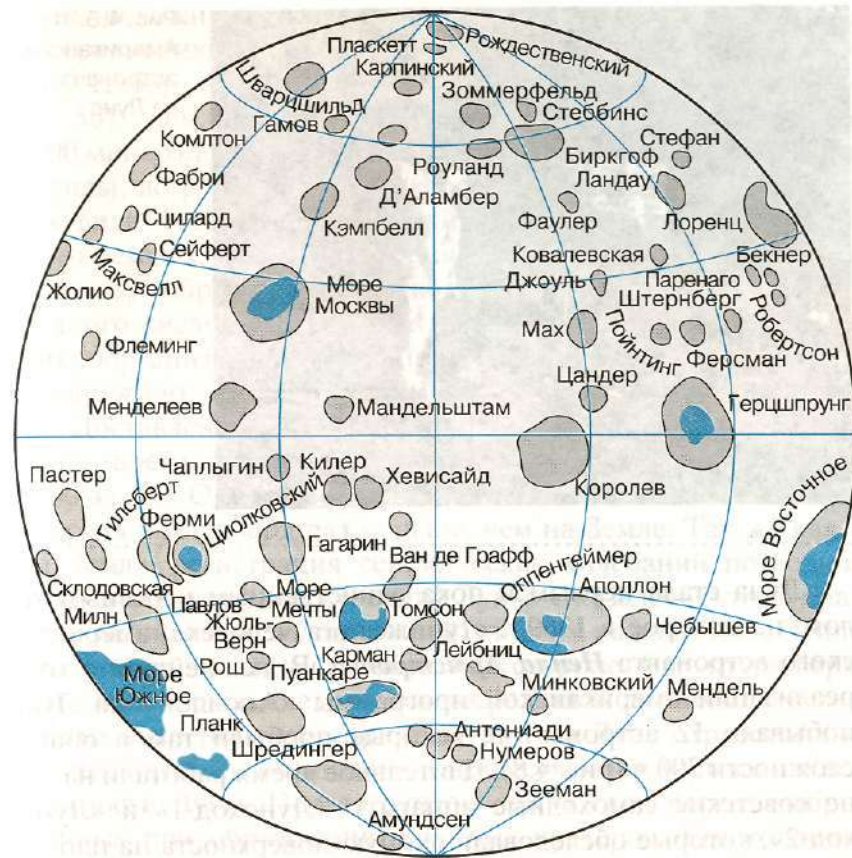


Рис. 4.7. Карта обратной стороны Луны

вой. В последующем съемка лунной поверхности неоднократно проводилась советскими и американскими космическими аппаратами. К настоящему времени составлены подробные карты обоих полушарий Луны и ее отдельных регионов, на которых зафиксированы объекты размером до 10 м.

Важные исследования были проведены советскими автоматическими станциями серии «Луна» и американскими аппаратами «Сервейор» на ее поверхности. Первой была «Луна-9», совершившая мягкую посадку на Луну в феврале 1966 г.

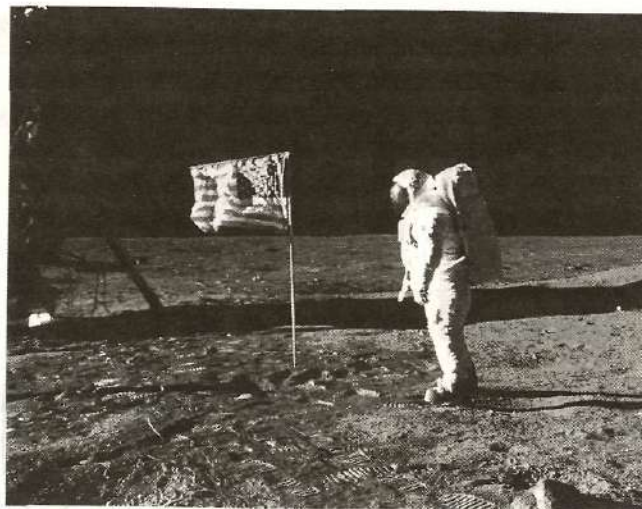


Рис. 4.8.
Американский
астронавт
на Луне

Луна стала первым и пока единственным небесным телом, на которое в 1969 г. ступила нога человека, американского астронавта **Нейла Армстронга**. В дальнейшем в ходе реализации американской программы «Аполлон» на Луне побывало 12 астронавтов, которые пробыли там в общей сложности 300 ч (рис. 4.8). Длительное время работали на Луне советские самоходные аппараты «Луноход-1» и «Луноход-2», которые обследовали лунную поверхность на площади свыше 100 км². Покрывающий всю лунную поверхность реголит по своим физико-механическим свойствам (размеры частиц, прочность и т. п.) похож на влажный песок. Он представляет собой смесь мелких обломков горных пород, остеклованных и оплавленных частиц, возникающих при образовании кратеров. Средний размер частиц реголита около 1 мм, однако встречаются и более крупные (см. рис. 3 на цветной вклейке III). На многих частицах с помощью микроскопа можно различить мельчайшие кратерочки, образовавшиеся при ударах микрометеоритов.

Американские корабли «Аполлон» и советские автоматические станции доставили на Землю около 400 кг образцов лунных пород, которые были подвергнуты детальному химическому анализу в лабораторных условиях на Земле. Породы

Луны похожи на земные изверженные породы, но обеднены по сравнению с ними летучими элементами, железом и водой. Набор минералов в их составе оказался беднее (около 50), чем в земных породах, где содержится более 2000 минералов. В лунных породах преобладают силикаты и оксиды, встречаются также фосфаты, сульфиды, карбиды и фосфиды. На Луне практически нет минералов, отличающихся от земных, но в то же время отсутствуют те из них, которые могут образовываться в водной среде и при наличии свободного кислорода. Никаких признаков жизни даже в виде микроорганизмов или органических соединений на Луне не обнаружено.

Доставленные на поверхность Луны сейсмометры позволили зарегистрировать большое число лунотрясений — до 3000 за год. Однако все они очень слабы — их сейсмическая энергия в миллиард раз меньше, чем на Земле. Так же как и на Земле, регистрация сейсмических колебаний позволила уточнить внутреннее строение Луны. Оказалось, что лунная кора значительно толще земной: от 60 км на видимом с Земли полушарии до 100 км на обратной стороне. Структура верхних слоев коры исследовалась посредством активных сейсмических экспериментов при падениях на Луну отработанных частей кораблей «Аполлон» и искусственных взрывах на поверхности Луны. Под реголитом лежит слой пород, выброшенных при образовании крупных кратеров. Его толщина меняется от нескольких десятков до сотен метров. Еще ниже до глубины примерно 1 км располагаются растрескавшиеся от многочисленных ударов базальтовые породы.

Определенный различными методами возраст пород, доставленных с Луны, как говорилось ранее, близок к возрасту Земли, что свидетельствует об их совместном происхождении. В то же время на лунной поверхности не было обнаружено более молодых пород, что говорит о давнем прекращении лавовых излияний и вулканической активности.

Отсутствие на Луне процессов размывания и выветривания позволяет считать ее своеобразным геологическим заповедником, где на протяжении миллионов и миллиардов лет сохраняются все возникавшие за это время формы рельефа. Таким образом, изучение Луны дает возможность понять геологические процессы, происходившие на Земле в далеком

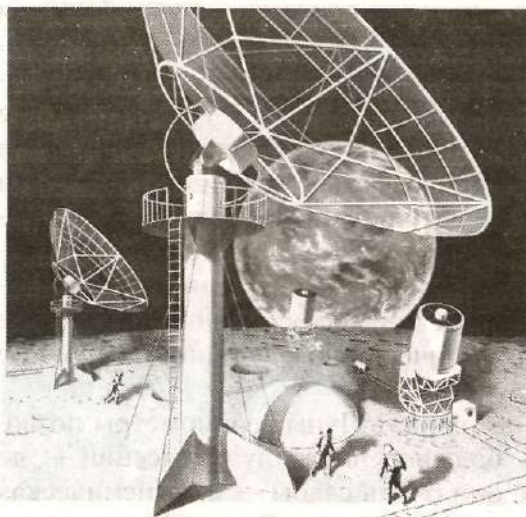


Рис. 4.9. Один из проектов лунной базы

прошлом, от которого на нашей планете не осталось никаких следов.

В настоящее время существуют детально разработанные проекты создания на Луне крупной обитаемой базы (рис. 4.9), где смогут длительное время находиться участники экспедиций. Наличие такой базы позволит постоянно проводить наблюдения за нашей планетой, объектами ближнего и дальнего космоса, а также другие исследования, которые трудно осуществить на Земле или на орбитальных станциях. При реализации этих проектов предполагается максимально использовать ресурсы самой Луны.



ВОПРОСЫ

1. Какие особенности распространения волн в твердых телах и жидкостях используются при сейсмических исследованиях строения Земли? 2. Почему в тропосфере температура с увеличением высоты падает? 3. Чем объясняются различия плотности веществ в окружающем нас мире? 4. Почему при ясной погоде ночью происходит наиболее сильное похолодание? 5. Видны ли с Луны те же созвездия (видны ли они так же), что и с Земли? 6. Назовите основные формы рельефа Луны. 7. Каковы физические условия на поверхности Луны? Чем и по каким причинам они отличаются от земных?



УПРАЖНЕНИЕ 13

1. Подсчитайте, какую (примерно) кинетическую энергию имеет тело массой 1 кг при встрече с лунной поверхностью. Скорость тела считать равной скорости орбитального движения Земли. 2*. Галилей первым измерил высоту гор на Луне, наблюдая появление вблизи терминатора (границы дня и ночи) отдельных горных вершин, освещенных Солнцем. Сделайте соответствующий чертеж и выведите формулу, по которой можно провести необходимые расчеты.

§ 18. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

1. Общность характеристик

Наличие литосферы — характерная черта всех планет земной группы. Рельеф их поверхности сформировался под действием внутренних и внешних факторов. Примером первых могут служить тектонические движения и вулканические явления, примером вторых — удары тел, падающих на планету с огромными скоростями из космического пространства.

Гидросфера, напротив, является уникальной особенностью нашей планеты. Атмосфера отсутствует лишь у Меркурия. Данные об атмосферах остальных планет земной группы представлены в приложении IV.

Можно принять (так удобно для запоминания), что плотность атмосферы у Венеры в 100 раз больше, чем у Земли, а у Марса — в 100 раз меньше.

Из приложения IV видно, что атмосферы Венеры и Марса весьма близки по составу между собой, но значительно отличаются от земной. Для объяснения причин такого различия приходится снова обращаться к рассмотрению эволюционных изменений, происходящих на протяжении длительных промежутков времени. Считается, что атмосферы Марса и Венеры в основном сохранили тот первичный химический состав, который когда-то имела и атмосфера Земли. За миллионы лет земная атмосфера в значительной степени уменьшила содержание углекислого газа и обогатилась кислородом за счет двух процессов. *Первым* из них является растворение углекислого газа в земных водоемах, которые, видимо, никогда не замерза-

ли. *Второй* процесс — выделение кислорода появившейся на Земле растительностью. Ни на Венере, ни на Марсе ни один из этих процессов происходить не мог. Современные исследования круговорота углекислого газа на нашей планете показывают, что только наличие гидросферы способно обеспечить сохранение температурного режима в пределах, необходимых для существования живых организмов.

2. Меркурий

Эта самая близкая к Солнцу планета во многом похожа на Луну, которую Меркурий лишь немного превосходит по размерам. Так же как и на Луне, большую часть поверхности занимают неровные возвышенные материки. Низменностей, заполненных застывшей лавой, еще меньше, чем на Луне. Крупнейшая из них — Море Зноя — имеет диаметр 1300 км. Самыми многочисленными и характерными являются кратеры метеоритного происхождения. На снимках наиболее высокого качества различаются объекты диаметром 50 м (рис. 4.10 и 4.11). Обнаружены также следы тектонических процессов — *эскарпы* — уступы, которые образовались

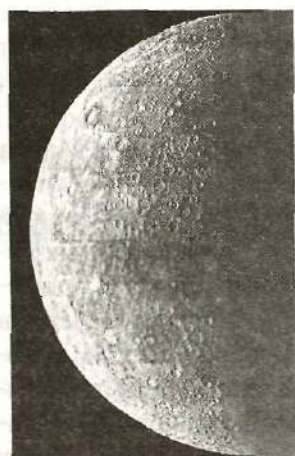


Рис. 4.10. Поверхность Меркурия

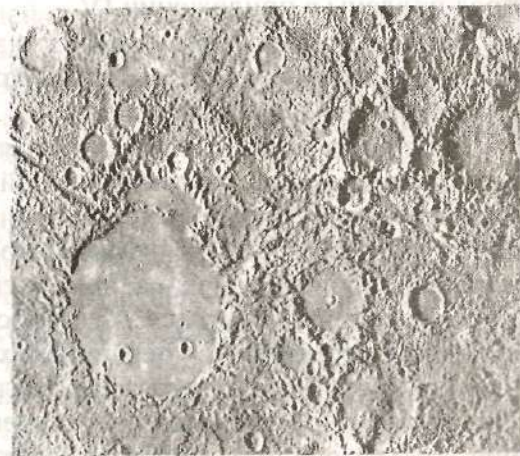


Рис. 4.11. Участок поверхности Меркурия

вследствие вертикальных смещений коры вдоль ее трещин. Протяженность одного из них достигает 500 км. Строение и свойства поверхностного слоя также показывают сходство с Луной. Помимо участков, покрытых мелкораздробленным веществом, выявлены выходы скальных пород.

Космические аппараты, пролетавшие вблизи планеты, измерили магнитное поле, которое оказалось в 100 раз слабее земного. Обнаружение незначительного количества газов (аргона, неона, гелия и водорода) лишь подтвердило мнение об отсутствии атмосферы. Перепады температуры на поверхности планеты в течение продолжительных «меркурианских» суток (176 земных суток) еще больше, чем на Луне. Вследствие значительного эксцентриситета орбиты заметно изменяется расстояние Меркурия от Солнца. Поэтому на дневной стороне планеты в той точке, для которой Солнце находится в зените, температура в афелии составляет 560 К, а в перигелии достигает 690 К. При такой температуре плавится свинец, олово и даже цинк. На ночной стороне она падает ниже 100 К (-173°C).

3. Венера

Эта планета по размерам и массе почти одинакова с Землей. Еще *Михаил Васильевич Ломоносов* (1711—1765) и его современники обнаружили наличие у Венеры атмосферы. Ломоносов правильно полагал, что она плотнее, чем земная. Изучение поверхности Венеры, окутанной постоянным покровом облаков, стало возможным лишь в последние десятилетия благодаря радиолокации и ракетно-космической технике.

Исследования атмосферы Венеры неоднократно проводились при спуске на поверхность планеты советских КА «Венера», начиная с 1967 г., а также при помощи научной аппаратуры, установленной на воздушных шарах, которые



Михаил Васильевич Ломоносов

были доставлены на планету советскими станциями «Вега-1» и «Вега-2». Оказалось, что верхняя граница облачного слоя находится на высоте около 65 км над поверхностью планеты. Температура здесь всего -40°C , как и должно быть в стратосфере планеты земного типа. По мере приближения к поверхности температура, давление и плотность атмосферы возрастают. Вблизи поверхности ее плотность всего в 14 раз меньше плотности воды.

Наблюдения облачных структур в ультрафиолетовых лучах, проведенные с борта американского КА «Маринер-10», показали, что на высоте около 50 км существуют постоянные атмосферные течения — ветры ураганной силы, скорость которых достигает 110 м/с. У поверхности скорость ветров снижается до нескольких метров в секунду. В атмосфере Венеры зарегистрированы грозные разряды. По концентрации частиц облачный слой Венеры напоминает земной туман с видимостью в несколько километров. Облака, видимо, состоят из капелек концентрированной серной кислоты, ее кристалликов и частиц серы. Капельки серной кислоты, хотя и в значительно меньшем количестве, присутствуют и в земной атмосфере. Вероятно, как и на Земле, серная кислота образуется из сернистого газа SO_2 — оксида серы(IV), источником которого являются вулканические извержения и серосодержащие породы поверхности — *пириты*.

Для солнечного излучения облака Венеры достаточно прозрачны, так что освещенность на ее поверхности примерно такая же, как на Земле в пасмурный день. Однако и этого количества солнечной энергии оказывается достаточно, чтобы вследствие парникового эффекта температура на поверхности Венеры установилась выше, чем на Меркурии, расположенном ближе к Солнцу. Суточные и годовые колебания температуры на Венере практически отсутствуют. Ее плотная атмосфера хорошо сохраняет тепло даже в условиях большой продолжительности суток. Один оборот вокруг оси планета совершает за 240 земных суток, вращаясь в направлении, противоположном вращению Земли и других планет. Ось вращения Венеры почти перпендикулярна к плоскости ее орбиты, так что северное и юж-



Рис. 4.12. Система разломов и трещин на Венере



Рис. 4.13. Вулканические конусы на Венере

ное полушария планеты всегда освещаются Солнцем одинаково.

Детальные радиолокационные исследования, проведенные с борта искусственных спутников Венеры российскими и американскими учеными, позволили получить подробные карты поверхности планеты, на которых показаны детали рельефа размером около 200 м.

Большую часть площади поверхности Венеры занимают холмистые равнины. Среди них на несколько километров возвышаются обширные плоскогорья, по размерам превышающие Тибет. Они получили названия Земля Иштар (женское божество в ассирийско-вавилонской мифологии) и Земля Афродиты (древнегреческая богиня любви и красоты, отождествляемая с Венерой). Горные массивы, расположенные на этих возвышенностях, поднимаются над их поверхностью на высоту 7—8 км, а самая высокая гора Максвелл вулканического происхождения — на 12 км; ее кратер имеет диаметр чуть меньше 100 км. Террасные вулканические кальдеры, протяженные лавовые потоки, складчатые горные системы, сложная система каньонов, разломов и трещин — все это свидетельствует о тектонической активности Венеры. Ее поверхность, сформированная теми же процессами, что и земная, впечатляет своеобразием своих структур (рис. 4.12, 4.13).

Так же как и на других планетах земной группы, на Венере обнаружено немало крупных метеоритных кратеров диаметром до 150 км (см. рис. 2 на цветной вклейке IV). По сложившейся традиции они названы именами выдающихся женщин. Интересно, что кратеров диаметром менее 6 км на поверхности планеты не встречается. Вероятно, небольшие метеориты разрушаются еще при полете в атмосфере и не достигают поверхности планеты.

На панорамах поверхности Венеры, переданных космическими аппаратами, видны каменистые осыпи и выходы скальных пород, их слоистость и продукты разрушения, подобные лунному реголиту. По мнению геологов, видны следы того, что на планете относительно недавно происходили активные геологические процессы (см. рис. 1, 3 на цветной вклейке IV). Химический анализ поверхностных пород Венеры показывает их сходство с земными базальтами различных типов.

Исследования Венеры позволяют получать результаты, полезные для развития геологии и метеорологии.

По-видимому, дальнейшие исследования смогут дать ответ на вопрос: почему столь похожая на Землю по размерам и массе планета стала в ходе своей эволюции по многим характеристикам сильно отличаться от нее?

4. Марс

Интерес к Марсу в значительной степени всегда был связан с надеждой обнаружить на этой планете жизнь, а может быть, и разумных обитателей.

Во время противостояний даже в школьный телескоп на Марсе можно заметить белые полярные шапки, а также темные пятна (*моря*) на общем оранжево-красном фоне *материков*. Период обращения Марса вокруг оси (24 ч 37 мин) лишь немного отличается от земных суток. Наклон оси вращения планеты к плоскости орбиты (65°) также близок к земному. Происходящие вследствие этого сезонные изменения на поверхности Марса нередко рассматривались как аналог явлений, наблюдаемых в растительном мире нашей планеты, и доказательство наличия жизни.

Благодаря изучению Марса аппаратами, ставшими его искусственными спутниками, выяснилось, что северное и южное полушария планеты резко отличаются одно от другого: более древние возвышенные материки расположены в южном полушарии, более молодые равнины — в северном. Разница высот между ними достигает 6 км. Наряду с многочисленными кратерами метеоритного происхождения на Марсе обнаружены гигантские вулканические конусы, образованные в результате излияний очень жидкой лавы. Среди них выделяется гора Олимп высотой 27 км, диаметр основания достигает 550 км, а диаметр кратера около 60 км (см. рис. 2 на цветной вклейке V). Сосредоточены вулканы в двух районах — Элизиум и Фарсида. Считается, что деятельность этих вулканов прекратилась не более чем несколько сот миллионов лет тому назад после того, как значительно увеличилась толщина марсианской коры, которая теперь составляет 70—100 км. Сейсмическая активность Марса мала. Приборы, доставленные на его поверхность, регистрируют лишь сотрясения, которые вызваны падениями метеоритов.

Не только вулканы, но и многие другие формы рельефа Марса являются следствием активных процессов в коре планеты, происходивших в прошлом, — горные цепи, системы трещин коры и огромные каньоны. Наиболее крупный из них — Долина Маринера — имеет длину около 4000 км, ширину до 200 км, а глубина достигает 5 км. На склонах видны осыпи и другие следы атмосферной эрозии (см. рис. 1 на цветной вклейке V). Многие метеоритные кратеры также подверглись разрушительному воздействию атмосферы, они нередко заполнены песчаными дюнами.

На панорамах поверхности, полученных в районах посадки космических аппаратов, она предстает перед нами как каменистая пустыня (см. цветную вклейку VI). Исследования химического состава марсианского грунта, которые проведены автоматическими станциями «Викинг», показали высокое содержание в этих породах кремния (до 20%), железа (до 14%). Красноватая окраска поверхности Марса, как и предполагалось, объясняется присутствием ок-

сидов железа в виде такого известного на Земле минерала, как лимонит.

Из всех планет Марс более всего похож на Землю по характеру процессов, происходящих в атмосфере. Но природные условия на Марсе весьма суровы: средняя температура на его поверхности -60°C и крайне редко бывает положительной. На полюсах температура падает до -150°C , при этом замерзает не только вода, но даже углекислый газ превращается в сухой лед. Видимо, полярные шапки Марса состоят из смеси обычного и сухого льда. С наступлением теплого времени года полярные шапки испаряются, и выделяющийся при этом углекислый газ повышает атмосферное давление в этих районах. Перепад давления создает условия для сильных ветров, скорость которых может превышать 100 м/с, и возникновения пылевых бурь. Одна из таких бурь, охвативших почти всю планету, наблюдалась с сентября 1971 г. по январь 1972 г. При этом в атмосфере находилось около миллиарда тонн пыли, которая поднялась в атмосферу до высоты более 10 км.

Воды в атмосфере Марса мало, но при низком атмосферном давлении и низких температурах даже такого количества достаточно для образования облаков и туманов. Среди различных видов этих облаков встречаются похожие на земные (например, перистые), но все они по сравнению с облачными покровами Земли выглядят значительно скромнее. Туманы наблюдаются в низменных районах Марса в холодное время суток. В зимние месяцы даже вблизи экватора на поверхности может появляться тонкий слой инея.

Тщательные исследования поверхности Марса и наблюдения за погодными явлениями были проведены в 1997—1998 гг. передвижной автоматической лабораторией «Марс—Пасфайндер».

Предполагается, что на Марсе значительные запасы воды сосредоточены в слое вечной мерзлоты, аналогичном существующему в отдельных районах Земли. В пользу такого предположения свидетельствует, например, форма выбросов на внешних склонах некоторых метеоритных кратеров, которая объясняется плавлением подповерхностного льда при ударе метеорита и стеканием образовавшихся при этом грязевых потоков. В современных условиях вода в жидком виде



Рис. 4.14. Спутники Марса — Фобос и Деймос

не может существовать на поверхности Марса. Возможно, что в прошлом плотность марсианской атмосферы была выше. На эту мысль наводит наличие на его поверхности протяженных ветвящихся долин, которые тянутся порой на сотни километров и напоминают по своему виду русла высохших земных рек (см. рис. 3 на цветной вклейке V).

Автоматическая биологическая лаборатория, которую американские космические аппараты «Викинг» доставили на поверхность планеты, провела три вида экспериментов по обнаружению жизни. Первый из них — поиск следов фотосинтеза в марсианском грунте. В ходе второго грунт помещали в питательный бульон и фиксировали происходившие в нем изменения. Третий предусматривал прокалывание грунта с целью обнаружения органических соединений. Убедительных доказательств наличия на Марсе жизни в настоящее время или следов прошлой жизнедеятельности не было получено ни в одном из этих экспериментов.

Марс имеет два небольших спутника (рис. 4.14). Размеры Фобоса $28 \times 20 \times 18$ км, а Деймос еще меньше — $16 \times 12 \times 10$ км. Фобос, находящийся от центра планеты на расстоянии всего 9400 км, интересен уникальной особенностью своего обращения. Он совершает три оборота за сутки, обгоняя вращение планеты, поэтому он восходит в той стороне горизонта, где остальные светила заходят, а заходит там, где они восходят.

По характеристикам пород, слагающих поверхность Фобоса и Деймоса, и внешнему облику они похожи на астероиды. На их поверхности видны многочисленные кратеры метеоритного происхождения. Размеры наиболее крупного на Фобосе кратера Стикни сопоставимы с размерами самого спутника. Удар при образовании этого кратера был так силен, что спутник едва не разрушился.



ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется отсутствие атмосферы у планеты Меркурий? 2. В чем причина различий химического состава атмосфер планет земной группы? 3. Какие формы рельефа поверхности обнаружены на поверхности планет земной группы с помощью космических аппаратов? 4. Какие сведения о наличии жизни на Марсе получены автоматическими станциями?



УПРАЖНЕНИЕ 14

1. Сравните суточные колебания температур на Луне, Земле и Венере. Объясните, в чем причина существующих различий. 2. Меркурий расположен ближе к Солнцу, чем Венера. Однако на поверхности Венеры температура выше, чем на Меркурии. Объясните почему. 3*. Сравните формы рельефа поверхности планет земной группы. Какую роль сыграли в их формировании внутренние и внешние факторы?

§ 19. ДАЛЕКИЕ ПЛАНЕТЫ

1. Общность характеристик планет-гигантов

Любая из планет-гигантов превосходит по массе все планеты земной группы, вместе взятые. Крупнейшая планета Солнечной системы — Юпитер — в 11 раз по диаметру и в 300 с лишним раз по массе больше, чем Земля. Все планеты-гиганты имеют мощные протяженные атмосферы, состоящие в основном из молекулярного водорода и содержащие также гелий (от 6 до 15% по объему), метан, аммиак, воду и некоторые другие соединения, в том числе более сложные. Сжатие этих планет, которое заметно даже на первый взгляд, вызвано их быстрым вращением вокруг оси.

Характерно, что экваториальные области планет-гигантов вращаются быстрее, чем области, находящиеся ближе к полюсам. На Юпитере различие периодов вращения на разных широтах составляет около 6 мин, а на Сатурне превышает 20 мин.

Наиболее изученным среди планет-гигантов является Юпитер, на котором даже в небольшой школьный телескоп видны многочисленные темные и светлые полосы, тянущиеся параллельно экватору планеты. Так выглядят облачные образования в его атмосфере, на уровне которых давление примерно такое же, как у поверхности Земли. Красновато-коричневый цвет полос объясняется, видимо, тем, что, помимо кристалликов аммиака, составляющих основу облаков, в них содержатся различные аэрозольные примеси, в частности соединения серы и фосфора. На снимках, полученных космическими аппаратами, видны следы интенсивных атмосферных процессов. В целом ряде случаев они имеют устойчивый характер. Так, один из атмосферных вихрей, получивший название Большое Красное Пятно, наблюдается на Юпитере уже свыше 350 лет (см. рис. 1 на цветной вклейке VII). В земной атмосфере циклоны и антициклоны существуют в среднем около недели. Атмосферные течения и облака зафиксированы космическими аппаратами и на других планетах-гигантах, хотя развиты они в меньшей степени, чем на Юпитере (см. рис. 1, 2 на цветной вклейке X).

Планеты-гиганты находятся далеко от Солнца, поэтому там очень холодно. Температура в атмосфере Юпитера на уровне облачного слоя составляет всего 134 К (около -140°C), Сатурна — 97 К, а на Уране и Нептуне она не превышает 60 К. Такая температура установилась на планетах не только за счет энергии, приходящей от Солнца, но и благодаря потоку энергии из их недр. На Юпитере, Сатурне и Нептуне он существенно больше потока солнечной энергии. Вместе с данными о химическом составе планет эти сведения позволяют рассчитать физические условия в их недрах — построить модели внутреннего строения планет-гигантов. Согласно такой модели для Юпитера температура в его центре составляет около 30 000 К, давление

достигает $8 \cdot 10^{12}$ Па, а для Нептуна — 7000 К и $6 \cdot 10^{11}$ Па. Расчеты показывают, что по мере приближения к центру планеты водород вследствие возрастания давления должен переходить из газообразного в газожидкое состояние — так называют состояние вещества, при котором сосуществуют его газообразная и жидкая фазы. Когда при дальнейшем приближении к центру давление в миллионы раз превысит атмосферное давление, существующее на Земле, водород приобретает свойства, характерные для металлов. Металлическую фазу водорода удалось получить в лабораторных условиях на Земле. В недрах Юпитера металлический водород вместе с силикатами и металлами образует ядро, которое по размерам примерно в 1,5 раза, а по массе в 10—15 раз превосходит Землю.

Магнитное поле Юпитера значительно сильнее земного, поэтому его радиационные пояса, подобные земным, значительно их превосходят, а магнитосфера, которая по своим размерам в 10 раз превосходит диаметр Солнца, охватывает четыре крупнейших спутника. Движение заряженных частиц в радиационных поясах Юпитера порождает его мощное радиоизлучение в дециметровом и декаметровом диапазонах. Космические аппараты зарегистрировали в атмосфере планеты очень сильные разряды молний, полярные сияния.

2. Спутники и кольца планет-гигантов

Данные о природе и химическом составе спутников планет-гигантов, полученные в последние годы с помощью космических аппаратов, стали еще одним подтверждением справедливости современных представлений о происхождении тел Солнечной системы. В условиях, когда водород и гелий на периферии протопланетного облака почти полностью вошли в состав планет-гигантов, их спутники оказались похожими на Луну и планеты земной группы. Все эти спутники состоят из тех же веществ, что и планеты земной группы, — силикатов, оксидов и сульфидов металлов и т. д., а также водяного (или водно-аммиачного) льда. Относительное содер-

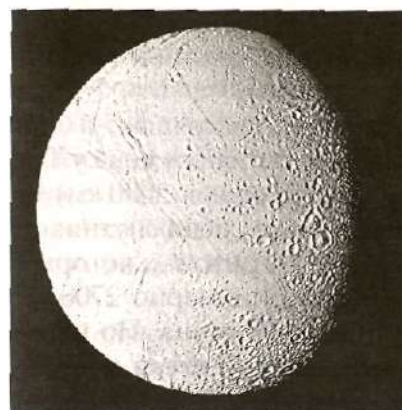


Рис. 4.15. Спутник Сатурна — Энцелад



Рис. 4.16. Спутник Сатурна — Гиперион

жание каменных и ледяных пород у отдельных спутников различно.

На поверхности многих спутников помимо многочисленных кратеров метеоритного происхождения обнаружены также тектонические разломы и трещины их коры (см. цветную вклейку VIII) или ледяного покрова (рис. 4.15). Самым удивительным оказалось открытие на ближайшем к Юпитеру спутнике Ио около десятка действующих вулканов (см. цветную вклейку IX). Высота выброса при крупнейшем из этих извержений составила около 300 км, а его источником была вулканическая кальдера размером 24×8 км. Продолжительность большинства извержений превысила четыре месяца. Таким образом, первое достоверное наблюдение вулканической деятельности за пределами нашей планеты позволяет считать Ио наиболее вулканически активным объектом среди всех тел планетного типа. На спутнике Урана — Миранде — видны уникальные структуры поверхности (см. рис. 1 на цветной вклейке XI). Их возникновение связано, видимо, с мощными ударными процессами, которые могли привести к разрушению спутника. Многие спутники планет-гигантов имеют небольшие

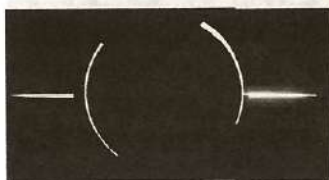


Рис. 4.17. Кольца Юпитера

и является наиболее крупным спутником Нептуна. По плотности и давлению у поверхности атмосфера Титана превосходит земную. На Тритоне и крупнейшем среди спутников Юпитера — Ганимеде, диаметр которого превышает 5000 км, замечены ледяные полярные шапки (см. рис. 2, 3 на цветной вклейке XI).

Исследования, проведенные с помощью космических аппаратов, показали, что, кроме множества спутников, все планеты-гиганты имеют еще и кольца. С момента своего открытия в XVII в. кольца Сатурна (см. рис. 2, 3 на цветной вклейке VII) долгое время считались уникальным образованием в Солнечной системе, хотя некоторые ученые

размеры и неправильную форму (см. рис. 1 на цветной вклейке VIII, рис. 4.16).

Атмосфера, состоящая в основном из азота, обнаружена у Титана (диаметр около 5000 км) — самого большого среди спутников Сатурна — и Тритона, который имеет диаметр примерно 2700 км

высказывали предположения о наличии колец у Юпитера и других планет-гигантов. Уже в XIX в. в работах *Джеймса Максвелла* и *Аристарха Аполлоновича Белопольского* было доказано, что кольца не могут быть сплошными. «Исчезновения» колец Сатурна, которые случались примерно через 15 лет, когда Земля оказывалась в плоскости этих колец, можно было объяснить тем, что толщина колец мала. Постепенно стало очевидно, что кольца Сатурна представляют собой скопления небольших по размеру тел, крупных и мелких кусков, которые обращаются



Рис. 4.18. Кольца Нептуна с арками

вокруг планет по почти круговым орбитам. Все они так малы, что по отдельности не видны. Благодаря их обращению вокруг планеты кольца кажутся сплошными, хотя сквозь кольца Сатурна, например, просвечивает и поверхность планеты, и звезды (см. рис. 3 на цветной вклейке X). Даже эти наиболее заметные кольца при общей ширине порядка 60 000 км имеют толщину не более 1 км. Снимки, сделанные с КА «Вояджер», показывают их сложное строение.

Кольца всех остальных планет-гигантов, включая Юпитер (рис. 4.17), значительно уступают по размерам и яркости кольцам Сатурна. На снимках заметно, что в кольцах Нептуна вещество распределено неравномерно и образует отдельные сгущения — *арки* (рис. 4.18).

Вероятнее всего, кольца образовались из вещества тех спутников, которые прежде были крупнее, а затем разрушились под действием приливных сил и при столкновениях между собой.

3. Плутон

Только в последние 20 лет удалось достичь серьезных успехов в исследованиях Плутона: определить его размеры и массу, а также обнаружить спутник, названный Хароном (рис. 4.19). Плутон оказался наименьшим из больших планет (его масса в 6 раз меньше массы Луны). Харон по диаметру всего лишь в 2 раза меньше самой планеты. Оба этих тела по плотности отличаются от планет обеих групп и, по-видимому, содержат в своем составе, подобно спутникам планет-гигантов, как скальные породы, так и лед. При прохождении через перигелий температура у поверхности Плутона не превышает 67 К, а в афелии опускается до 32—50 К. Разреженная атмосфера планеты состоит из метана. На северном полюсе замерзшие газы образуют полярную шапку, а на остальной поверхности, покрытой метано-



Рис. 4.19. Плутон со спутником Хароном

вым льдом и инеем, чередуются темные и светлые пятна, заметны вытянутые светлые полосы.



ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется наличие у Юпитера и Сатурна плотных и протяженных атмосфер? 2. Почему атмосферы планет-гигантов отличаются по химическому составу от атмосфер планет земной группы? 3. Каковы особенности внутреннего строения планет-гигантов? 4. Какие формы рельефа характерны для поверхности большинства спутников планет? 5. Каковы по своему строению кольца планет-гигантов? 6. Какое уникальное явление обнаружено на спутнике Юпитера Ио? 7. Какие физические процессы лежат в основе образования облаков на различных планетах?



УПРАЖНЕНИЕ 15

Используя данные приложения VI, рассчитайте линейную и угловую скорости вращения на экваторах Земли и Юпитера.



ЗАДАНИЕ 14

Подготовьте доклад о природе одной из планет Солнечной системы.

§ 20. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Часть вещества допланетного облака, которая осталась после образования больших планет, продолжает обращаться вокруг Солнца в виде тел меньшего размера — *астероидов* и *комет*.

1. Малые планеты

Поскольку малые планеты даже в телескоп видны как светящиеся точки, похожие на звезды, их называют еще *астероидами* (звездopodobными). Первая из них была открыта в 1801 г. и получила имя, взятое из древней мифологии, — Церера. Она оказалась самой большой — ее диаметр около 1000 км. Вскоре были обнаружены Паллада, Веста (рис. 4.20) и Юнона. Эти и другие открытые за последующие полтора столетия малые планеты, в основном, обращаются между орбитами Марса и Юпитера, в так называемом *поясе астероидов*. Кроме Весты ни одна из них не видна невооруженным

глазом. Считается, что общее число малых планет, размеры которых превышают 1 км, может достигать миллиона. По массе астероиды невелики. Даже общая масса всех астероидов составляет не более 1/1000 массы Земли.

Метеориты, которые попадают в руки человека после падения на Землю, являются, как правило, обломками астероидов. Они могут сотни миллионов лет двигаться по своим орбитам вокруг Солнца, как и остальные, более крупные тела Солнечной системы. Но если их орбиты пересекаются с орбитой Земли, то они могут с ней столкнуться. Это возможно потому, что эксцентриситеты орбит астероидов (а тем более их частей) больше, чем эксцентриситеты орбит больших планет. В афелии некоторые из них оказываются ближе к Солнцу, чем Земля, а другие в перигелии — дальше, чем Юпитер и даже Сатурн. Известно несколько астероидов, которые периодически проходят на расстоянии менее 1 млн км от нашей планеты (рис. 4.21).

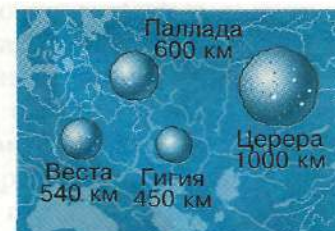


Рис. 4.20. Размеры астероидов

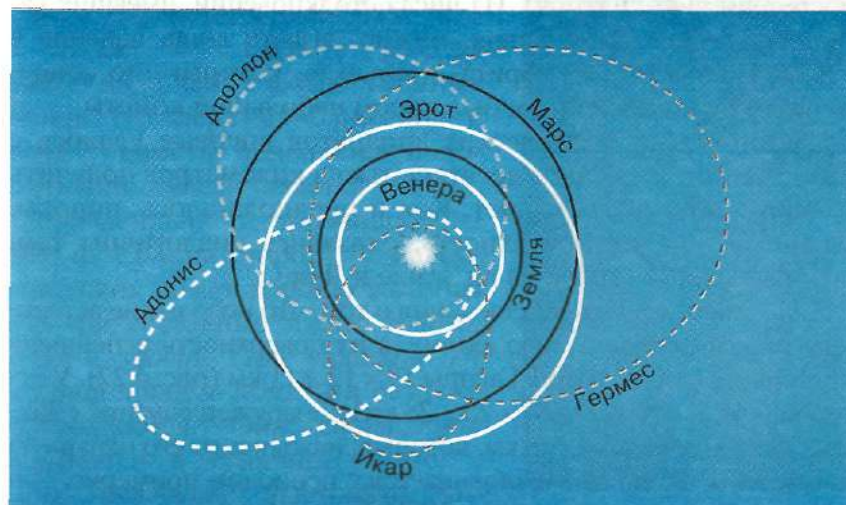


Рис. 4.21. Орбиты астероидов, пролетающих вблизи Земли



Рис. 4.22. Астероид Гаспра

Так, Гермес в 1937 г. отделяло от Земли всего 800 тыс. км, а в 1989 г. астероид диаметром около 300 м прошел от нее на расстоянии менее 650 000 км.

Современные наблюдательные средства, в частности приборы, установленные на космических аппаратах, обнаружили, что в окрестностях Земли каждый месяц пролетает несколько тел размером от 5 до 50 м. К настоящему времени известно около 20 тел астероидного размера (от 50 м до 5 км), орбиты которых проходят недалеко от орбиты нашей планеты. Опасения по поводу возможного столкновения таких тел с Землей значительно усилились после падения на Юпитер кометы Шумейкеров—Леви 9 в июле 1995 г. Это стимулировало поиски и отслеживание комет и астероидов, которые пересекают орбиту Земли, а также разработку способов, которые позволят избежать столкновения (вплоть до уничтожения этих тел). Нет особых оснований считать, что количество столкновений с Землей может сколько-нибудь заметно увеличиться в будущем (ведь «запасы» метеоритного вещества в межпланетном пространстве постепенно истощаются). Из числа столкновений, имевших катастрофические последствия, можно назвать лишь падение в 1908 г. Тунгусского метеорита — объекта, который, по современным представлениям, был ядром небольшой кометы.

С помощью космических аппаратов впервые удалось с расстояния в несколько десятков тысяч километров получить изображения малых планет. Как и предполагалось, породы, составляющие их поверхность, оказались аналогичны тем, которые распространены на Земле и Луне.

Подтвердились представления о том, что небольшие астероиды имеют неправильную форму, а их поверхность испещрена кратерами. Так, размеры Гаспры $19 \times 12 \times 11$ км (рис. 4.22). У астероида Ида (размеры $56 \times 28 \times 28$ км) обнаружен спутник (Дактиль) размером около 1,5 км, который, находясь от его центра на расстоянии около 85 км, обращается с периодом примерно 24 ч (см. рис. 2 на цветной вклейке XIII). В подобной «двойственности» заподозрено около 50 астероидов.

До недавнего времени считалось, что малые планеты движутся в основном между орбитами Марса и Юпитера. Однако в последние годы в Солнечной системе между планетами-гигантами и за пределами орбиты Нептуна было открыто несколько десятков тел размером 100—300 км. Первым из них еще в 1992 г. был обнаружен астероид, период обращения которого составляет 93 года (большая полуось орбиты около 20 а. е.), а затем еще более далекий, диаметром около 200 км на расстоянии более 40 а. е. от Солнца. В последующем подтвердилось высказанное ранее предположение о том, что в Солнечной системе за орбитой Нептуна существует второй пояс астероидов, где их число в сотни раз превышает число астероидов известного пояса. Вероятно, эти далекие астероиды содержат значительное количество водяного льда, и они больше похожи на ядра комет, чем на «обычные» астероиды.

2. Кометы

Из-за своего необычного вида (наличие хвоста, который может простираться на несколько созвездий) **кометы** с древних времен обращали на себя внимание людей, даже далеких от астрономии. За все время наблюдений было замечено и описано свыше 2000 комет (рис. 4.23).

Вдали от Солнца кометы имеют вид очень слабых туманных пятен. По мере приближения к нему у кометы появляется и постепенно увеличивается хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. У наиболее ярких комет хорошо заметны все три составные части: *голова*, *ядро* и *хвост*. При удалении от Солнца яркость кометы и ее хвост уменьшаются. Она снова превращается в туманное пятно, а затем ослабевает настолько, что становится недоступной для наблюдений.



Рис. 4.23. Комета на звездном небе

Кроме необычного внешнего вида, кометы обращали на себя внимание неожиданностью появления. Решить вопрос о том, откуда появляются кометы и как они движутся в пространстве, удалось только на основе закона всемирного тяготения. Наблюдая в 1680 г. комету, Ньютон вычислил ее орбиту и убедился, что она подобно планетам обращается вокруг Солнца. Пользуясь советами Ньютона, его современник, английский ученый **Эдмунд Галлей** (1656—1742) вычислил орбиты нескольких комет, появлявшихся ранее, и обнаружил, что орбиты комет, наблюдавшихся в 1531, 1607 и 1682 гг., очень похожи. Он предположил, что это была одна и та же комета, периодически возвращающаяся к Солнцу, и впервые предсказал ее очередное появление. В 1756 г. (уже после смерти ученого) комета действительно появилась и получила название кометы Галлея. Так была положена традиция называть кометы именами их первооткрывателей. Оказалось, что комета Галлея в афелии уходит за орбиту Нептуна, но затем вновь возвращается в окрестности Солнца, имея период обращения около 76 лет (рис. 4.24). Со времен Ньютона и Галлея вычислены орбиты более чем 700 комет.

Короткопериодические кометы (периоды обращения от трех до десяти лет), двигаясь по вытянутым эллиптическим орбитам, удаляются от Солнца на 5—8 а. е. Наряду с ними существуют долгопериодические кометы, подобные комете Галлея,

но уходящие в афелии за пределы планетной системы. Среди комет немало таких, которые наблюдались всего один раз и могут вернуться только через несколько столетий. В тех случаях, когда удается с достаточной точностью определить орбиту кометы, не представляет труда с помощью компьютера вычислить ее положение в пространстве и указать, где и когда она будет видна. Сближение комет с планетами позволяет определить их массу, которая не превышает тысячных долей массы земной атмосферы и в сотни миллионов раз меньше массы



Эдмунд Галлей

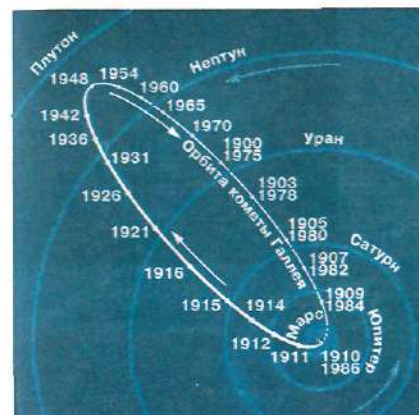


Рис. 4.24. Орбита кометы Галлея



Рис. 4.25. Комета Хиякутаки

земного шара. Однако такая планета, как Юпитер, своим тяготением может существенно изменить форму орбиты и период обращения кометы. Тогда она может быть «потеряна».

Ежегодно наблюдается 15—20 комет, большинство которых видны только в телескоп. Некоторые из них оказываются новыми, неизвестными ранее. Так случилось, например, недавно, когда в 1996 и 1997 гг. появились две очень яркие, видимые даже невооруженным глазом кометы, хотя обычно такие кометы появляются раз в 10—15 лет (рис. 4.25 и рис. 1 на цветной вклейке XIII). По традиции они названы фамилиями тех, кто их открыл. Это японский любитель астрономии **Хиякутаки** и два американца — **Хейл** и **Бопп**.

Иногда у кометы образуется несколько хвостов различной длины и формы. Их классификация была предложена выдающимся русским ученым **Федором Александровичем Бредихиным** (1831—1904): **I тип** — длинный хвост, направленный почти прямо от



Федор Александрович Бредихин



Рис. 4.26. Классификация кометных хвостов



Рис. 4.27. Ядро кометы Галлея

Солнца; *II тип* — изогнутый и отклоненный от этого направления; *III тип* — короткий, почти прямой и отклоненный (рис. 4.26). Хвосты образуются частицами разного рода, для которых соотношение сил притяжения к Солнцу и сил, действующих в противоположном направлении, неодинаково. Во времена Бредихина в расчет принималось лишь давление света; в настоящее время известно, что не менее существенную роль в формировании кометного хвоста играет солнечный ветер — поток заряженных частиц, летящих от Солнца. Солнечное излучение вызывает распад молекул, вылетевших из кометного ядра, а также образование ионов. Именно ионы атомов и молекул образуют плазменные хвосты I типа. Воздействие солнечного ветра на ионы кометного хвоста, которое в тысячи раз сильнее их притяжения Солнцем, нередко вызывает изломы хвостов I типа. Хвосты II типа составляют непрерывно выделяющиеся из ядра пылинки. Если же из ядра вылетает сразу целое облако пылинок, то появляются хвосты III типа. Пылинки, различные по размерам и массе, получают различные ускорения, поэтому облако вытягивается и образует хвост.

Несмотря на внушительные размеры хвоста, который может превышать в длину 100 млн км, и головы, которая по диаметру может превосходить Солнце, кометы справедливо называют «видимое ничто». Практически все их вещество сосредоточено в небольшом ядре, которое удалось увидеть только с космических аппаратов, пролетевших в непосредственной близости от него. В 1986 г. КА «Вега-2» прошел на расстоянии 8000 км от ядра кометы Галлея, а КА «Джотто» —

на расстоянии 600 км. Оказалось, что ядро имеет длину всего 14 км, а ширину и толщину вдвое меньше (рис. 4.27). Оно представляет собой снежно-ледяную глыбу с примесью замерзших газов (циана, аммиака, углекислого газа и других соединений) и вкраплением мелких твердых частиц различного химического состава. В этом «грязном мартовском сугробе», как часто называют кометные ядра, содержится примерно столько замерзшей воды, сколько в снежном покрове, выпавшем за одну зиму на территории Московской области. Интенсивное испарение замерзших газов из ядра начинается после того, как комета пересечет орбиту Юпитера. Газы захватывают с собой пыль и вместе с ней образуют голову кометы (ее атмосферу), а также хвост. В момент сближения космических аппаратов с ядром (на расстоянии 0,8 а. е. от Солнца) была измерена его температура, которая составила около 350 К. С поверхности ядра, покрытой темным пористым веществом, каждую секунду испарялось примерно 40 т вещества — в основном воды. Примерно за сутки поверхностный слой полностью обновлялся — взамен улетевших пылинок «вытаивали» новые.

Предполагается, что общее число комет в Солнечной системе превышает десятки миллиардов. Считается, что Солнечная система окружена одним или даже несколькими облаками комет, которые движутся вокруг Солнца на расстояниях, которые в тысячи и десятки тысяч раз больше, чем расстояние до самой дальней планеты Плутон (рис. 4.28). Там, в этом космическом сейфе-холодильнике кометные ядра «хранятся» на протяжении миллиардов лет с момента образования Солнечной системы. Некоторые из них попадают внутрь планетной системы и наблюдаются как новые кометы. После этого, вследствие постоянной потери вещества, ядро кометы уже не может существовать долго. Твердые частицы, потерянные кометой, движутся в Солнечной системе самостоятельно.

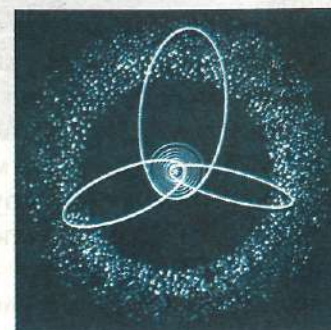


Рис. 4.28. Облако комет в Солнечной системе

3. Метеоры, болиды и метеориты

Метеоры, которые в старину называли «падающими звездами», можно видеть практически в любую ясную ночь, если только не мешает свет Луны. Явление метеора вызывается метеорными телами — мелкими камешками и песчинками, влетающими в атмосферу Земли со скоростями в десятки километров в секунду. В спектре вспыхнувшего метеора наблюдаются линии кремния, кальция, железа и других металлов. Теряя скорость при торможении в атмосфере, метеорные тела разогреваются, испаряются и практически полностью разрушаются, не долетев до поверхности Земли. На своем пути они ионизируют молекулы воздуха. Благодаря этому светящийся метеорный след отражает радиоволны, что позволяет с помощью радиолокаторов наблюдать метеоры не только ночью, но и днем.

Фотографируя один и тот же метеор из пунктов, отстоящих друг от друга на расстоянии 20—30 км, можно определить его параллактическое смещение и вычислить, на какой высоте он появился и на какой исчез. Обычно это происходит на высотах от 130 до 80 км. Если при фотографировании

использовать камеру, объектив которой периодически перекрывается вращающимся затвором, то по полученному прерывистому следу можно оценить скорость метеора (рис. 4.29).

Метеорные тела, догоняющие Землю, влетают в ее атмосферу со скоростью не менее 11 км/с, а летящие навстречу — 60—75 км/с.

Они имеют массу от миллиграммов до нескольких граммов. Оставшаяся после разрушения этих тел мелкая пыль постепенно оседает на поверхность Земли.

Метеорные потоки наблюдаются ежегодно в определенные ночи, когда несколько (а иногда



Рис. 4.30. Метеорное вещество на орбите

несколько десятков) метеоров каждый час вылетают из определенной области неба, называемой **радиантом**. Такие метеорные потоки получают названия по имени созвездия, в котором расположен их радиант, например Дракониды, Леониды, Персеиды. Наличие радианта означает, что до встречи с Землей метеорные тела двигались почти параллельно, по близким орбитам. Еще во второй половине XIX в. удалось установить, что орбита частиц метеорного потока Персеид практически совпадает с орбитой одной из комет. Особенно очевидной связь метеорных потоков с кометами стала после наблюдений за кометой Биэлы, открытой еще в 1772 г. и регулярно возвращавшейся каждые семь лет. В 1846 г. она распалась на две самостоятельные кометы, а с 1872 г. вместо них ежегодно в конце ноября стал наблюдаться метеорный поток.

Потерянные ядром кометы твердые частицы растягиваются вдоль всей орбиты, по которой движется комета, и образуют огромный тор из метеорного вещества (рис. 4.30). Частицы этого тора встречаются на пути нашей планеты в определенном месте ее орбиты. Так, например, с орбитой кометы Галлея Земля сближается дважды в год — 4 мая и 22 октября. На это время приходятся два метеорных потока — майские Аквариды и Ориониды. Поскольку метеорное вещество распределяется по орбите неравномерно, активность некоторых метеорных потоков периодически меняется. Так, метеорный поток Леониды дает обильные метеорные дожди каждые 33 года.

Наблюдения метеорных потоков, имеющие научную ценность, могут проводить и успешно проводят юные любители астрономии.



Рис. 4.29. След метеора на звездном небе



Рис. 4.31. Железный метеорит

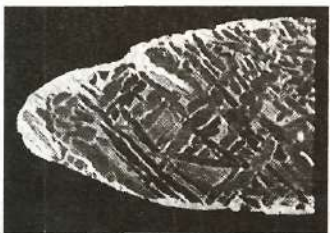


Рис. 4.32. Внутренняя структура железного метеорита



Рис. 4.33. Структура каменного метеорита с хондрами

Когда в атмосферу Земли падает из космического пространства крупное тело, наблюдается явление, называемое **болидом**. Болиды имеют вид огненного шара и оставляют после своего полета след, который иногда можно наблюдать в течение 15—20 мин. Наиболее яркие болиды видны даже днем.

В отдельных случаях тело, вызвавшее появление болида, не успевает до конца испариться в атмосфере и падает на поверхность Земли в виде **метеорита** (см. рис. 3, 4 на цветной вклейке XIII). Считается, что в течение года на Землю выпадает около 2000 метеоритов.

По химическому составу различают **каменные**, **железные** и **железокаменные** метеориты. Железные метеориты состоят в основном из никелистого железа, содержащего 90% железа и 9% никеля. Подобное соотношение не встречается в земных минералах, так что железные метеориты достаточно легко отличить от пород земного происхождения (рис. 4.31). На их отполированной поверхности при травлении кислотой появляется своеобразная система продольных и поперечных полос (рис. 4.32). Такая структура возникает, когда расплавленные породы медленно остывают внутри тел диаметром свыше 200—300 км. Эти и другие данные свидетельствуют о том, что метеориты являются обломками астероидов.

Каменные метеориты составляют более 90% всех падающих на Землю метеоритов. Для большинства из них характерно наличие в их составе **хондр** — мелких круглых частиц размером от нескольких микрометров до сантиметра (рис. 4.33). Соотношение содержащихся в этих шариках серовато-коричневого цвета химических элементов точно такое же, как и в атмосфере Солнца. Возможно, в хондрах «законсервировано» вещество протопланетного облака.

В составе метеоритов обнаружено значительно меньшее число минералов, чем в земных горных породах. Это позволяет судить о процессах, которые происходили на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

Кратеры на планетах земной группы, Луне и других спутниках планет имеют метеоритное происхождение. На Земле методами аэрофотосъемки обнаружено около 130 подобных кратеров; их стали называть **астроблемами**. Одним из наиболее известных является Аризонский метеоритный кратер (США), имеющий диаметр более 1200 м и глубину 200 м (рис. 4.34). Считается, что образовался этот кратер примерно 5000 лет тому назад. Расчеты показывают, что для его образования метеоритное тело должно иметь массу более 100 000 т.

К числу крупнейших метеоритов, падение которых наблюдалось, принадлежит Сихотэ-Алинский массой около 100 т. Железный метеоритный дождь выпал 12 февраля 1947 г. в уссурийской тайге, так как в воздухе метеорит распался на тысячи кусков, поскольку состоял из непрочного скрепленных между собой железоникелевых кристаллов различного размера. Наиболее крупные из них массой в несколько тонн, достигнув земли с большой скоростью, образовали более сотни кратеров и воронок. Самый большой из кратеров имел диаметр около 26 м и глубину 6 м.

Мощным взрывом завершился полет огненного шара, наблюдавшийся 30 июня 1908 г. в Сибири и получивший название Тунгусского метеорита. При этом были повалены почти все деревья на площади поперечником около



Рис. 4.34. Аризонский метеоритный кратер

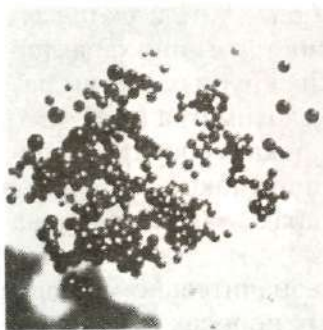


Рис. 4.35. Метеоритные шарики

40 км. Однако, несмотря на многолетние тщательные поиски, ни самого метеорита, ни метеоритного кратера найти не удалось. Вероятнее всего, в атмосферу Земли влетело ядро небольшой кометы, разрушение которого имело характер взрыва и произошло на высоте нескольких километров. Образовавшаяся при этом взрывная волна вызвала вывал леса, но для образования кратера ее энергия оказалась недостаточной. Твердые частицы в виде шариков диаметром не более 1 мм, которые найдены в этом районе, очень похожи на те, которые встречаются на местах падения многих крупных метеоритов (рис. 4.35). Видимо, это все, что осталось от ядра кометы после его взрыва.



Вопросы

1. Как отличить при наблюдениях астероид от звезды? 2. Какова форма большинства астероидов? Каковы примерно их размеры? 3. Чем обусловлено образование хвостов комет? 4. В каком состоянии находится вещество ядра кометы? ее хвоста? 5. Может ли комета, которая периодически возвращается к Солнцу, оставаться неизменной? 6. Какие явления наблюдаются при полете в атмосфере тел с космической скоростью? 7. Какие типы метеоритов выделяются по химическому составу?



УПРАЖНЕНИЕ 16

1. После захода Солнца на западе видна комета. Как относительно горизонта направлен ее хвост? 2. Какова большая полуось орбиты кометы Галлея, если период ее обращения 76 лет? 3. Сравните причины свечения планеты и кометы. Какие различия в их спектрах обусловлены этими причинами? 4. Орбиты двух комет лежат в плоскости земной орбиты, наименьшие их расстояния от Солнца составляют 0,5 и 2 а. е. Каждая из комет имеет на этом расстоянии хвост длиной 150 млн км. Могут ли эти кометы своим хвостом «зацепить» Землю? Полезно сделать чертеж. 5*. Опишите, какие превращения может испытать молекула воды, входившая в состав ядра кометы, под действием солнечного излучения. 6*. Оцените примерную ширину метеорного потока Персеид, зная, что метеоры этого потока наблюдаются с 17 июля по 24 августа.



V. СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

§ 21. СОЛНЦЕ — БЛИЖАЙШАЯ ЗВЕЗДА

1. Энергия и температура Солнца

Солнце — центральное тело Солнечной системы является типичным представителем звезд, наиболее распространенных во Вселенной тел. Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг. Как и многие другие звезды, Солнце представляет собою огромный шар, который состоит из водородно-гелиевой плазмы и находится в равновесии в поле собственного тяготения. Изучение физических процессов, происходящих на Солнце, имеет важное значение для астрофизики, поскольку эти процессы свойственны, очевидно, и другим звездам, но только на Солнце мы можем наблюдать их достаточно детально.

Солнце излучает в космическое пространство колоссальный по мощности поток излучения, который в значительной мере определяет физические условия на Земле и других планетах, а также в межпланетном пространстве. Земля получает всего лишь одну двухмиллиардную долю солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре. Все источники энергии, которые использует человечество, связаны с Солнцем. Тепло и свет Солнца обеспечили развитие жизни на Земле, формирование месторождений угля, нефти и газа.

Количество приходящей от Солнца на Землю энергии принято характеризовать *солнечной постоянной*.

Солнечная постоянная — поток солнечного излучения, который приходит на поверхность площадью 1 м^2 , расположенную за пределами атмосферы перпендикулярно солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а. е.).

Солнечная постоянная равна $1,37 \text{ кВт/м}^2$. Умножив эту величину на площадь поверхности шара, радиус которого 1 а. е., определим полную мощность излучения Солнца, его светимость, которая составляет $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Знание законов излучения позволяет определить температуру фотосферы Солнца. Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана—Больцмана:

$$E = \sigma \cdot T^4.$$

Светимость Солнца известна, остается узнать, какова площадь поверхности Солнца.

С Земли мы видим Солнце как небольшой диск, край которого достаточно четко определяет фотосфера (в переводе с греческого — «сфера света»). Так называется тот слой, от которого приходит практически все видимое излучение Солнца. Он имеет толщину всего 300 км и выглядит как поверхность Солнца. Угловой диаметр солнечного диска примерно $30'$. Зная расстояние до Солнца ($150\,000\,000 \text{ км}$), нетрудно вычислить его линейные размеры и площадь поверхности. Радиус Солнца равен приблизительно $700\,000 \text{ км}$. Теперь можно узнать, какова температура фотосферы. Светимость Солнца

$$L = 4\pi R^2 \cdot E,$$

или

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Отсюда

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}.$$

Подставив в эту формулу численные значения входящих в нее величин, получим $T = 6000 \text{ К}$. Очевидно, что такая температура может поддерживаться лишь за счет постоянного притока энергии из недр Солнца.

2. Состав и строение Солнца

Для изучения Солнца используются телескопы особой конструкции — башенные солнечные телескопы (рис. 5.1). Система зеркал непрерывно поворачивается вслед за Солнцем и направляет его лучи вниз на главное зеркало, а затем они попадают в спектрографы или другие приборы, с помощью которых проводятся исследования Солнца. Благодаря большому фокусному расстоянию солнечных телескопов (до 90 м) можно получить изображение Солнца диаметром до 80 см и детально изучать происходящие на нем явления. Они лучше видны на спектрограммах (см. цветную вклейку XII) — снимках Солнца, которые сделаны в лучах, соответствующих спектральным линиям водорода, кальция и некоторых других элементов.

Важнейшую информацию о физических процессах на Солнце дает спектральный анализ. Именно в спектре Солнца

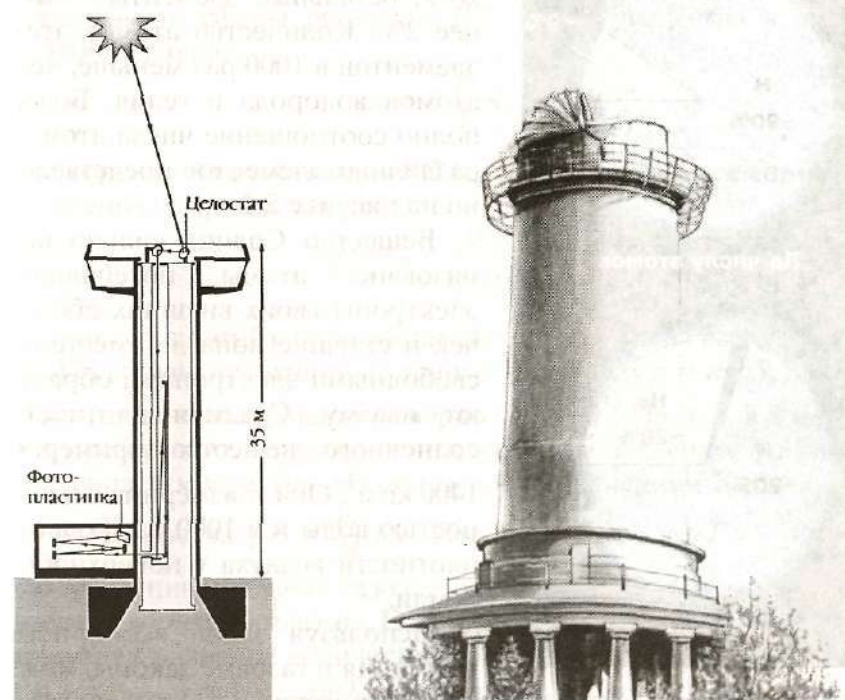


Рис. 5.1. Башенный солнечный телескоп

Йозеф Фраунгофер еще в 1814 г. обнаружил и описал линии поглощения, по которым, как стало ясно почти полвека спустя, можно узнать состав его атмосферы (см. рис. 4 на цветной вклейке XII). В настоящее время в солнечном спектре зарегистрировано более 30 000 линий, принадлежащих 72 химическим элементам. Спектральными методами гелий (от греческого «гелиос» — солнечный) был сначала открыт на Солнце и лишь затем обнаружен на Земле. Все последующие попытки найти линии других неизвестных элементов не увенчались успехом, но были тем не менее не бесполезны. Они во многом способствовали развитию теории спектрального анализа, которая важна как для астрофизики, так и для физики в целом.

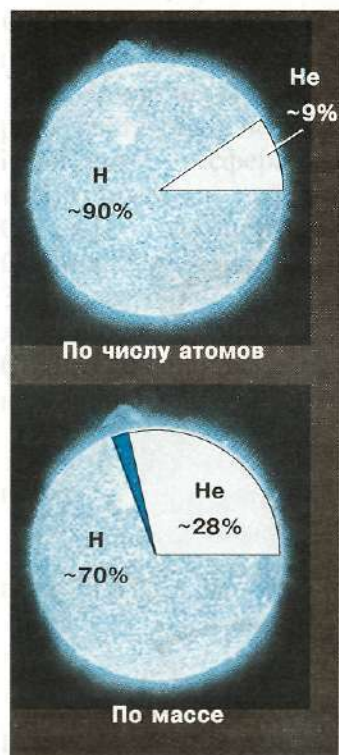


Рис. 5.2. Диаграмма химического состава Солнца

Современные данные о химическом составе Солнца таковы: водород составляет около 70% солнечной массы, гелий — более 28%, остальные элементы — менее 2%. Количество атомов этих элементов в 1000 раз меньше, чем атомов водорода и гелия. Более полно соотношение числа атомов различных элементов представлено на рисунке 5.2.

Вещество Солнца сильно ионизовано: атомы, потерявшие электроны своих внешних оболочек и ставшие ионами, вместе со свободными электронами образуют плазму. Средняя плотность солнечного вещества примерно 1400 кг/м^3 . Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.

Используя закон всемирного тяготения и газовые законы, можно рассчитать условия внутри Солнца, построить модель «спо-

койного» Солнца. Оно находится в равновесии, поскольку в каждом его слое действие сил тяготения, которые стремятся сжать Солнце, уравнивается действием сил внутреннего давления газа. Действием гравитационных сил в недрах Солнца создается огромное давление. Сделаем приближенный расчет его величины для слоя, лежащего на расстоянии $R/2$ от центра Солнца. При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней (рис. 5.3).

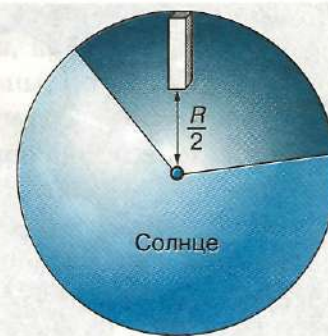


Рис. 5.3. Расчет условий в недрах Солнца

Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключенной в радиальном столбике, высота которого $R/2$, площадь S , а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом $R/2$. Масса вещества в этом столбике равна:

$$m = \bar{\rho} \frac{R}{2} S,$$

а ускорение на расстоянии $R/2$ (согласно закону всемирного тяготения) выражается так:

$$g = G \cdot \frac{M/8}{(R/2)^2},$$

так как объем этой сферы составляет $1/8$ от объема всего Солнца. Подставив необходимые данные в формулу $p = mg/S$, получим, что давление равно примерно $6,6 \cdot 10^{13} \text{ Па}$, т. е. в 1 млрд раз превосходит нормальное атмосферное давление. Для вычисления температуры воспользуемся уравнением Клапейрона—Менделеева: $pV = \frac{m}{M} RT$. Поскольку $\frac{m}{V} = \rho$, $T = \frac{M \cdot p}{R \cdot \rho}$, где R — универсальная газовая постоянная, а M — молярная масса водородной плазмы. Если считать, что в состав вещества входят в равном количестве протоны и электроны, то она примерно равна $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Тогда $T = 2,8 \cdot 10^6 \text{ К}$. Более точные расчеты, проведенные с учетом изменения плотности

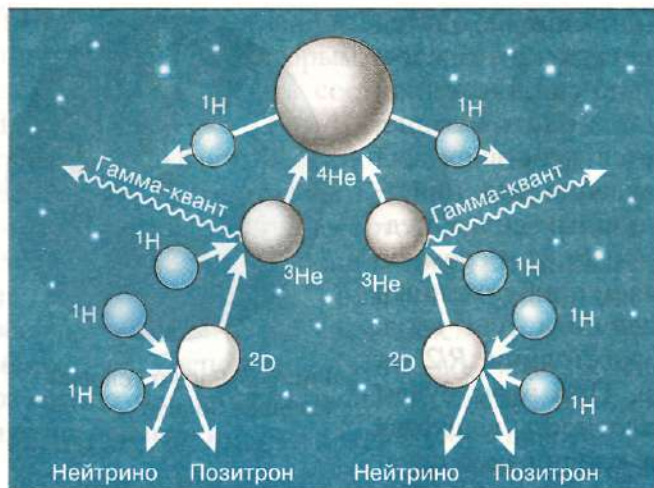


Рис. 5.4. Схема реакций протон-протонного цикла

с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше: $p = 6,1 \cdot 10^{13}$ Па, $T = 3,4 \cdot 10^6$ К.

Согласно современным данным, температура в центре Солнца достигает 15 млн К, давление $2 \cdot 10^{18}$ Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твердых тел в земных условиях: $1,5 \cdot 10^5$ кг/м³, т. е. в 13 раз больше плотности свинца. Тем не менее применение газовых законов к веществу, находящемуся в этом состоянии, оправдано тем, что оно ионизовано. Размеры атомных ядер, потерявших свои электроны, примерно в 10 тыс. раз меньше размеров самого атома, а размеры самих частиц довольно малы по сравнению с расстояниями между ними. Это условие, которому должен удовлетворять идеальный газ, для смеси ядер и электронов, составляющих вещество внутри Солнца, выполняется несмотря на его высокую плотность.

При высокой температуре в центральной части Солнца протоны, которые преобладают в составе солнечной плазмы, имеют столь большие скорости, что могут преодолеть электростатические силы отталкивания и взаимодействовать между собой. В результате такого взаимодействия происходит *термоядерная реакция*: четыре протона образуют альфа-частицу (ядро гелия) (рис. 5.4).

В процессе реакции высвобождается определенная порция энергии. Кинетическая энергия, которую приобретают образующиеся в ходе реакции частицы, поддерживает высокую температуру плазмы и тем самым создаются условия для продолжения термоядерного синтеза. Энергия гамма-квантов обеспечивает излучение Солнца.

Из недр Солнца наружу эта энергия передается двумя способами: *излучением*, т. е. самими квантами, и *конвекцией*, т. е. веществом. Выделение энергии и ее перенос определяют внутреннее строение Солнца:

ядро — центральная зона, где при высоком давлении и температуре происходят термоядерные реакции;

«лучистая» зона, где энергия передается наружу от слоя к слою в результате последовательного поглощения и излучения квантов;

наружная конвективная зона, где энергия от слоя к слою переносится самим веществом в результате перемешивания (конвекции).

Каждая из этих зон занимает примерно 1/3 солнечного радиуса (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Внутреннее строение Солнца

Сразу за конвективной зоной начинается *атмосфера*, которая простирается далеко за пределы видимого диска Солнца. Ее нижний слой — *фотосфера* — воспринимается как поверхность Солнца. Верхние слои атмосферы непосредственно не видны и могут наблюдаться либо во время полных солнечных затмений, либо из космического пространства, либо при помощи специальных приборов с поверхности Земли.

3. Атмосфера Солнца

Фотосфера — самый нижний слой атмосферы Солнца, в котором температура довольно быстро убывает от 8000 до 4000 К. Следствием конвективного движения вещества в верхних слоях Солнца является своеобразный вид фотосферы — *грануляция* (рис. 5.6). Фотосфера как бы состоит из отдельных зерен — гранул, размеры которых составляют в среднем несколько сотен (до 1000) километров. *Гранула* — это поток горячего газа, поднимающийся вверх. В темных промежутках между гранулами находится более холодный газ, опускающийся вниз. Каждая гранула существует всего 5—10 мин, затем на ее месте появляется новая, которая отличается от прежней по форме и размерам. Общая наблюдаемая картина при этом не меняется. Вещество фотосферы нагревается за счет энергии, поступающей из недр Солнца, а излучение, которое уходит в межпланетное пространство, уносит энергию, поэтому наружные слои фотосферы охлаждаются.

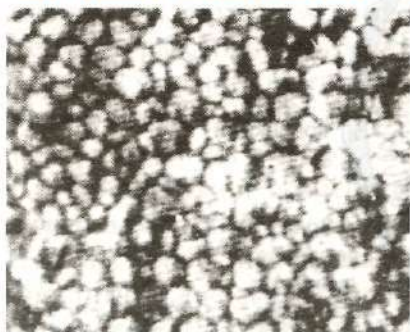


Рис. 5.6. Грануляция в фотосфере

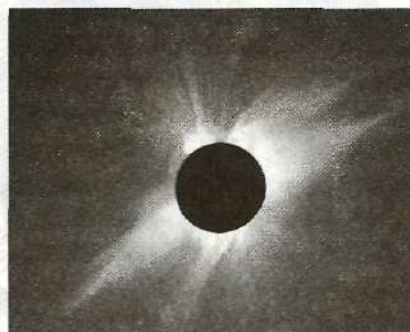


Рис. 5.7. Вид хромосферы и короны во время полного затмения Солнца

В самых верхних слоях фотосферы плотность вещества составляет 10^{-3} — 10^{-4} кг/м³. Здесь в условиях минимальной для Солнца температуры оказывается возможным существование нейтральных атомов водорода и даже простейших молекул и радикалов H₂, OH, CH.

Над фотосферой располагается *хромосфера* («сфера цвета»). Красновато-фиолетовое кольцо хромосферы можно видеть в те моменты, когда диск Солнца закрыт Луной во время полного солнечного затмения (рис. 5.7). В хромосфере вещество имеет температуру в 2—3 раза выше, чем в фотосфере. Здесь, как и внутри Солнца, оно представляет собой плазму, только меньшей плотности. Толщина хромосферы 10—15 тыс. км, а далее на миллионы километров (несколько радиусов Солнца) простирается *солнечная корона*.

Для короны, которую можно наблюдать во время полных солнечных затмений как жемчужно-серебристое сияние, характерна лучистая структура с множеством сложных деталей — дуг, шлемов и т. д. (рис. 5.7). Температура в короне повышается до 1—2 млн К, а затем очень медленно снижается. Солнечная корона (рис. 5.8) явилась для астрофизики уникальной природной лабораторией, в которой удастся наблюдать поведение вещества в условиях, недостижимых на Земле. Высокая температура короны обеспечивает полную ионизацию легких элементов, а у более тяжелых сохраняются электроны, находящиеся на самых глубоких электронных оболочках. Высокоионизованную плазму короны часто называют электронным газом, имея в виду, что число электронов, потерянных атомами, существенно превосходит число образовавшихся при этом положительных ионов.

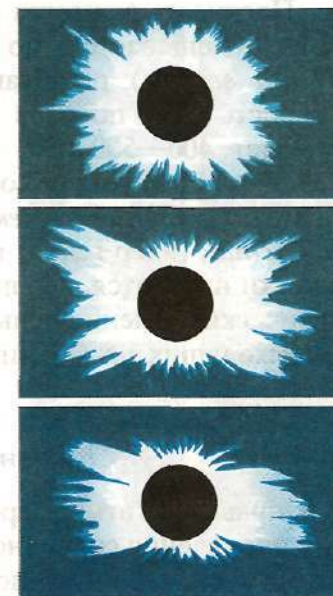


Рис. 5.8. Изменение вида солнечной короны

Плотность вещества по мере удаления от Солнца постепенно уменьшается, но потоки плазмы из короны («солнечный ветер») растекаются по всей планетной системе. Скорость этих потоков в окрестностях Земли обычно составляет 400—500 км/с, но у некоторых может достигать 1000 км/с. Основными составляющими солнечного ветра являются *протоны* и *электроны*, значительно меньше *альфа-частиц* (ядер гелия) и других ионов. Наша планета фактически находится в солнечной короне, поэтому многие геофизические явления испытывают на себе влияние процессов, происходящих на Солнце, в особенности солнечной активности.

4. Солнечная активность

Как правило, в атмосфере Солнца наблюдаются многообразные проявления солнечной активности, характер протекания которых определяется поведением солнечной плазмы в магнитном поле — *пятна*, *вспышки*, *протуберанцы* и т. п. Наиболее известными из них являются *солнечные пятна*, открытые еще в начале XVII в. во время первых наблюдений при помощи телескопа. По изменению положения пятен на диске Солнца было обнаружено, что оно вращается. Наблюдения показали, что угловая скорость вращения Солнца убывает от экватора к полюсам, а время полного оборота вокруг оси возрастает с 25 суток (на экваторе) до 30 (вблизи полюсов).

Общее магнитное поле Солнца по форме линий магнитной индукции отчасти напоминает земное. Пятна появляются

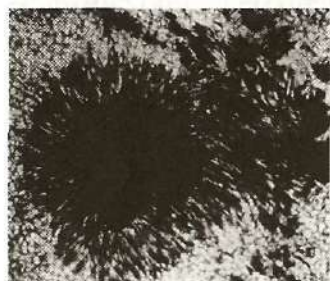


Рис. 5.9. Структура крупного пятна

в тех сравнительно небольших областях фотосферы Солнца, где магнитное поле усиливается в несколько тысяч раз по сравнению с общим фоном, и его индукция может достигать 0,4—0,5 Тл. Усиление магнитного поля, которое охватывает также лежащие выше области хромосферы и короны, является характерным признаком активной области (центра активности).

Сначала пятна наблюдаются как маленькие темные участки диаметром 2000—3000 км. Большинство из них в течение суток пропадают, однако некоторые увеличиваются в десятки раз. Такие пятна могут образовывать большие группы и существовать, меняя форму и размеры, на протяжении нескольких месяцев, т. е. нескольких оборотов Солнца. У крупных пятен вокруг наиболее темной центральной части (ее называют *тень*) наблюдается менее темная полутень (рис. 5.9). В центре пятна температура вещества снижается примерно до 4000 К, поэтому в спектре пятен наблюдаются полосы поглощения некоторых двухатомных молекул, например CO, TiO, CN, CN. Понижение температуры в районе пятна связано с действием магнитного поля, которое нарушает нормальную конвекцию и препятствует притоку энергии снизу. Вместе с тем вблизи пятен, где магнитное поле слабее, конвективные движения усиливаются, и появляются хорошо заметные яркие образования — *факелы*.

Наиболее крупными по своим масштабам проявлениями солнечной активности являются наблюдаемые в солнечной короне *протуберанцы* — огромные по объему облака газа, масса которых может достигать миллиардов тонн (см. рис. 2 на цветной вклейке XII). Некоторые из них («спокойные») напоминают по форме гигантские занавеси толщиной 3—5 тыс. км, высотой около 10 тыс. км и длиной до 100 тыс. км, подпираемые колоннами, по которым газ течет из короны вниз. Они медленно меняют свою форму и могут существовать в течение нескольких месяцев. Во многих случаях в протуберанцах наблюдается упорядоченное движение отдельных сгустков и струй

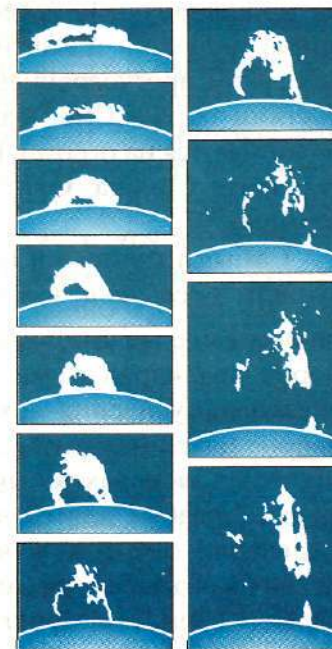


Рис. 5.10. Движение вещества протуберанца

по криволинейным траекториям, напоминающим по форме линии индукции магнитных полей (рис. 5.10). Порой отдельные части протуберанцев быстро устремляются вверх со скоростями порядка нескольких сотен километров в секунду и поднимаются на огромную высоту (до 1 млн км), что превышает радиус Солнца. Оказалось, что происходит это во время вспышек.

Самыми мощными проявлениями солнечной активности являются **вспышки**, в процессе которых за несколько минут иногда выделяется энергия до 10^{25} Дж (такова энергия примерно миллиарда атомных бомб). Вспышки наблюдаются как внезапные усиления яркости отдельных участков Солнца в районе пятен (см. рис. 3 на цветной вклейке XII). Продолжительность сильных вспышек в среднем может достигать трех часов, а слабые длятся всего несколько минут. По скорости выделения энергии вспышки подобны взрыву. Солнечная плазма в этой области может нагреваться до температуры порядка 10 млн К. Возрастает кинетическая энергия выбросов веществ, движущихся в короне и уходящих в межпланетное пространство со скоростями до 1000 км/с. Получают дополнительную энергию и значительно ускоряются потоки электронов, протонов и других заряженных частиц. Усиливается оптическое, рентгеновское, гамма- и радиоизлучение. Детальная теория сложного комплекса явлений, наблюдаемых во время вспышек, пока еще не разработана, но, по современным представлениям, они связаны с возникновением и

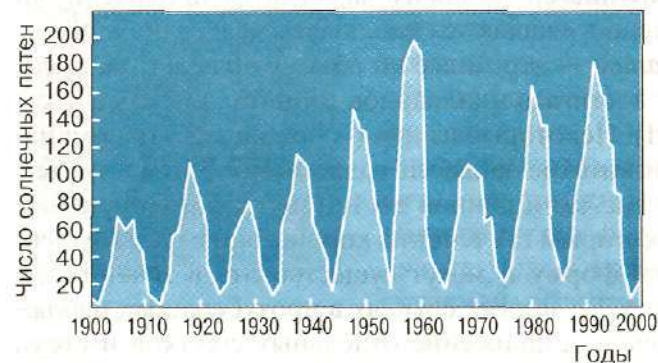


Рис. 5.11.
Периодичность солнечной активности

происходящим затем быстрым выделением избытка энергии в магнитных полях активных областей.

Потоки плазмы, образующиеся во время вспышки, через сутки-двое достигают окрестностей Земли. Магнитосфера нашей планеты отклоняет и задерживает эти потоки, так что только незначительная их часть попадает в земную атмосферу. Однако даже этого достаточно, чтобы вызывать магнитные бури, полярные сияния и другие геофизические явления. Например, при сильных вспышках практически прекращается слышимость радиопередач на коротких волнах по всему освещенному полушарию нашей планеты.

Число пятен и протуберанцев, частота и мощность вспышек на Солнце меняются с определенной, хотя и не очень строгой периодичностью — в среднем этот период составляет примерно 11,2 года (рис. 5.11). Отмечается определенная связь процессов жизнедеятельности растений и животных, состояния здоровья людей и погодно-климатических аномалий с уровнем солнечной активности, однако механизм воздействия этих процессов на земные явления еще не вполне ясен.



ВОПРОСЫ

1. Из каких химических элементов состоит Солнце и каково их соотношение? 2. Каков источник энергии излучения Солнца? Какие изменения с его веществом происходят при этом? 3. Какой слой Солнца является основным источником видимого излучения? 4. Каково внутреннее строение Солнца? Назовите основные слои его атмосферы. 5. В каких пределах изменяется температура на Солнце от его центра до фотосферы? 6. Какими способами осуществляется перенос энергии из недр Солнца наружу? 7. Чем объясняется наблюдаемая на Солнце грануляция? 8. Какие проявления солнечной активности наблюдаются в различных слоях атмосферы Солнца? С чем связана основная причина этих явлений? 9. Чем объясняется понижение температуры в области солнечных пятен? 10. Какие явления на Земле связаны с солнечной активностью?



УПРАЖНЕНИЕ 17

1. Можно ли заметить невооруженным глазом (через темный фильтр) на Солнце пятно размером с Зем-

лю, если глаз различает объекты, видимые размеры которых 2—3'? 2. Какова вторая космическая скорость на уровне фотосферы Солнца? 3. Какая мощность излучения приходится в среднем на 1 кг солнечного вещества?

§ 22. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЕЗД.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЕЗД

Наше Солнце справедливо называют типичной звездой, но среди огромного многообразия мира звезд есть немало таких, которые значительно отличаются от него по физическим характеристикам. Поэтому более полное представление о звездах дает такое определение:

звезда — это пространственно обособленная гравитационно связанная непрозрачная для излучения масса вещества, в которой в значительных масштабах происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

Солнце существует уже несколько миллиардов лет и мало изменилось за это время, поскольку в его недрах все еще происходят термоядерные реакции, в результате которых из четырех протонов (ядер водорода) образуется альфа-частица (ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов). Более массивные звезды расходуют запасы водорода значительно быстрее (за десятки миллионов лет). После того как водород израсходован, начинаются реакции между ядрами гелия с образованием устойчивого изотопа углерод-12 и другие реакции, продуктами которых являются кислород и тяжелые элементы (натрий, сера, магний и т. д.). Таким образом в недрах звезд образуются ядра многих химических элементов, вплоть до железа.

У наиболее массивных звезд прекращение всех возможных термоядерных реакций сопровождается мощным взрывом, который наблюдается как вспышка сверхновой звезды.

Все элементы, которые входят в состав нашей планеты и всего живого на ней, образовались в результате термоядерных реакций, происходивших в звездах, поэтому звезды не только самые распространенные во Вселенной объекты, но и самые важные для понимания происходящих в ней явлений и процессов.

1. Годичный параллакс и расстояния до звезд

Мысли о том, что звезды — это далекие солнца, высказывались еще в глубокой древности. Однако долгое время оставалось неясным, как далеко они находятся от Земли. Еще Аристотель понимал, что если Земля движется, то, наблюдая положение какой-либо звезды из двух диаметрально противоположных точек земной орбиты, можно заметить, что направление на звезду изменится (рис. 5.12). Это кажущееся (параллактическое) смещение звезды будет служить мерой расстояния до нее: чем оно больше, тем ближе к нам расположена звезда. Но не только самому Аристотелю, но даже значительно позднее Копернику не удалось обнаружить это смещение. Только в конце первой половины XIX в., когда телескопы были оборудованы приспособлениями для точных угловых измерений, удалось измерить такое смещение у ближайших звезд.

Годичным параллаксом звезды p называют угол, под которым со звезды можно было бы видеть большую полуось земной орбиты (равную 1 а. е.), перпендикулярную направлению на звезду (рис. 5.13).



Рис. 5.12. Параллактическое смещение звезды

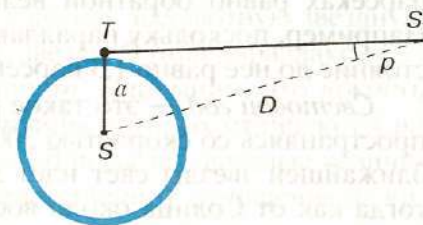


Рис. 5.13. Годичный параллакс звезды

Расстояние до звезды

$$D = \frac{a}{\sin p},$$

где a — большая полуось земной орбиты. Заменяв синус малого угла величиной самого угла, выраженной в радианной мере, и приняв $a = 1$ а. е., получим следующую формулу для вычисления расстояния до звезды в астрономических единицах:

$$D = \frac{206\,265''}{p}.$$

В 1837 г. впервые были осуществлены надежные измерения годичного параллакса. Русский астроном **Василий Яковлевич Струве** (1793—1864) провел эти измерения для ярчайшей звезды Северного полушария Веги (α Лиры). Почти одновременно в других странах определили параллаксы еще двух звезд, одной из которых была α Центавра. Эта звезда, которая с территории России не видна, оказалась ближайшей к нам. Даже у нее годичный параллакс составил всего $0,75''$. Под таким углом невооруженному глазу видна проволочка толщиной 1 мм с расстояния 280 м. Поэтому неудивительно, что столь малые угловые смещения так долго не могли заметить.

Расстояние до ближайшей звезды, параллакс которой $p = 0,75''$, составляет $D = \frac{206\,265''}{0,75''} = 270\,000$ а. е. Единицами для измерения столь значительных расстояний являются парсек и световой год.

Парсек — это такое расстояние, на котором параллакс звезд равен $1''$. Отсюда и название этой единицы: пар — от слова «параллакс», сек — от слова «секунда». Расстояние в парсеках равно обратной величине годичного параллакса. Например, поскольку параллакс α Центавра равен $0,75''$, расстояние до нее равно 1,3 парсека.

Световой год — это такое расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью 300 000 км/с, проходит за год. От ближайшей звезды свет идет до Земли свыше четырех лет, тогда как от Солнца около восьми минут, а от Луны немногим более одной секунды.

$$1 \text{ пк (парсек)} = 3,26 \text{ светового года} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

К настоящему времени с помощью специального спутника «Гиппаркос» измерены годовые параллаксы более 118 тыс. звезд с точностью $0,001''$.

Таким образом, теперь измерением годичного параллакса можно надежно определить расстояния до звезд, удаленных от нас на 1000 пк, или 3000 св. лет. Расстояние до более далеких звезд определяются другими методами.

2. Видимая и абсолютная звездные величины. Светимость звезд

После того как астрономы получили возможность определять расстояния до звезд, выяснилось, что звезды, находящиеся на одинаковом расстоянии, могут отличаться по видимой яркости. Стало очевидно, что звезды имеют различную **светимость**. Солнце кажется самым ярким объектом на небе только потому, что оно находится гораздо ближе всех остальных звезд.

Светимостью называется полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени.

Она выражается в абсолютных единицах (ваттах) или в единицах светимости Солнца.

В астрономии принято сравнивать звезды по светимости, рассчитывая их видимую яркость (звездную величину) для одного и того же стандартного расстояния — 10 пк.

Видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии $D_0 = 10$ пк, получила название **абсолютной звездной величины** M .

Рассмотрим, как можно определить абсолютную звездную величину M , зная расстояние до звезды D (или параллакс — p) и ее видимую звездную величину m . Напомним, что яркость двух источников, звездные величины которых отличаются на единицу, отличается в 2,512 раза. Для звезд, звездные величины которых равны m_1 и m_2 (соответственно), отношение их яркостей I_1 и I_2 выражается соотношением:

$$I_1 : I_2 = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

Для видимой и абсолютной звездных величин одной и той же звезды отношение яркостей будет выглядеть так:

$$I : I_0 = 2,512^{M-m},$$

где I_0 — яркость этой звезды, если бы она находилась на расстоянии $D_0 = 10$ пк.

В то же время известно, что видимая яркость звезды меняется обратно пропорционально квадрату расстояния до нее. Поэтому

$$I : I_0 = D_0^2 : D^2.$$

Следовательно,

$$2,512^{M-m} = D_0^2 : D^2.$$

Логарифмируя это выражение, находим

$$0,4(M-m) = \lg 10^2 - \lg D^2,$$

или

$$M = m + 5 - 5 \lg D,$$

или

$$M = m + 5 + \lg p.$$

Абсолютная звездная величина Солнца $M_\odot = 5^m$. Иначе говоря, с расстояния 10 пк наше Солнце выглядело бы как звезда пятой звездной величины.

Зная абсолютную звездную величину звезды M , легко вычислить ее светимость L . Считая светимость Солнца $L_\odot = 1$, получаем:

$$L = 2,512^{5-M},$$

или

$$\lg L = 0,4(5 - M).$$

По светимости (мощности излучения) звезды значительно отличаются друг от друга: некоторые излучают энергию в несколько миллионов раз больше, чем Солнце, другие — в сотни тысяч раз меньше. Абсолютные звездные величины звезд наиболее высокой светимости (гигантов и сверхгигантов) достигают $M = -9^m$, а звезды-карлики, обладающие наименьшей светимостью, имеют абсолютную звездную величину $M = +17^m$.

3. Спектры, цвет и температура звезд

Всю информацию о звездах можно получить только на основе исследования приходящего от них излучения. Наблюдая звезды, можно заметить, что они имеют различный цвет. Хорошо известно, что цвет любого нагретого тела, в частности звезды, зависит от его температуры. Более полное представление об этой зависимости дает изучение звездных спектров. Для большинства звезд это спектры поглощения, в которых на фоне непрерывного спектра наблюдаются темные линии.

Температуру наружных слоев звезды, от которых приходит излучение, определяют по распределению энергии в непрерывном спектре (рис. 5.14). Длина волны, на которую приходится максимум излучения, зависит от температуры излучающего тела. По мере увеличения температуры положение максимума смещается от красного к фиолетовому концу спектра. Количественно эта зависимость выражается законом Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,29}{T},$$

где $\lambda_{\max}$ — длина волны (в см), на которую приходится максимум излучения, а T — абсолютная температура.

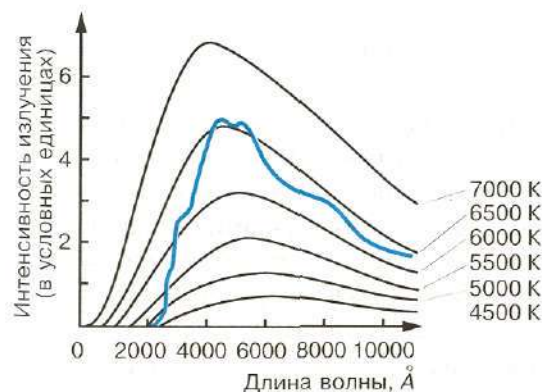


Рис. 5.14. Распределение энергии в непрерывном спектре Солнца и черного тела при различных температурах

Как оказалось, эта температура для различных типов звезд заключена в пределах от 2500 до 50 000 К. Изменение температуры меняет состояние атомов и молекул в атмосферах звезд, что отражается в их спектрах. По ряду характерных особенностей спектров звезды разделены на спектральные классы, которые обозначены латинскими буквами и расположены в порядке, соответствующем убыванию температуры: О, В, А, F, G, К, М.

У наиболее холодных (красных) звезд класса М в спектрах наблюдаются линии поглощения некоторых двухатомных молекул (например, оксидов титана, циркония и углерода). Примерами звезд, температура которых около 3000 К, являются Антарес и Бетельгейзе.

В спектрах желтых звезд класса G с температурой около 6000 К, к которым относится и Солнце, преобладают линии металлов: железа, натрия, кальция и т. д. По температуре, спектру и цвету сходна с Солнцем звезда Капелла.

Для спектров белых звезд класса А, которые имеют температуру около 10 000 К (Вега, Денеб и Сириус), наиболее характерны линии водорода и множество слабых линий ионизованных металлов. В спектрах наиболее горячих звезд появляются линии нейтрального и ионизованного гелия.

Различия звездных спектров объясняются отнюдь не разнообразием их химического состава, а различием температуры и других физических условий в атмосферах звезд. Изучение спектров показывает, что преобладают в составе звездных атмосфер (и звезд в целом) водород и гелий. На долю всех остальных химических элементов приходится не более нескольких процентов.

Измерение положения спектральных линий позволяет не только получить информацию о химическом составе звезд, но и определить скорость их движения. Если источник излучения (звезда или любой другой объект) приближается к наблюдателю или удаляется от него со скоростью v , то наблюдатель будет регистрировать изменение длины волны принимаемого излучения. В случае уменьшения расстояния между наблюдателем и звездой длина волны уменьшается и соответствующая линия смещается к сине-фиолетовому концу спектра. При удалении

звезды длина волны излучения увеличивается, а линия смещается в красную его часть. Это явление получило название *эффекта Доплера*, согласно которому зависимость разности длин волн от скорости источника по лучу зрения v и скорости света c выражается следующей формулой:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c},$$

где λ_0 — длина волны спектральной линии для неподвижного источника, а λ — длина волны в спектре движущегося источника.

Эффект Доплера наблюдается в оптической и других областях спектра и широко используется в астрономии.

4. Диаграмма «спектр—светимость»

Полученные данные о светимости и спектрах звезд уже в начале XX в. были сопоставлены двумя астрономами — *Эйнар Герцшпрунгом* (Голландия) и *Генри Расселлом* (США) — и представлены в виде диаграммы, которая получила название «диаграмма Герцшпрунга—Расселла». Если по горизонтальной оси отложены спектральные классы (температура) звезд, а по вертикальной — их светимости (абсолютные звездные величины), то каждой звезде будет соответствовать определенная точка на этой диаграмме (рис. 5.15). В результате обнаруживается определенная закономерность в расположении звезд на диаграмме — они не заполняют все ее поле, а образуют несколько групп, названных *последовательностями*. Наиболее многочисленной (примерно 90% всех звезд) оказалась *главная последовательность*, к числу звезд которой принадлежит наше Солнце (его положение отмечено на диаграмме кружочком). Звезды этой последовательности отличаются друг от друга по светимости и температуре и взаимосвязь этих характеристик соблюдается весьма строго: *самую высокую светимость имеют наиболее горячие звезды, а по мере уменьшения температуры светимость падает*. Красные звезды малой светимости получили название *красных карликов*. Вместе с тем на диаграмме существуют и другие последовательности, где подобная

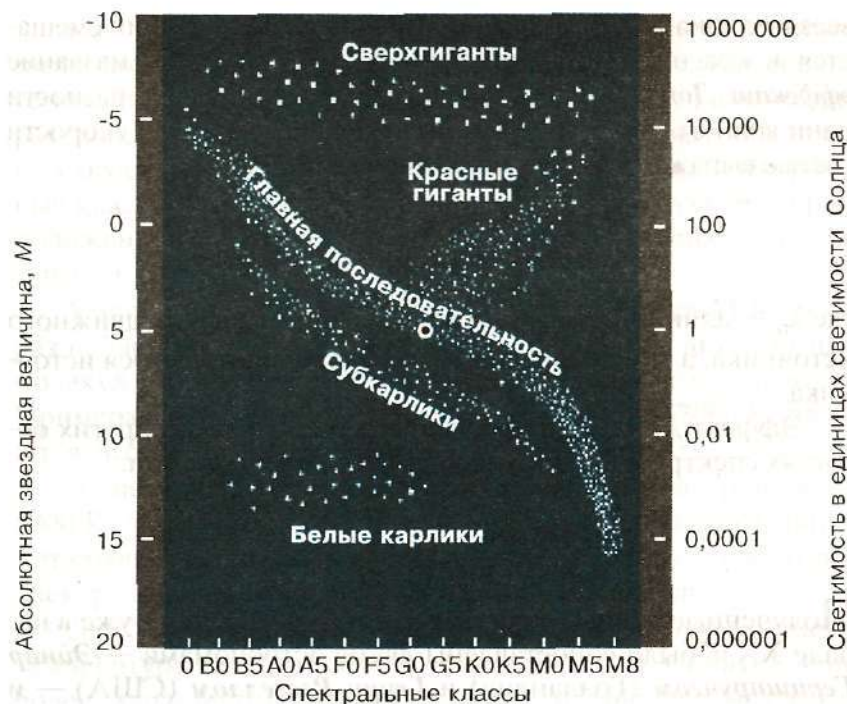


Рис. 5.15. Диаграмма «спектр — светимость»

закономерность не соблюдается. Особенно заметно это среди более холодных (красных) звезд: помимо звезд, принадлежащих главной последовательности и потому имеющих малую светимость, на диаграмме представлены звезды высокой светимости, которая практически не меняется при изменении их температуры. Такие звезды принадлежат двум последовательностям (*гиганты* и *сверхгиганты*), получившим эти названия вследствие своей светимости, которая значительно превосходит светимость Солнца. Особое место на диаграмме занимают горячие звезды малой светимости — *белые карлики*.

Лишь к концу XX в., когда объем знаний о физических процессах, происходящих в звездах, существенно увеличился и стали понятными пути их эволюции, удалось найти теоретическое обоснование тем эмпирическим закономерностям, которые отражает диаграмма «спектр — светимость».

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Какова светимость звезды ξ Скорпиона, если ее звездная величина 3^m , а расстояние до нее 7500 св. лет?

Дано:

$$m = 3^m$$

$$D = 7500 \text{ св. лет}$$

$$L = ?$$

Решение:

$$\lg L = 0,4(5 - M).$$

$$M = m + 5 - 5 \lg D,$$

$$\text{где } D = 7500 : 3,26 = 2300 \text{ пк.}$$

$$\text{Тогда } M = 3 + 5 - 5 \lg 2300 = -8,8.$$

$$\lg L = 0,4[5 - (-8,8)] = 5,52.$$

$$\text{Отсюда } L = 330\,000.$$

$$\text{Ответ: } L = 330\,000.$$



ВОПРОСЫ

1. Как определяют расстояния до звезд? 2. От чего зависит цвет звезды? 3. В чем главная причина различия спектров звезд? 4. От чего зависит светимость звезды?



УПРАЖНЕНИЕ 18

1. Во сколько раз Сириус ярче, чем Альдебаран? Солнце ярче, чем Сириус? 2. Одна звезда ярче другой в 16 раз. Чему равна разность их звездных величин? 3. Параллакс Веги $0,11''$. Сколько времени идет свет от нее до Земли? 4. Сколько лет надо было бы лететь по направлению к созвездию Лир со скоростью 30 км/с, чтобы Вега стала вдвое ближе? 5. Во сколько раз звезда 3,4 звездной величины слабее, чем Сириус, имеющий звездную величину $-1,6$? Чему равны абсолютные величины этих звезд, если расстояние до каждой составляет 3 пк?

§ 23. МАССЫ И РАЗМЕРЫ ЗВЕЗД

1. Двойные звезды.

Определение массы звезд

Среди звезд, которые видны на небе рядом, различают *оптические двойные* и *физические двойные* звезды. В первом случае такие две звезды хотя и видны вблизи, но находятся в пространстве далеко друг от друга. Если же в результате

наблюдений выясняется, что они образуют единую систему и обращаются вокруг общего центра масс под действием взаимного тяготения, то их называют *физическими двойными звездами*.

Первым, кто доказал, что такие звезды действительно существуют, был известный английский астроном *Вильям Гершель* (1738—1822). Множество двойных звезд открыл и исследовал В. Я. Струве. В настоящее время известно уже более 70 тыс. этих объектов. Когда число звезд в системе, связанной взаимным тяготением, оказывается более двух, то их называют *кратными*. В настоящее время считается, что большинство звезд (более 70%) образуют системы большей или меньшей кратности. В зависимости от того, каким способом можно обнаружить двойственность звезды, их называют по-разному. Если она заметна при непосредственных наблюдениях в телескоп, то *визуально-двойной*. Если же об этом можно судить только по спектру, то *спектрально-двойной*.

Редким примером двойной звезды, оба компонента которой различимы даже невооруженным глазом, являются Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы. Среди ярчайших звезд также были обнаружены двойные: Сириус, Капелла, Кастор и др. Более того, оказалось, что во многих случаях каждая из звезд такой пары сама состоит из нескольких звезд. Так, Мицар и Капелла имеют в своем составе четыре компонента, а Кастор — шесть. Выяснилось, что α Центавра является тройной звездой, одна из которых расположена ближе всего к нам и получила название Проксима (в переводе с греческого — «ближайшая»).

У двойных звезд, каждый компонент которых можно наблюдать в отдельности, периоды обращения вокруг общего центра масс обычно бывают от нескольких лет до нескольких десятков лет (в редких случаях превышают 100 лет). Их орбиты сравнимы по размерам с орбитами планет-гигантов. Большинство спектрально-двойных звезд имеют периоды обращения порядка нескольких суток, располагаясь друг от друга на расстоянии 5—7 млн км. Самый короткий из известных периодов составляет всего 2,6 ч.

Несмотря на многочисленность двойных звезд, достаточно надежно определены орбиты лишь примерно для сотни из

них. При известном расстоянии до этих систем использование третьего закона Кеплера позволяет определить их массу. Сравнивая движение спутника звезды с движением Земли вокруг Солнца, можно написать:

$$\frac{m_1 + m_2}{A^3} T_1^2 = \frac{M_1 + M_2}{a^3} T_2^2,$$

где m_1 и m_2 — массы компонентов звездной пары; M_1 и M_2 — массы Солнца и Земли; T_1 — период обращения звезд; T_2 — период обращения Земли; A — большая полуось орбиты двойной звезды; a — большая полуось земной орбиты. Приняв период обращения Земли и величину большой полуоси ее орбиты равными 1 и пренебрегая массой Земли по сравнению с массой Солнца, получим, что в массах Солнца:

$$m_1 + m_2 = A^3 : T_1^2.$$

Чтобы определить массу каждой звезды, надо изучить движение каждой из них и вычислить их расстояния A_1 и A_2 ($A = A_1 + A_2$) от общего центра масс. Тогда мы получим второе уравнение:

$$m_1 : m_2 = A_2 : A_1.$$

Решая систему двух уравнений, можно вычислить массу каждой звезды.

У спектрально-двойных звезд наблюдается смещение (или раздвоение) линий в спектре, которое происходит вследствие эффекта Доплера. Оно меняется с периодом, равным периоду обращения пары. Если яркости и спектры звезд, составляющих пару, сходны, то в спектре наблюдается периодическое раздвоение линий (рис. 5.16, а). Пусть компоненты A и B занимают положения A_2 или B_2 , когда один движется по направлению к наблюдателю, а другой — от него. Спектральные линии приближающейся звезды сместятся к фиолетовому концу спектра, а удаляющейся — к красному. Линии в спектре будут раздвоены. В положениях A_1 и B_1 оба компонента движутся перпендикулярно к лучу зрения, и раздвоения линий не наблюдается. Если одна из звезд настолько

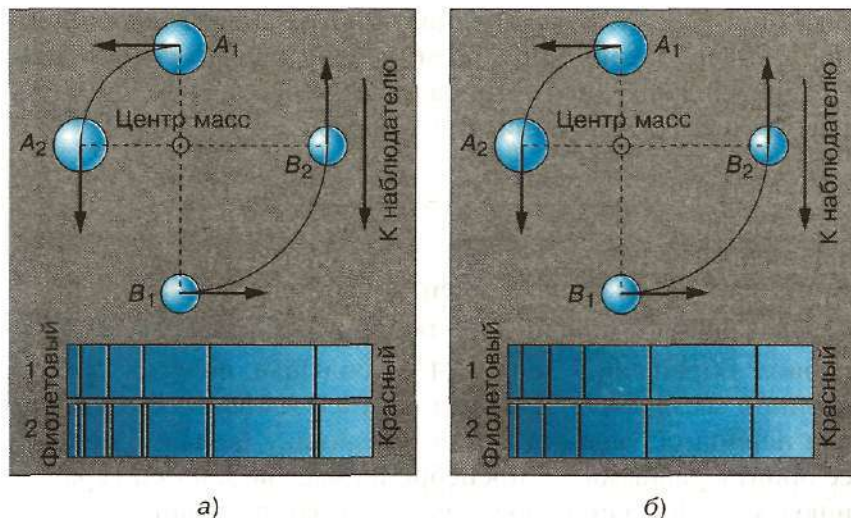


Рис. 5.16. Раздвоение линий в спектре двойной звезды

слаба, что ее линии не видны, то будет наблюдаться периодическое смещение линий более яркой звезды (рис. 5.16, б).

Для наблюдателя, который находится в плоскости орбиты спектрально-двойной звезды, ее компоненты будут поочередно загораживать, «затмевать» друг друга. Такие звезды называют *затменно-двойными* или алголями — по названию наиболее известной звезды этого типа β Персея. Ее арабское название «эль гуль» (дьявол) постепенно превратилось в Алголь. Возможно, что еще древние арабы заметили странное поведение этой звезды: в течение 2 суток 11 часов ее яркость остается постоянной, но затем за 5 часов она ослабевает от 2,3 до 3,5 звездной величины, а за следующие 5 часов ее прежняя яркость восстанавливается (рис. 5.17).

В настоящее время известно более 5 тыс. затменно-двойных звезд. Их изучение позволяет определить не только характеристики орбиты, но также получить некоторые сведения о самих звездах. Продолжительность затмения дает возможность судить о размерах звезды. Рекордсменом здесь является ϵ Возничего, в системе которой при периоде 27 лет затмение продолжается 2 года. Когда во время затмения свет одной звезды проходит через атмосферу другой, можно детально исследовать строение и состав этой атмосферы. Фор-

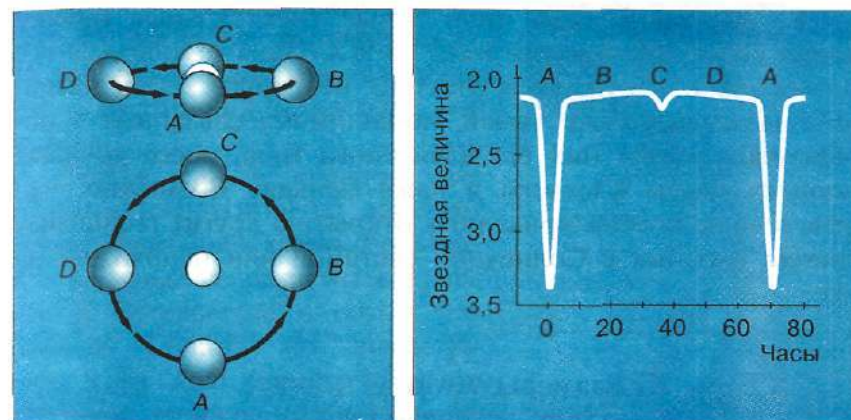


Рис. 5.17. Схема затмений и кривая блеска Алголя

ма кривой блеска некоторых звезд свидетельствует о том, что их форма существенно отличается от сферической (рис. 5.18). Близкое расположение компонентов приводит к тому, что газы из атмосферы одной звезды перетекают на другую. Иногда эти процессы принимают катастрофический характер, и наблюдается вспышка *Новой звезды*.

Определение масс звезд на основе исследований двойных звезд показало, что они заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца. При этом большинство из них имеют массу от 0,3 до 3 масс Солнца. Очень большие массы встречаются крайне редко.

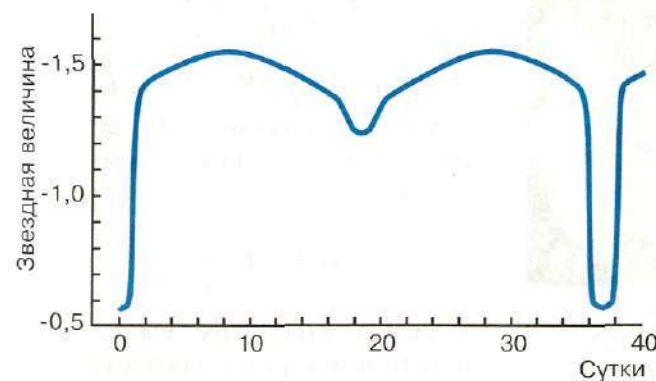


Рис. 5.18. Кривая блеска не-сферической двойной звезды

В последние годы тщательные спектральные наблюдения более 100 близких звезд типа Солнца и холоднее его позволили обнаружить в спектрах некоторых звезд незначительные смещения линий, по-видимому связанные с обращением вокруг них тел планетного типа, масса которых порядка массы Юпитера и даже меньше. Возможно, что дальнейшие поиски приведут к открытию других планетных систем, сходных с Солнечной системой или непохожих на нее.

2. Размеры звезд. Плотность их вещества

К сожалению, звезды расположены так далеко от нас, что за редким исключением они даже в самые мощные телескопы видны как точки. Лишь в последние годы для некоторых самых крупных из них удалось получить изображение в виде диска, на котором обнаруживаются пятна (рис. 5.19).

В большинстве случаев размеры звезд приходится рассчитывать на основе данных об их светимости и температуре. Светимость звезды рассчитывается по той же формуле, что и светимость Солнца:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Отношение светимостей звезды и Солнца будет равно:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4.$$

Приняв, что $R_{\odot} = 1$ и $L_{\odot} = 1$, получаем выражение для вычисления радиуса звезды (в радиусах Солнца)

$$R = \sqrt{L} \frac{T_{\odot}^2}{T^2}.$$

Результаты этих вычислений достаточно хорошо согласуются с

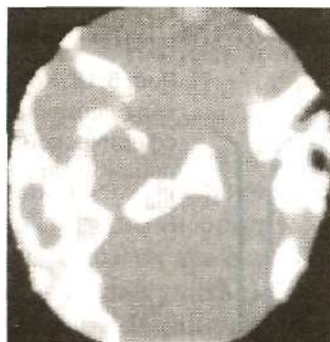


Рис. 5.19. Пятна на диске Бетельгейзе

данными непосредственных измерений с помощью интерферометра размеров наиболее крупных звезд, расстояния до которых невелики.

Звезды самой большой светимости (сверхгиганты) действительно оказались очень большими. Красные сверхгиганты Антарес и Бетельгейзе в сотни раз больше Солнца по диаметру (рис. 5.20). Зато диаметр красных карликов, относящихся к главной последовательности, в несколько раз меньше солнечного. Самыми маленькими звездами являются белые карлики, диаметр которых несколько тысяч километров (рис. 5.21).

Расчеты средней плотности звезд различных типов, проведенные на основе имеющихся данных об их массе и размерах, показывают, что она может значительно отличаться от средней плотности Солнца. Так, средняя плотность некоторых сверхгигантов составляет всего 10^{-3} кг/м³, что в 1000 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях. Другой крайностью является плотность белых карликов — около 10^9 кг/м³.

3. Модели звезд

В зависимости от массы и размеров звезды различаются по внутреннему строению, хотя все имеют примерно одинаковый химический состав (95—98% их массы составляют водород и гелий).



Рис. 5.20. Солнце в сравнении с гигантами и сверхгигантами



Рис. 5.21. Размеры звезд-карликов

Звезды главной последовательности, температура которых такая же, как у Солнца, или ниже, похожи на него по внутреннему строению. У более горячих звезд главной последовательности внешняя конвективная зона отсутствует. В этих звездах конвекция происходит в ядре протяженностью до 1/4 их радиуса, окруженном лучистой оболочкой (рис. 5.22).

Гиганты и сверхгиганты имеют очень маленькое ядро (его радиус около 0,001 доли радиуса звезды). Термоядерные реакции происходят в окружающем его тонком слое; далее на протяжении около 0,1 радиуса звезды происходит передача энергии излучением. Практически весь остальной объем (9/10 радиуса) составляет протяженная конвективная зона. Белые карлики состоят из вырожденного газа, давление которого определяется лишь его плотностью и не зависит от температуры. Равновесие такой «экзотической» звезды,

масса которой равна солнечной, наступает лишь тогда, когда она сожмется до размеров, примерно равных размерам Земли. Внутри белого карлика температура достигает 10 млн К и практически не меняется; только в тонкой оболочке из «обычного» вещества она резко падает до 10 000 К.

Понять, как связаны между собой различные типы звезд, как они возникают и как происходит их эволюция, оказалось возможным только на основе изучения всей совокупности звезд, образующих огромные звездные системы — *галактики*.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Период обращения двойной звезды 100 лет. Большая полуось видимой орбиты $a = 2,0''$, а параллакс $p = 0,05''$. Определите сумму масс и массы звезд в отдельности, если они отстоят от центра масс на расстояниях, относящихся как 1 : 4.

Дано:

$$T = 100 \text{ лет}$$

$$a = 2,0''$$

$$p = 0,05''$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{4}$$

$$m_1 = ?$$

$$m_2 = ?$$

Решение:

$$\text{так как } A_1 : A_2 = m_2 : m_1, \text{ то } \frac{m_2}{m_1} = \frac{1}{4} \text{ и}$$

$$m_1 = 4m_2.$$

По третьему закону Кеплера

$$m_1 + m_2 = A^3 : T^2 \text{ или } 4m_2 + m_2 = A^3 : T^2,$$

$$\text{т. е. } 5m_2 = A^3 : T^2.$$

$$A = \frac{a}{p},$$

$$A = \frac{2,0''}{0,05''} = 40 \text{ а. е.};$$

$$m_2 = \frac{40^3}{5 \cdot 100^2} = 1,28; m_1 = 4 \cdot 1,28 = 5,12.$$

Ответ: $m_1 = 5,12$ массы Солнца, $m_2 = 1,28$ массы Солнца.

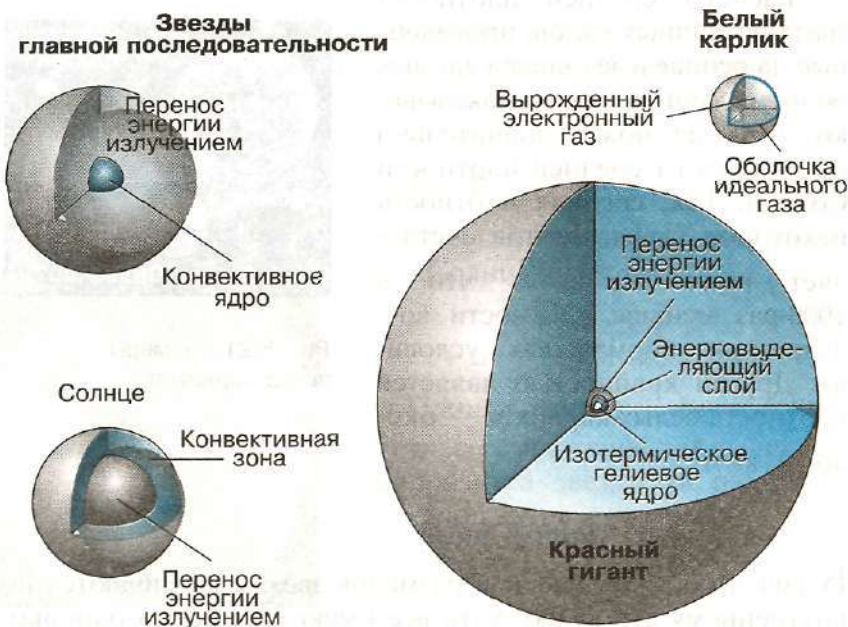


Рис. 5.22. Внутреннее строение звезд различных классов

2. Во сколько раз Арктур больше Солнца, если светимость Аркура равна 100, а температура 4500 К?

Дано:

$$L = 100$$

$$T = 4500 \text{ К}$$

$$T_{\odot} = 6000 \text{ К}$$

$$L_{\odot} = 1$$

$$\frac{R}{R_{\odot}} = ?$$

Решение:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{L} \cdot \frac{T_{\odot}^2}{T^2} = 10 \cdot \frac{(6000 \text{ К})^2}{(4500 \text{ К})^2} = 18.$$

Ответ: радиус Аркура больше радиуса Солнца в 18 раз.



ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется изменение яркости некоторых двойных звезд? 2. Во сколько раз отличаются размеры и плотности звезд сверхгигантов и карликов? 3. Каковы размеры самых маленьких звезд?



УПРАЖНЕНИЕ 19

1. Определите сумму масс двойной звезды Капелла, если большая полуось ее орбиты равна 0,85 а. е., а период обращения 0,285 года. 2. Во сколько раз светимость Ригеля больше светимости Солнца, если его параллакс равен 0,003", а видимая звездная величина 0,34? 3. Какова средняя плотность красного сверхгиганта, если его диаметр в 300 раз больше солнечного, а масса в 30 раз больше массы Солнца?

§ 24. ПЕРЕМЕННЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Наряду с исследованиями двойных звезд важную роль в развитии представлений о физической природе звезд сыграли исследования *переменных звезд*. В отличие от затменно-переменных речь идет о физических переменных звездах, у которых светимость меняется в результате различных процессов, происходящих на самой звезде. В настоящее время известно несколько десятков тысяч переменных звезд различных типов. Светимость некоторых меняется

строго периодически, у других периодичность часто нарушается или не соблюдается так строго, а есть и такие, у которых светимость меняется неправильным образом, и пока не удалось найти определенных закономерностей в этих изменениях.

1. Пульсирующие переменные

К числу переменных звезд со строгой периодичностью принадлежат прежде всего *цефеиды*. Они получили это название потому, что первой среди звезд этого типа была открыта δ Цефея. Эта классическая цефеида меняет свою светимость с периодом 5,37 суток, а амплитуда изменения светимости примерно одна звездная величина (рис. 5.23). Как правило, у цефеид эта амплитуда не превышает 1,5 звездной величины, зато периоды изменения светимости весьма различны: от десятков минут до нескольких десятков суток, причем этот период у них долгие годы сохраняется постоянным.

Изучение спектров цефеид показало, что изменение светимости сопровождается изменениями температуры и лучевой скорости (рис. 5.24). Эти данные показывают, что причиной всему является пульсация наружных слоев звезды. Они периодически то расширяются, то сжимаются. При сжатии звезда нагревается и становится ярче, при расширении ее светимость уменьшается. По сути дела, цефеида — это природная автоколебательная система, «сферический маятник», который имеет собственную частоту (период) колебаний.

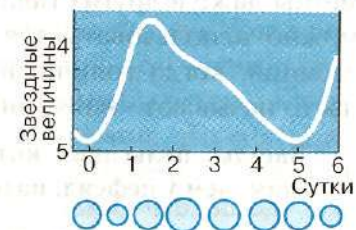


Рис. 5.23. Кривая блеска δ Цефея



Рис. 5.24. Графики изменения светимости, лучевой скорости и температуры цефеид

Еще в начале XX в. было замечено: чем ярче цефеида, тем продолжительнее период изменения ее светимости. Зависимость «период — светимость», существующая у цефеид (рис. 5.25), используется для определения расстояний в астрономии. Получив из наблюдений период изменения светимости цефеиды, можно узнать ее светимость, вычислить абсолютную звездную величину M , а сравнив ее с видимой звездной величиной m , вычислить расстояние до звезды по формуле:

$$\lg D = 0,2(m - M) + 1.$$

Цефеиды — это звезды-сверхгиганты, они обладают высокой светимостью. Так, например, светимость цефеиды с периодом 50 суток в 10 тыс. раз больше, чем у Солнца. Они заметны даже в других галактиках, поэтому цефеиды, которые можно использовать для определения таких больших расстояний, когда годичный параллакс невозможно измерить, часто называют «маяками Вселенной».

Звезды, пульсация которых происходит с периодом большим, чем у цефеид, называются долгопериодическими.

Период изменения светимости у них не выдерживается так строго, как у цефеид, и составляет в среднем от несколь-

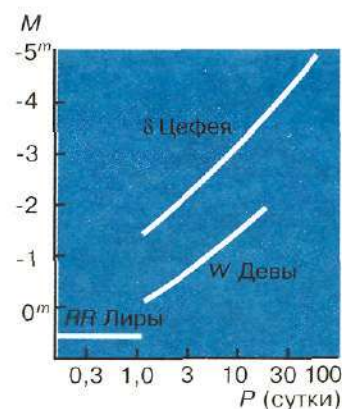


Рис. 5.25. Зависимость «период — светимость» цефеид

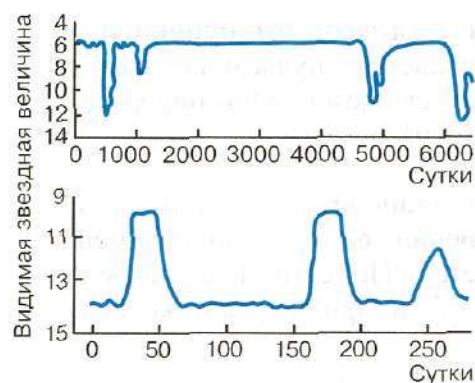


Рис. 5.26. Кривые блеска неправильных переменных звезд

ких месяцев до полутора лет, а светимость меняется очень значительно — на несколько звездных величин. Эти звезды типа Миры (о Кита) являются красными гигантами с весьма протяженной и холодной атмосферой.

У некоторых звезд, светимость которых долгое время оставалась практически постоянной, она вдруг неожиданно падает, а через некоторое время опять восстанавливается на прежнем уровне (рис. 5.26). Поскольку в атмосферах таких звезд наблюдается повышенное содержание углерода, принято считать, что причиной уменьшения светимости является образование гигантских облаков сажи, поглощающих свет.

2. Новые и сверхновые звезды

Начиная с глубокой древности в исторических летописях разных народов неоднократно отмечены случаи появления звезд, видимых невооруженным глазом на том месте, где их прежде не было. Особенно удивительными были эти «новые» звезды, когда они становились столь яркими, что могли наблюдаться даже днем. Затем их свет постепенно, в течение нескольких месяцев ослабевал настолько, что звезду уже нельзя было видеть невооруженным глазом. Например, в китайских и японских хрониках сохранились сведения о «звезде-госте», которая вспыхнула в созвездии Тельца в 1054 г. и в течение трех недель была видна днем, а через год совершенно «исчезла». В 1572 г. учитель Кеплера Тихо Браге наблюдал в созвездии Кассиопеи новую звезду, которая была ярче Венеры. В 1604 г. уже сам Кеплер наблюдал новую звезду в созвездии Змееносца.

В XX в. тщательные наблюдения за звездным небом с применением фотографии позволили установить, что такие неожиданные вспышки наблюдаются у звезд, которые до этого долгое время оставались слабыми и не привлекали к себе внимание астрономов. В настоящее время различают **новые** и **сверхновые** вспыхивающие звезды. У новых звезд светимость возрастает на 12—13 звездных величин и выделяется энергия до 10^{39} Дж. Звезда приобретает максимальную яркость всего за несколько суток, а ослабление до первоначаль-

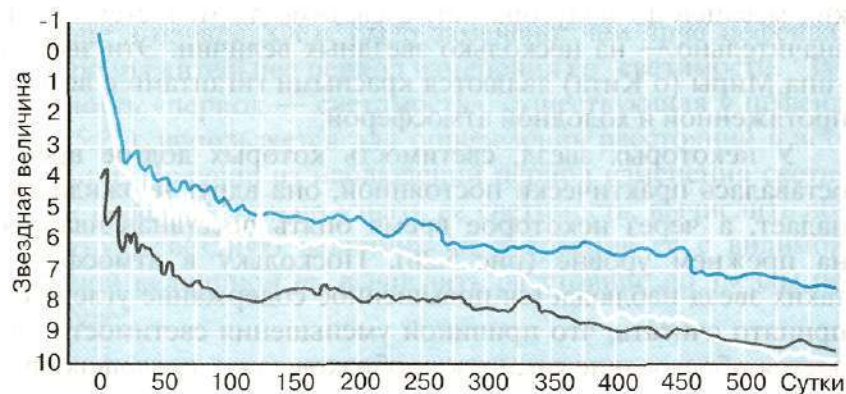


Рис. 5.27. Кривые блеска новых звезд

ного значения светимости может длиться годами (рис. 5.27). Долгое время причины вспышек новых звезд оставались непонятными. Положение изменилось, когда в 1954 г. было обнаружено, что одна из новых звезд (DQ Геркулеса) является двойной с периодом обращения всего 4 ч 39 мин. Один из компонентов — белый карлик, а другой — красная звезда главной последовательности. Из-за их близкого расположения на белый карлик перетекает газ из атмосферы красного карлика. По мере накопления водорода плотность и температура внешних слоев белого карлика возрастает, создаются условия для начала термоядерных реакций превращения водорода в гелий. Они происходят настолько быстро, что приобретают характер взрыва. При этом внешние слои звезды, составляющие небольшую часть ее массы, расширяются и выбрасываются в космическое пространство. Их свечение и наблюдается, как вспышка новой звезды. Такое явление может повторяться с тесными двойными звездами неоднократно: у одних через тысячи, у других с изменением светимости на 4—5 звездных величин через несколько десятков лет.

Вспышка сверхновой звезды — гигантский по своим масштабам взрыв звезды, при котором ее светимость в течение нескольких суток возрастает в сотни миллионов раз. При вспышке выделяется энергия порядка 10^{46} Дж, что примерно равно энергии, которую Солнце может излучить за все время

своего существования. Теоретические расчеты, результаты которых хорошо согласуются с наблюдательными данными, позволили составить достаточно полное представление о процессах, происходящих в тех сверхновых звездах, масса которых в десятки раз превосходит массу Солнца. К моменту вспышки в них полностью исчерпаны возможности протекания термоядерных реакций. Эволюция таких массивных звезд — это непрерывно ускоряющийся процесс увеличения температуры и плотности в ядре звезды.

На протяжении большей части жизни любой звезды основным источником ее энергии служит термоядерный синтез гелия из водорода. В звездах с большой массой эта стадия длится несколько миллионов лет. Когда запасы водорода в звездном ядре истощаются, оно сжимается и разогревается настолько, что из гелия начинает синтезироваться углерод. Эта стадия занимает около 500 тыс. лет. Затем во все более нарастающем темпе последовательно проходят реакции синтеза, в которых участвуют углерод (600 лет), неон (1 год), кислород (6 месяцев) и, наконец, кремний. На последней стадии, которая длится всего сутки, из кремния синтезируется железо. Ядро железа связано сильнее других ядер, поэтому дальнейший синтез становится невозможным, поскольку при этом энергия должна была бы не выделяться, а поглощаться. Лишенное источников энергии ядро не может противостоять гравитационным силам и *коллапсирует* (катастрофически сжимается) за несколько миллисекунд. На конечной стадии коллапса центральная часть ядра звезды сжимается до плотности ядерного вещества.

Вскоре после того, как ядро прекратит сжиматься, наружные слои звезды, которые не участвовали в этом катастрофическом сжатии, упадут на него. При ударе о ядро плотность и температура вещества этих слоев резко возрастут. Это порождает мощную ударную волну, которая движется наружу со скоростью не менее 30 000 км/с и срывает со звезды большую часть массы. В некоторых случаях вещество полностью рассеивается в космическом пространстве, а иногда на месте звезды остается плотный остаток ее ядра.

В 1967 г. выводы теории получили весьма неожиданное подтверждение. В созвездии Лисички группа английских радиоастрономов обнаружила источник необычных радиосиг-

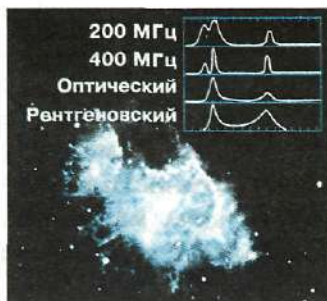


Рис. 5.28. Пульсар
в Крабовидной туманности

сара, которое испускается в узком конусе, наблюдатель видит лишь в том случае, когда при вращении звезды этот конус направлен на него подобно свету маяка. Вещество пульсаров состоит из нейтронов, образовавшихся при соединении протонов с электронами, тесно прижатых друг к другу гравитационными силами. Диаметры таких нейтронных звезд всего 20—30 км, а плотность близка к ядерной и может превышать 10^{18} кг/м³. Таким образом, нейтронные звезды являются одним из тех объектов во Вселенной, которые предоставляют ученым возможность изучать поведение вещества в условиях, пока недостижимых в земных лабораториях.

Исследования показали, что пульсары являются остатками сверхновых звезд. Один из пульсаров был обнаружен в Крабовидной туманности, которая наблюдается на месте вспышки Сверхновой 1054 г. Его излучение в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах излучения меняется с периодом, равным 0,033 с (рис. 5.28).

Наиболее уникальные объекты, получившие название **черных дыр**, должны возникать, согласно теории, на конечной стадии эволюции звезд, масса которых значительно превышает солнечную. У объекта такой массы, который сжимается до размеров в несколько километров, поле тяготения оказывается столь сильным, что вторая космическая скорость в его окрестности должна была бы превышать скорость света. Стало быть, черную дыру не могут покинуть ни частицы, ни даже излучение — она становится невидимой. Воз-

налов: импульсы продолжительностью около 0,3 с повторялись через каждые 1,34 с, причем периодичность импульсов выдерживалась с точностью до 10^{-10} с. Так был открыт первый **пульсар**, которых в настоящее время известно уже около 500.

Сразу же после открытия пульсаров было высказано предположение о том, что они являются быстровращающимися **нейтронными звездами**. Излучение пуль-

можность обнаружить такой объект существует лишь в том случае, когда черная дыра оказывается одним из компонентов тесной двойной звездной системы. Мощное гравитационное поле черной дыры способно вызвать падение на нее газа из атмосферы другой звезды, входящей в эту систему. Газ при падении на черную дыру нагревается до высокой температуры и дает рентгеновское излучение. Именно это излучение и позволяет обнаружить существование черной дыры. В настоящее время известно несколько десятков рентгеновских источников, в состав которых могут входить черные дыры. Наиболее вероятным «кандидатом» среди них считается Лебедь X-1.

Белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры являются конечными стадиями эволюции звезд различной массы. Из вещества, которое было потеряно ими, в последующем могут образовываться звезды нового поколения. Процесс формирования и развития звезд рассматривается в настоящее время как один из важнейших процессов эволюции звездных систем — галактик — и Вселенной в целом.



Вопросы

1. Перечислите известные вам типы переменных звезд.
2. Перечислите возможные конечные стадии эволюции звезд.
3. В чем причина изменения блеска цефеид?
4. Почему цефеиды называют «маяками Вселенной»?
5. Что такое пульсары?
6. Может ли Солнце вспыхнуть, как новая или сверхновая звезда? Почему?



VI. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 25. НАША ГАЛАКТИКА

1. Млечный Путь и Галактика¹

Практически все объекты, которые видят на небе невооруженным глазом жители средних широт Северного полушария Земли, составляют единую систему небесных тел (главным образом звезд) — нашу Галактику. Из числа этих объектов в состав Галактики не входит лишь слабо заметное туманное пятно, видимое в созвездии Андромеды и напоминающее по форме пламя свечи, — туманность Андромеды (см. рис. 2 на цветной вклейке XVI).

Характерной деталью звездного неба является Млечный Путь, в котором уже первые наблюдения с помощью телескопа позволили различить множество слабых звезд нашей Галактики. Как вы можете сами убедиться в любую ясную безлунную ночь, он простирается через все небо светлой белесоватой полосой клочковатой формы (рис. 6.1).

Идея о том, что Вселенная имеет «островную» структуру, неоднократно высказывалась в прошлом. Однако лишь в конце XVIII в. Гершель предложил первую модель строения нашей Галактики (рис. 6.2). На основе подсчетов звезд в различных участках неба он установил, что их число по мере удаления от Млечного Пути резко убывает. По его расчетам, слабые звезды Млечного Пути вместе с остальными, более яркими образуют единую звездную систему, напоминающую по форме диск конечных размеров, диаметр которого более чем в 4 раза превышает его толщину.

¹ Термин «галактика» происходит от греческого слова *galaxis*, которое означает «молочный, млечный».



Рис. 6.1. Фотография Млечного Пути

Окончательное «открытие» нашей Галактики связано с обнаружением в 1923 г. в туманности Андромеды нескольких цефеид. Наблюдение цефеид позволило определить расстояние до нее и окончательно убедило ученых, что это не просто туманность, а другая, подобная нашей звездная система. Название «галактика» было дано всем туманностям, находящимся за пределами нашей Галактики. Согласно современным данным, эта галактика находится от нас на расстоянии немногим более 2 млн св. лет.

Успехи в исследовании нашей Галактики в значительной степени связаны с изучением туманности Андромеды и других галактик. Их сравнение с Галактикой позволило выявить многие черты ее строения. В частности, поскольку характеристики и число звезд, размеры и некоторые другие особен-

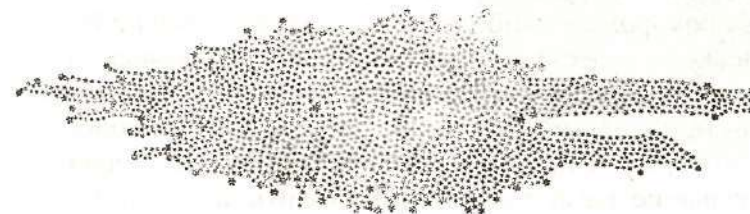


Рис. 6.2. Строение Галактики (модель Гершеля)

ности строения нашей Галактики оказались сходными с данными, полученными для туманности Андромеды, естественно было предположить, что так же, как и эта галактика, наша имеет спиральные рукава. В последующем целенаправленные исследования подтвердили этот факт.

Наши знания о размерах, составе и структуре Галактики получены в основном за последние десятилетия благодаря использованию больших телескопов, которые позволили изучать слабые звезды и другие далекие объекты. Было определено, что в ее структуре прослеживается *ядро* и окружающие его *две системы звезд*: *дискообразная* и почти сферическая *галактическая корона* (гало). Первая включает значительное число звезд, концентрация которых возрастает по мере приближения к галактической плоскости. Менее многочисленные звезды второй имеют концентрацию к ядру. Млечный Путь, который образуют звезды диска, опоясывает небо вдоль большого круга, а это означает, что Солнечная система находится вблизи галактической плоскости. Диаметр нашей Галактики — около 100 тыс. св. лет (30 тыс. пк). Число звезд в ней — по разным оценкам — от 200 млрд до 1 трлн. Они составляют 98% общей массы Галактики, а оставшиеся 2% — межзвездное вещество в виде газа и пыли, при этом пыли примерно в 100 раз меньше, чем газа.

Исследования Галактики, проведенные во второй половине XX в., позволили также выявить взаимосвязи звезд и межзвездного вещества, свидетельствующие о процессах эволюции, которые происходят в этой системе на протяжении миллионов и миллиардов лет. После того как выяснилось, что источником энергии звезд являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, стали возможными расчеты сроков их существования. Вычисления показали, что запасов водорода у наиболее ярких звезд хватит не более, чем на несколько десятков миллионов лет. Оказалось, что в Галактике сосуществуют как очень старые звезды, возраст которых приблизительно 15 млрд лет, так и очень молодые, возраст которых не превышает 100 тыс. лет. Стало очевидно, что образование звезд должно происходить постоянно, а эволюцию Галактики, по сути дела, можно считать историей происходящего в ней процесса звездообразования.

2. Звездные скопления и ассоциации

Как вы уже знаете, число одиночных звезд меньше, чем звезд, составляющих двойные и кратные системы. Кроме того, в Галактике существуют различные по численности объектов и по своей форме скопления звезд.

Звездное скопление — группа звезд, которые расположены близко друг к другу и связаны взаимным тяготением.

Различаются два вида звездных скоплений: *шаровые* и *рассеянные*.

В *рассеянных скоплениях* звезд относительно немного — от нескольких десятков до нескольких тысяч. Самым известным рассеянным скоплением являются Плеяды, видимые в созвездии Тельца (см. рис. 1 на цветной вклейке XV). В том же созвездии находится еще одно скопление — Гиады — треугольник из слабых звезд вблизи яркого Альдебарана. Часть звезд, относящихся к созвездию Большой Медведицы, также составляет рассеянное скопление. Практически все скопления этого типа видны вблизи Млечного Пути. Известно около 1200 рассеянных скоплений, но считается, что их в Галактике может быть в несколько десятков раз больше.

Шаровые звездные скопления насчитывают в своем составе сотни тысяч и даже миллионы звезд. Лишь два из них — в созвездиях Стрельца и Геркулеса (рис. 6.3) — можно с трудом увидеть невооруженным глазом. Шаровые скопления распределяются в Галактике по-иному: большая часть расположена вблизи ее центра, а по мере удаления от него их концентрация в пространстве уменьшается. Известных скоплений такого типа около 150, но очевидно, что это только небольшая часть существующих в нашей Галактике.

Различия двух типов скоплений касаются также их звездного «населения». В состав рассеянных скоплений входят в основном



Рис. 6.3. Шаровое звездное скопление М13 в созвездии Геркулеса

звезды, относящиеся (как и Солнце) к главной последовательности. В шаровых — очень много красных гигантов и субгигантов.

Звездные скопления явились такими объектами, при изучении которых астрономы получили редкостную возможность осуществить своеобразный эксперимент. При проведении научных исследований задача нередко заключается в том, чтобы, изменяя какой-то один параметр (например, температуру) и оставляя все остальные неизменными, изучить, как этот параметр влияет на характер наблюдаемого явления. Для всех звезд данного скопления последние две из трех основных характеристик звезд — массы, химического состава и возраста — можно (в первом приближении) считать одинаковыми. Очевидно, что эти звезды не случайно оказались в одном месте, а скорее всего когда-то образовались все вместе из одного и того же вещества. Следовательно, наблюдаемое различие их свойств определяется только тем, что эволюция звезд, различных по массе, происходит по-разному. Это намного облегчает задачу сравнения выводов теории внутреннего строения и эволюции звезд с результатами наблюдений.

Оказалось, что среди хорошо изученных звездных скоплений (их около 500), нет ни одного, для которого диаграмма «спектр — светимость» противоречила бы выводам теории звездной эволюции.

Таким образом, различия скоплений двух типов объясняются, согласно современным представлениям, различием возраста звезд, входящих в их состав, а следовательно, и возраста самих скоплений. Расчеты показали, что возраст многих рассеянных скоплений примерно 2—3 млрд лет, в то время как возраст шаровых скоплений значительно больше и может достигать 12—14 млрд лет.

Группировки наиболее молодых звезд получили название *звездных ассоциаций*. Возраст некоторых из них не превышает миллион лет. Ассоциации существуют недолго (по космическим меркам) — всего за 10—20 млн лет они расширяются настолько, что их звезды уже невозможно выделить среди других звезд.

Существование в Галактике звездных скоплений и ассоциаций самого различного возраста свидетельствует о том, что звезды формируются не в одиночку, а группами, а сам процесс звездообразования продолжается и в настоящее время.

3. Межзвездная среда: газ и пыль

Межзвездное вещество распределено в объеме Галактики весьма неравномерно. Основная масса газа и пыли сосредоточена в слое небольшой толщины (около 200—300 пк) вблизи плоскости Млечного Пути. Местами это вещество сгущается в огромные (диаметром сотни световых лет) облака, которые загораживают от нас расположенные за ними звезды. Именно такие облака наблюдаются как темные промежутки в Млечном Пути (см. рис. 6.1), которые долгое время считались областями, где звезд нет, а потому через них можно заглянуть за пределы Млечного Пути.

Самое большое и близкое к нам облако вызывает хорошо заметное раздвоение Млечного Пути, которое протянулось от созвездия Орла до созвездия Скорпиона. Оно показано на картах звездного неба (см. «Школьный астрономический календарь»).

Свет звезд рассеивает и поглощает космическая пыль, частицы которой по своим размерам сравнимы с длиной световой волны. Частицы такого размера сильнее поглощают более коротковолновое излучение в сине-фиолетовой части спектра; в длинноволновой (красной) его части поглощение слабее, поэтому наряду с ослаблением света далеких объек-

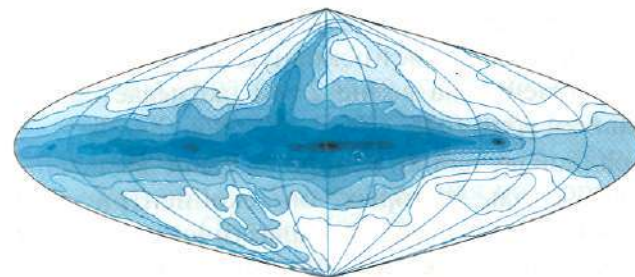


Рис. 6.4.
Распределение
интенсивности
радиоизлучения
по небу

тов наблюдается их покраснение. Пылинки имеют различный химический состав (графит, силикаты, лед и т. п.) и довольно вытянутую форму.

В облаках концентрация частиц составляет всего несколько десятков атомов на 1 см^3 . В пространстве между облаками она по крайней мере в 100 раз меньше, чем в облаках. Масса пыли составляет всего несколько процентов массы межзвездного вещества, состоящего в основном из молекулярного водорода с небольшими примесями других газов. Но даже столь малое содержание пыли при тех огромных расстояниях, которые проходит свет от далеких звезд, вызывает его значительное ослабление. В среднем оно составляет 1,5 звездной величины на 1000 пк, а в облаках может достигать 30 звездных величин. Сквозь такую завесу излучение в оптическом диапазоне практически не проникает, что, в частности, лишает нас возможности увидеть ядро Галактики, которое можно изучать, только принимая его инфракрасное и радиоизлучение. Таким образом, межзвездное поглощение света значительно осложняет изучение структуры Галактики и расположения в ней звезд.

Вторая сложность заключается в том, что более половины межзвездного вещества в Галактике составляет нейтральный водород, который не светится сам и не поглощает свет. Сведения о его распределении в Галактике были получены благодаря радиоастрономическим исследованиям, при которых удалось использовать особенности строения атома водорода. Оказалось, что основной уровень энергии этого атома имеет два подуровня. При переходе с одного из них на другой происходит испускание кванта с частотой, соответствующей длине волны 21 см. В каждом отдельном атоме такой переход происходит в среднем один раз за 11 млн лет, но благодаря тому, что водород составляет основную массу вещества Галактики, радиоизлучение на волне 21 см оказывается достаточно интенсивным (рис. 6.4).

Именно по радиоизлучению водорода были выявлены спиральные ветви, вдоль которых он сконцентрирован (рис. 6.5). Спиральная структура в галактическом диске прослеживается, хотя и не так надежно, по другим объек-

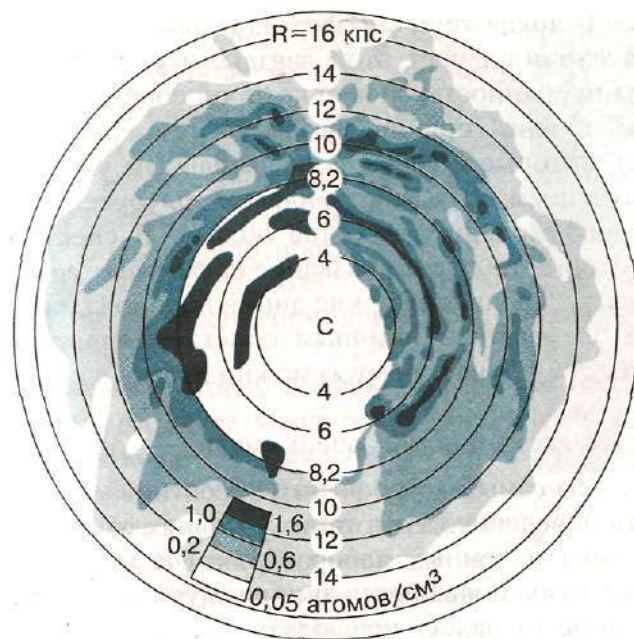


Рис. 6.5.
Спиральная
структура Галак-
тики по радиоиз-
лучению

там: горячим звездам классов О и В, а также светлым туманностям. Солнце находится почти посередине между двумя спиральными ветвями, удаленными от него примерно на 3 тыс. св. лет. Они названы по имени созвездий, в которых заметны их участки, — рукав Стрельца и рукав Персея. По современным представлениям, спиральные ветви являются волнами плотности, причем движутся они вокруг центра Галактики с постоянной угловой скоростью независимо от звезд и других объектов. Природу спиральных ветвей удалось выяснить, изучая не только нашу, но и другие сходные с нею галактики, о которых будет рассказано далее.

Физические условия в межзвездной среде весьма разнообразны, поэтому даже сходные по своей природе и близкие по составу газопылевые облака выглядят по-разному. Они могут наблюдаться как темные туманности, например весьма примечательная по форме Конская Голова в созвездии Ориона (см. рис. 3 на цветной вклейке XIV). Иной вид приобретает облако, если поблизости от него на-

ходится достаточно яркая горячая звезда. Пыль, входящая в состав облака, отражает свет этой звезды, и облако выглядит как светлая туманность, спектр которой совпадает со спектром звезды. Очень горячие звезды (с температурой 20 000—30 000 К), которые обладают значительным ультрафиолетовым излучением, вызывают видимое флуоресцентное свечение газов, входящих в состав облака. В спектре таких облаков, которые получили название *диффузных газовых туманностей*, наблюдаются яркие линии водорода, кислорода и других элементов. Типичным объектом является Большая туманность Ориона, которую можно видеть в хороший бинокль.

Плотность этих туманностей очень мала — порядка 10^{-18} — 10^{-20} кг/м³. Тем самым астрофизика обеспечивает возможность изучать поведение газа в таких условиях, которые пока неосуществимы в земных лабораториях. В спектрах столь разреженных газов появляются линии излучения, которые ранее никогда не удавалось наблюдать. Две яркие зеленые линии спектра туманностей довольно долго приписывались гипотетическому, существующему только в туманностях элементу, который, по аналогии с гелием, стали называть *небулием* (от лат. nebula — туманность). Впоследствии выяснилось, что эти линии принадлежат атому кислорода, потерявшему два электрона.

Астрономы давно считали, что звезды образуются из межзвездной среды, однако обнаружить области звездообразования и проследить за тем, как этот процесс происходит, удалось только в последние десятилетия благодаря наблюдениям в инфракрасном и радиодиапазонах.

На фоне светлых туманностей нередко бывают видны темные пятна и прожилки (рис. 6.6). Так выглядят наиболее плотные и холодные части межзвездного вещества, получившие название *молекулярных облаков*, которых в настоящее время известно несколько тысяч (см. рис. 3 на цветной вклейке XV). Масса таких облаков может достигать миллиона масс Солнца, а диаметр — 60 пк. Большая часть из них обнаружена только по радиоизлучению. Именно в этих облаках, состоящих в основном из молекулярного водорода и гелия, происходит образование звезд. Как примесь в этих облаках присут-

ствуют молекулы CO, CH₃CHO, CH₃OH, NH₃ и многие другие. Пыль, относительно содержание которой в облаках невелико, делает их непрозрачными. Плотность молекулярных облаков в сотни раз больше плотности облаков атомарного водорода, а температура их всего примерно 10 К (–263 °С).

Именно в таких условиях гравитационные силы могут преодолеть газовое давление и вызвать неустойчивое сжатие облака — его *коллапс*. Практически можно считать, что происходит свободное падение вещества. Возникающая при этом неоднородность отдельных частей облака приводит к тому, что оно распадается на отдельные фрагменты (сгустки), каждый из которых продолжает сжиматься. Этот процесс может повторяться до тех пор, пока не образуются фрагменты, которые вследствие высокой плотности будут непрозрачными для излучения, и вещество не сможет уносить выделяющееся тепло. Эти зародыши будущих звезд принято называть *протозвездами* (от греч. protos — первый). В процессе превращения фрагмента облака в звезду происходит колоссальное изменение физических условий: температура возрастает примерно в 1 млн раз, а плотность увеличивается в 10^{20} раз. Продолжительность всего процесса по космическим меркам невелика: для такой звезды, как Солнце, она составляет около 1 млн лет.

Протозвезда еще не имеет термоядерных источников энергии, излучая за счет энергии, выделяющейся при сжатии. На центральную, наиболее плотную часть протозвезды продолжает падать окружающий ее газ. С ростом массы протозвезды растет температура в ее недрах, и когда она достигает нескольких миллионов кельвин, начинаются термоядерные реакции. Сжатие прекращается, сила тяжести уравновешена внутренним давлением горячего газа — протозвезда превратилась в звезду.



Рис. 6.6. Темные прожилки в светлой туманности

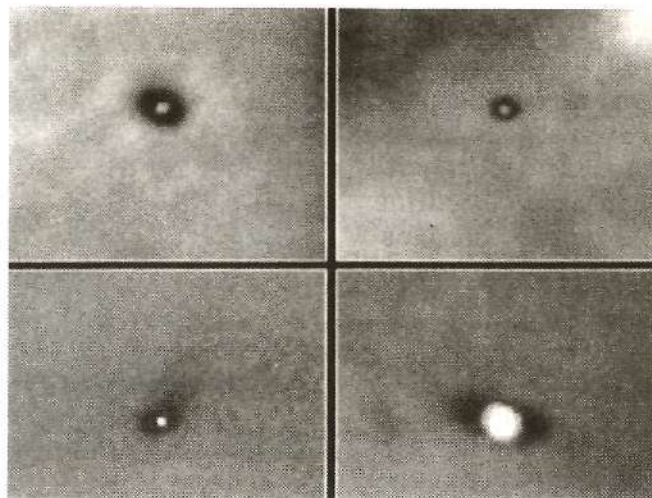


Рис. 6.7.
Газопылевые
диски вокруг
звезд

Согласно современным представлениям, рождающиеся звезды на определенном этапе проходят стадию *звезды-кокона*. Протозвезды и очень молодые звезды обычно окружены газопылевой оболочкой из того вещества, которое еще не упало на звезду. Эта оболочка делает невозможным наблюдение рождающейся звезды в оптическом диапазоне. Однако сама оболочка разогревается излучением звезды до температуры 300—600 К и является источником инфракрасного излучения. Таких объектов к настоящему времени обнаружено уже более 250.

Излучение звезды нагревает окружающую газовую оболочку и постепенно рассеивает ее полностью или только частично. Разлет остатков облака, разогретых родившимися в нем звездами, наблюдается в огромном комплексе облаков в Орионе. Этот очаг звездообразования является одним из ближайших к Земле и наиболее заметным. Две другие, самые близкие области звездообразования находятся в темных облаках созвездий Тельца и Змееносца. В отдельных случаях от оболочки-кокона остаются *газопылевые диски*, частицы которых обращаются вокруг звезд. Изображения таких объектов впервые получены с помощью космического телескопа им. Хаббла (рис. 6.7). Вероятно, из вещества одного из таких дисков, который образовался вместе с будущим Солнцем, около 5 млрд лет тому на-

зад сформировалась наша Земля и все другие тела Солнечной системы.

Иная форма взаимосвязи звезд и межзвездного вещества наблюдается в туманностях, которые образуются на определенных этапах эволюции звезд. К их числу относятся *планетарные туманности*, которые были названы так, поскольку в слабые телескопы они выглядят, как диски далеких планет — Урана и Нептуна (см. рис. 2 на цветной вклейке XV). Это внешние слои звезд, отделившиеся от них при сжатии ядра и превращении звезды в белого карлика. Эти оболочки расширяются и в течение нескольких десятков тысяч лет рассеиваются в космическом пространстве.

Туманности другого типа образуются при взрывах сверхновых звезд. Самая известная из них — Крабовидная туманность в созвездии Тельца (см. рис. 1 на цветной вклейке XIV). Она появилась как результат вспышки Сверхновой 1054 г. На этом месте в настоящее время внутри туманности наблюдается пульсар. Сама ажурная, состоящая из множества волокон оболочка сверхновой расширяется со скоростью свыше 1000 км/с.

Взаимодействие таких оболочек с межзвездной средой приводит к появлению туманностей самой причудливой формы (рис. 6.8).

Состав вещества, теряемого звездами, отличается от первичного состава межзвездной среды. В процессе термоядерных реакций в недрах звезд происходит образование многих химических элементов, а во время вспышек сверхновых образуются даже ядра тяжелее железа. Потерянный звездами газ с повышенным содержанием тяжелых химических элементов меняет состав межзвездного вещества, из которого впоследствии образуются звезды. Химический состав звезд «второго поколения», к числу которых принадлежит, вероятно, и наше Солнце, несколько отличается от состава старых звезд, образовавшихся ранее.



Рис. 6.8. Волокнистая оболочка, сброшенная звездой

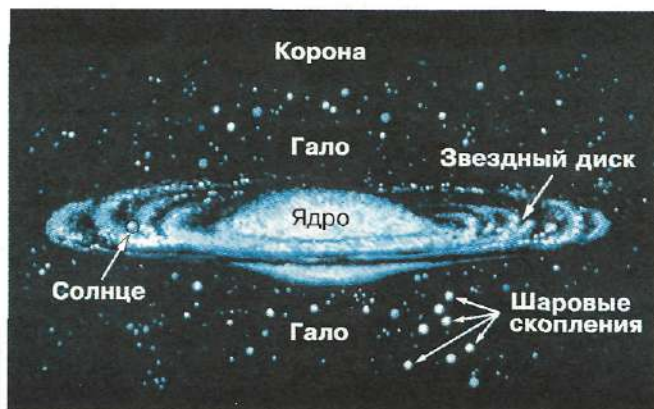


Рис. 6.9. Схема строения Галактики

В настоящее время объекты, имеющие разный возраст, по их распределению в пространстве принято разделять на ряд подсистем, образующих единую звездную систему — Галактику. Наиболее четко выделяются две: *плоская* (диск) и *сферическая* (гало). Их расположение представлено на схеме, показывающей структуру Галактики в плоскости, перпендикулярной плоскости Млечного Пути (рис. 6.9); указаны корона, которая окружает эти подсистемы, центральная область Галактики, получившая название «балдж», и ее ядро, которое находится в направлении созвездия Стрельца, а также отмечено положение Солнца.

Центр Галактики (область радиусом примерно 1 кпк) является не просто геометрическим центром нашей звездной системы, а представляет собой одну из наиболее интересных ее составных частей, которая по своим характеристикам существенно отличается от всех остальных. Особая роль ядра в любой звездной системе стала очевидной в ходе исследования других галактик. К сожалению, ядро нашей Галактики изучено еще недостаточно, поскольку скрыто от нас мощными газопылевыми облаками.

В центральных областях Галактики наблюдается повышенная концентрация звезд, расстояния между которыми здесь в десятки и сотни раз меньше, чем в окрестностях Солнца. Так, в самой середине, в области радиусом всего 50 пк, сосредоточены сотни горячих звезд. Центральная

часть в радиусе примерно 150 пк, помимо большого количества звезд, заполнена ионизованным водородом, масса которого в 1 млн раз превышает массу Солнца.

Область размером 10 пк, называемая ядром Галактики, является источником радиоизлучения, внутри которого находятся красные гиганты и отдельные плотные газовые конденсации размером около 0,1 пк. Два других радиоисточника находятся дальше от центра Галактики и представляют собой молекулярные облака с массой в 1 млн масс Солнца, в которых идет бурный процесс звездообразования. Некоторые исследователи полагают, что в центре Галактики находится массивная (1 млн масс Солнца) черная дыра, однако эти представления не являются общепризнанными.

4. Движения звезд в Галактике. Ее вращение

Долгое время звезды не случайно считались «неподвижными». Измеряя взаимное расположение звезд на небе, астрономы только в начале XVIII в. заметили, что координаты некоторых ярких звезд (Альдебарана, Арктура, Сириуса) изменились по сравнению с теми, которые были получены в древности. Смещение звезд, которое назвали собственным движением, было обнаружено раньше, чем удалось измерить их годичный параллакс.

Собственным движением звезд называется ее видимое угловое смещение за год по отношению к слабым далеким звездам.

Смещение звезд на небе в течение года невелико. Однако на протяжении десятков тысяч лет собственные движения звезд существенно сказываются на их положении, вследствие чего меняются привычные очертания созвездий (рис. 6.10).

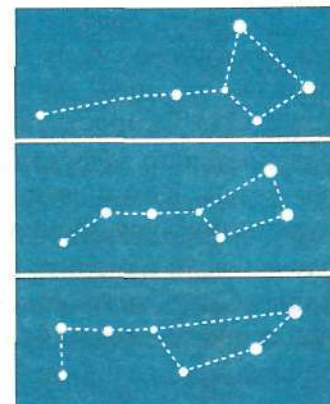


Рис. 6.10. Изменение вида созвездия Большая Медведица на протяжении 100 тыс. лет

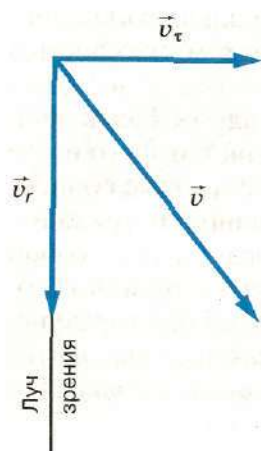


Рис. 6.11

Скорости движения в пространстве у различных звезд отличаются довольно значительно. Самая «быстрая» из них, получившая название «летающая звезда Барнарда», за год перемещается по небу на $10,8''$. Это означает, что $0,5^\circ$ — угловой диаметр Солнца и Луны она проходит менее чем за 200 лет. В настоящее время эта звезда (ее звездная величина 9,7) находится в созвездии Змееносца. Большинство из 300 000 звезд, собственное движение которых измерено, меняют свое положение значительно медленнее — смещение составляет всего лишь сотые и тысячные доли угловой секунды за год.

В настоящее время собственные движения звезд определяют, сравнивая положение звезд на фотографиях данного участка звездного неба, полученных на одном и том же телескопе с промежутком времени в несколько лет или даже десятилетий. Но даже в этом случае смещение сравнительно близких звезд на фоне более далеких столь мало, что его можно определить только с помощью специальных микроскопов.

Скорость звезды в пространстве $\vec{v}$ можно представить как векторную сумму двух компонентов, один из которых направлен по лучу зрения, другой — перпендикулярно ему (рис. 6.11). Скорость по лучу зрения ($\vec{v}_r$) непосредственно определяется по эффекту Доплера — смещению линий в спектре звезды. Компонент скорости по направлению, перпендикулярному лучу зрения ($\vec{v}_t$), можно вычислить только в том случае, если измерить собственное движение звезды и ее параллакс, т. е. знать расстояние до нее. Тогда пространственная скорость звезды будет равна:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}.$$

Пространственные скорости звезд относительно Солнца (или Земли) составляют, как правило, десятки километров в секунду.

Изучение собственных движений и лучевых скоростей показало, что Солнечная система движется со скоростью 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса. Точка небесной сферы, в направлении которой она движется относительно ближайших звезд, называется **апексом** Солнца.

Анализ собственных движений и лучевых скоростей звезд по всему небу показал, что они движутся вокруг центра Галактики. Это движение звезд воспринимается как вращение нашей звездной системы, которое подчиняется определенной закономерности: *угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра, а линейная возрастает, достигая максимального значения на том расстоянии, на котором находится Солнце, а затем практически остается постоянной.*

Звезды, газ и другие объекты, составляющие галактический диск, движутся по орбитам, близким к круговым. Солнце вместе с близлежащими звездами обращается вокруг центра Галактики со скоростью около 250 км/с, совершая один оборот примерно за 200 млн лет. Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23—28 тыс. св. лет (7—9 тыс. пк). Скорость обращения Солнца практически совпадает со скоростью, с которой на данном расстоянии от центра Галактики движется волна уплотнения, формирующая спиральные рукава. Эта область Галактики получила название **коротационной окружности** (от англ. corotation — совместное вращение). Оказавшиеся здесь Солнце и другие звезды находятся в привилегированном положении. Все остальные звезды периодически попадают внутрь спиральных рукавов, поскольку их линейные скорости не совпадают со скоростью обращения волны уплотнения вокруг центра Галактики. Следовательно, наша планета и вся Солнечная система не испытывают на себе катастрофического влияния тех бурных процессов, которые происходят внутри спиральных рукавов. Стабильность условий, в которых возникла и миллиарды лет существует Солнечная система, может рассматриваться как один из важнейших факторов, обусловивших происхождение и развитие жизни на Земле.



ВОПРОСЫ

1. Какова структура и размеры нашей Галактики?
2. Какие объекты входят в состав Галактики?
3. Как проявляет себя межзвездная среда? Каков ее состав?
4. Какие источ-

ники радиоизлучения известны в нашей Галактике? 5. Чем различаются рассеянные и шаровые звездные скопления?



УПРАЖНЕНИЕ 20

Звезда, находящаяся на расстоянии 10 пк, приближается к нам со скоростью 100 км/с. Как изменится это расстояние за 100 лет?

§ 26. ДРУГИЕ ЗВЕЗДНЫЕ СИСТЕМЫ — ГАЛАКТИКИ

Наиболее яркие галактики были включены в каталог, составленный Мессье еще в XIX в. Так, туманность Андромеды по этому каталогу обозначена М31. В «Новый общий каталог» (New General Catalog), который содержит сведения о более чем 13 000 галактик, она включена как NGC 224. В состав всех галактик входят звезды, межзвездный газ и пыль. Но их относительное содержание в галактиках различного типа существенно отличается.

Для большинства галактик определить расстояние по наблюдениям цефеид оказывается невозможным. В этих случаях пользуются другими методами, среди которых наиболее надежным считается определение расстояния по закону «красного смещения», открытому в 1929 г. американским астрономом **Эдвином Хабблом** (1889—1953). Он обнаружил, что в спектрах всех галактик (за исключением туманности Андромеды и других ближайших галактик) линии смещены к красному концу (рис. 6.12). Это «красное смещение» означало, что они удаляются от нашей Галактики. Сравнив расстояние до галактик со скоростями их удаления,

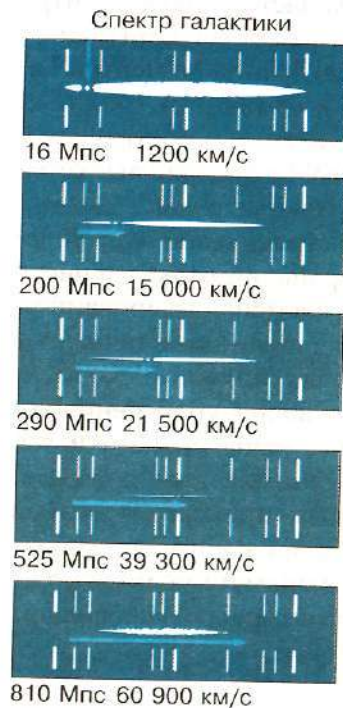


Рис. 6.12. «Красное смещение» в спектрах галактик

ученый установил, что между этими величинами существует весьма простая зависимость (закон Хаббла):

$$v = H \cdot R,$$

где v — скорость галактики, R — расстояние до нее, а H — коэффициент пропорциональности, называемый теперь *постоянной Хаббла*. По современным данным, наиболее вероятное значение H лежит в пределах 60—80 км/(с · Мпк).

Этот закон дал возможность определить расстояние до наиболее далеких объектов во Вселенной, когда непригодны все другие способы, применяемые в астрономии. Определив скорость галактики по смещению линий в ее спектре, можно вычислить расстояние до нее по формуле:

$$R = \frac{v}{H}.$$

К настоящему времени измерены «красные смещения» и определены расстояния до нескольких тысяч галактик. От самых далеких из них свет идет около 10 млрд лет.

По внешнему виду и структуре галактики весьма разнообразны, однако большинство из них хорошо укладывается в предложенную Хабблом еще в 1923 г. простую и стройную классификацию (рис. 6.13). Все галактики были разбиты на три типа: эллиптические — E , спиральные — S и неправильные (иррегулярные) — I . Форма *эллиптических галактик* различна: от почти круглой до очень сильно сплюснутой. В *спиральных галактиках* выделены два подтипа: *нормальные спирали*, у которых спиральные рукава начинаются непосредственно из центральной области (см. рис. 1 на цветной вклейке XVI), и *пересеченные спирали*, у которых рукава выходят не из ядра, а связаны с перемычкой, проходящей через центр галактики.

Ближайшими и самыми яркими оказались две галактики неправильного типа, которые получили названия Большое и



Эдвин Хаббл



Рис. 6.13. Классификация галактик по Хаббл

Малое Магеллановы Облака (рис. 6.14). Они хорошо видны невооруженным глазом в южном полушарии неподалеку от Млечного Пути. Магеллановы Облака являются спутниками нашей Галактики, расстояние до Большого около 200 тыс. св. лет, до Малого — 170 тыс. св. лет. Среди всех известных галактик доля неправильных сравнительно невелика — всего 5%. Значительную часть их массы (до половины) составляет газ.



Рис. 6.14. Большое Магелланово Облако



Рис. 6.15. Структура спиральных ветвей: слева — в радиодиапазоне, справа — в оптическом

Спиральные галактики, подобные нашей, являются наиболее распространенными — примерно половина наблюдаемых галактик относится к этому типу. Их отличает наличие двух (иногда больше) спиральных рукавов, в которых сосредоточено много молодых ярких звезд, светящихся газовых туманностей, а также холодных газопылевых облаков. Именно в спиральных рукавах происходит формирование звезд из межзвездного вещества.

По современным представлениям, спиральные ветви — это волна повышенной плотности звезд и газа, которая вращается вокруг центра галактики как твердое тело, — угловая скорость постоянна, а линейная увеличивается с увеличением расстояния от оси вращения. В ветвях нет постоянного состава звезд и газа, они периодически вступают в область рукава. Проходя через них, волна уплотнения оказывает значительное влияние на газ — увеличение его плотности в несколько раз стимулирует начало процесса звездообразования. Концентрация нейтрального водорода вдоль спиральных ветвей подтверждается данными радиоастрономии. Причем в одной и



Рис. 6.16. Спиральная галактика M102, видимая с ребра



Рис. 6.17. Эллиптическая галактика



Рис. 6.18. Карликовая галактика

той же галактике (M51) по наблюдениям в радиодиапазоне спиральные ветви прослеживаются значительно дальше от ее центра, чем в оптическом диапазоне (рис. 6.15).

Те спиральные галактики, которые мы видим «с ребра», напоминают по внешнему виду чечевицу или диск с утолщением в середине (рис. 6.16). Это утолщение представляет собой центральную, наиболее плотную часть гало, которое принято называть балдж (английский синоним русского слова «утолщение»). Очевидно, так выглядит и наша Галактика.

Вторым по распространенности типом галактик (примерно 25% от их общего числа) являются *эллиптические* (рис. 6.17). У них нет ни диска, ни спиральных ветвей, а имеется только сферическая составляющая, которая состоит преимущественно из старых звезд красного цвета и почти не содержит холодного газа. Вероятно, все межзвездное вещество ушло на образование этих звезд.



Рис. 6.19. Местная группа галактик

Линзовидные галактики похожи на спиральные тем, что у них есть и диск, и гало, но они, как и эллиптические, не имеют спиральных ветвей. Из общего числа галактик примерно 20% относится к этому типу.

Галактики одного и того же типа значительно отличаются друг от друга по размерам, числу звезд и другим характеристикам. Самые маленькие среди них называют карликовыми. Несколько таких карликовых галактик входят в число спутников нашей Галактики (рис. 6.18).

Галактики, как и звезды, редко бывают одиночными; гораздо чаще они наблюдаются в виде пар, небольших групп и даже скоплений, в которых объединяются тысячи галактик.

Наша Галактика вместе с известными галактиками Андромеды и Треугольника и расположенными в их окрестностях слабыми карликовыми галактиками образует Местную систему, в составе которой насчитывается около 40 объектов (рис. 6.19). Все они связаны гравитационными силами и не удаляются друг от друга.

Большинство галактик группируется в скопления, которые делятся на два типа: *правильные* и *неправильные*. Правильные скопления галактик во многом напоминают шаровые звездные скопления, для которых характерна сферическая симметрия с сильной концентрацией галактик к центру. Типичное скопление такого типа размером около 4 Мпк, которое наблюдается в созвездии Волосы Вероники, насчитывает несколько десятков тысяч галактик (рис. 6.20).

Концентрация галактик в скоплениях бывает так велика, что они располагаются очень близко друг к другу. Их гравитационное взаимодействие вызывает значительное изменение формы галактик. Часто наблюдаются соединяющие их перемычки, которые состоят из звезд или газа, а также уходя-



Рис. 6.20. Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники



Рис. 6.21. Взаимодействие галактик

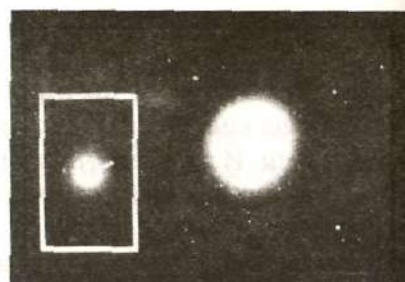


Рис. 6.22. Выброс вещества из ядра галактики

щие далеко в сторону протяженные «хвосты» (рис. 6.21). Первым к исследованию таких галактик, получивших название взаимодействующих, приступил Б. А. Воронцов-Вельяминов.

В настоящее время известно несколько сот случаев, когда галактики слились вместе и образовали единую систему. Так, например, считается, что галактика NGC5128 является результатом слияния эллиптической и спиральной галактик. Радионаблюдения обнаружили следы взаимодействия нашей Галактики с ее ближайшими соседями — идущий к ней поток газа от Магеллановых Облаков. Вероятно, через несколько миллиардов лет их звезды волеются в состав Галактики.

Среди взаимодействующих галактик и галактик, имеющих близких спутников, часто наблюдаются галактики с активными ядрами. Ядро любой галактики, ее центральная часть, всегда выделяется своей яркостью. Небольшое число галактик (около 1%) имеет особенно яркие ядра, в которых происходит колоссальное выделение энергии. Их активность может проявляться по-разному. Во-первых, это очень большая мощность излучения (светимость) не только в оптической, но и в рентгеновской или инфракрасной части спектра. Светимость ядер таких галактик почти такая же, как светимость всей нашей Галактики. Излучение исходит из области, диаметр которой составляет примерно 1 пк, и заметно меняется порой за несколько месяцев или даже дней. Во-вторых, в ядре происходит движение газа со скоростями тысячи километров в секунду, что приводит к появлению длинных выбросов — *джетов* (рис. 6.22). В-третьих, мощные потоки



Рис. 6.23. Радиоизлучение галактики Центавр А

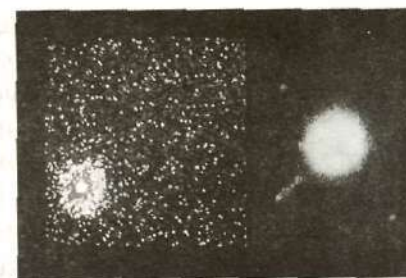


Рис. 6.24. Квазар 3C273

электронов и протонов высокой энергии, идущие из ядра в двух противоположных направлениях, порождают синхротронное радиоизлучение.

Галактики с активными ядрами, являющиеся источниками радиоизлучения большой мощности, называют *радиогалактиками* (см. рис. 3 на цветной вклейке XVI). Их радиоизлучение может быть в десятки тысяч раз больше по мощности, чем радиоизлучение нашей Галактики или других, подобных ей. Характерно, что наиболее интенсивное радиоизлучение приходит от областей, которые располагаются примерно симметрично по обе стороны от галактики и значительно превосходят ее по размерам (рис. 6.23).

Радиоастрономические наблюдения позволили обнаружить также самые мощные из всех известных во Вселенной источники видимого и инфракрасного излучений, которые называли *квазарами*. Это слово является сокращением полного их названия — квазизвездные радиоисточники. На фотографиях квазары действительно выглядят как звезды, причем самый яркий из них виден как звезда 13-й звездной величины. Однако их спектры, содержащие яркие линии излучения, напоминают спектры газовых туманностей, а сами линии сильно смещены в красную сторону спектра, как в спектре далеких галактик. Оказалось, что даже наиболее близкие квазары расположены дальше большинства известных галактик, на расстояниях порядка 1 млрд св. лет. Самые далекие квазары наблюдаются на расстояниях до 15 млрд св. лет. На таких огромных расстояниях они могут быть обнаружены только

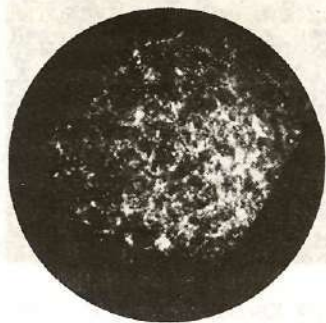


Рис. 6.25. Ячеистая структура Вселенной

вследствие большой светимости, которая значительно превышает светимость нашей Галактики, иногда в несколько сот раз. В настоящее время известны тысячи квазаров.

В квазарах наблюдаются такие явления, как изменение яркости, выброс струй вещества и т. п. (рис. 6.24). Вокруг квазаров, расположенных не слишком далеко, обнаружено свечение, состав и структуру которого можно объяснить присутствием звезд. Вероятно, квазары представляют собой ядра

далеких галактик, проявляющие очень высокую активность.

Изучение наиболее удаленных объектов позволяет «заглянуть» в прошлое. В самом деле, если расстояние до галактики (или квазара) составляет, например, 3 млрд св. лет, то мы наблюдаем этот объект не в том состоянии, в котором он находится в данный момент, а в том, в котором он находился 3 млрд лет тому назад. Возможно, что отсутствие квазаров поблизости от нашей Галактики свидетельствует о более высокой активности ядер галактик в далеком прошлом.

Окончательного ответа на вопрос об источниках высокой активности ядер галактик пока нет. Одной из возможных моделей, описывающих весь наблюдаемый комплекс явлений, считается наличие в ядрах черных дыр массой в десятки и сотни миллионов масс Солнца. В результате падения вещества на черную дыру должно выделяться огромное количество энергии, преобразуемой в электромагнитное излучение. В пользу такого предположения говорит наличие в ядрах целого ряда галактик больших масс несветящегося вещества, обнаруженного с помощью крупнейших наземных телескопов и космического телескопа им. Хаббла.

Эти телескопы позволяют получить фотографии, на которых можно насчитать многие миллионы галактик. В их пространственном распределении наблюдается определенная закономерность — *ячеисто-сотовая структура* (рис. 6.25). Скопления и сверхскопления галактик располагаются так, что не заполняют все пространство, а образуют лишь «стен-

ки», которые отделяют друг от друга гигантские пустоты, в которых галактики практически не встречаются. Размер этих ячеек около 100 Мпк, а стенки имеют толщину всего 3—4 Мпк. Такая структура возникла в результате длительной эволюции всех объектов, наблюдаемых во Вселенной, самые общие свойства которой изучает космология.



ВОПРОСЫ

1. Как определяют расстояния до галактик? 2. На какие основные типы можно разделить галактики по их внешнему виду и форме? 3. Чем различаются по составу и структуре спиральные и эллиптические галактики? 4. Чем объясняется красное смещение в спектрах галактик? 5. Какие внегалактические источники радиоизлучения известны в настоящее время? 6. Что является источником радиоизлучения в радиогалактиках?

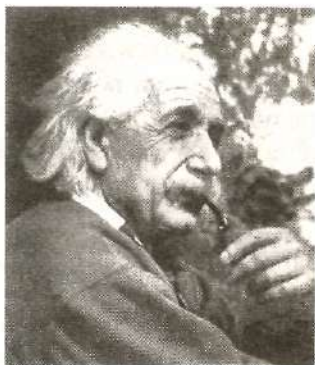


УПРАЖНЕНИЕ 21

1. Галактика, находящаяся на расстоянии 150 Мпк, имеет видимый угловой диаметр 21". Сравните ее линейные размеры с размерами нашей Галактики. 2. Каково расстояние до галактики, если в ней обнаружена новая звезда, видимая звездная величина которой +18, а абсолютная звездная величина равна -7? 3. Какова скорость удаления галактики, находящейся от нас на расстоянии 300 Мпк? Постоянную Хаббла принять равной 75 км/(с · Мпк). 4. На каком расстоянии находится галактика, если скорость ее удаления составляет $2 \cdot 10^4$ км/с? Постоянная Хаббла равна 75 км/(с · Мпк). 5. Какого углового диаметра будет видна наша Галактика, диаметр которой составляет 30 000 пк, для наблюдателя, находящегося в галактике М31 (туманность Андромеды) на расстоянии 600 Кпк?

§ 27. Основы современной космологии

По сути дела, существовавшие на каждом этапе развития человеческой цивилизации представления о строении мира можно считать космологическими теориями соответствующей эпохи. Геоцентрическая система Аристотеля—Птолемея стала первой научно обоснованной космологической моделью Вселенной. Спустя 1500 лет ее сменила новая космологическая модель — гелиоцентрическая система, предложенная Коперником.



Альберт Эйнштейн

Космология — раздел астрономии, который изучает строение и эволюцию Вселенной в целом, используя при этом методы и достижения физики, математики и философии.

Теоретические модели, описывающие наиболее общие свойства строения и эволюции Вселенной, проверяются астрофизическими методами наблюдений. Очевидно, что выводы космологии имеют важное значение для формирования современной научной картины мира.

Теоретическим фундаментом современной космологии явилась созданная **Альбертом Эйнштейном** (1879—1955) в начале XX в. общая теория относительности — релятивистская теория тяготения. Наиболее существенным отличием современных космологических моделей, первые из которых были разработаны **Александром Александровичем Фридманом** (1888—1925) на основе теории Эйнштейна, является их эволюционный характер. Идея глобальной эволюции Вселенной оказалась столь необычной, что первоначально не была принята даже самим создателем теории относительности, таким выдающимся ученым, как Эйнштейн.

Даже позднее, когда стало очевидно, что все объекты во Вселенной изменяются с течением времени, казалось, что процессы, происходящие в ее отдельных составных частях, не меняют облика всей Вселенной.

Эта идея была для Эйнштейна настолько очевидной, что для уравнений теории относительности, примененных ко всей Вселенной, он стал искать решения, описывающие ее состояние, не меняющееся со временем. Для того чтобы уравновесить силы тяготения, он предположил, что кроме них во Вселенной существует сила отталкивания. Эта сила должна быть универсальной, зависящей только от расстояния между телами и независящей от их массы. Ускорение, которое она будет создавать этим телам, должно быть пропорционально расстоянию: $a = \text{const} \cdot R$. Так в уравнениях по-

явилась обусловленная гипотетическими силами отталкивания космологическая постоянная — *лямбда-член*.

В 1922—1924 гг. российский математик Фридман вывел из общей теории относительности Эйнштейна уравнения, которые описывали общее строение и эволюцию Вселенной. Решения, полученные Фридманом для этих космологических уравнений, означали, что материя в масштабах однородной и изотропной Вселенной не может находиться в покое — Вселенная должна либо сжиматься, либо расширяться. Суть этого вывода, сделанного на основе математически строгого решения уравнений, можно объяснить довольно просто, оперируя только привычными понятиями теории тяготения Ньютона.

Будем исходить из предположения, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной можно считать однородным. Тогда, галактика, которая находится на поверхности шара произвольного радиуса, притягивается к его центру согласно закону всемирного тяготения с силой, прямо пропорциональной массе шара M и обратно пропорциональной квадрату его радиуса R . Все остальные галактики, лежащие вне этого шара, не меняют величины этой силы. Для доказательства этого важного утверждения произвольно выделим во Вселенной шаровой слой толщиной h такого радиуса, чтобы внутри него оказались не только галактика A , но и весь шар радиуса R (рис. 6.26). Рассмотрим силы тя-



Александр Александрович Фридман

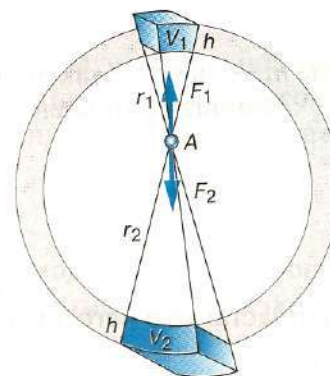


Рис. 6.26. Объяснение нестационарности Вселенной

готения, действующие на галактику A со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от нее направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объеме элементов слоя V_1 и V_2 . Сравним объем и массу этих элементов. Толщина их одинакова — h , а площади S_1 и S_2 и объемы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя — r_1 и r_2 :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Силы, с которыми эти массы притягивают галактику A , согласно закону всемирного тяготения, равны:

$$F_1 = \frac{GM_1 m}{r_1^2}$$

и

$$F_2 = \frac{GM_2 m}{r_2^2},$$

где m — масса галактики A .

Запишем отношение этих сил

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{M_1 r_2^2}{M_2 r_1^2}$$

и, подставив в него значение $\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$, получим

$$\frac{F_1}{F_2} = 1,$$

или

$$F_1 = F_2.$$

Таким образом, эти силы, равные по абсолютной величине и направленные в противоположные стороны, уравновешивают друг друга. Значит, галактики, находящиеся вне шара радиуса R , не влияют на величину силы, с которой галактика A притягивается галактиками, находящимися внутри этого шара.

Следовательно, можно написать следующее выражение для ускорения, которое имеет одна из этих галактик по отношению к галактике, расположенной в его центре:

$$a = -\frac{GM}{R^2}.$$

Знак минус означает, что ускорение соответствует притяжению, а не отталкиванию. Из этой формулы следует, что Вселенная должна быть нестационарной, поскольку в ней действует тяготение. Галактики могут находиться в покое только мгновение. В следующий момент они придут в движение и будут сближаться под действием сил тяготения. Если же в начальный момент галактики будут иметь скорости, направленные так, чтобы они удалялись друг от друга, то в этом случае тяготение будет тормозить расширение Вселенной. Величина и направление скорости, которую имеют галактики в определенный момент, из теории тяготения не выводятся, их можно получить только на основе наблюдений.

Теоретические выводы Фридмана получили важное наблюдательное подтверждение в открытом Хабблом законе пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию:

$$v = H \cdot R.$$

Удаление галактик, которое происходит во все стороны со скоростями, прямо пропорциональными расстоянию от нас, не означает, однако, что наша Галактика занимает какое-то особое положение во Вселенной. Точно такая же картина «разбегания» галактик будет наблюдаться для любой другой галактики.

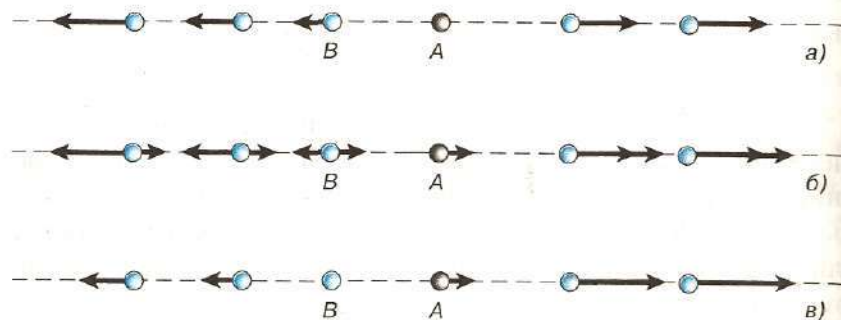


Рис. 6.27. Расширение Вселенной

Выберем в пространстве, занятом галактиками, произвольно направленную прямую, которая проходит через нашу Галактику (рис. 6.27). На этой прямой окажется несколько галактик, которые удаляются со скоростями, подчиняющимися закону Хаббла, от нашей Галактики A (рис. 6.27, а). Теперь попробуем представить, какую картину разбегания галактик мы увидим, если перенесемся на галактику B . Для того чтобы определить скорости всех галактик относительно нее, надо из скоростей, изображенных на рисунке 6.27, а, вычесть скорость галактики B (рис. 6.27, б). Полученная картина, которая представлена на рисунке 6.27, в, принципиально не отличается от предыдущей: скорости удаления галактик по-прежнему пропорциональны расстояниям.

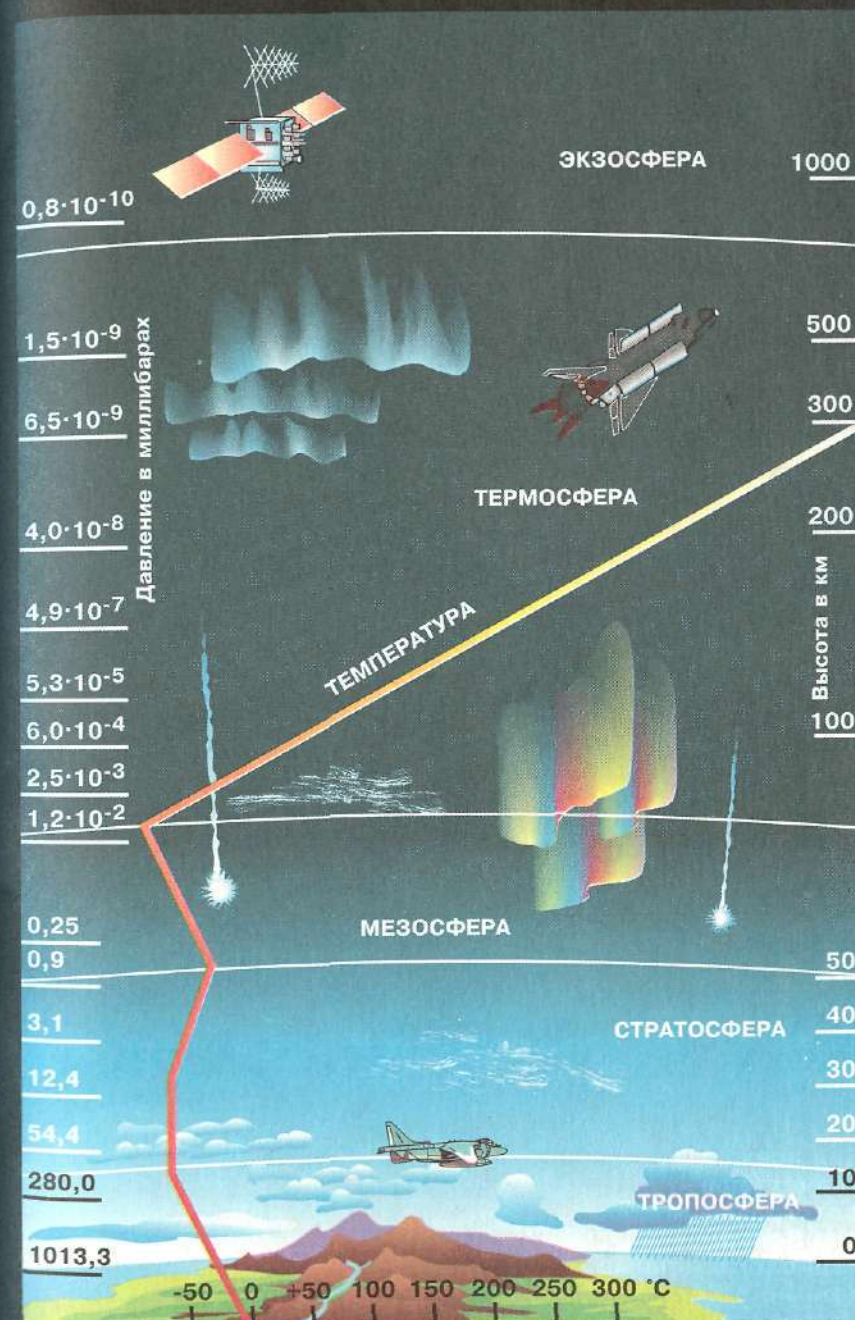
Для того чтобы узнать, когда примерно началось наблюдаемое расширение, необходимо воспользоваться постоянной Хаббла H . Галактика, находящаяся от нас на расстоянии R , удаляется со скоростью $H \cdot R$. Следовательно, разделив расстояние, пройденное галактикой с момента начала расширения, на ее скорость, мы получим:

$$R/(H \cdot R) = 1/H.$$

Величина, обратная постоянной Хаббла, дает примерную оценку времени, которое прошло с момента начала расширения Вселенной. Нетрудно подсчитать, что это время составляет 12—15 млрд лет.

Открытие Хабблом «красного смещения» и работы Фридмана, показавшего, что Вселенная не может быть ста-

1. Строение атмосферы Земли



II. Сравнительные размеры планет земной группы



Меркурий



Венера



Земля

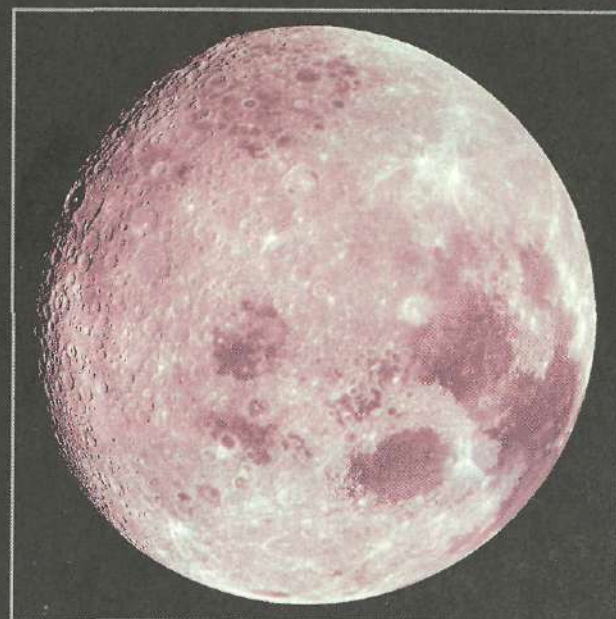


Марс

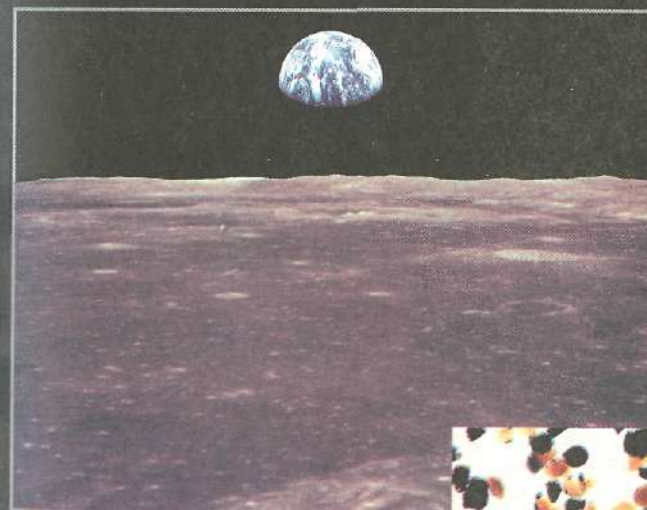
Для всех планет даны фотографии, для Венеры — радиолокационные данные с КА «Магеллан»

III. Луна — спутник Земли

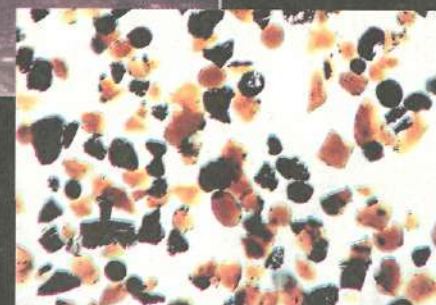
1. Луна — снимок с космического аппарата



2. Земля на небе Луны



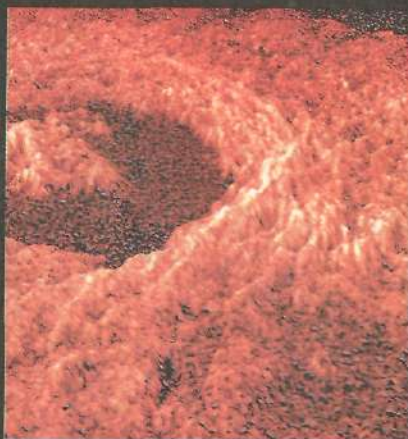
3. Частицы лунного реголита



IV. Поверхность Венеры по данным радиолокации



1. Пейзаж
Венеры —
слева вулкан Сиф



2. Кратер
Голубкина

3. Тектоничес-
кие трещины



V. Поверхность Марса



1. Участок
каньона —
Долины
Маринера

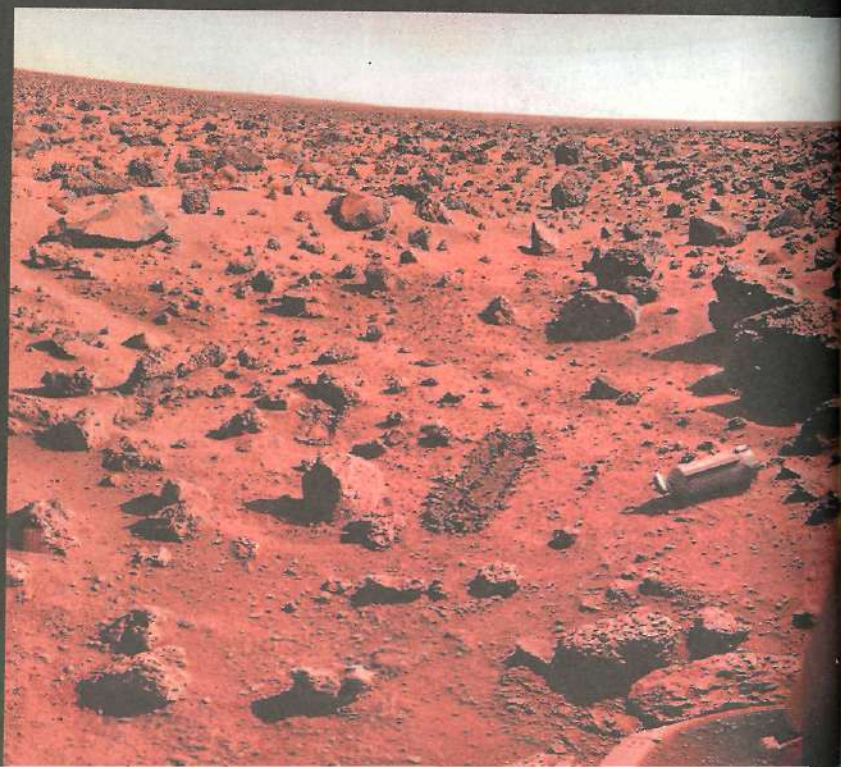
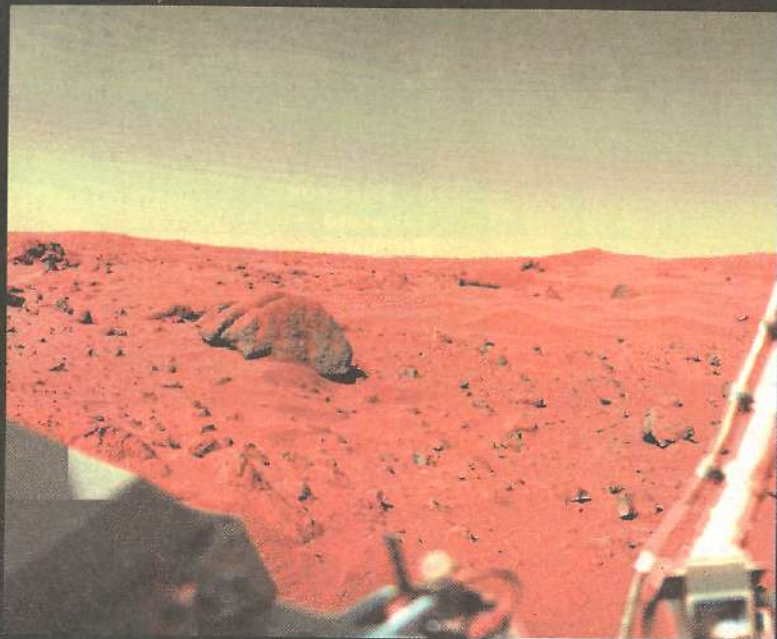


2. Вулканическая
гора Олимп

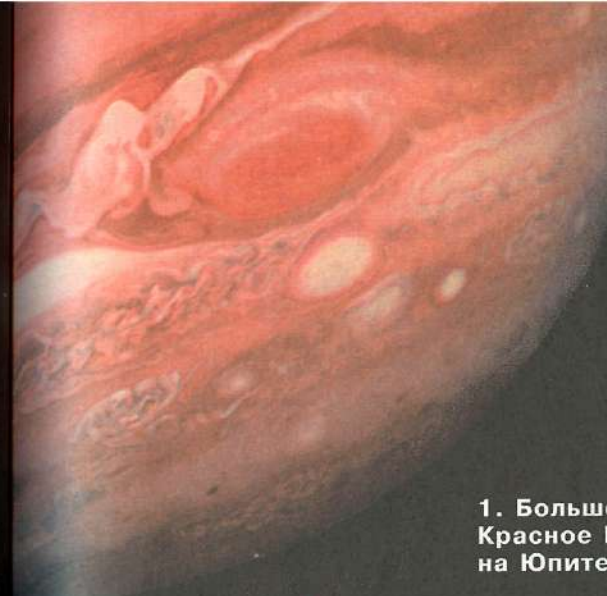


3. Сухие русла

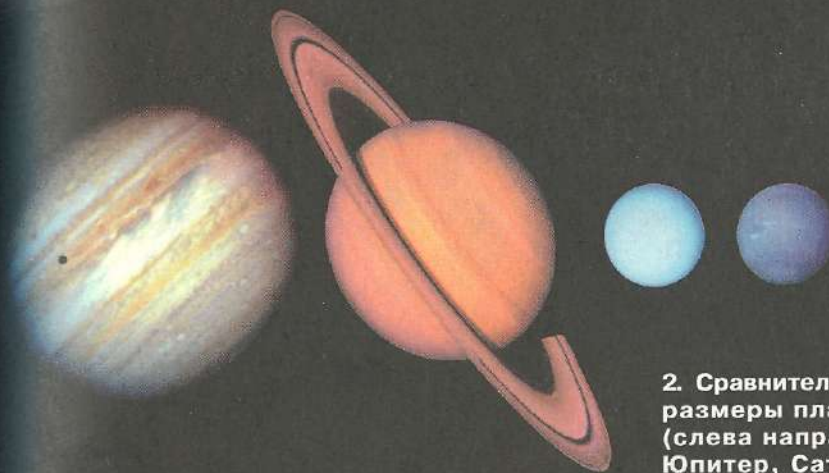
VI. Панорамы поверхности Марса



VII. Планеты-гиганты

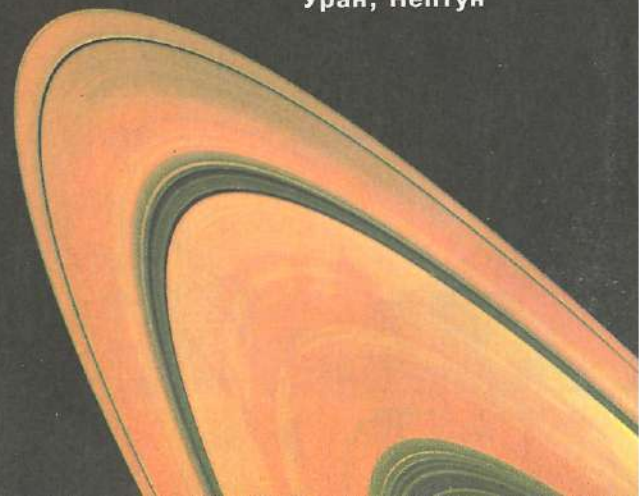


1. Большое
Красное Пятно
на Юпитере



2. Сравнительные
размеры планет
(слева направо):
Юпитер, Сатурн,
Уран, Нептун

3. Структура
колец Сатурна





VIII. Спутники Юпитера (в сравнении с Луной)



Амальтея



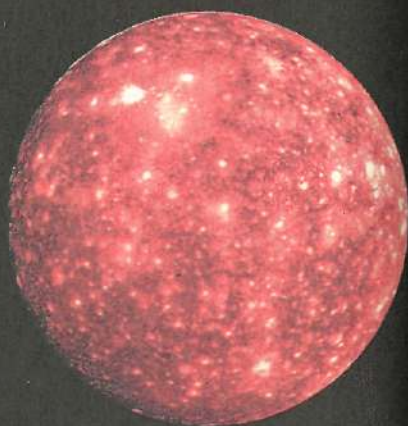
Ио



Европа

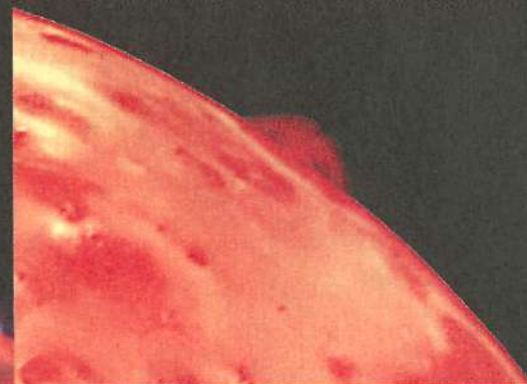


Ганимед

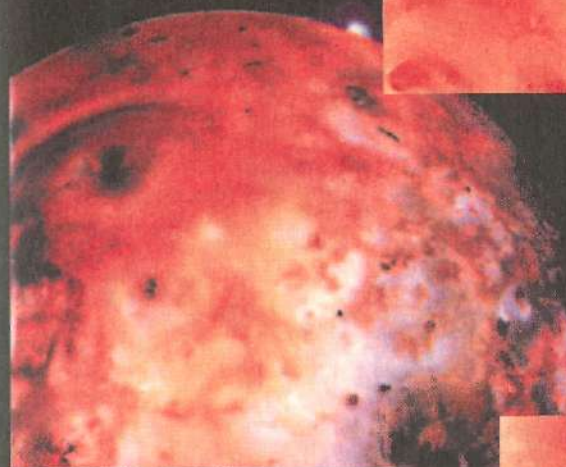


Каллисто

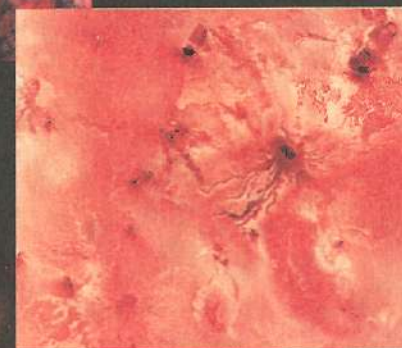
IX. Действующие вулканы на Ио



1. Фонтан газа
высотой 300 км



2. Замерзшие
на поверхности
продукты
извержений



3. Черные
потоки
расплавленно
й серы



4. Одна из
вулканических
кальдер

X. Нептун и Сатурн с близкого расстояния

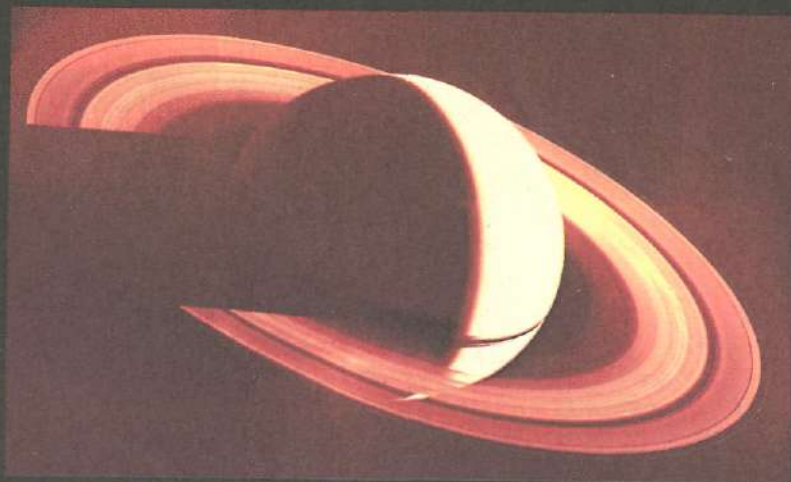


1. Общий вид Нептуна с Большим Темным Пятном — антициклоном

2. Фрагмент облачной структуры



3. Сатурн. Тень от планеты на кольцах



XI. Спутники планет-гигантов

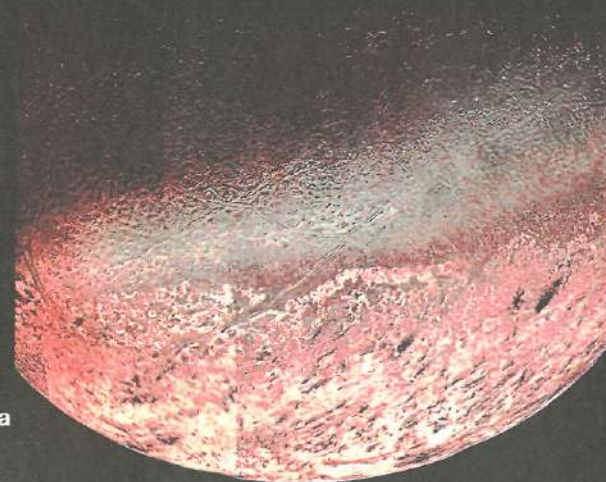
1. Следы тектонических процессов на Миранде — спутнике Урана



2. Ореол атмосферы вокруг Титана — спутника Сатурна



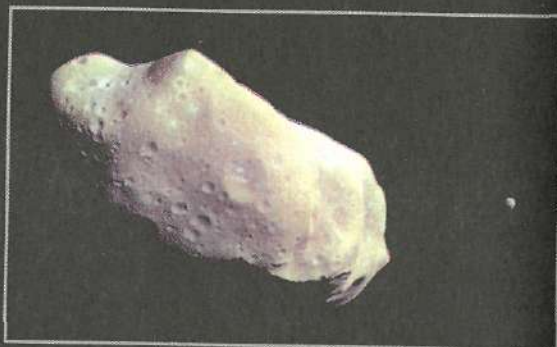
3. Полярная шапка и следы вулканизма на Тритоне — спутнике Сатурна



XII. Малые тела Солнечной системы



1. Комета
Хейла—Боппа



2. Астероид Ида
со спутником
Дактиль



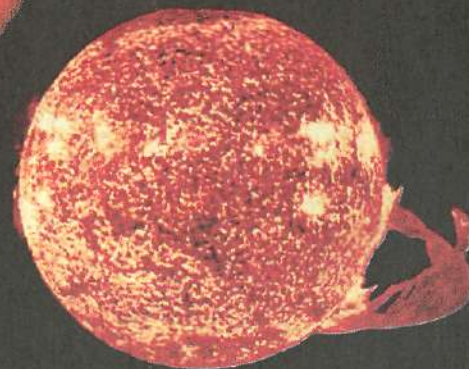
3, 4. Каменный
метеорит и его
внутренняя
структура



XIII. Солнце



1. В красных
лучах
излучения
водорода



2. В ультра-
фиолетовых
лучах



3. В рентге-
новских лучах

4. Спектр
Солнца



XIV. Наша Галактика

1. Крабовидная
туманность

2. Газопылевая
туманность
в созвездии
Ориона

3. Фрагмент
туманности —
«Конская
голова»

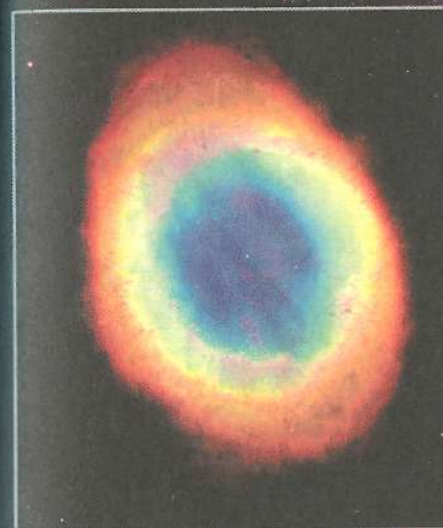


XV. Наша Галактика

1. Звездное
скопление
Плеяды

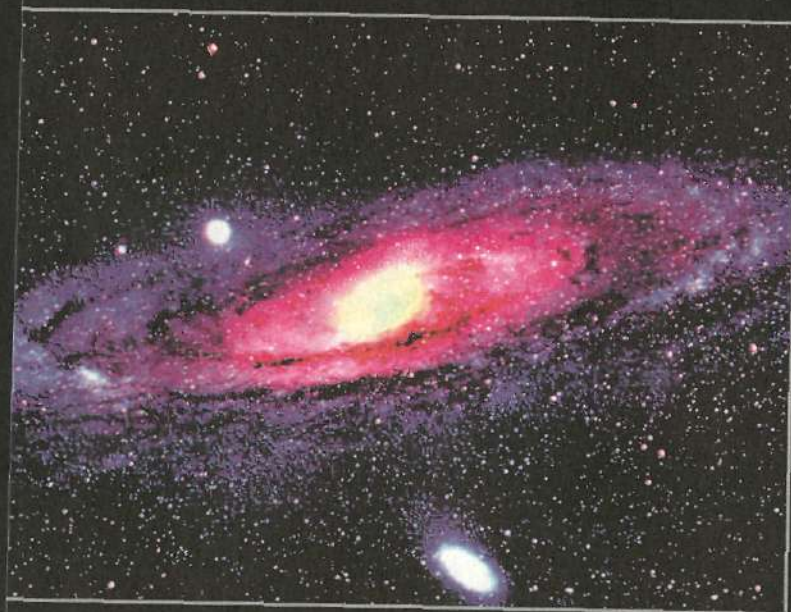
2. Планетарная
туманность

3. Одна из
областей
звздообра-
зования



XVI. Галактики

1. Спиральная
галактика (M100)



2. Туманность
Андромеды (M31)

3. Радиогалактика
Центавр А



ционарной, явились только началом исследований эволюции Вселенной.

Взаимное удаление галактик означает, что в прошлом они были гораздо ближе друг к другу, чем теперь. В еще более раннюю эпоху плотность вещества была так велика, что во Вселенной не могло существовать ни галактик, ни звезд и никаких других наблюдаемых ныне объектов. Расчеты прошлого, проведенные на основе космологических моделей Фридмана, показывают, что в момент начала расширения Вселенной ее вещество должно иметь огромную (бесконечно большую) плотность.

Перед наукой встала задача изучения тех физических процессов, которые происходят в расширяющейся Вселенной на разных этапах ее эволюции вплоть до современности, а также тех, которые предстоят во Вселенной в будущем.

В 1948 г. в работах *Георгия Антоновича Гамова* (1904—1968) и его сотрудников была выдвинута гипотеза о том, что вещество во Вселенной на начальных стадиях расширения имело не только большую плотность, но и высокую температуру. Так, спустя 0,1 с после начала расширения температура была около $3 \cdot 10^{10}$ К. При столь высокой температуре взаимодействие фотонов высокой энергии, которых в горячем веществе было много, приводило к образованию пар всех известных частиц и античастиц: электрон — позитрон, нейтрино — антинейтрино и т. п. При аннигиляции этих пар снова рождались фотоны, а протоны и нейтроны, взаимодействуя с ними, превращались друг в друга.

При очень высокой температуре сложные атомные ядра существовать не могут — они моментально были бы разрушены окружающими энергичными частицами, поэтому не образуются даже ядра дейтерия, хотя нейтроны и протоны существуют.

По мере расширения плотность вещества и его температура уменьшаются. Позднее, когда температура в расширяющейся Вселенной опустится ниже 1 млрд К, станет возможным сохранение некоторого количества ядер дейтерия и, следовательно, образование гелия. Согласно расчетам, к этому моменту нейтроны составят примерно 15% массы всего вещества. Остальное вещество — протоны (ядра атомов водорода). Соединение равного количества протонов и нейтронов приведет

к образованию дейтерия, а в процессе следующих ядерных реакций образуются ядра гелия. Рассматривая ядерные реакции в горячем веществе в начале космологического расширения, удалось рассчитать, что в процессе этих реакций могли образоваться только водород и гелий. Спустя пять минут после начала расширения, когда температура во Вселенной становится недостаточной для термоядерных реакций, вещество состоит из смеси ядер водорода (70% массы) и ядер гелия (30%). Таким его состав остается до того времени, пока не происходит образование звезд и галактик.

Исследования показали, что содержание гелия в звездах и межзвездном веществе действительно составляет около 30% по массе. Это достаточно хорошо согласуется с выводами теории, которая основана на предположении о «горячей Вселенной».

Спустя примерно миллион лет после начала расширения, когда температура снижается до 4000 К, ядра атомов водорода и гелия, захватывая электроны, превращаются в нейтральные атомы. Эта эпоха явилась важнейшим этапом в эволюции Вселенной. Во-первых, только с появлением нейтрального вещества становится возможным формирование отдельных небесных тел и их систем. Во-вторых, излучение, которое играло важную роль в процессах, происходивших прежде, практически не взаимодействовало с нейтральным веществом. Иначе говоря, теория «горячей Вселенной» предсказывала существование в настоящее время реликтового электромагнитного излучения, оставшегося от того далекого прошлого, когда вещество во Вселенной было плотным и горячим. Температура этого излучения, которая в процессе космологического расширения уменьшалась так же, как и температура вещества, должна составлять в нашу эпоху всего несколько кельвинов. Это излучение, получившее название *реликтового*, было случайно обнаружено на волне 7,35 см американскими инженерами *Арно Пензиасом* и *Робертом Вильсоном*. Открытие реликтового излучения явилось одним из важнейших научных открытий XX в., которое подтвердило, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей. Авторы этого открытия в 1978 г. удостоены Нобелевской премии по физике.

Характерной особенностью реликтового излучения является то, что независимо от направления, с которого оно приходит, его интенсивность оказывается одинаковой в пределах точности измерений. Это означает, что реликтовое излучение существовало уже в начальную эпоху расширения Вселенной и не имело каких-либо отдельных источников типа звезд или галактик.

Плотность энергии, содержащейся в настоящее время в реликтовом излучении, оказывается в 30 раз больше плотности энергии в излучении всех существующих сегодня источников (звезд, галактик и т. п.). В одном кубическом сантиметре Вселенной содержится около 500 квантов реликтового излучения. В то же время средняя плотность вещества во Вселенной составляет всего один атом в кубическом метре. Следовательно, во Вселенной на единицу объема квантов излучения приходится в миллион раз больше, чем атомов вещества. Правда, плотность вещества во Вселенной известна с невысокой степенью точности. Это не позволяет сделать достаточно обоснованный вывод о том, как в дальнейшем будет происходить ее расширение.

Вследствие действия сил тяготения расширение Вселенной происходит с замедлением. Если замедление мало, то расширение может продолжаться неограниченно (рис. 6.28, а). Но если оно достаточно велико, то расширение в конце концов должно смениться сжатием — уменьшением расстояний между галактиками (рис. 6.28, б). Ситуация вполне аналогична той, которая возникает при запуске космических аппаратов. Величина второй космической скорости, которую необходимо сообщить аппарату для того, чтобы он покинул ту или иную планету, зависит от массы этой планеты.

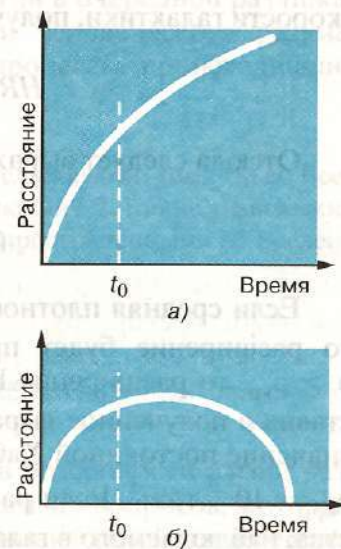


Рис. 6.28. Будущее Вселенной

Из курса физики известна формула для определения первой космической скорости:

$$v_1 = \sqrt{gR},$$

или

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Вторая космическая скорость v_2 , которую называют также параболической или скоростью освобождения, связана с первой космической соотношением:

$$v_2 = v_1 \sqrt{2}.$$

Рассмотрим возможные случаи движения галактики, расположенной на поверхности шара радиуса R . Согласно закону Хаббла ее скорость $v = H \cdot R$. Теперь запишем выражение второй космической скорости для шара массы M :

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Выразив массу через плотность и подставив значение скорости галактики, получим:

$$HR = \sqrt{\frac{8G\pi}{3} \rho R^2}.$$

Отсюда следует выражение для плотности:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Если средняя плотность вещества во Вселенной $\rho \leq \rho_{кр}$, то расширение будет продолжаться неограниченно, если $\rho > \rho_{кр}$, то расширение Вселенной сменится сжатием. Подставив в полученное выражение для критической плотности значение постоянной Хаббла $H = 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$, получим $\rho_{кр} = 10^{-29} \text{ г}/\text{см}^3$. Если рассчитать среднюю плотность вещества, наблюдаемого в галактиках, то она оказывается почти в 10 раз меньше этого критического значения плотности. В этом случае расширение Вселенной должно было бы происходить неограниченно.

В последние годы выяснилось, что между галактиками в их скоплениях находится газ, разогретый до температуры более 10 млн К. Объем пространства, занимаемого скоплением, огромен — их диаметр составляет несколько миллионов парсек, и несмотря на малую концентрацию газа (в среднем всего 1 атом на 1000 см^3), его полная масса сравнима с суммарной массой всех галактик скопления. Такую массу очень горячего газа гравитационные силы этих галактик могут удерживать лишь в том случае, если в скоплении существует невидимая, так называемая *скрытая масса*. Более того, согласно расчетам, скрытая масса должна в несколько раз превышать общую массу всех наблюдаемых объектов, тем самым увеличивая плотность вещества во Вселенной.

Физическая природа скрытой массы пока не выяснена. Видимо, частично она состоит из большого числа слабосветящихся звезд и других объектов, которые существуют на окраинах галактик. Другую ее часть может составлять огромное число элементарных частиц, которые обладают массой покоя и слабо взаимодействуют с обычным веществом. К числу таких частиц принадлежит, вероятно, нейтрино.

Развитие современной космологии в очередной раз показывает безграничные возможности человеческого разума, способного исследовать сложные процессы, происходившие во Вселенной миллиарды лет назад.



ВОПРОСЫ 1. Какие факты свидетельствуют о том, что во Вселенной происходит процесс эволюции? 2. Какие химические элементы являются наиболее распространенными во Вселенной, какие — на Земле?

§ 28. Жизнь и разум во Вселенной

Существование жизни вне Земли, в особенности жизни разумной, с давних пор является одним из вопросов, которые волнуют человечество. Сама постановка такой сложнейшей проблемы, как происхождение жизни и ее распространенности во Вселенной, стимулировала развитие всех естественных наук. Физика и химия обеспечивала ученых все более совер-

шенными методами изучения состояния, строения и свойств живого и неживого вещества. Биология, изучая различные формы жизни, определяла условия, при которых могут возникать, существовать и развиваться живые организмы. Астрономия, получая сведения о природе небесных тел и происходящих на них явлениях, создавала возможность обнаружить те или иные проявления жизни, в том числе разумной, за пределами Земли. История поисков жизни вне Земли полна драматических событий и горьких разочарований.

Мысли о том, что наша планета не является единственным населенным миром в беспредельном пространстве Вселенной, высказывались еще до нашей эры, когда существовала единая наука — философия. Идею множественности обитаемых миров разделяли многие выдающиеся ученые XVII—XIX вв.

Человеку всегда хотелось найти где-нибудь на других космических телах подобные себе существа. Именно поэтому не раз и не два в истории науки случалось, что те или иные данные о планетах (особенно о Марсе) рассматривались как доказательство их «обитаемости». Выдвигались даже проекты того, как человечество могло бы заявить о своем существовании. Так, например, немецкий математик Гаусс предлагал прорубить в лесах Сибири гигантские просеки в форме треугольника и других геометрических фигур, чтобы «марсиане» узнали о наличии на нашей планете разумных обитателей.

Всякий раз сведения об открытии разумных обитателей других миров не подтверждались. Тем не менее каждый новый шаг человечества в развитии науки и техники рождал очередные надежды найти следы подобной деятельности на других планетах. Так, в начале XX в., когда на Земле уже были построены Суэцкий (1869) и Панамский (1914) каналы, с большим энтузиазмом были встречены сообщения о «каналах», обнаруженных на Марсе. На первых порах развития радиотехники шумы непонятного происхождения нередко приписывались инопланетянам.

Современный уровень развития науки и техники считается достаточным для того, чтобы обнаружить результаты деятельности разумных обитателей других миров. Это касается и земной цивилизации. Мощные сигналы телевизионных передатчиков и радиолокационных установок, действующих на Земле, могут быть обнаружены цивилизациями, находящи-

мися на таком же уровне технического развития, как и наша, если они располагаются на расстоянии в несколько парсек от Солнечной системы.

Ученые в настоящее время ведут исследования по двум направлениям:

— прием радиоизлучения из космоса на различных частотах в целях поиска сигналов искусственного происхождения, посланных разумными обитателями других миров;

— поиск органических веществ и различных форм жизни с помощью КА, в том числе и спускаемых на другие планеты.

Радионаблюдения, которые были начаты в 1960 г., проводились и проводятся по нескольким международным проектам. Аппаратура и программа работы радиотелескопов постепенно совершенствуются. В ходе исследований космического радиоизлучения были попытки объяснить некоторые явления деятельностью разумных существ за пределами нашей планеты — инопланетян. Когда в 1967 г. были обнаружены пульсары, посылающие периодические радиоимпульсы, первоначально была высказана гипотеза о том, что они являются сигналами другой цивилизации. Однако оказалось, что эти радиоимпульсы имеют естественное происхождение, они приходят от быстро вращающихся нейтронных звезд, которые получили название пульсаров. Исследования продолжаются, но сигналы разумных существ пока не обнаружены.

Ракетно-космические исследования до сих пор также не принесли каких-либо достоверных данных о существовании внеземной жизни. Ни на Луне, ни на Марсе в результате изучения химического состава грунта, взятого с поверхности этих тел, живых организмов или их остатков не обнаружено. Исследования, проводимые специалистами, не подтвердили предположения об искусственном характере объектов на поверхности Луны или Марса, в которых некоторые склонны видеть подобие то пирамид, то сфинкса. Все эти объекты оказывались причудливыми созданиями природы, возникшими в результате различных естественных процессов, в том числе эрозии поверхностных пород.

Таким образом, в настоящее время для научных исследований доступны лишь те формы жизни, которые существуют на нашей планете.

Земные живые организмы состоят из сложных высокомолекулярных химических соединений. В этой связи очень важен

один из немногих положительных результатов, полученных в ходе поисков внеземной жизни во Вселенной. Это — обнаружение в плотных молекулярных облаках нашей Галактики нескольких классов типичных органических соединений — альдегидов, спиртов, простых и сложных эфиров, карбоновых кислот, амидов кислот. Многие из этих соединений (HCN , CH_2NH , CH_3NH_2 и др.) являются тем исходным материалом, из которого образуются важнейшие предбиологические молекулы — аминокислоты и азотистые основания. Аминокислоты были обнаружены также в некоторых метеоритах.

Обнаружение органических соединений свидетельствует о том, что во Вселенной при определенных условиях происходит синтез важных составных частей животных и растительных белков, молекул ДНК и РНК. Подобный синтез удалось осуществить также в лабораторных условиях на Земле. Газовая смесь имитировала состав первичной атмосферы нашей планеты (водород, метан, аммиак, сероводород, вода). Воздействуя на эту смесь ультрафиолетовым излучением и электрическими разрядами, ученым удалось получить различные соединения, в том числе 12 аминокислот из 20, образующих все белки земных организмов, а также четыре из пяти оснований, образующих молекулы ДНК и РНК. Подобный синтез можно считать лишь первым шагом на пути решения проблемы зарождения и развития жизни.

Итак, существование высокоразвитых форм жизни, в том числе разумной, на нашей планете и наличие во Вселенной органических соединений говорит о том, что в ходе эволюции при определенных условиях могут возникать живые организмы. Вывод об этих условиях ученые, к сожалению, вынуждены делать на основе лишь единственного случая — земной жизни. Существование органических соединений, процессы, происходящие с ними в живых организмах и составляющие основу жизнедеятельности, могут происходить лишь при определенных температурных условиях ($0-100^\circ\text{C}$). Более того, для возникновения и развития живых организмов необходимо, чтобы эти условия поддерживались в течение достаточно длительного времени. Согласно современным представлениям, в земной биосфере от момента зарождения простейших форм жизни до появления человека прошло примерно 3 млрд лет.

Таким образом, существование жизни возможно не на всех планетах, а лишь на тех, где изменения температуры не выходят за указанные пределы. Таким требованиям удовлетворяют планеты, которые движутся по орбитам, мало отличающимся от окружности, вокруг звезд, излучение которых не подвержено существенным изменениям на протяжении миллиардов лет. Таковыми являются звезды главной последовательности со светимостью, близкой к солнечной (спектральных классов от F до K).

Эти условия соблюдаются на Земле потому, что в центре нашей планетной системы находится такая звезда, как Солнце. Границы зоны, внутри которой температурные условия благоприятны для существования жизни на планете, таковы, что в нее попала лишь Земля. Меркурий и Венера располагаются слишком близко к Солнцу, поэтому температура на поверхности этих планет значительно превышает допустимые для живых организмов пределы. А Марс находится у самой внешней границы этой зоны — там температура слишком низкая.

Если бы на месте Солнца была другая звезда, то Земля могла бы оказаться вне этой благоприятной зоны. Так, у звезды, которая излучает в 16 раз меньше тепла и света, чем Солнце, эта зона оказалась бы целиком внутри орбиты Меркурия, а у звезды, излучающей в 17 000 раз сильнее Солнца, эта зона переместилась бы за пределы орбиты самой далекой планеты Плутона и в нее тоже не попала бы ни одна из планет Солнечной системы.

Для того чтобы на такой планете могла возникнуть и развиваться жизнь, необходимы и другие условия. Наличие атмосферы — одно из них. Вы уже познакомились с тем, какую важную роль играет атмосфера Земли в защите существующих на нашей планете форм жизни, в частности, регулированием температуры.

Согласно современным научным представлениям, жизнь могла возникнуть только в водной среде. Вода как химическое соединение имеет довольно широкое распространение в Солнечной системе и во Вселенной. Как известно, ядра комет состоят в основном из льда — замерзшей воды. Ученые полагают, что на Марсе существует весьма значительный слой замерзшей воды, скрытый от наблюдателя под поверхностью этой планеты.

Вода обнаружена в межзвездном веществе нашей и других галактик. Однако лишь на Земле мы встречаемся с таким количеством воды в жидком виде. Наличие морей и океанов, кото-

рые на нашей планете занимают большую часть ее поверхности, следствие того, что Земля находится от Солнца на таком расстоянии, что ни в одной точке земного шара его поверхность не нагревается солнечными лучами до температуры выше точки кипения воды. И хотя температура в зимнее время нередко опускается значительно ниже точки ее замерзания, однако воды в морях и океанах так много, что вся она остыть и замерзнуть не успевает, и значительная ее часть остается на планете в жидком виде. Согласно современным данным, уже 3,8 млрд лет тому назад на Земле существовали океаны и земная поверхность никогда полностью не замерзала.

Весьма умеренным, пригодным для жизни климатом наша планета обязана, вероятно, особенностям газообмена между атмосферой и гидросферой: когда поверхность планеты остывает, количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, а когда температура поверхности возрастает, то количество этого газа в атмосфере уменьшается. Можно полагать, что гидросфера и жизнь на Земле — те особенности, которые отличают нашу планету от других, во многом сходных с нею планетных тел, — тесным образом связаны между собой.

К сожалению, детальное исследование условий, существующих на планетах, возможно только в Солнечной системе. Лишь в последние 10 лет были получены достоверные сведения о наличии планет и даже планетных систем у других звезд. Исследовать физические характеристики этих планет и выяснить условия на их поверхности еще предстоит в будущем.

Таким образом, до сих пор поиски жизни за пределами Земли остаются безуспешными. На основе имеющихся к настоящему времени данных можно даже предполагать, что жизнь является уникальным явлением в Солнечной системе, а разумная жизнь, вероятно, достаточно редким явлением во Вселенной. Наука пока не имеет фактов, которые можно было бы считать доказательствами существования жизни на других космических телах в настоящее время или в прошлом. В частности, все науки о Земле не располагают достоверными сведениями о посещениях нашей планеты представителями каких бы то ни было внеземных цивилизаций в прошлом.

За последние 25 лет человечество несколько раз заявляло другим цивилизациям о своем существовании. Так, в 1974 г. в направлении шарового скопления в созвездии Геркулеса было

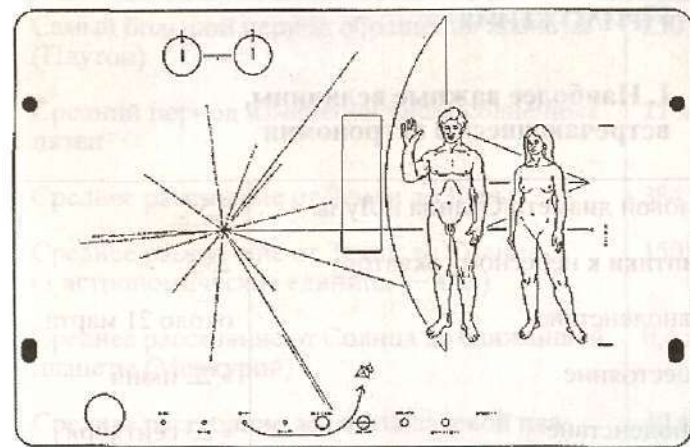


Рис. 6.29.
Пластина,
помещенная на КА
«Пионер»

послано радиосообщение, в котором содержатся сведения о Земле и ее обитателях. На космических аппаратах «Пионер», запущенных в 1972—1974 гг. и к настоящему времени уже покинувших Солнечную систему, находятся небольшие металлические пластины, на которых выгравированы фигуры людей, схема планетной системы, а также некоторые другие данные (рис. 6.29). Космические аппараты «Вояджер», запуск которых осуществлен в 1977 г., уносят в межзвездное пространство видеодиски со 115 изображениями Земли, живых существ, обитающих на ней, а также важнейших результатов научных исследований. Кроме того, на борту этих аппаратов находятся записи классических и современных музыкальных произведений, человеческой речи на 58 языках народов, населяющих Землю, звуки и шумы, отражающие живую и неживую природу нашей планеты. Остается надеяться и ждать ответных посланий.

Разумеется, обнаружение за пределами Земли жизни даже в ее простейших формах, а тем более встреча с разумными существами будет не только замечательным научным достижением человеческой цивилизации. Это откроет новые горизонты в решении проблемы происхождения жизни, а также сможет оказать огромное влияние на дальнейшее развитие всех наук. Существование жизни и разума во Вселенной было и остается одной из проблем, которые человечеству предстоит решать в третьем тысячелетии нашей эры!

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Наиболее важные величины, встречающиеся в астрономии

Видимый угловой диаметр Солнца и Луны	0,5°
Наклон эклиптики к небесному экватору	23,5°
Весеннее равноденствие	около 21 марта
Летнее солнцестояние	» 22 июня
Осеннее равноденствие	» 23 сентября
Зимнее солнцестояние	» 22 декабря
Продолжительность звездного года (период обращения Земли вокруг Солнца)	365 сут 5 ч 49 мин
Продолжительность синодического месяца (период изменения фаз Луны)	29,5 сут
Продолжительность звездного месяца (период обращения Луны вокруг Земли)	27,3 сут
Средний радиус Земли	6370 км
Разность экваториального и полярного радиусов Земли	21 км
Диаметр Луны по сравнению с диаметром Земли	1/4
Диаметр Солнца по сравнению с диаметром Земли	109
Диаметр Юпитера по сравнению с диаметром Земли	11
Масса Солнца по сравнению с массой Земли	330 000
Температура фотосферы Солнца	6000 К
Самый короткий период обращения планеты (Меркурий)	3 месяца (88 суток)

Самый большой период обращения планеты (Плутон)	250 лет
Средний период изменения числа солнечных пятен	11 лет
Среднее расстояние от Земли до Луны	384 000 км
Среднее расстояние от Земли до Солнца (1 астрономическая единица — а. е.)	150 000 000 км
Среднее расстояние от Солнца до ближайшей планеты (Меркурий)	0,4 а. е.
Среднее расстояние до самой далекой планеты (Плутон)	40 а. е.
1 парсек (пк)	206 265 а. е. 3,26 св. года $3 \cdot 10^{13}$ км
Расстояние до ближайшей звезды (Проксима Кентавра)	4 св. года $1\frac{1}{3}$ пак 270 000 а. е.
Число звезд, видимых невооруженным глазом	около 6000
Температура фотосферы звезд	от 3000 К до 30 000 К
Возраст земной коры	около 5 млрд лет
Возраст Солнца	» 6 млрд лет
Диаметр нашей Галактики	около 100 тыс. св. лет
Расстояние до ближайшей спиральной галактики (туманность Андромеды)	2 млн св. лет
Расстояние до наиболее далеких галактик	около 8 млрд св. лет
Начало расширения Вселенной	12—20 млрд лет тому назад

II. Греческий алфавит

α — альфа	η — эта	ν — ню (ни)	τ — тау
β — бета	υ — тэта	ξ — кси	ϖ — ипсилон
γ — гамма	ι — йота	ο — омикрон	φ — фи
δ — дельта	κ — каппа	π — пи	χ — хи
ε — эпсилон	λ — лямбда	ρ — ро	ψ — пси
ζ — дзета	μ — ми (мю)	σ — сигма	ω — омега

III. Названия некоторых звезд

Алголь — β Персея	Кастор — α Близнецов
Альдебаран — α Тельца	Мицар — ζ Б. Медведицы
Альтаир — α Орла	Поллукс — β Близнецов
Антарес — α Скорпиона	Полярная — α М. Медведицы
Арктур — α Волопаса	Процион — α М. Пса
Беллятрикс — γ Ориона	Регул — α Льва
Бетельгейзе — α Ориона	Ригель — β Ориона
Вега — α Лиры	Сириус — α Б. Пса
Денеб — α Лебеда	Спика — α Девы
Капелла — α Возничего	Фомальгаут — α Южной Рыбы

IV. Характеристики атмосфер планет земной группы

Планета	Венера	Земля	Марс
Основные составляющие атмосферы (в %)	N ₂	3—5	78
	O ₂	0,001	21
	CO ₂	95	0,03
	H ₂ O	0,01—0,1	0,1—1
	Ar	0,01	0,93
Давление у поверхности (по сравнению с земным)	90	1	0,006
Температура на поверхности (°C) в средних широтах	470	от +40 до -30	от 0 до -70

V. Наиболее яркие звезды, видимые на территории России

Звезда	Звездная величина <i>m</i>	Прямое восхождение		Склонение		Спектральный класс <i>R</i>	Температура 10 ³ K	Расстояние пк
		ч	мин	град	мин			
α Тельца	1,06	4	33,0	+16	25	K5	3,5	20,8
β Ориона	0,34	5	12,1	-8	15	B8	12,8	330,0
α Возничего	0,21	5	13,0	+45	57	G0	5,2	13,7
α Ориона	0,92	5	52,5	+7	24	M0	3,1	200,0
α Б. Пса	-1,58	6	42,9	-16	39	A0	16,8	2,7
α Близнецов	1,99	7	31,4	+32	00	A0	10,4	13,0
α М. Пса	0,48	7	36,7	+5	21	F5	6,9	3,5
β Близнецов	1,21	7	42,3	+28	09	K0	4,6	10,7
α Льва	1,34	10	05,7	+12	13	B8	13,2	25,6
α Девы	1,21	13	22,6	-10	54	B2	16,8	47,7
α Волопаса	0,24	14	13,4	+19	27	K0	4,1	11,1
α Скорпиона	1,22	16	26,3	-26	19	M0	3,1	52,5
α Лиры	0,14	18	35,2	+38	41	A0	10,6	8,1
α Орла	0,89	19	48,3	+8	44	A5	8,4	5,0
α Лебеда	1,33	20	39,7	+45	06	A2	9,8	290,0

VI. Основные характеристики планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, а. е.	Звездный период обращения, годы	Синодический период обращения, сутки	Период вращения вокруг оси	Наклонение орбиты к эклиптике	Радиус, в радиусах Земли	Масса, в массах Земли	Средняя плотность, кг/м ³	Сжатие	Число известных спутников
Меркурий	0,4	0,24	116	59 сут	7°	0,38	0,055	5400	0,0	0
Венера	0,7	0,62	584	243 сут	3°24'	0,95	0,816	5200	0,0	0
Земля	1,0	1,00	—	24 ч 56 мин	—	1,00	1,000	5500	0,003 ₄	1
Марс	1,5	1,88	780	24 ч 37 мин	1°51'	0,53	0,107	3900	0,005 ₂	2
Юпитер	5,2	11,86	399	9 ч 50 мин	1°18'	11,2	318	1300	0,062	15
Сатурн	9,5	29,46	378	10 ч 14 мин	2°29'	9,5	94,3	700	0,103	17
Уран	19,2	84,07	370	15 ч 36 мин	0°46'	3,9	14,6	1600	0,06	14
Нептун	30,1	164,82	367	18 ч 29 мин	1°46'	4,0	17,2	1700	0,02	2
Плутон	39,5	247,7	367	6,4 сут	17°08'	0,36	0,002	2100	(?)	1

VII. Даты важнейших астрономических наблюдений и открытий

3000 до н. э.	Первые астрономические записи, сделанные в Египте, Вавилоне и Китае
1100 до н. э.	Определение наклона экватора к эклиптике (Чу Конг, Китай)
360 до н. э.	Обоснование представлений о шарообразности Земли, Луны и других небесных тел (Аристотель, Греция)
280 до н. э.	Начало систематических наблюдений звездного неба александрийскими астрономами (Аристилл, Тимохарис)
265 до н. э.	Высказывание идеи о движении Земли вокруг Солнца и вращении ее вокруг оси, первые оценки расстояний до Солнца и Луны (Аристарх Самосский, Греция)
240 до н. э.	Определение размеров земного шара (Эратосфен, Александрия)
140—120 до н. э.	Составление первых таблиц движения Солнца и Луны, а также каталога, содержащего 1022 звезды с указанием их звездных величин (Гиппарх, Александрия)
46 до н. э.	Введение в Римской империи юлианского календаря (Созиген, Александрия)
150 н. э.	Создание «Альмагеста» — известного труда, содержащего геоцентрическую систему мира (К. Птолемей, Александрия)
1031	Определение окружности Земли (Бируни, Хорезм)
1425	Окончание строительства крупнейшей в мире обсерватории (Улугбек, Самарканд)
1543	Выход в свет книги «Об обращениях небесных сфер», в которой была обоснована гелиоцентрическая система мира (Н. Коперник, Польша)
1583	Введение григорианского календаря в ряде стран Европы
1584	Выход в свет книги «О бесконечности, Вселенной и мирах» (Дж. Бруно, Италия)
1609—1619	Установление законов движения планет вокруг Солнца (И. Кеплер, Германия)

- 1610 Начало астрономических наблюдений с телескопом (Г. Галилей, Италия; Т. Харриот, Англия; С. Мариус, Германия)
- 1632 Выход в свет книги «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», защищавшей гелиоцентрическую систему мира (Г. Галилей, Италия)
- 1671—
1673 Первое определение параллакса Солнца по наблюдениям Марса в противостоянии (Д. Кассини, Ж. Рише, Франция)
- 1687 Создание теории тяготения (И. Ньютон, Англия)
- 1705 Установление периодичности возвращения некоторых комет (Э. Галлей, Англия)
- 1719 Открытие собственных движений звезд (Э. Галлей, Англия)
- 1755 Публикация книги «Общая естественная история и теория неба» с изложением космогонической гипотезы (И. Кант, Германия)
- 1761 Открытие атмосферы Венеры (М. В. Ломоносов, Россия)
- 1781 Открытие планеты Уран (В. Гершель, Англия)
- 1783 Открытие движения Солнца среди звезд (В. Гершель, Англия)
- 1794 Установление космического происхождения метеоритов (Э. Хладни, Германия)
- 1796 Выход в свет книги «Изложение системы мира», содержащей космогоническую гипотезу (П. Лаплас, Франция)
- 1801 Открытие первой малой планеты — астероида Церера (Д. Пиацци, Италия)
- 1814 Описание линий поглощения в спектре Солнца (Й. Фраунгофер, Германия)
- 1837—
1839 Первые определения параллаксов звезд (В. Я. Струве, Россия, 1837 г.; Ф. Бессель, Германия, 1838 г.; Т. Гендерсон, Англия, 1839 г.)
- 1843 Открытие в солнечном спектре смещения линий, происходящего вследствие вращения Солнца, — эффекта Доплера (Австрия)

- 1846 Открытие планеты Нептун (И. Галле, Германия)
- 1859—
1862 Открытие спектрального анализа (Р. Бунзен, Г. Кирхгоф, Германия)
- 1860 Начало спектроскопии звезд (В. Хэггинс, Англия)
- 1862—
1904 Исследование физической природы комет; классификация кометных хвостов (Ф. А. Бредихин, Россия)
- 1863 Первая классификация спектров звезд (А. Секки, Италия)
- 1868 Открытие гелия на Солнце (Н. Локьер, Англия)
- 1894 Доказательство метеоритного строения колец Сатурна (А. А. Белопольский, Россия)
- 1900—
1910 Экспериментальное доказательство давления света на пылевые частицы и газы (П. Н. Лебедев, Россия)
- 1905—
1913 Обнаружение звезд-карликов и звезд-гигантов; построение диаграммы «спектр — светимость» (Э. Герцшпрунг, Дания; Г. Рассел, США)
- 1908 Открытие зависимости «период — светимость» у цефеид (Г. Ливитт, США)
- 1916 Начало теоретических исследований внутреннего строения звезд (А. Эддингтон, Англия)
- 1922—
1924 Теоретическое обоснование нестационарности Вселенной (А. А. Фридман, Россия)
- 1924 Открытие вращения Галактики (Я. Оорт, Нидерланды)
- 1924 Разрешение (разделение) на звезды галактик М31 и М33; начало внегалактической астрономии (Э. Хаббл, США)
- 1929 Открытие «красного смещения» в спектрах галактик (Э. Хаббл, США)
- 1930 Открытие Плутона (К. Томбо, США)
- 1931 Обнаружение космического радиоизлучения на длине волны 15 м (К. Янский, США)
- 1937 Создание теории ядерных реакций в недрах звезд как источников их энергии (Г. Бете, США)
- 1946 Радиолокация Луны
- 1948 Разработка теории горячей Вселенной, предсказание существования реликтового излучения (Г. Гамов, США)

- 1948 Наблюдения ядра Галактики в инфракрасных лучах (А. А. Калиняк, В. И. Красовский, В. Б. Никонов, Россия)
- 1951 Обнаружение радиоизлучения межзвездного водорода на длине волны 21 см
- 1957 Открытие взаимодействующих галактик (Б. А. Воронцов-Вельяминов, Россия)
- 1963 Открытие квазаров (М. Шмидт, США)
- 1965 Обнаружение реликтового радиоизлучения (А. Пензиас, Р. Вилсон, США)
- 1967 Открытие пульсаров (нейтронных звезд)
- 1976 Открытие колец Урана
- 1979 Открытие колец Юпитера и действующих вулканов на спутнике Юпитера — Ио
- 1992 Открытие анизотропии реликтового излучения
- 1995 Наблюдение столкновения фрагментов кометы Шумейкеров—Леви с планетой Юпитер
- 1998 Обнаружение коричневых карликов — холодных звезд, на которых не происходят термоядерные реакции

Важнейшие события в космонавтике

1957 г.

- 4 октября Вывод на орбиту первого искусственного спутника Земли (СССР). Начало космической эры

1959 г.

- 7 октября Первое фотографирование обратной стороны Луны («Луна-3», СССР)

1961 г.

- 12 апреля Первый полет человека в космос (КК «Восток», Ю. А. Гагарин, СССР). Всемирный день авиации и космонавтики

1963 г.

- 16—19 июня Первый полет женщины в космос (КК «Восток-6», В. В. Терешкова, СССР)

1964 г.

- 12 октября Вывод на орбиту первого космического корабля с экипажем из нескольких человек (КК «Восход», В. М. Комаров, К. П. Феоктистов, Б. Б. Егоров, СССР)

1965 г.

- 18 марта Первый выход человека из космического корабля в открытый космос (КК «Восход-2», А. А. Леонов, СССР)
- 15 июля Первое фотографирование Марса с близкого расстояния (КА «Маринер-4», США)

1966 г.

- 1 марта Первый космический аппарат достиг другой планеты — Венера (КА «Венера-3», СССР)
- 3 апреля Первый искусственный спутник Луны («Луна-10», СССР)

1967 г.

- 27 января Подписание Договора о принципах деятельности государства по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела
- 18 октября Первая передача научных данных при спуске в атмосфере другой планеты — Венера (КА «Венера-4», СССР)
- 30 октября Первая автоматическая стыковка двух ИСЗ («Космос-186» и «Космос-188», СССР)

1968 г.

- 22 апреля Подписание Соглашения о спасении космонавтов, возвращении космонавтов и объектов, запускаемых в космическое пространство
- 21 сентября Первое возвращение космического аппарата на Землю после облета Луны (КА «Зонд-5», СССР)

1969 г.

- 21 июля Первый выход человека на поверхность Луны (КК «Аполлон-11», Н. Армстронг, Э. Олдрич, США)

1970 г.

- 24 сентября Первая доставка на Землю лунного грунта (КА «Луна-16», СССР)
- 17 ноября Доставка на Луну первого самоходного аппарата «Луноход-1» (КА «Луна-16», СССР)
- 15 декабря Первая мягкая посадка на поверхность Венеры (КА «Венера-7», СССР)

1971 г.

- 19 апреля Создание первой орбитальной научной станции («Салют», СССР)
- 2 декабря Первая мягкая посадка автоматического аппарата на поверхность Марса (КА «Марс-2», СССР)
- 12 декабря Запуск первого спутника для исследования рентгеновского излучения («Ухуру», США)

1972 г.

- август Запуск на орбиту телескопа-рефлектора для исследований ультрафиолетового излучения (станция «Коперник», Европа—США)

1973 г.

- 4 декабря Первые исследования Юпитера с близкого расстояния (КА «Пионер-10», США)

1974 г.

- 29 марта Первое получение изображений Меркурия с близкого расстояния (КА «Маринер-10», США)

1975 г.

- 17 июля Первая стыковка космических кораблей разных стран (КК «Союз-19», А. А. Леонов и В. М. Кубасов, СССР, и КК «Аполлон», Т. Стаффорд, В. Бранд, Д. Слейтон, США)
- 22 октября Вывод на орбиту вокруг Венеры первого искусственного спутника, первая передача на Землю телевизионного изображения Венеры (КА «Венера-9», СССР)

1976 г.

- 20 июля Начало научных исследований на поверхности Марса (КА «Викинг-1», США)

1977 г.

- 20 августа Запуск космического аппарата для изучения планет-гигантов (КА «Вояджер-2», США)

1979 г.

- июль Исследования Юпитера с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
- 1 сентября Первые исследования Сатурна с близкого расстояния (КА «Пионер-11», США)
- 18 декабря Подписание Соглашения о деятельности государств на Луне и других небесных телах

1981 г.

- август Исследования Сатурна с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)

1983 г.

- январь Запуск первой космической обсерватории для исследований инфракрасного излучения (IRAS, Европа—США)
- 10 и 14 октября Вывод на орбиту вокруг Венеры двух космических аппаратов, радиолокационное картографирование поверхности планеты (КА «Венера-15» и «Венера-16», СССР)

1984 г.

- 15 и 21 декабря Запуск космических аппаратов для исследований Венеры и кометы Галлея (КА «Вега-1» и «Вега-2», СССР)

1985 г.

- июнь Аэростатное зондирование атмосферы Венеры (КА «Вега-1» и «Вега-2», СССР)

1986 г.

- январь Первые исследования Урана с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
- 20 февраля Вывод на орбиту долговременной обитаемой научной станции («Мир», СССР)
- 9 марта Получение первых изображений ядра кометы — кометы Галлея (КА «Вега-1», СССР)

1988 г.

21 декабря Завершение рекордного по продолжительности космического полета — 1 год (орбитальная станция «Мир», В. Г. Титов, М. Х. Манаров, СССР)

1989 г.

январь Исследования спутника Марса Фобос с борта искусственного спутника планеты (КА «Фобос-2», СССР)

4 мая Запуск космического аппарата «Магеллан» для радиолокационного картографирования поверхности Венеры (КК «Атлантис», США)

август Первые исследования Нептуна с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)

август Запуск искусственного спутника «HIPPARCOS» для измерения координат и изучения движения звезд (Европа)

19 октября Запуск космического аппарата для исследования Юпитера (КА «Галилео», США)

1990 г.

март Запуск первого японского аппарата для дистанционного исследования Луны («Мусес-А», Япония)

25 апреля Вывод на орбиту космического телескопа им. Хаббла (КК «Спейс Шаттл», США)

1991 г.

5 апреля Запуск на орбиту Комптоновской гамма-обсерватории (США)

29 октября Получение первого изображения астероида с близкого расстояния — Гаспра (КА «Галилео», США)

1994 г.

январь Запуск аппарата нового поколения для изучения поверхности Луны, ее гравитационного поля и внутреннего строения (КА «Климентина», США)

1995 г.

декабрь Создание первого искусственного спутника Юпитера, спуск зонда в атмосферу планеты (КА «Галилео», США)

1997 г.

июль Посадка на поверхность Марса первого автоматического марсохода «Марс—Пасфайндер», начало исследований химического состава поверхности планеты и метеорологических условий (США)

октябрь Запуск аппарата для исследования спутников и колец Сатурна (КА «Кассини», США)

1998 г.

январь Запуск космического аппарата для уточнения площадей, занятых льдом на Луне (КА «Лунар Проспектор», США)

июль Запуск аппарата нового поколения для исследования Марса с орбиты его искусственного спутника (КА «Надежда», Япония)

VIII. Указания к наблюдениям

Среди наблюдений, проводимых с помощью телескопа, наиболее интересными и информативными являются наблюдения Солнца и Луны.

Наблюдения Солнца

При наблюдении Солнца с помощью телескопа целесообразно спроектировать его изображение на экран. Экран должен быть прикреплен к телескопу так, чтобы можно было менять его расстояние от окуляра и фиксировать в этом положении; на экране закрепляют листы бумаги для зарисовки солнечных пятен.

Внимание! Смотреть на Солнце в телескоп можно лишь при наличии темного фильтра на объективе.

При использовании телескопа-рефрактора следует на объектив поставить диафрагму, которая сократит его входное отверстие в 2—3 раза. Для получения изображения всего диска Солнца необходимо использовать окуляр, с которым данный телескоп дает увеличение не более 40—60 раз. Целесообразно также использовать окуляр такой конструкции, при которой лучи отводятся на экран перпендикулярно направлению на Солнце. Это позволит избежать попадания на экран солнечных лучей. Если такого окуляра нет, то на трубе телескопа желательно раз-

местить защитный экран размером примерно 70×70 см. Для зарисовки солнечных пятен следует на листах бумаги заранее заготовить шаблоны — круги диаметром 7—10 см.

Наведя телескоп на Солнце и обеспечив необходимую резкость изображения, надо закрепить экран в положении, при котором диаметр изображения Солнца равен диаметру заготовленного на бумаге шаблона.

Остро отточенным карандашом отмечается положение всех наблюдаемых в данный момент пятен. Сняв полученную зарисовку с экрана, можно дорисовать размеры пятен и очертания тени и полутени. Чтобы убедиться в том, что Солнце вращается вокруг оси, достаточно повторить зарисовку положения пятен через два-три дня. Стоит обратить внимание на то, как изменяется форма пятен по мере их приближения к краю диска Солнца. Для изучения строения пятна используют тот окуляр, с которым данный телескоп обеспечивает максимально возможное увеличение.

Регулярные зарисовки пятен позволяют получить значение числа Вольфа, которое широко используется для характеристики солнечной активности: $W = 10g + f$, где g — число групп пятен, а f — общее число пятен во всех группах. При полном отсутствии пятен в период минимума солнечной активности $W = 0$. Во время ее максимума число Вольфа может достигать 180.

Наблюдения лунной поверхности

Первое знакомство с расположением морей и материков на лунной поверхности удобнее всего провести во время полнолуния, наблюдая Луну невооруженным глазом. Контуры основных морей следует сравнить с их изображением на простейшей лунной карте, познакомившись с принятыми их названиями. С помощью шестикратного бинокля в полнолуние можно разглядеть и отдельные наиболее крупные кратеры. Они будут выделяться на общем фоне либо в виде темных точек (Платон, Риччиоли, Гримальди, Шиккард), либо в виде светлых пятнышек (Коперник, Кеплер, Аристарх, Тихо). Достаточно хорошо будут заметны светлые лучи, идущие, в частности, от кратера Тихо.

Более детальное ознакомление с рельефом лунной поверхности лучше проводить не в полнолуние, а при других фазах,

когда отдельные объекты благодаря теням весьма четко выявляются близ терминатора (границы дня и ночи). Для таких наблюдений необходимо воспользоваться телескопом с увеличением не менее 50 раз. Начинать наблюдения следует не ранее чем через три дня после новолуния. В это время, когда терминатор пересекает Море Кризисов, наиболее интересны для изучения неровности на поверхности этого моря, а также окаймляющие его береговые хребты. В южной половине Луны, где терминатор проходит через Море Изобилия, интересны расположенные цепочкой на его поверхности крупные кратеры Лангрэн, Венделин, Петавий и Фурнерий.

На шестой день после новолуния хорошо различимы неровности на поверхности Моря Ясности и восточной части Моря Спокойствия, а также валы двух больших кратеров Аристотеля и Эвдокса. Интерес представляет также цепь из трех крупных кратеров Феофил, Кирилл и Катарина. Обращает на себя внимание та часть вала кратера Кирилл, которая была разрушена образовавшимся позднее кратером Феофил. К югу от этих кратеров находится горная цепь Алтай, которая при освещении Солнцем выглядит как столь значительный выступ на темной части Луны, что бывает замечен даже невооруженным глазом.

Во время первой четверти, когда терминатор проходит по середине лунного диска, важно обратить внимание на борозды Ареадеус и Гигин.

На восьмые-девятые сутки после новолуния терминатор проходит через Море Дождей — типичную лунную низменность. Именно в этот район попал первый космический аппарат, достигший Луны, — «Луна-2»; здесь работал и «Луноход-1».

Найдя на карте Луны районы, где совершали посадку автоматические станции и пилотируемые корабли «Аполлон», можно определить, при какой фазе Луны наступают условия, наиболее благоприятные для наблюдения этих районов, познакомиться с их рельефом.

Если по погодным условиям все же приходится наблюдать Луну в течение нескольких дней до и после полнолуния, то в этом случае лучше всего обратить внимание на околополярные районы, где лунный рельеф виден так, как это привычно для земного наблюдателя, а условия освещения Солнцем позволяют по теням выявлять его детали значительно лучше, чем в центральной части лунного диска.

Упр. 1. 1. 25 раз. 2. 10^4 раз. Упр. 2. 1. 6,25 раза. 2. 100 раз. 3. 10^{10} раз.
 Упр. 3. 1. 6 ч, 6 ч 52 мин. 2. 81° , 279° . 3. Отрицательное (-16°).
 Упр. 4. 1. 14° . 2. 87° . 3. $+13^\circ$. 4. а) $\delta = \varphi$; б) $\delta = \varphi - 90^\circ$. 5. а) $\delta > 90^\circ - \varphi$;
 $\delta < \varphi - 90^\circ$. Упр. 5. 1. $23^\circ 30'$. 2. а) На экваторе ($\varphi = 0^\circ$); б) на северном
 тропике ($23^\circ 30'$ с. ш.). 3. 21 декабря (день зимнего солнцестояния).
 4. 41° . 5. В Архангельске: $48,5^\circ$ (летнее солнцестояние), $1,5^\circ$ (зимнее
 солнцестояние). В Ашхабаде: $75,5^\circ$ (летнее солнцестояние), $28,5^\circ$ (зим-
 нее солнцестояние). Различия высот: а) 27° (разность географических
 широт городов); б) 47° ($23,5^\circ \times 2$). Упр. 6. 1. Вечером. 2. В западной.
 3. Уменьшится. 4. Утром. 5. 27,3 сут. Упр. 7. 1. 15 октября видеть нельзя,
 т. к. в это время полярная ночь; 15 апреля — можно. 2. В июне видеть
 нельзя, в ноябре — можно. 3. 1) Форма границы между светлой и тем-
 ной частями Луны. 2) Красноватый цвет земной тени во время затме-
 ния. 3) Скорость происходящих изменений вида Луны. Упр. 8. 1. На
 1 час больше числа часов, равного номеру часового пояса в осенне-зим-
 ний период; на 2 часа больше числа часов, равного номеру часового по-
 яса в весенне-летний период. 2. На число минут, равное разности гео-
 графической долготы данного пункта и географической долготы цент-
 рального меридиана соответствующего часового пояса (больше — для
 пунктов восточнее центрального меридиана, меньше — западнее).
 3. 25 декабря 1642 г. Упр. 9. 4. Вечером, около 3 ч. 5. $1\frac{1}{11}$ ч. 6. 584 сут.,
 $1\frac{1}{11}$ года = 398 сут. Упр. 10. 1. 687 сут. 2. 2,4 а. е., 1350 сут. Упр. 11.
 1. $2,2''$. 2. 1° ; $54'$. 3. 389 раз. 4. $45''$. Упр. 12. 1. 320 масс Земли. 2. 3,5 км/с;
 42 км/с. 3. 255 сут. Упр. 13. 1. $4,5 \cdot 10^8$ Дж. Упр. 14. 1. Причина — раз-
 личная плотность атмосферы (у Луны атмосфера отсутствует, у Земли
 атмосфера более плотная, чем у Марса). 2. Парниковый эффект в ат-
 мосфере Венеры. Упр. 15. 1. На Земле — 465 м/с; на Юпитере — при-
 мерно 12,4 км/с. Упр. 16. 1. Вверх, под углом к горизонту. 2. Около
 18 а. е. 3. Планета отражает свет Солнца, пыль хвоста кометы также от-
 ражает излучение Солнца, а газы кометы его переизлучают. Поэтому в
 отличие от спектра планеты в спектре кометы наряду с линиями погло-
 щения присутствуют линии излучения. 4. Первая из комет — может,
 вторая — нет. 5. Ионизации и диссоциации. 6. Примерно 95 млн км.
 Упр. 17. 1. Нельзя, т. к. его угловые размеры всего $18''$. 2. 619 км/с.
 3. $2 \cdot 10^{-4}$ Вт. Упр. 18. 1. а) Примерно в 10 раз; б) в 10^{10} раз. 2. Примерно
 3 зв. величины. 3. 29,3 года. 4. Примерно 146 000 лет. 5. а) В 100 раз;
 б) 6^m ; 1^m . Упр. 19. 1. 7,6 массы Солнца. 2. Примерно в $5 \cdot 10^4$ раз. 3. $1,5 \cdot$
 10^{-3} кг/м³. Упр. 20. Уменьшится на $3 \cdot 10^{11}$ км. Упр. 21. 1. Вдвое меньше
 нашей. 2. 10^6 пк. 3. 22 500 км/с. 4. 267 Мпк. 5. $\approx 2,75^\circ$.



I. Введение	
§ 1. Предмет астрономии	
1. Что изучает астрономия. Ее значение и связь с другими науками.	
2. Структура и масштабы Вселенной.	
§ 2. Наблюдения — основа астрономии.	
1. Особенности астрономии и ее методов.	
2. Телескопы.	
II. Практические основы астрономии	
§ 3. Звезды и созвездия	
§ 4. Небесные координаты и звездные карты	
§ 5. Видимое движение звезд на различных географических широтах	
1. Высота полюса мира над горизонтом	
2. Высота светила в кульминации.	
§ 6. Годичное движение Солнца по небу. Эклиптика ...	
§ 7. Движение и фазы Луны	
§ 8. Затмения Солнца и Луны.	
§ 9. Время и календарь	
1. Точное время и определение географической долготы	
2. Календарь	
III. Строение Солнечной системы.	
§ 10. Развитие представлений о строении мира	
1. Геоцентрическая система мира	
2. Гелиоцентрическая система мира	
§ 11. Конфигурация планет. Синодический период	
1. Конфигурация планет и условия их видимости ..	
2. Синодический и сидерический периоды обращения планет.	
§ 12. Законы движения планет Солнечной системы	

§ 13. Определение расстояний и размеров тел в Солнечной системе.	62
1. Форма и размеры Земли.	62
2. Определение расстояний в Солнечной системе. Горизонтальный параллакс	66
3. Определение размеров светил	68
§ 14. Движение небесных тел под действием сил тяготения	70
1. Закон всемирного тяготения.	70
2. Возмущения в движении тел Солнечной системы	72
3. Масса и плотность Земли.	73
4. Определение массы небесных тел	73
5. Приливы	75
6. Движение искусственных спутников Земли и космических аппаратов к планетам Солнечной системы	76
IV. Природа тел Солнечной системы	79
§ 15. Общие характеристики планет	79
§ 16. Солнечная система как комплекс тел, имеющих общее происхождение	80
§ 17. Система Земля—Луна.	83
1. Земля	83
2. Луна	87
§ 18. Планеты земной группы.	95
1. Общность характеристик	95
2. Меркурий	96
3. Венера	97
4. Марс	100
§ 19. Далекие планеты	104
1. Общность характеристик планет-гигантов.	104
2. Спутники и кольца планет-гигантов	106
3. Плутон	109
§ 20. Малые тела Солнечной системы.	110
1. Малые планеты	110
2. Кометы.	113
3. Метеоры, болиды и метеориты.	118
V. Солнце и звезды	123
§ 21. Солнце — ближайшая звезда	123
1. Энергия и температура Солнца	123

2. Состав и строение Солнца.	125
3. Атмосфера Солнца	130
4. Солнечная активность	132
§ 22. Расстояния до звезд. Характеристики излучения звезд	136
1. Годи́чный параллакс и расстояния до звезд.	137
2. Видимая и абсолютная звездные величины. Светимость звезд	139
3. Спектры, цвет и температура звезд	141
4. Диаграмма «спектр — светимость»	143
§ 23. Массы и размеры звезд.	145
1. Двойные звезды. Определение массы звезд.	145
2. Размеры звезд. Плотность их вещества.	150
3. Модели звезд	151
§ 24. Переменные и нестационарные звезды	154
1. Пульсирующие переменные	155
2. Новые и сверхновые звезды	157
VI. Строение и эволюция Вселенной	162
§ 25. Наша Галактика.	162
1. Млечный Путь и Галактика.	162
2. Звездные скопления и ассоциации.	165
3. Межзвездная среда: газ и пыль.	167
4. Движения звезд в Галактике. Ее вращение	175
§ 26. Другие звездные системы — галактики.	178
§ 27. Основы современной космологии	187
§ 28. Жизнь и разум во Вселенной	197
Приложения	204
Ответы к задачам	220