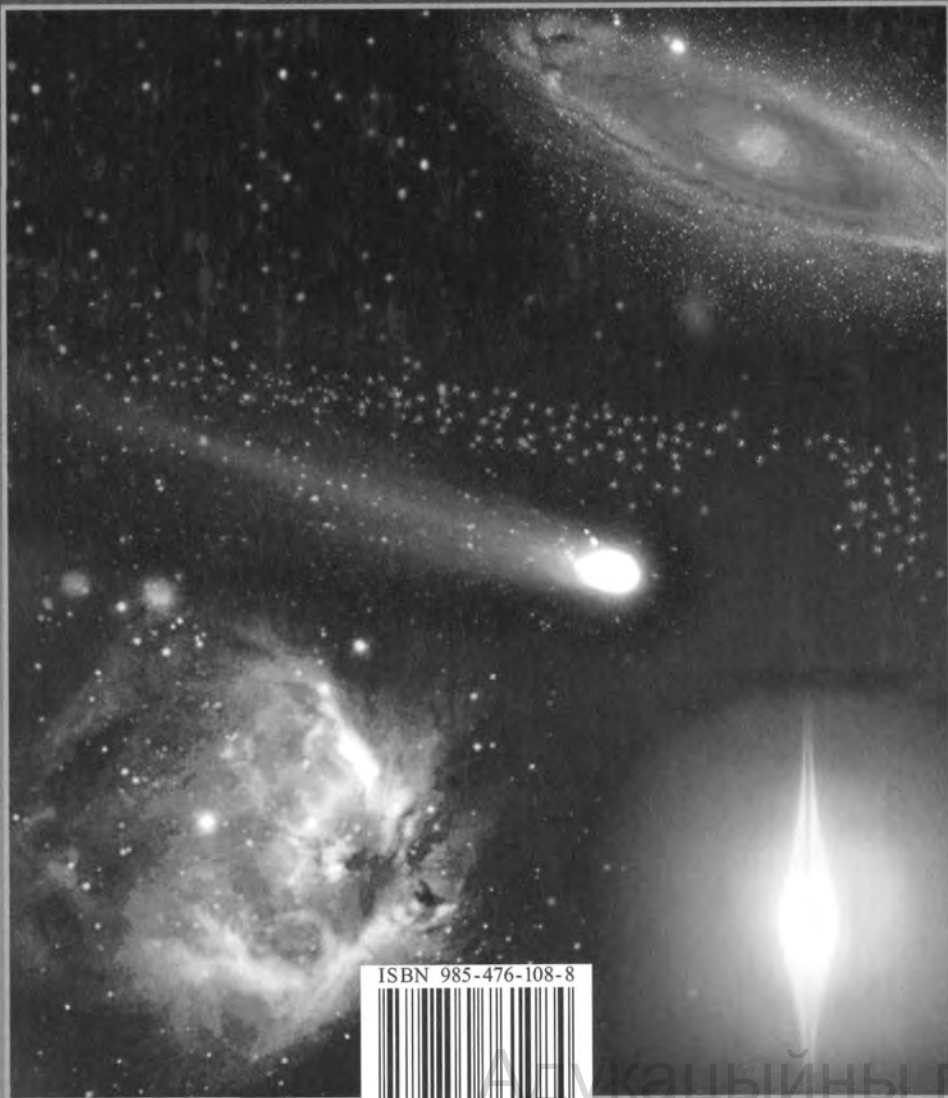


1416

Издательский центр БГУ



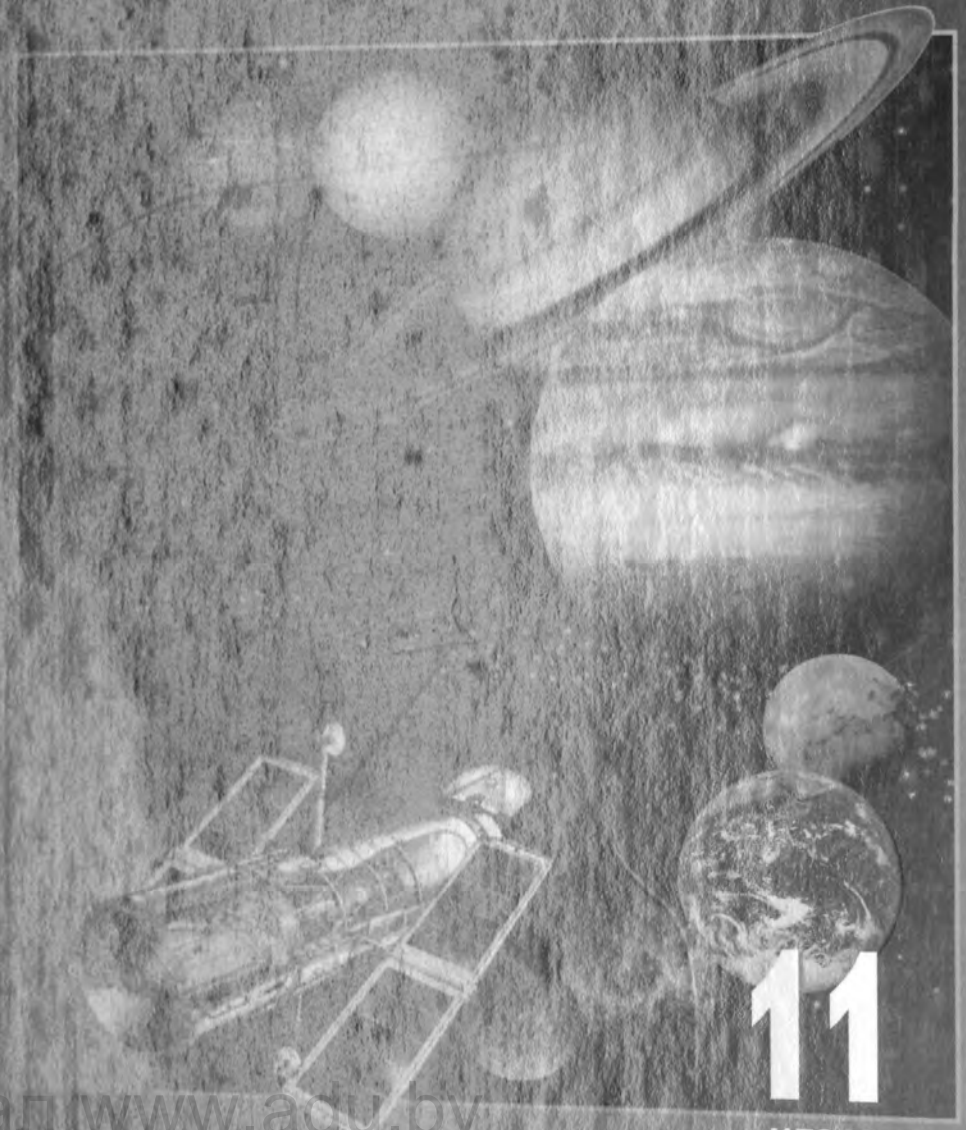
ISBN 985-476-108-8



9 780954 761084

И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалев

# АСТРОНОМИЯ



11

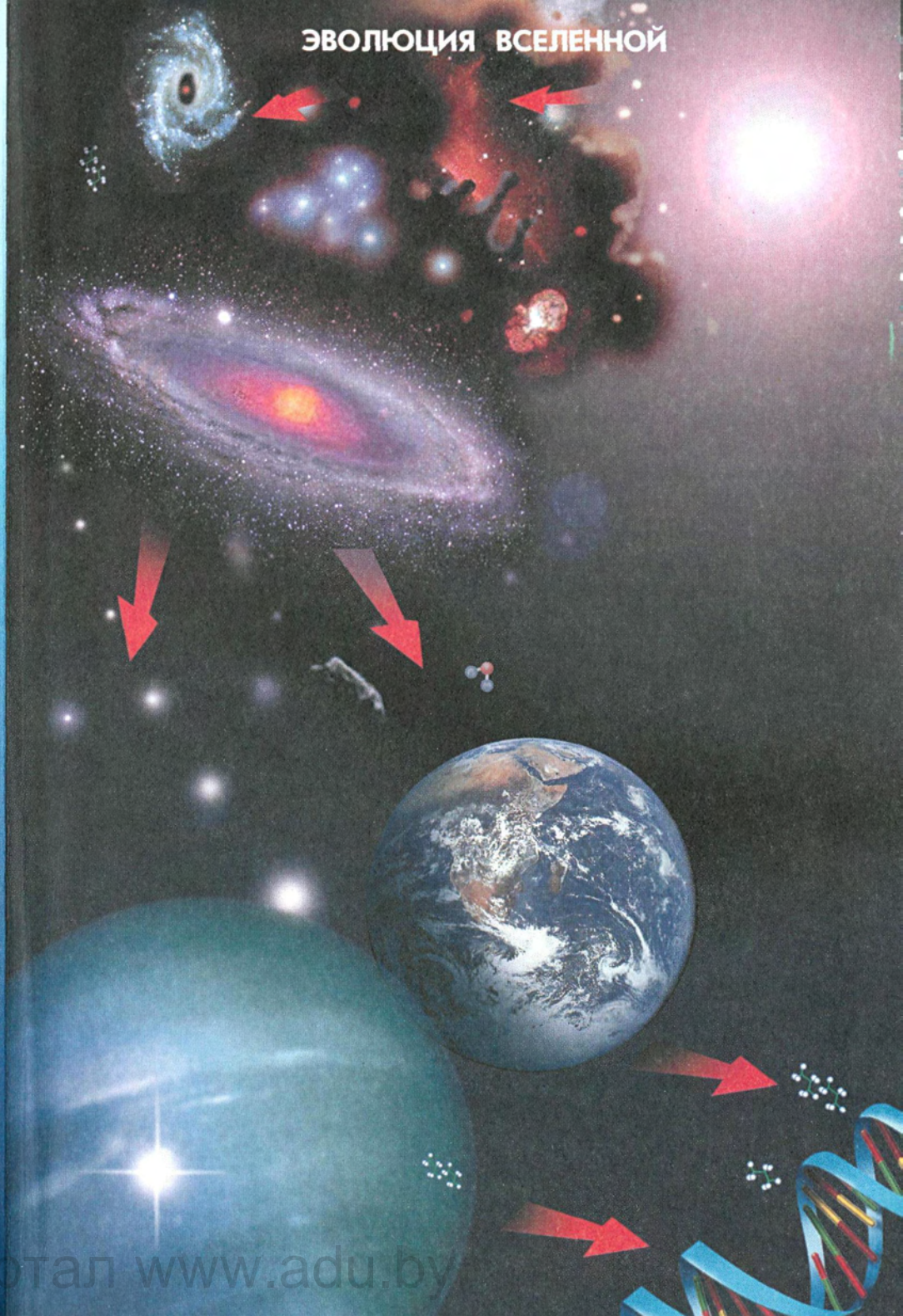
класс

Адукацыйны партал [www.edu.by](http://www.edu.by)

# СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ



# ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ



1 световой год = около 9460 млрд км

УДК 52(075.3)  
ББК 22.6я721  
Г16

Рецензенты:

доктор физико-математических наук,  
профессор *А. П. Кличенко*;  
учитель средней школы № 193 г. Минска *В. И. Коваленко*

**Галузо И. В.**

Г16 **Астрономия: Учеб. пособие для учащихся 11-го кл. учреждений, обеспечивающих получение общ. сред. образования, с рус. яз. обучения с 11-летним сроком обучения / И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалев. — Мн.: Изд. центр БГУ, 2003. — 224 с.: ил.**

ISBN 985-476-108-8.

УДК 52(075.3)  
ББК 22.6я721

© Галузо И. В., Голубев В. А., Шимбалев А. А., 2003  
© Оформление. Издательский центр БГУ, 2003  
© Кубарев Ю. Е., иллюстрации, 2003.

ISBN 985-476-108-8

585038/9960

## Предисловие

Астрономия — это древнейшая наука, которая изучает объекты и явления, наблюдаемые на небе. Тайны неба призывают человеческий разум к размышлению и исследованию физического мира. Этот беспредельный и постоянно меняющийся мир мы называем Вселенной. Понятие «Вселенная» включает в себя и Землю, и Солнце с остальными планетами, и звезды, и галактики, и разреженную среду, в которой они находятся. Наша родная Земля, а вместе с ней и мы затерялись в этом мире маленькой песчинкой.

Люди всегда стремились понять природу тел и явлений, наблюдаемых во Вселенной, поэтому строили картину окружающего их мира в соответствии с теми данными, которыми располагали. Постепенно с появлением новых фактов и теорий, а также с возможностью проверки этих идей через наблюдения и измерения, с использованием достижений смежных с астрономией наук (особенно физики) картина взглядов на мир уточнялась и изменялась. Иногда это была революционная ломка отживших представлений — например, утверждение гелиоцентрической системы Коперника.

В наше время астрономия использует все более совершенную наблюдательную технику. Современные приемники излучения передают информацию прямо в компьютеры.

Наблюдения ведутся в различных диапазонах электромагнитного излучения: видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском, радиодиапазоне и гамма-лучах. Открыты новые объекты (черные дыры, нейтронные звезды), выявлены неожиданные свойства у многих уже известных тел, созданы условия для прямого исследования ряда объектов Солнечной системы и т. д. И чем больше астрономы соприкасаются с неизвестным и открывают новое, тем больше появляется вопросов, требующих разрешения.

Современная астрономия изучает весьма далекие космические объекты, и вместе с тем она не оторвана от Земли. Для человечества важно исследовать активность Солнца и его влияние на земные процессы. Не снята проблема астероидной опасности. Необходимо ответить на ряд вопросов, касающихся возможности зарождения жизни на других планетах: как часто это происходит, как космос влияет на развитие всего живого и др. Звездное небо всегда доступно для всех, но раскрывает свои тайны только наиболее пытливым и упорным исследователям.

# I Введение

## РАЗДЕЛ

### § 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

**1. Что изучает астрономия.** Люди издавна пытались разгадать тайну окружающего мира, определить свое место в мировом порядке Вселенной, которую древнегреческие философы называли Космосом. Так, человек пристально наблюдал за восходами и заходами Солнца, за порядком смены фаз Луны — ведь от этого зависела его жизнь и трудовая деятельность. Человека интересовал неизменный суточный ход звезд, но пугали непредсказуемые явления — затмения Луны и Солнца, появление ярких комет. Люди стремились понять закономерность небесных явлений и осмыслить свое место в этом безграничном мире. Небесные объекты, явления и процессы, происходящие во Вселенной, исследует наука астрономия.

**Астрономия** (от греческого *ástron* — звезда, светило и *nómos* — закон) — фундаментальная наука, изучающая строение, движение, происхождение и развитие небесных тел, их систем и всей Вселенной в целом.

Астрономия как наука — важный вид человеческой деятельности, дающий систему знаний о закономерностях в развитии природы. Цель астрономии — изучить происхождение, строение и эволюцию Вселенной.

Важными задачами астрономии являются объяснение и прогнозирование астрономических явлений, таких как солнечные и лунные затмения, появление периодических комет, прохождение вблизи Земли астероидов, крупных метеорных тел или ядер комет. Астрономия занимается изучением физических процессов, происходящих в недрах планет, на поверхности и в их атмосферах, чтобы лучше понять строение и эволюцию нашей планеты. Девять больших планет, в том числе и Земля, их спутники, астероиды, метеорные тела, кометы, межпланетная пыль и полевые формы материи вместе с Солнцем составляют гравитационно связанную Солнечную систему. Исследование движения небесных тел позволяет выяснить вопрос об устойчивости Солнечной системы, о вероятности столкновения Земли с астероидами и ядрами комет. Не теряет актуальности откры-

тие новых объектов Солнечной системы и изучение их движения. Важно знание процессов, происходящих на Солнце, и прогнозирование их дальнейшего развития, так как от этого зависит существование всего живого на Земле. Изучение эволюции других звезд и сравнение их с Солнцем помогают познать этапы развития нашего светила.

Исследование нашей звездной Галактики и других галактик позволяет определить тип нашего звездного «города», эволюцию Галактики, место, занимаемое в ней Солнечной системой, вероятность близкого прохождения от Солнца других звезд или прохождения его самого через межзвездные облака газа и пыли.

Итак, астрономия изучает строение и эволюцию Вселенной. Под термином «Вселенная» понимается максимально большая область пространства, включающая в себя все доступные для изучения небесные тела и их системы.

**2. Возникновение астрономии.** Астрономия возникла в глубокой древности. Известно, что еще первобытные люди наблюдали звездное небо и затем на стенах своих пещер рисовали то, что видели. По мере развития человеческого общества, с возникновением земледелия, появилась потребность в счете времени, в создании календаря. Подмеченные закономерности в движении небесных светил, изменении вида Луны позволили древнему человеку найти и определить единицы счета времени (сутки, месяц, год) и высчитать наступление определенных сезонов года, чтобы вовремя провести посевные работы и убрать урожай.

Наблюдение звездного неба с древнейших времен формировало самого человека как мыслящее существо. И если ориентация в пространстве и времени по звездам, Солнцу и Луне доступна животным и растениям на уровне рефлексов, то только человеку свойственно предсказывать земные явления по небесным. Так, в Древнем Египте по появлению на предутреннем небе ярчайшей звезды Сириус жрецы предсказывали периоды весенних разливов Нила, определявших сроки сельскохозяйственных работ (рис. 1.1). В Аравии, где из-за дневной жары многие работы переносились на ночное время, существенную роль играло наблюдение фаз Луны. В странах, где было развито море-



Рис. 1.1. Наблюдение предутреннего восхода Сириуса в Древнем Египте



Рис. 1.2. Стоунхендж — древняя астрономическая наблюдательная площадка

плавание, в особенности до изобретения компаса, особое внимание уделялось способам ориентирования по звездам. В самых ранних письменных документах (3—2-е тыс. до н. э.) древнейших цивилизаций Египта, Вавилона, Китая, Индии и Америки имеются следы астрономической деятельности. В различных местах Земли наши предки оставили сооружения из каменных глыб и обработанных столбов, ориентированные на астрономически значимые направления. Эти направления совпадают, например, с точками восхода Солнца в дни равноденствий и солнцестояний. Подобные каменные солнечно-лунные указатели найдены в Южной Англии (Стоунхендж; рис. 1.2), в России на Южном Урале (Аркаим) и других местах. Возраст таких древних обсерваторий около 5—6 тыс. лет.

Аналогичные наблюдательные площадки, использовавшиеся для астрономических наблюдений и отправления культовых обрядов, обнаружены и в нашей стране. Например, кульгово-астрономическое каменное сооружение находится на берегу Янова озера вблизи г. Полоцка.

**3. Разделы астрономии.** Как и любая другая наука, астрономия включает ряд разделов, тесно связанных между собой. Они отличаются друг от друга предметом исследования, а также методами и средствами познания. Рассмотрим возникновение и развитие разделов астрономии в историческом аспекте. Правильное, научное представление о Земле как небесном теле появилось в Древней Греции. Александрийский астроном *Эратосфен* в 240 г. до н. э. весьма точно



Николай Коперник  
(1473—1543)



Галилео Галилей  
(1564—1642)



Иоганн Кеплер  
(1571—1630)

определил по наблюдениям Солнца размеры земного шара. Развивающиеся торговля и мореплавание нуждались в разработке методов ориентации, определении географического положения наблюдателя, точном измерении времени исходя из астрономических наблюдений. Решением этих задач стала заниматься **практическая астрономия**.

Гелиоцентрическая система мира *Николая Коперника*, изложенная в труде «Об обращениях небесных сфер» (1543), дала ключ к познанию Вселенной. Однако веками укоренившееся мнение о неподвижной Земле как центре Вселенной долго не уступало места новому учению. Окончательно утвердил теорию Коперника, получив бесспорные доказательства ее истинности, итальянский физик, механик и астроном *Галилео Галилей*. Астрономические открытия Галилея были сделаны с помощью простейшего телескопа. На Луне ученый увидел горы, открыл 4 спутника Юпитера. Обнаруженная им смена фаз Венеры свидетельствовала о том, что эта планета движется вокруг Солнца, а не вокруг Земли.

Современник Галилея *Иоганн Кеплер* (будучи ассистентом великого астронома Тихо Браге) получил доступ к высоким по точности результатам наблюдений планет, проводившихся в течение примерно 20 лет. Особое внимание Кеплера привлек Марс, в движении которого обнаружились значительные отступления от всех прежних теорий. После длительных вычислений ученому удалось найти законы движения планет. Эти три закона сыграли важную роль в развитии представлений об устройстве Солнечной системы. Раздел астрономии, изучающий движение небесных тел, получил название **небесной механики**. Небесная механика позволила объяснить и предельно точно вычислить с очень высокой точностью почти все движения, наблюдаемые как в Солнечной системе, так и в Галактике.

В астрономических наблюдениях использовались все более совершенные телескопы. Зрительная труба Галилея была усовершенствована Кеплером, а затем *Христианом Гюйгенсом*. *Исаак Ньютон* изобрел новый вид телескопа — телескоп-рефлектор. С помощью модернизированных оптических приборов были



Исаак Ньютон  
(1643—1727)



Михаил Васильевич  
Ломоносов  
(1711—1765)

сделаны новые открытия, причем относящиеся не только к телам Солнечной системы, но и к миру слабых и далеких звезд. В 1655 г. Гюйгенс разглядел кольца Сатурна и ряд его спутников. В 1761 г. *М. В. Ломоносов* открыл атмосферу у Венеры и провел исследование комет. Принимая за эталон Землю, ученые сравнивали ее с другими планетами и спутниками. Так зарождалась **сравнительная планетология**.

Огромные и все увеличивающиеся возможности изучения физической природы и химического состава звезд предоставило открытие спектрального анализа (1859). Детальные исследования темных линий в спектре Солнца, выполненные немецким ученым *Йозефом Фраунгофером*, стали первым шагом в получении массовой спектральной информации о небесных телах. В 60-е гг. XIX в. спектральный анализ утвердился как основной метод исследования физической природы небесных тел. Быстрое развитие лабораторной спектроскопии и теории спектров атомов и ионов на основе квантовой механики привело к возникновению на этой основе физики звезд, и в первую очередь физики звездных атмосфер. Раздел астрономии, изучающий физические явления и химические процессы, происходящие в небесных телах, их системах и в космическом пространстве, называется **астрофизикой**.

Дальнейшее развитие астрономии связано с усовершенствованием техники наблюдений. Большие успехи достигнуты в создании новых типов приемников излучения. Фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи, методы электронной фотографии и телевидения повысили точность и чувствительность фотометрических наблюдений и еще более расширили спектральный диапазон регистрируемых излучений. Стал доступен для наблюдений мир далеких галактик, находящихся на расстоянии миллиардов световых лет. Возникли новые направления астрономии: звездная астрономия, космология и космогония.

Временем зарождения **звездной астрономии** принято считать 1837—1839 гг., когда независимо в России, Германии и Англии были получены первые результаты в определении расстояний до звезд. Звездная астрономия изучает закономерности в пространственном распределении и движении звезд в нашей звездной системе — Галактике, исследует свойства и распределение других звездных систем.

**Космология** — раздел астрономии, изучающий происхождение, строение и эволюцию Вселенной как единого целого. Выводы космологии основываются на законах физики и данных наблюдательной астрономии, а также на всей системе знаний определенной эпохи. Интенсивно этот раздел астрономии стал развиваться

в первой половине XX в., после разработки общей теории относительности А. Эйнштейном.

**Космогония** — раздел астрономии, изучающий происхождение и развитие небесных тел и их систем. Поскольку все небесные тела возникают и развиваются, идеи об их эволюции тесно связаны с представлениями о природе этих тел вообще. При исследовании звезд и галактик используются результаты наблюдений многих сходных объектов, возникающих в разное время и находящихся на разных стадиях развития. В современной космогонии широко применяются законы физики и химии.

Космогонические гипотезы XVIII—XIX вв. относились главным образом к происхождению Солнечной системы. Затем развитие физики и астрофизики позволило приступить к серьезному изучению происхождения и развития звезд (рис. 1.3). В 60-х гг. XX в. началось исследование происхождения и развития галактик, природа которых была выяснена только в 1920-х гг. (Важнейшие астрономические открытия приведены в Приложении 2.)

**4. Астрономические наблюдения.** Основным способом исследования небесных объектов и явлений служат астрономические наблюдения. **Астрономические наблюдения** — это целенаправленная и активная регистрация информации о процессах и явлениях, происходящих во Вселенной. Такие наблюдения выступают основным источником знаний на эмпирическом уровне.

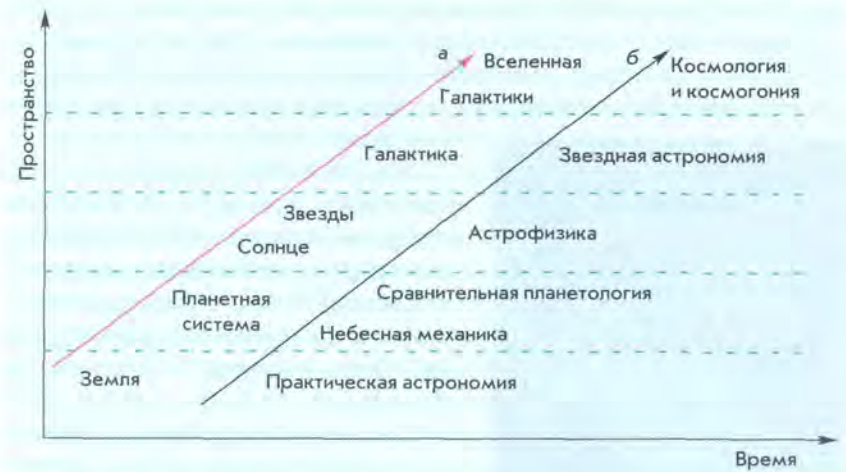


Рис. 1.3. Становление и развитие астрономической науки:  
а — объекты изучения разделов астрономии;  
б — последовательность возникновения разделов астрономии

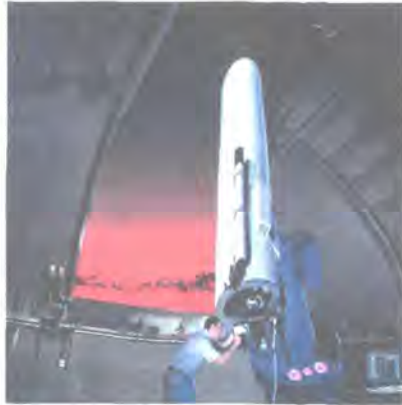


Рис. 1.4. Наблюдения в телескоп в современной обсерватории

На протяжении тысячелетий астрономы изучали положение небесных объектов на звездном небе и их взаимное перемещение с течением времени. Точные измерения положений звезд, планет и других небесных тел дают материал для определения расстояний до них и их размеров, а также для исследования законов их движения. Результаты угломерных измерений пользуются практическая астрономия, небесная механика, звездная астрономия.

Для проведения астрономических наблюдений во многих странах созданы специальные научно-исследовательские учреждения — **астрономические обсерватории**.

Для выполнения астрономических наблюдений и обработки полученных данных в современных обсерваториях используют наблюдательные инструменты (телескопы), светоприемную и анализирующую аппаратуру, вспомогательные приборы для наблюдений, электронно-вычислительную технику и др. (рис. 1.4).

**Оптические телескопы** служат для собирания света исследуемых небесных тел и получения их изображения. Телескоп увеличивает угол зрения, под которым видны небесные тела, и собирает во много раз больше света, приходящего от светила, чем невооруженный глаз наблюдателя. Благодаря этому в телескоп можно рассматривать невидимые с Земли детали поверхности ближайших небесных тел, а также множество слабых звезд.

После второй мировой войны начала бурно развиваться радиофизика (физика радиоволн). Усовершенствованные приемники, антенны и оставшиеся после войны радиолокаторы могли принимать радиоизлучение Солнца и далеких космических объектов.

Так возникла **радиоастрономия** — одна из ветвей астрофизики. Внедрение радионаблюдений в астрономию (рис. 1.5) обогатило ее множеством выдающихся открытий.



Рис. 1.5. Радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк

Новым импульсом в развитии астрономических наблюдений стал выход космических аппаратов и человека в космос. Научные приборы и телескопы, установленные на космических кораблях, позволили исследовать ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение от Солнца, звезд, галактик. Эти наблюдения за пределами земной атмосферы, поглощающей коротковолновое излучение, необычайно расширили объем информации о физической природе небесных тел и их систем.

**5. Значение астрономии.** Во все времена астрономия оказывала большое влияние на практическую деятельность человека, но самое главное ее значение заключалось и заключается в формировании научного мировоззрения. Это можно проследить, рассматривая развитие отдельных разделов астрономии.

Методы ориентировки, разрабатываемые практической астрономией, применяются в мореплавании, авиации и космонавтике. Требования к точности определения координат небесных объектов (звезд, квазаров, пульсаров) значительно возросли в связи с тем, что по ним ориентируются космические автоматические аппараты, скорости которых и покоряемые расстояния несоизмеримы с земными. В связи с освоением тел Солнечной системы возникает необходимость составления подробных карт Луны, Марса, Венеры.

Работа службы времени также связана с астрономией. В задачи данной службы входят определение, хранение и передача сигналов точного времени, что не потеряло актуальности и сейчас. Атомные часы, точность хода которых достигает  $10^{-8}$  с, позволяют изучать годовые и вековые изменения вращения Земли, а значит, вносить поправки в единицы измерения времени.

По мере освоения космического пространства увеличивается число задач, решать которые призвана небесная механика. Одна из них — изучение отклонений орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ) от расчетных. Изменение высоты полета ИСЗ над земной поверхностью зависит от средней плотности залегающих пород, что указывает на районы поиска нефти, газа или железной руды.

Исследование атмосфер тел Солнечной системы помогает лучше познать законы динамики атмосферы Земли, точнее построить ее модель, а следовательно, увереннее предсказывать погоду. Практический интерес имеют для метеорологов, к примеру, вопросы образования сернистых облаков на Венере, вызывающих «парниковый эффект», или вопросы глобальных марсианских пылевых бурь, охлаждающих поверхность этой планеты.

Развитие астрофизики стимулирует разработку новейших технологий. Так, исследование источников энергии Солнца и звезд

подказало идею создания управляемых термоядерных реакторов. В процессе изучения солнечных протуберанцев родилась идея теплоизоляции сверхгорячей плазмы магнитным полем, создания магнитогидродинамических генераторов. Результаты наблюдений Службы Солнца — международной координирующей сети по регистрации активности Солнца — используются в метеорологии, космонавтике, медицине и других отраслях человеческой деятельности (рис. 1.6).

Наша Земля не изолирована в пространстве, на нее воздействуют частицы и поля, идущие от Солнца и звезд. Многие звезды в конце своей эволюции взрываются (так называемые Сверхновые), выделяя огромное количество энергии в течение нескольких секунд. Так, типичная вспышка сверхновой звезды на расстоянии 60 световых лет способна уменьшить озоновый слой нашей планеты в 20 раз, что в свою очередь приведет к возрастанию в миллион раз потока ультрафиолетового излучения, достигающего Земли.

Звездная астрономия изучает частоту, пространственное распределение и тип звезд, приводящих к космическим катастрофам.

Таким образом, еще раз подчеркнем, что основное назначение астрономии состоит в формировании мировоззрения людей. Земля — это уникальная планета, где в процессе эволюции возникла человеческая цивилизация, и если природа Земли уникальна, то и огромна ответственность людей за ее сохранение.

### Вопросы и упражнения

1. Что изучает астрономия? Объясните происхождение слова «астрономия».
2. Каковы цель и задачи изучения астрономии?
3. Как возникла наука астрономия? Какие причины привели к возникновению астрономии?
4. Какие объекты и их системы изучает астрономия? Перечислите их в порядке увеличения размеров.
5. Из каких разделов состоит астрономия? Кратко охарактеризуйте каждый из них.
6. Что такое телескоп и для чего он предназначен?
7. Каково значение астрономии для практической деятельности человечества?

## II РАЗДЕЛ

# Основы практической астрономии

### § 2. ЗВЕЗДНОЕ НЕБО

**1. Звезды и созвездия.** Небо над нами на открытом месте простирается в виде купола. На нем в безоблачную ночь сияют мириады звезд, и, кажется, невозможно разобраться в этой величественной звездной картине. Вспоминаются вдохновенные строки русского ученого и поэта М. В. Ломоносова:

*Открылась бездна звезд полна,  
Звездам числа нет, бездне — дна.*

Древние наблюдатели видели на звездном небе отдельные сочетания ярких звезд и мысленно объединяли их в различные фигуры. Чтобы было легче ориентироваться на звездном небе, группам звезд, или созвездиям люди присваивали названия животных, птиц, различных предметов. В некоторых фигурах древнегреческие астрономы «видели» мифических героев. В труде «Альмагест» («Великое математическое построение астрономии в XIII книгах», II в. н. э.) древнегреческий астроном *Клавдий Птолемей* упоминает 48 созвездий. Это Большая Медведица и Малая Медведица, Дракон, Лебедь, Орел, Телец, Весы и др.

Наиболее заметные созвездия у многих народов имеют свои названия. Так, древним славянам Большая Медведица представлялась в виде Лося или Оленя. Часто ковш Большой Медведицы сравнивался с повозкой, отсюда и названия этого созвездия: Воз, Телега, Колесница. Между Большой Медведицей и Малой Медведицей извивается созвездие Дракона. Русское название этого созвездия — Змей, который похищает красавицу. А знаменитая Полярная звезда и есть та самая плененная красавица.

Еще в III в. до н. э. древнегреческие астрономы свели названия созвездий в единую систему, связанную с греческой мифологией. Эти названия впоследствии заимствовала европейская наука. Поэтому все созвездия, содержащие яркие звезды и видимые в средних широтах Северного полушария Земли, получили имена героев древнегреческих мифов и легенд (например, созвездия Цефея, Андромеды,

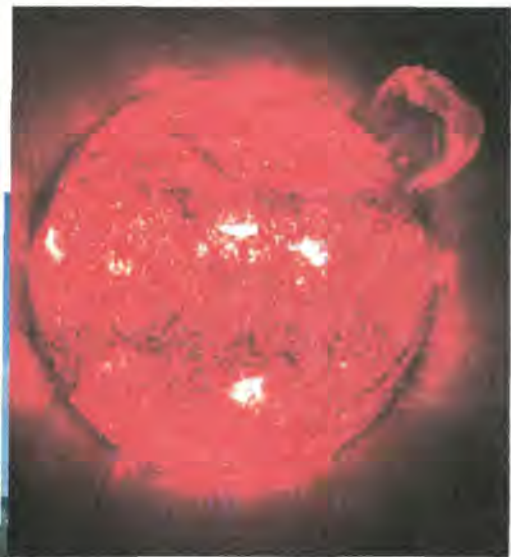


Рис. 1.6. Активное Солнце. Фотография, сделанная спутником SOHO





Рис. 2.1. Фрагмент атласа А. Целлариуса с изображением созвездий

Пегаса, Персея). Их изображения можно найти на старинных звездных картах: Большая Медведица и Малая Медведица, небесный охотник Орион, голова звездного быка — Тельца и др. (рис. 2.1). Однако в созвездии Кассиопеи, названном в честь мифической царицы (рис. 2.2), белорусы «видели» двух косцов, косящих траву (рис. 2.3). На современных астрономических картах нет рисунков легендарных образов созвездий, но сохранены их древние названия.



Рис. 2.2. Созвездие Кассиопеи. Гравюра из атласа Яна Гевелия



Рис. 2.3. Созвездие Кассиопеи в представлении белорусов

Менее яркие созвездия были названы европейскими астрономами в XVI—XVIII вв. Все созвездия Южного полушария (невидимые в Европе) получили названия в эпоху Великих географических открытий, когда европейцы начали плавать в Новый Свет (Америку).

Однако с течением времени сложилась непростая ситуация — в разных странах использовались различные карты созвездий. Возникла необходимость унифицировать разделение звездного неба. Окончательное число и границы созвездий были определены на I съезде Международного астрономического союза в 1922 г. Вся сферическая поверхность звездного неба была условно разделена на 88 созвездий.

В настоящее время под **созвездием** понимается участок звездного неба с характерной наблюдаемой группировкой звезд, выделенный для удобства ориен-

тировки и обозначения звезд. Эти площадки-созвездия носят названия либо древнегреческих созвездий, которые находились (или находятся) в границах современных, либо названия, присвоенные европейскими астрономами. Для облегчения запоминания и поиска созвездий в учебниках астрономии и астрономических атласах яркие звезды, составляющие созвездия, соединены условными линиями в узнаваемые на небе фигуры. Созвездия, звезды которых образуют легко выделяемую на звездном фоне конфигурацию, или те, что содержат яркие звезды, относятся к **главным созвездиям** (рис. 2.4).

Над горизонтом на ясном звездном небе невооруженным глазом можно увидеть около 3000 звезд. Они различаются по своему блеску: одни заметны сразу, другие едва различимы. Поэтому еще во II в. до н. э. *Tynnarch*, один из основоположников астрономии, ввел условную **шкалу звездных величин**. Самые яркие звезды были отнесены к 1-й величине, следующие по блеску (более слабые примерно в 2,5 раза) считаются звездами 2-й звездной величины, а самые слабые, видимые только в безлунную ночь, — звезды 6-й величины.



Рис. 2.4. Схема взаимного расположения главных созвездий и ярких звезд, видимых в средних географических широтах



Гиппарх (ок. 180—125 гг. до н. э.)

На всем звездном небе ярких звезд 1-й звездной величины 24. На территории Республики Беларусь доступны наблюдениям лишь 15 из них.

Многим ярким звездам древнегреческие и арабские астрономы дали названия: Вега, Сириус, Капелла, Альтаир, Ригель, Альдебаран и др. В дальнейшем яркие звезды в созвездиях стали обозначать буквами греческого алфавита, как правило, по мере убывания их блеска. С 1603 г. действует предложенная немецким астрономом *Иоганном Байером* система обозначений звезд. В системе Байера название звезды состоит из двух частей: из названия созвездия, которому принадлежит звезда, и буквы греческого алфавита. При этом первая буква греческого алфавита  $\alpha$  соответствует самой яркой звезде в созвездии,  $\beta$  — второй по яркости звезде и т. д. Например, Сириус —  $\alpha$  Большого Пса — это самая яркая звезда в созвездии Большого Пса; Ригель —  $\beta$  Ориона — звезда второй величины в созвездии Ориона.

По мере развития науки и в связи с изобретением телескопов количество исследуемых звезд все увеличивалось. Для их обозначения уже не хватало букв греческого алфавита. И тогда звезды начали обозначать латинскими буквами. Когда закончились и они, звезды стали просто нумеровать по порядку увеличения координаты  $\alpha$  (например, 61 Лебеда).

Набор звездных карт смежных участков неба, покрывающих все небо или некоторую его часть, называется **звездным атласом**.

**2. Видимое суточное движение звезд.** При наблюдении звездного неба на протяжении одного-двух часов мы убеждаемся в том, что оно вращается как единое целое таким образом, что с одной стороны звезды поднимаются, а с другой — опускаются. Для нас, жителей Северного полушария, звезды поднимаются с восточной части горизонта и смещаются вправо. Далее они достигают наивысшего положения в южной части неба и затем опускаются в западной части горизонта. В течение суток звездное небо со всеми находящимися на нем светилами совершает один оборот. Таким образом, *видимое суточное вращение звездного неба происходит с востока на запад, если стоять лицом к югу, т. е. по часовой стрелке.*

В северной части неба можно отыскать Полярную звезду. Кажется, что все небо вращается вокруг нее (рис. 2.5). На самом же деле

вокруг своей оси вращается наш земной шар. Очевидно, что **суточное движение звезд** (светил) — наблюдаемое кажущееся явление вращения небесного свода — отражает действительное вращение земного шара вокруг своей оси.

**3. Основные точки и линии небесной сферы.** Нам кажется, что все звезды расположены на некоторой шаровой поверхности небосвода и одинаково удалены от наблюдателя. На самом деле они находятся от нас на различных расстояниях, которые так огромны, что глаз не может заметить эти различия. Поэтому воображаемую шаровую поверхность стали называть **небесной сферой**.

**Небесная сфера** — это воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой в зависимости от решаемой задачи совмещается с той или иной точкой пространства. Центр небесной сферы может быть выбран в месте наблюдения (глаз наблюдателя), в центре Земли или Солнца и т. д. Понятием небесной сферы пользуются для угловых измерений, изучения взаимного расположения и движения космических объектов на небе.

На поверхность небесной сферы проецируются видимые положения всех светил, а для удобства измерений на ней строят ряд точек и линий (рис. 2.6). Например, некоторые из звезд «ковша» Большой

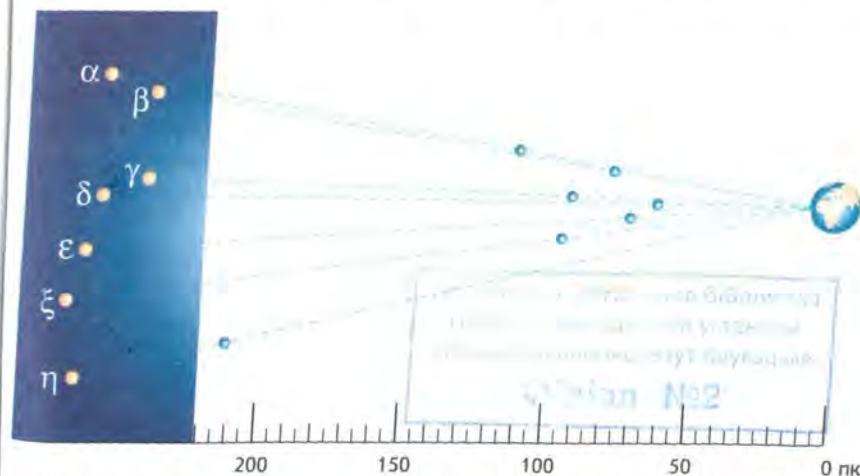


Рис. 2.6. Схема проецирования звезд в созвездиях на небесной сфере



Рис. 2.5. Суточные дуги светил в полярной области неба

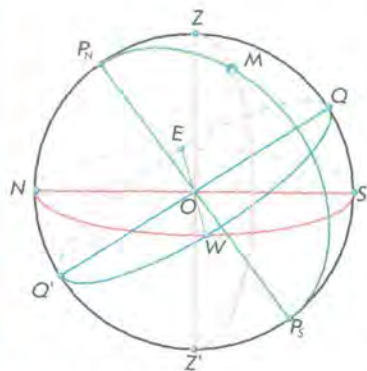


Рис. 2.7. Небесная сфера:  $O$  — центр небесной сферы (место нахождения наблюдателя);  $P_N$  — северный полюс мира;  $P_S$  — южный полюс мира;  $P_N P_S$  — ось мира (полярная ось);  $Z$  — зенит;  $Z'$  — надир;  $E$  — восток;  $W$  — запад;  $N$  — север;  $S$  — юг;  $Q$  — верхняя точка небесного экватора;  $Q'$  — нижняя точка небесного экватора;  $ZZ'$  — вертикальная линия;  $P_N P_S$  — круг склонения;  $NS$  — полуденная линия;  $M$  — светило на небесной сфере

Ось мира — прямая, проходящая через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли, пересекающая небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках.

Точка пересечения оси мира с небесной сферой, вблизи которой находится Полярная звезда, называется **северным полюсом мира**, противоположная точка — **южным полюсом мира**. Полярная звезда отстоит от северного полюса мира на угловом расстоянии около  $1^\circ$ .

Плоскость, проходящую через центр небесной сферы и перпендикулярную оси мира, называют **небесным экватором**. Он делит небесную сферу на две части: **Северное полушарие** с вершиной в северном полюсе мира и **Южное** — с вершиной в южном полюсе мира.

**Часовой круг**, или **круг склонения** — большой круг небесной сферы, проходящий через северный и южный полюсы мира.

**Суточная параллель** — малый круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира.

Большой круг небесной сферы, проходящий через точки зенита, надира и полюсы мира, называется **небесным меридианом**. Небесный меридиан пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках. Точка пересечения истинного

Медведицы находятся далеко одна от другой, но для земного наблюдателя они проецируются на один и тот же участок небесной сферы.

Прямая, проходящая через центр небесной сферы (рис. 2.7) и совпадающая с направлением нити отвеса в месте наблюдения, называется **вертикальной линией**. Она пересекает небесную сферу в точках **зенита** (верхняя точка пересечения отвесной линии с небесной сферой) и **надира** (точка небесной сферы, противоположная зениту). Плоскость, проходящая через центр небесной сферы и перпендикулярная отвесной линии, называется **плоскостью истинного или математического горизонта**.

**Вертикальный круг** — это большой круг небесной полусферы, проходящий через зенит и надир.

**Ось мира** — прямая, проходящая через центр небесной сферы парал-

горизонта и небесного меридиана, ближайшая к северному полюсу мира, называется **точкой севера**. Точка пересечения истинного горизонта и небесного меридиана, ближайшая к южному полюсу мира, называется **точкой юга**. Линия, соединяющая точки севера и юга, называется **полуденной линией**. Она лежит на плоскости истинного горизонта. По направлению полуденной линии падают тени от предметов в полдень.

С небесным экватором истинный горизонт также пересекается в двух диаметрально противоположных точках — **точке востока** и **точке запада**. Для наблюдателя, стоящего в центре небесной сферы лицом к точке севера, точка востока будет расположена справа, а точка запада — слева. Помня это правило, легко ориентироваться на местности.

Годовой путь Солнца среди звезд называется **эклиптикой**. Она наклонена к небесному экватору под углом  $23^\circ 27'$  и пересекает его в точках весеннего ( $\gamma$ ) и осеннего ( $\omega$ ) равноденствия (рис. 2.8).

### Вопросы и упражнения

1. Что понимают под созвездием? Созвездие — это группа звезд, создающих определенную конфигурацию, или участок небесной сферы, внутри которого находятся характерные звезды? 2. Каким образом созвездия получили свои названия? Приведите примеры названий созвездий. 3. По какому принципу строится шкала звездных величин Гиппарха? Что понимают под звездной величиной? 4. В чем заключается сущность системы классификации звезд по Байеру? 5. Опишите видимое суточное движение звезд. По какой причине происходит наблюдаемое явление суточного движения звезд? 6. Что понимают под небесной сферой? Дайте определения основным точкам, линиям и плоскостям небесной сферы.

## § 3. НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ

**1. Системы координат.** Положение звезд (светил, небесных объектов) определяется по отношению к точкам и кругам небесной сферы (см. рис. 2.7). Для этого введены небесные координаты, подобные географическим координатам на поверхности Земли.



Рис. 2.8. Эклиптика — путь Солнца на небесной сфере

В астрономии применяется несколько систем координат.

**Небесные координаты** — центральные углы или дуги больших кругов небесной сферы, с помощью которых определяют положение светил по отношению к основным кругам и точкам небесной сферы.

**Горизонтальная система координат.** При астрономических наблюдениях удобно определять положение светил по отношению к горизонту. Горизонтальная система координат использует в качестве основного круга истинный горизонт. В этой системе основными координатами являются **высота** ( $h$ ) и **азимут** ( $A$ ).

**Высота светила** — угловое расстояние светила  $M$  от истинного горизонта, измеренное вдоль вертикального круга (рис. 3.1). Высота определяется в градусах, минутах и секундах. Она отсчитывается в пределах от  $0$  до  $+90^\circ$  к зениту, если светило находится в видимой части небесной сферы, и от  $0$  до  $-90^\circ$  к надиру, если светило находится в невидимой части небесной сферы.

Для измерения азимутов за начало отсчета принимается точка юга. **Азимут светила** — угловое расстояние, измеренное вдоль истинного горизонта, от точки юга до точки пересечения горизонта с вертикальным кругом, проходящим через светило  $M$  (см. рис. 3.1). Азимут отсчитывается к западу от точки юга в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ .

Горизонтальная система координат используется при топографической съемке, в навигации. Вследствие суточного вращения небесной сферы высота и азимут светила со временем изменяются. Следовательно, горизонтальные координаты имеют определенное значение только для известного момента времени.

Угловое расстояние от зенита до светила, измеренное вдоль вертикального круга, называется **зенитным расстоянием** ( $z$ ). Оно отсчитывается в пределах от  $0$  до  $+180^\circ$  к надиру. Высота и зенитное расстояние связаны соотношением:  $z + h = 90^\circ$ .

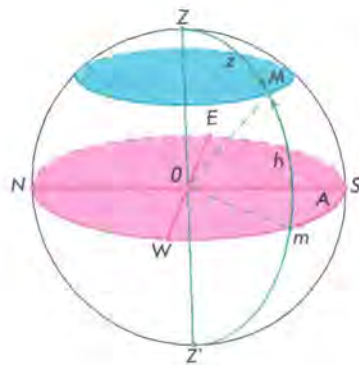


Рис. 3.1. Горизонтальная система координат:  $h$  — высота светила  $M$  над горизонтом;  $z$  — зенитное расстояние;  $A$  — азимут

**Экваториальная система координат.** Для построения звездных карт и составления звездных каталогов удобно принять за основной круг небесной сферы круг небесного экватора (рис. 3.2). Небесные координаты, в системе которых основным кругом является небесный экватор, называются экваториальной системой координат. В этой системе координатами служат **склонение** ( $\delta$ ) и **прямое восхождение** ( $\alpha$ ).

**Склонение светила** — угловое расстояние светила  $M$  от небесного экватора, измеренное вдоль круга склонения. Склонение отсчитывается в пределах от  $0$  до  $+90^\circ$  к северному полюсу мира и от  $0$  до  $-90^\circ$  к южному полюсу мира.

За начальную точку отсчета на небесном экваторе принимается точка весеннего равноденствия  $\Upsilon$ , где Солнце бывает около 21 марта.

**Прямое восхождение светила** — угловое расстояние, измеренное вдоль небесного экватора, от точки весеннего равноденствия до точки пересечения небесного экватора с кругом склонения светила. Прямое восхождение отсчитывается в сторону, противоположную суточному вращению небесной сферы, в пределах от  $0$  до  $360^\circ$  в градусной мере или от  $0$  до  $24^h$  в часовой мере.

Для некоторых астрономических задач (связанных с измерением времени) вместо прямого восхождения ( $\alpha$ ) вводится **часовой угол** ( $t$ ) (см. рис. 3.2). Часовой угол отсчитывается от верхней точки небесного экватора, т. е. той точки, в которой небесный экватор пересекается с небесным меридианом в южной стороне. Таким образом, часовой угол — угловое расстояние, измеренное вдоль небесного экватора, от верхней точки небесного экватора до круга склонения светила. Отсчитывается часовой угол по направлению видимого суточного вращения небесной сферы, т. е. к западу, подобно азимуту.

Из-за суточного вращения небесной сферы часовой угол, так же как высота и азимут светила, все время меняется.

Координаты звезд ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) в экваториальной системе координат не связаны с суточным движением небесной сферы и изменяются очень медленно. Поэтому они применяются для составления звездных карт и каталогов. Звездные карты представляют собой проекции небесной сферы на плоскость. Для изображения картины звездного неба, видимого в данном месте в определенный день и час, служит **подвижная карта звездного неба** (см. Приложение 3).

Вследствие возмущающего действия, которое оказывают на вращение Земли Луна и Солнце, направление оси вращения Земли совершает в пространстве очень сложное движение. Ось медленно описывает конус, оставаясь все время наклоненной к плоскости

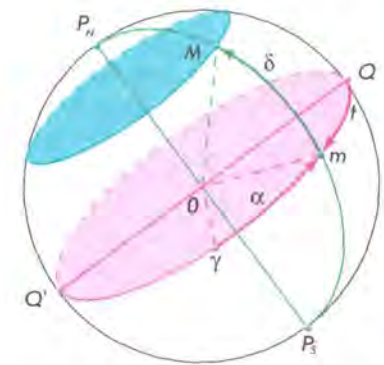


Рис. 3.2. Экваториальная система координат:  $\delta$  — склонение светила  $M$ ;  $\alpha$  — прямое восхождение;  $t$  — часовой угол



Рис. 3.3. Высота полюса мира над горизонтом

звездой была звезда  $\alpha$  Дракона, через 12 000 лет Полярной станет  $\alpha$  Лиры.

Прецессионное движение полюса мира вызывает изменение координат звезд с течением времени. Поэтому приходится периодически обновлять звездные карты. Современные карты звездного неба относятся к началу 2000 г.

**2. Высота полюса мира над горизонтом.** Мы уже знаем, что Полярная звезда, находящаяся вблизи северного полюса мира, остается почти на одной высоте над горизонтом на данной широте при суточном вращении звездного неба. При перемещении наблюдателя с севера на юг, где географическая широта меньше, Полярная звезда опускается к горизонту, т. е. существует зависимость между высотой полюса мира и географической широтой места наблюдения.

На рис. 3.3 земной шар и небесная сфера изображены в сечении плоскостью небесного меридиана места наблюдения. Наблюдатель из точки  $O$  видит полюс мира на высоте  $\angle PON = h_p$ . Направление оси мира  $OP$  параллельно земной оси. Угол при центре Земли  $\angle OO'q$  соответствует географической широте места наблюдения  $\varphi$ . Так как радиус Земли в точке наблюдения перпендикулярен плоскости истинного горизонта, а ось мира перпендикулярна плоскости географического экватора, то угол  $\angle PON$  и  $\angle OO'q$  равны между собой, как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Таким образом, *угловая высота полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения:*

$$h_p = \varphi. \quad (3.1)$$

С другой стороны, из рис. 3.3 следует, что угол  $\angle QOZ$  определяет собой величину склонения зенита  $\delta_z$ . Поэтому можно записать, что

$$\varphi = \delta_z \text{ или } \varphi = h_p = \delta_z. \quad (3.2)$$

Равенство (3.2) характеризует зависимость между географической широтой места наблюдения и соответствующими горизонтальной и экваториальной координатами светила.

По мере перемещения наблюдателя к Северному полюсу Земли северный полюс мира поднимается над горизонтом. На полюсе Земли полюс мира будет находиться в зените. Звезды здесь движутся по кругам, параллельным горизонту, который совпадает с небесным экватором. Становится неопределенным небесный меридиан, теряют смысл точки севера, юга, востока и запада.

На средних географических широтах ось мира и небесный экватор наклонены к горизонту, суточные пути звезд также наклонены к горизонту. Поэтому наблюдаются **восходящие** и **заходящие** звезды.

Под **восходом** понимается явление пересечения светилом восточной части горизонта, а под **заходом** — западной части горизонта. В средних широтах, например на территории Республики Беларусь, наблюдаются звезды северных околополярных созвездий, которые никогда не опускаются под горизонт. Они называются **незаходящими**. Звезды, расположенные около южного полюса мира, у нас никогда не восходят. Их называют **невосходящими**.

На экваторе Земли ось мира совпадает с полуденной линией, а полюсы мира — с точками севера и юга. Небесный экватор проходит через точки востока, запада и точку зенита. Суточные пути всех звезд перпендикулярны горизонту, и каждая из них половину суток находится над горизонтом.

### Вопросы и упражнения

1. Какие системы небесных координат вам известны? В чем заключается принципиальная разница между различными системами небесных координат?
2. Дайте описание горизонтальной системы координат. Какие координаты используются в этой системе?
3. Дайте описание экваториальной системы координат. Какими координатами в этой системе определяется положение светила на небесной сфере?
4. Для какой цели служат карты звездного неба?
5. Как определить высоту полюса мира над горизонтом?
6. Какая существует зависимость между географической широтой места наблюдения и соответствующими горизонтальной и экваториальной координатами светила?
7. Какие звезды называют восходящими, заходящими, невосходящими и незаходящими?
8. Определите склонения звезд, доступных наблюдению на широте вашего населенного пункта.

## § 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ

**1. Кульминация светил.** При своем суточном вращении вокруг оси мира светила два раза за сутки пересекают небесный меридиан. Явление прохождения светилом небесного меридиана называется **кульминацией**.

Различают верхнюю и нижнюю кульминации. В **верхней кульминации** светило при суточном движении находится в наивысшей точке над горизонтом, ближайшей к зениту. **Нижняя кульминация** светила более удалена от точки зенита, чем верхняя кульминация, и происходит через половину суток после верхней кульминации.

Точка пересечения суточной параллели светила с восточной частью истинного горизонта называется **точкой восхода светила**, а с западной частью истинного горизонта — **точкой захода светила**.

Незаходящие звезды (рис. 4.1) видны в верхней ( $M_2, M_3$ ) и нижней ( $M'_2, M'_3$ ) кульминациях. У восходящих и заходящих звезд нижняя кульминация  $M'_1$  проходит под горизонтом. У невосходящих звезд обе кульминации  $M_4$  и  $M'_4$  невидимы, т. е. происходят под горизонтом.

Найдем зависимость между географическими и небесными координатами.

Так как кульминация светил происходит при пересечении небесного меридиана, то плоскость рисунка 4.1 совпадает с плоскостью небесного меридиана. Суточные пути звезд изображаются отрезками, параллельными небесному экватору  $QQ'$ . Пусть восходящая и заходящая звезда находится в верхней кульминации  $M_1$ . Высота полюса мира равна географической широте  $\varphi$ . Как видно из рисунка,  $\angle QOS$  равен  $90^\circ - \varphi$  и представляет собой наклон небесного экватора к плоскости горизонта. Дуга  $M_1S$  (или  $\angle M_1OS$ ) — это высота светила над горизонтом. Эта дуга состоит из суммы двух дуг:  $M_1S = SQ + QM_1$ . Учитывая, что дуга  $SQ$ , опирающаяся на  $\angle QOS$ , определяется величиной  $90^\circ - \varphi$ , а дуга  $QM_1$  обозначает угловое расстояние звезды от небесного экватора и определяется величиной склонения  $\delta$ , получим формулу для определения высоты звезды в ее верхней кульминации:

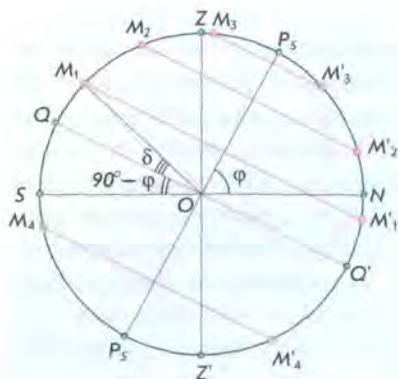


Рис. 4.1. Кульминация светил

$$h_B = (90^\circ - \varphi) + \delta. \quad (4.1)$$

Для незаходящей звезды нижняя кульминация  $M'_2$  измеряется дугой  $M'_2N$  или соответствующим центральным углом ( $\angle M'_2ON$ ). Указанный угол равен разности  $\angle M'_2OQ'$  и  $\angle NOQ'$ , где  $\angle M'_2OQ' = \delta$  — угловое расстояние светила от небесного экватора, а  $\angle NOQ' = 90^\circ - \varphi$  — наклон небесного экватора к плоскости горизонта. Значит, высота звезды в нижней кульминации равна:

$$h_H = \delta - (90^\circ - \varphi). \quad (4.2)$$

Если обе кульминации незаходящей звезды находятся по одну сторону от зенита (например,  $M_3$  и  $M'_3$ ), то ее верхняя кульминация определяется из соотношения:  $h_B = 180^\circ - [(90^\circ - \varphi) + \delta]$ , или после упрощения:

$$h_B = 90^\circ + \varphi - \delta. \quad (4.3)$$

Соотношения (4.1—4.3) связывают географическую широту с высотой и склонением звезд во время их кульминации. Отметим, что на рис. 4.1 азимуты звезд в верхней кульминации  $M_1$  и  $M_2$  равны  $0^\circ$ , а азимуты звезд в нижней кульминации  $M'_1$  и  $M'_2$  равны  $180^\circ$ .

**2. Определение географической широты по астрономическим наблюдениям.** При составлении географических и топографических карт, прокладке дорог и магистралей, разведке залежей полезных ископаемых и в ряде других случаев необходимо знать географические координаты местности. (В Приложении 4 приведены географические координаты городов Республики Беларусь.) Эту задачу можно решить с помощью астрономических наблюдений. Рассмотрим три способа.

**Первый способ.** Определить географическую широту можно по Полярной звезде. Если считать, что Полярная звезда указывает северный полюс мира, то приблизительно высота Полярной звезды над горизонтом дает нам географическую широту места наблюдения. Если измерить высоту Полярной звезды в верхней и нижней кульминациях, то получим более точное значение широты места наблюдения:

$$\varphi = \frac{h_B + h_H}{2}. \quad (4.4)$$

Это равенство получаем из двух вышеозначенных равенств (4.2) и (4.3). Формула (4.4) пригодна для всех незаходящих звезд, у которых верхняя и нижняя кульминации находятся по одну сторону от зенита.

**Второй способ.** Определить географическую широту можно из наблюдения верхней кульминации звезд. Из равенств (4.1) и (4.3) получим, что

$$\varphi = \delta \pm (90^\circ - h_B). \quad (4.5)$$

Знак «+» ставится, если звезда кульминирует к югу от зенита, а знак «-» — при кульминации звезды к северу от зенита.

*Третий способ.* Определить географическую широту можно из наблюдения звезд, проходящих вблизи зенита:

$$\varphi = \delta_z. \quad (4.6)$$

На астрономических обсерваториях устанавливаются специальные телескопы (зенит-телескоп, фотографическая зенитная труба), которые фиксируют звезды, проходящие в поле зрения инструмента, вблизи зенита. Склонение ( $\delta$ ) звезды, находящейся в зените, будет равно  $\varphi$ .

Ряд обсерваторий, оснащенных зенит-телескопами, составляют Всемирную службу широты. В ее задачи входит слежение за колебаниями широты, т. е. за изменениями (перемещениями) оси вращения внутри Земли.

### Вопросы и упражнения

1. Какие точки называют точками кульминации светил? 2. Что называется точками восхода и захода светил? 3. Найдите интервал склонений звезд, которые на данной широте: а) никогда не восходят; б) никогда не заходят; в) могут восходить и заходить. 4. Как изменяются при суточном движении светила его высота, прямое восхождение, склонение? 5. Как приблизительно определить географическую широту места из наблюдения Полярной звезды?

## § 5. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ДОЛГОТЫ

**1. Измерение времени.** Вся наша жизнь связана со временем и в конечном итоге регулируется периодической сменой дня и ночи, а также времен года. На этих природных повторяющихся явлениях базируются основные единицы измерения времени — сутки, месяц, год. Основная величина для измерения времени связана с периодом полного обращения земного шара вокруг своей оси.

Момент верхней кульминации центра Солнца называется **истинным полднем**, а нижней — **истинной полночью**. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра Солнца называется **истинными солнечными сутками**. Время, прошедшее от момента нижней кульминации центра истинного солнечного диска

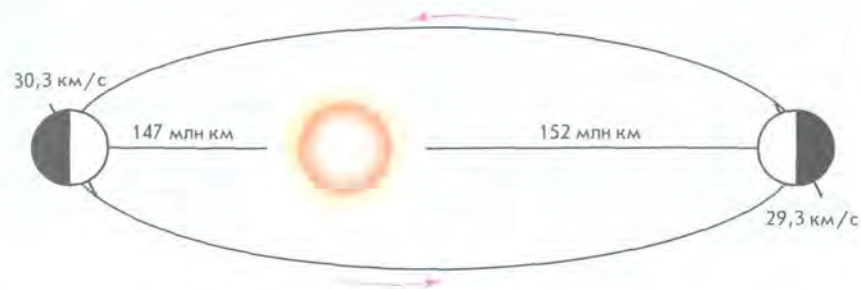


Рис. 5.1. Объяснение причин изменения длительности истинных солнечных суток

до любого другого его положения на одном и том же географическом меридиане, называется **истинным солнечным временем** ( $T_{\odot}$ ).

Необходимо отметить, что истинные солнечные сутки периодически меняют свою продолжительность. Это вызывается двумя причинами: во-первых, наклоном плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора, во-вторых, эллиптической формой орбиты Земли. Когда Земля находится на участке эллипса, расположенном ближе к Солнцу (на рис. 5.1 это положение показано слева), то она движется быстрее. Через полгода Земля окажется в противоположной части эллипса и будет перемещаться по орбите медленнее. Неравномерное движение Земли по своей орбите вызывает неравномерное видимое перемещение по небесной сфере Солнца, т. е. в разное время года Солнце перемещается с различной скоростью. Поэтому продолжительность истинных солнечных суток постоянно меняется.

Вследствие неравномерности истинных солнечных суток пользоваться ими в качестве единицы для измерения времени неудобно. По этой причине в повседневной жизни используются не истинные, а **средние солнечные сутки**, продолжительность которых принята постоянной.

Что такое средние солнечные сутки? Вообразим точку, которая в течение года совершает один полный оборот вокруг Земли за такое же время, как и Солнце, но при этом перемещается равномерно и по небесному экватору, а не по эклиптике. Назовем такую воображаемую точку **средним Солнцем**. Верхнюю кульминацию среднего Солнца называют **средним полднем**, а промежуток времени между двумя последовательными средними полднями — **средними солнечными сутками**. Продолжительность их всегда одинакова. Средние солнечные сутки делят на 24 часа. Каждый час среднего солнечного времени в свою очередь делится на 60 минут, а каждая минута — на 60 секунд среднего солнечного времени. За начало средних солнечных суток при-

нимается **средняя полночь**, т. е. момент нижней кульминации воображаемой точки небесной сферы, называемой средним Солнцем. Время, прошедшее от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого его положения на одном и том же географическом меридиане, называется **средним солнечным временем** ( $T_{\text{сп}}$ ).

Разность между средним солнечным временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется **уравнением времени**. Оно обозначается греческой буквой  $\eta$ . Тогда можно записать следующее равенство:

$$\eta = T_{\text{сп}} - T_{\odot}.$$

Величина уравнения времени  $\eta$  обычно приводится в астрономических календарях и ежегодниках. Приблизительно ее можно найти по графику (рис. 5.2), из которого также видно, что четыре раза в год уравнение времени  $\eta$  равно нулю. Это происходит примерно 14 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. Уравнение времени  $\eta$  принимает наибольшие численные значения около 12 февраля ( $\eta = +14$  мин) и 3 ноября ( $\eta = -16$  мин).

**2. Определение географической долготы.** Измерение времени солнечными сутками связано с географическим меридианом. Время, измеренное на данном меридиане, называется **местным временем данного меридиана**, и оно одинаково для всех пунктов, находящихся на нем. Кульминация любой точки небесной сферы происходит в разное время на разных меридианах земного шара. Причем чем восточнее земной меридиан, тем раньше в пунктах, лежащих на нем, происходит кульминация или начинаются сутки. Так как Земля за каждый час поворачивается на  $15^\circ$ , то разность времени двух мест в 1 час соответствует и разности долгот в  $15^\circ$  (в часовой мере 1 час).

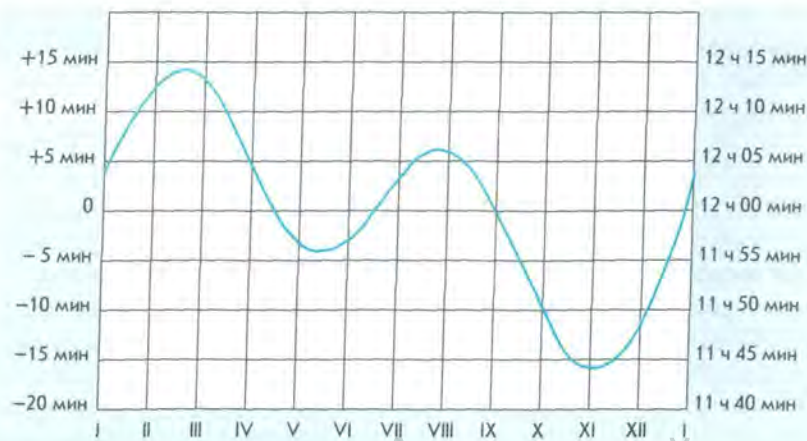


Рис. 5.2. График уравнения времени

Отсюда можно сделать вывод: разность местного времени двух пунктов на Земле численно равна разности значений долготы, выраженных в часовой мере. Для пунктов земной поверхности, расположенных на географических долготах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , получим:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (5.1)$$

За начальный (нулевой) меридиан для отсчета географической долготы принят меридиан, проходящий через Гринвичскую обсерваторию близ Лондона. Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называется **всемирным временем**. Все сигналы точного времени соответствуют минутам и секундам всемирного времени. В астрономических календарях и ежегодниках моменты происхождения большинства явлений указываются по всемирному времени. Моменты этих явлений по местному времени какого-либо пункта легко определить, зная долготу этого пункта от Гринвича.

Если в данный момент на Гринвичском меридиане всемирное время будет  $T_0$ , то в местности с географической долготой  $\lambda$  будет  $T_\lambda$ . Следовательно, формула (5.1) примет вид ( $\lambda_0 = 0$ ):

$$\lambda = T_\lambda - T_0. \quad (5.2)$$

Данная формула позволяет находить географическую долготу по всемирному времени ( $T_0$ ) и местному времени ( $T_\lambda$ ), которое определяется из астрономических наблюдений.

С другой стороны, зная долготу места наблюдения ( $\lambda$ ) и всемирное время ( $T_0$ ), можно определить местное время:

$$T_\lambda = T_0 + \lambda.$$

Различие между местным временем даже не очень далеко расположенных друг от друга населенных пунктов создает неудобства в повседневной жизни. Так, например, местное время в Бресте и Витебске отличается на 26 мин. Жители этих городов, приезжая друг к другу в гости, должны были бы постоянно переводить стрелки часов. Отсюда возникла необходимость введения **поясной системы** счета среднего солнечного времени. Согласно этой системе, весь земной шар разделен на 24 часовых пояса, каждый из которых простирается по долготе на  $15^\circ$  (или 1 ч). Часовой пояс Гринвичского меридиана считается нулевым. Остальным поясам, в направлении от нулевого на восток, присвоены номера от 1 до 23. В пределах одного пояса во всех пунктах в каждый момент поясное время одинаково. В соседних поясах оно отличается ровно на один час. Границы поясов в малонаселенных местах, на морях и океанах проходят по меридианам, отстоящим на  $7,5^\circ$  к востоку и западу от центрального меридиана данного часового пояса. В адуных районах границы поясов для большего



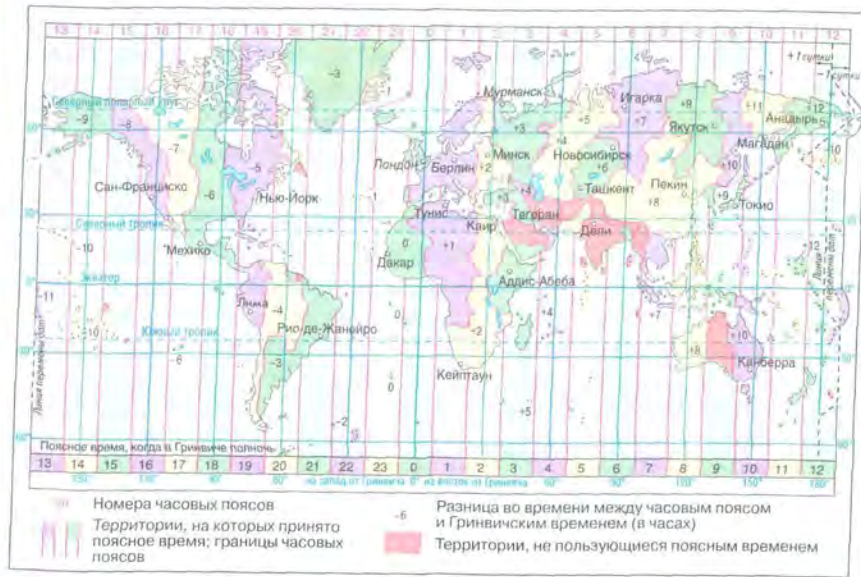


Рис. 5.3. Границы часовых поясов

удобства проведены по государственным и административным границам, горным хребтам, рекам и другим естественным рубежам (рис. 5.3).

Зная всемирное время ( $T_0$ ) и номер пояса данного места ( $n$ ), можно найти поясное время:

$$T_n = T_0 + n. \quad (5.3)$$

Исключив из формул (5.1) и (5.3)  $T_0$ , получим соотношение, позволяющее определять географическую долготу по поясному времени ( $T_n$ ) и времени для местности с географической долготой  $\lambda$  ( $T_\lambda$ ):

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda. \quad (5.4)$$

Система поясного счета времени устраняет неудобства, связанные с использованием как местного, так и всемирного времени. Часы, поставленные по поясному времени, показывают одно и то же количество секунд и минут во всех часовых поясах, но эти показания различаются на целое число часов.

В целях экономии и рационального распределения электроэнергии в течение суток, на летний период в некоторых странах (в том числе и в нашей республике) стрелки часов переводят на час вперед — вводят **летнее время**. Разумеется, осенью часы снова ставят по поясному времени.

Существует граница, открывающая новую дату и день недели. Международная линия перемены дат проходит через Берингов про-

лив между островами Тихого океана от Северного полюса до Южного полюса (меридиан  $180^\circ$ ). Линия перемены дат, так же как и границы часовых поясов, учитывает государственную принадлежность определенных территорий. Например, в Беринговом проливе между островом Ротманова (Россия) и островом Крузенштерна (США), удаленными друг от друга на 12 км, проходит государственная граница и линия перемены дат. На обоих островах часы показывают одинаковое время (они находятся в одном часовом поясе), но календарные даты разнятся на одни сутки (на острове Ротманова дата на сутки впереди).

Более надежным и удобным временем считается атомное время, введенное Международным комитетом мер и весов в 1964 г. За эталон приняты атомные (квантовые) часы. По таким часам **секунда** — это промежуток времени, за который проходит 9 192 631 770 колебаний электромагнитной волны, излучаемой атомом цезия. С 1 января 1972 г. все страны земного шара ведут счет времени по атомным часам.

Атомное время очень удобно для исследования самой Земли, потому что с его помощью можно изучать неравномерности во вращении нашей планеты. Ошибка хода атомных часов невелика — примерно 1 секунда за 50 000 лет.

**3. Календарь.** Календарь — это система счета длительных промежутков времени, в основе которой лежат периодические астрономические явления: смена дня и ночи, изменение лунных фаз, смена времен года. Любая календарная система опирается на три основные единицы измерения времени, а именно: солнечные сутки, синодический (или лунный) месяц и тропический (или солнечный) год.

**Синодический месяц** — это промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны. **Тропический год** — промежуток времени между двумя последовательными прохожденими центра Солнца через точку весеннего равноденствия.

Синодический месяц и тропический год не содержат целого числа средних солнечных суток. Так, средняя продолжительность синодического месяца равна 29,530 588 суток, а продолжительность тропического года — в среднем 365,242 199 суток. Как видим, все три меры времени несоизмеримы. Невозможно подобрать такое целое число тропических лет, в которых содержалось бы целое число синодических месяцев и целое число средних солнечных суток. Стремление согласовать между собой сутки, месяц и год привело к тому, что в разные эпохи у различных народов было создано много разных календарей, которые можно условно разделить на 3 типа: лунные, лунно-солнечные и солнечные.

В лунном календаре год делится на 12 месяцев, содержащих попеременно 30 или 29 суток. Всего в лунном календаре 354 или 355 средних солнечных суток, т. е. он короче солнечного года примерно на 10 суток. Этот календарь получил широкое распространение в мусульманских странах. Из-за того что лунный год имеет меньше дней, чем тропический, у мусульман вообще нет фиксированного начала года, оно постоянно перемещается и выпадает то на весну, то на лето, то на зиму, то на осень.

Лунно-солнечные календари наиболее сложные. В них сумма некоторого количества лунных месяцев приблизительно соответствует продолжительности тропического года. В основе этих календарей лежит соотношение: 19 солнечных лет равны 235 лунным месяцам (с ошибкой менее чем в 1,5 ч). Год делится на 12 месяцев, каждый из которых начинается с новолуния. В настоящее время такая система сохранилась в еврейском календаре. Он содержит 12 или 13 месяцев в году, продолжительность некоторых месяцев каждый год меняется, начало года всегда приходится на осень, но не совпадает с одной и той же датой григорианского календаря, которым мы пользуемся.

Римляне первоначально исчисляли время лунными годами. Новый год начинался 1 марта. До сих пор некоторые месяцы современного календаря называются в соответствии с этой традицией: сентябрь — «седьмой», декабрь — «десятый» и т. д. Впоследствии первый день года был перенесен римлянами на 1 января, так как с 153 г. до н. э. в этот день вступали в должность консулы (рис. 5.4).

Одним из первых солнечных календарей считается египетский, созданный в 4-м тыс. до н. э. По этому календарю год состоял из 12 месяцев по 30 дней в каждом, а в конце года добавлялось еще 5 праздничных дней. Современный календарь берет начало от солнечного римского календаря, появившегося в результате реформы Юлия Цезаря (отсюда происходит и его название — **юлианский календарь**), проведенной 1 января 45 г. до н. э.

Средняя продолжительность года, согласно этому календарю, была равна 365,25 суток, что соответствовало известной в то время длине тропического года. Для удобства три года подряд считали по 365 дней, а на четвертый (високосный) добавляли лишние сутки — 366 дней. Год состоял из 12 месяцев: нечетные месяцы — 31 день, четные — 30 дней; только февраль простого, невисокосного года содержал 28 дней.



Рис. 5.4. Древний римский календарь

Вследствие того что юлианский год длиннее тропического на 11 мин 14 с, за 128 лет накапливалась ошибка в целые сутки, а за 400 лет — около трех суток. С течением времени календарь запаздывал все больше и больше. Поэтому в конце XVI в. весеннее равноденствие наступало не 21, а 11 марта. Ошибка была исправлена в 1582 г., когда глава католической церкви папа Григорий XIII создал специальную комиссию по реформе календаря, передвинувшую счет дней на 10 дней вперед и вернувшую весеннее равноденствие на 21 марта. Исправленный календарь получил название **григорианского календаря** или **нового стиля**. В честь его введения была отчеканена памятная медаль (рис. 5.5).

Високосный год в григорианском календаре — каждый четвертый, за исключением годов с целым числом столетий (например, 1700, 1800). Такой год считается високосным только тогда, когда число сотен делится на 4 без остатка.

В католических странах переход на григорианский календарь произошел в XVI в., в Скандинавии и Великобритании — в XVIII в. Православные страны Греция, Болгария, Румыния, Сербия приняли новый стиль в начале XX в. В России этот календарь был введен со среды 31 января 1918 г. Следующий день уже был 14 февраля, так как к тому времени календарная ошибка между новым и старым стилем достигла 13 дней.

Юлианский календарный год длиннее солнечного почти на 11¼ мин, а григорианский — всего лишь на 26 с. Лишние сутки накопятся только в I в. (пятидесятом веке) н. э., потому что разница в один день набегает за 3300 лет, а для практических надобностей большей точности и не требуется.

Необходимо отметить, что и григорианский календарь не лишен недостатков: неодинаковая продолжительность месяцев, неравенство кварталов, несогласованность чисел месяцев с днями недели. Поэтому появились проекты новых (всемирных) календарей, в которых год более равномерно разделяется на полугодия, кварталы и т. д. Однако существующие политические и экономические отношения между странами не позволяют провести единую реформу и ввести всемирный календарь.

Много вопросов вызывают и привычные названия месяцев. Так, июль назван в память о римском правителе Юлии Цезаре, август — в честь римского императора Октавиана Августа. Остальные месяцы календаря получили свои



Рис. 5.5. Медаль, выпущенная в память о введении григорианского календаря

названия по-разному: например, январь — в честь римского бога Януса, февраль — в честь ежегодных языческих обрядов очищения, март — по имени бога Марса, май — богини Майи, июнь — богини Юноны. Названия «сентябрь», «октябрь», «ноябрь», «декабрь» переводятся с латинского языка соответственно как «седьмой», «восьмой», «девятый», «десятый» и в настоящее время не соответствуют этой нумерации.

Кроме счета месяцев в годах, следует вести счет и самим годам. Для этой цели издревле использовались эры, т. е. длительные промежутки счета лет. **Эрой** называется исходный пункт каждого летоисчисления. У разных народов эры были разные и связывались с какими-либо знаменательными событиями.

Так, в Риме использовалась эра от основания Рима (753 г. до н. э.); в средневековой Европе — эра Диоклетиана, считавшаяся от восшествия на престол императора Диоклетиана (29 августа 284 г. н. э.). Она существовала до XV в. Иудеи отсчитывают начало эры от сотворения мира — от 3761 г. до н. э. Христиане считают, что сотворение мира произошло в 5508 г. до н. э.

Эру от Рождества Христова ввел в 525 г. папский архивариус Дионисий Малый. Он приравнял 248 год эры Диоклетиана к 532 году от рождения Христа. Христианская, или новая, эра (**наша эра**) частично начала применяться с X в., а повсеместно в католических странах лишь с XV в. В России она была введена в 1700 г. указом Петра I, согласно которому после 31 декабря 7208 г. от сотворения мира наступило 1 января 1700 г.

Мусульмане всего мира используют свою эру, которая называется хиджра и ведет счет лет от даты переселения Мухаммеда из Мекки в Медину, что произошло в сентябре 622 г. н. э.

### Вопросы и упражнения

1. Чем отличаются истинные солнечные сутки от средних солнечных суток? 2. Что понимают под средним Солнцем? 3. Что понимают под уравнением времени? Запишите и объясните уравнение времени. 4. Какое время называют местным? Как его определяют? 5. Что понимают под всемирным временем? 6. Как связаны между собой географические долготы места наблюдения с местным временем? 7. Как можно найти поясное время? Как определяется географическая долгота по поясному времени? 8. Что понимают под линией перемены дат? Где она проходит? 9. Назовите календарные системы. На каких принципах они строятся? 10. В чем состоит отличие григорианского календаря от юлианского? 11. Почему нельзя создать абсолютно точный календарь?

## III

### РАЗДЕЛ

## Движение небесных тел

### § 6.

### ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОПЕРНИКА

**1. Видимое движение планет.** В древности были известны 5 похожих на звезды, но более ярких светил, которые хотя и участвуют в суточном вращении небосвода, но совершают и самостоятельные видимые движения. Древние греки называли такие светила **планетами** (по-гречески «планета» означает «блуждающая»). Невооруженным глазом можно увидеть 5 блуждающих светил (планет) — Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн.

Планеты всегда располагаются на небе недалеко от эклиптики, но в отличие от Солнца и Луны через определенные временные интервалы меняют направление своего движения. Они перемещаются между звездами в основном с запада на восток (как Солнце и Луна) — **прямое движение**. Однако каждая планета в определенное время замедляет свое движение, останавливается и начинает двигаться с вос-

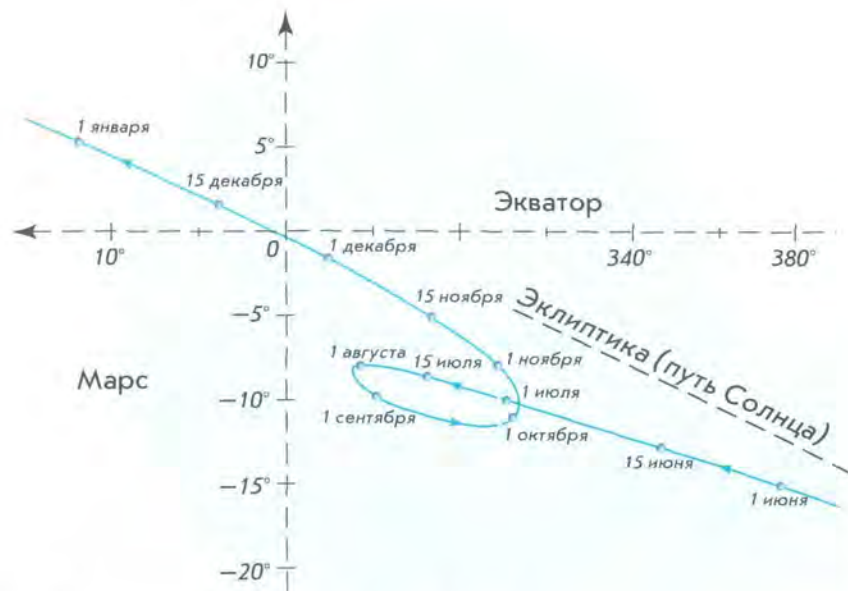


Рис. 6.1. Видимое петлеобразное движение Марса

тока на запад — **попятное движение**. Затем светило опять останавливается и возобновляет прямое движение. Поэтому видимый путь каждой планеты на небосводе — сложная линия с зигзагами и петлями. Эта траектория к тому же меняется от цикла к циклу, в течение которого планета возвращается примерно на одно и то же место среди звезд (рис. 6.1).

Петлеобразное движение планет длительное время оставалось для астрономов непонятным, загадочным и нашло свое правильное и простое объяснение в учении Коперника.

**2. Система мира Птолемея.** Правильное понимание наблюдаемых небесных явлений у людей складывалось веками. Первые модели мироздания предлагались древними греками (Фалес, Пифагор, Филолай, Евдокс). Первоначальные представления греков о хрустальных сферах были весьма упрощенным объяснением небесных явлений. Около 370 г. до н. э. *Евдокс* попытался придумать такую модель, которая описывала бы действительное движение планет. Он рассматривал сферы (рис. 6.2) как геометрические конструкции, а не как реальные небесные тела. Он считал, что существует 27 концентрических сфер, плавно вращающихся одна в другой. Солнце, Луна и планеты имели по несколько сфер, вращающихся с постоянной скоростью вокруг различных осей. Однако с течением времени Евдокс убедился в несовершенстве своей системы,

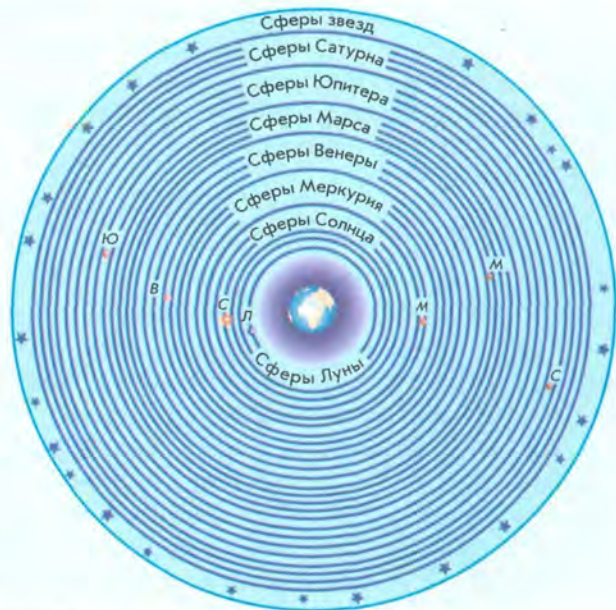


Рис. 6.2. Сферы Евдокса

что подтверждали более точные наблюдения планет. Очевидный выход из положения — увеличение числа сфер — был использован его последователями.

Во II в. н. э. *Клавдий Птолемей* разработал **геоцентрическую систему мира**, позволявшую вычислять положения планет относительно звезд на много лет вперед и предсказывать наступление солнечных и лунных затмений. Используя наблюдения своих предшественников, а также свои собственные, Птолемей построил теорию движения Солнца, Луны, планет и предположил, что все светила движутся вокруг Земли, которая является центром мироздания и имеет шарообразную форму.

Для объяснения сложного петлеобразного движения планет Птолемей ввел комбинацию двух равномерных круговых движений: движение самой планеты по малой окружности (эпицикл) и обращение центра этой окружности вокруг Земли (деферент). При комбинации двух круговых движений получалась эпициклоида, по которой двигалась планета (P) (рис. 6.3).

По мере накопления наблюдений о движениях планет теория Птолемея все больше усложнялась (вводились дополнительные круги с различными радиусами, наклонами, скоростями и т. п.), что вскоре сделало ее слишком громоздкой и неправдоподобной.



Рис. 6.3. Траектория планеты согласно теории Птолемея

**3. Система мира Коперника.** В XVI в. польский ученый Николай Коперник, отбросив догматическое представление о неподвижности Земли, поставил ее в число рядовых планет. Коперник указал, что Земля, занимая третье место от Солнца, так же, как и другие планеты, движется в пространстве вокруг Солнца и одновременно вращается вокруг своей оси. **Гелиоцентрическая система** Коперника очень просто объясняла петлеобразное движение планет. На рис. 6.4 показано движение Марса на небесной сфере, наблюдаемое с Земли. Одинаковыми цифрами отмечены положения Марса, Земли и точек траектории Марса на небосводе в одни и те же моменты времени.

Геоцентрические системы Евдокса и Птолемея не позволяли измерить расстояние до планет. Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность рассчитать пропорции Солнечной системы, пользуясь радиусом земной орбиты как астрономической единицей длины.

Главное научное сочинение Коперника «Об обращениях небесных сфер», написание которого он затратил более 20 лет упорного труда, было опубликовано в мае 1543 г., незадолго до смерти ученого. Революционность труда Коперника состоит в том, что в нем с новым взглядом на строение Солнечной системы неразрывно связан вопрос о положении Земли, а с ней и человека во Вселенной. Со временем учение Коперника заставило освободить науку

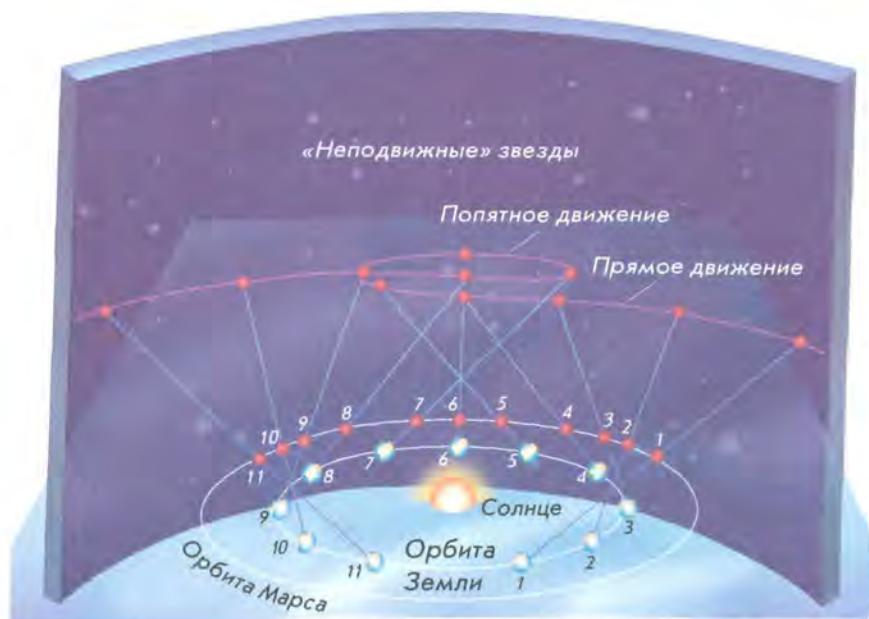


Рис. 6.4. Объяснение петлеобразного движения планет исходя из учения Коперника

от устаревших и схоластических традиций, тормозивших ее развитие. Однако сам великий астроном оставался в плену некоторых предрассудков. Например, Коперник так и не смог отказаться от представления, что планеты движутся равномерно по круговым орбитам. Поэтому его модель Вселенной также содержала множество сфер — эпициклов и деферентов.

Великий итальянский ученый Галилео Галилей подтвердил учение Коперника своими открытиями, сделанными при помощи телескопа. Он обнаружил, что на Луне находятся горы и кратеры, Венера имеет фазы, у Юпитера есть четыре спутника и что Млечный Путь не просто сияние на небе, а распадается на отдельные слабые звезды, недоступные невооруженному глазу.

Иоганн Кеплер развил учение Коперника, открыв законы движения планет, и доказал на основе фактов, что планеты движутся по эллипсам и неравномерно. Исаак Ньютон опубликовал в 1687 г. открытый им закон всемирного тяготения, который позволил выразить теорию движения планет в виде формул и отказаться навсегда от громоздких геометрических построений.

**4. Конфигурации и условия видимости планет.** Под конфигурациями планет понимают характерные взаимные расположения планет, Земли и Солнца. Конфигурации различны для **нижних** планет (орбиты которых находятся ближе к Солнцу, чем орбита Земли) и **верхних** планет (орбиты которых расположены за орбитой Земли).

Для нижних планет выделяют **соединения** и **элонгации** (рис. 6.5).

В нижнем соединении планета ближе всего к Земле, а в верхнем соединении — дальше всего от нее. При элонгациях угол между направлениями с Земли на Солнце и на нижнюю планету, не превышая какой-то определенной величины, остается острым. Из-за эллиптичности планетных орбит наибольшие элонгации не имеют постоянного значения. У Венеры они заключены в пределах от 45 до 48°, а у Меркурия — от 18 до 28°. Обе планеты не отходят далеко от Солнца и поэтому ночью не видны. Продолжительность их утренней или вечерней видимости не превышает четырех часов для Венеры и полутора часов для Меркурия. Меркурий иногда совсем не виден, так как восходит и заходит в светлое время суток.

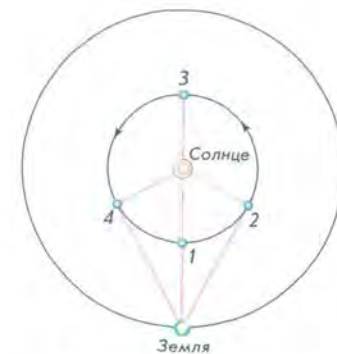


Рис. 6.5. Схема конфигураций планет: 1 — нижнее соединение; 2 — наибольшая западная элонгация; 3 — верхнее соединение; 4 — наибольшая восточная элонгация

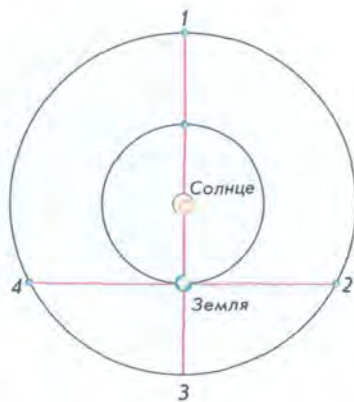


Рис. 6.6. Схема конфигураций верхних планет: 1 — соединение; 2 — западная квадратура; 3 — противостояние; 4 — восточная квадратура

Для верхних планет (рис. 6.6) характерны другие конфигурации.

Если Земля оказывается между планетой и Солнцем, то такая конфигурация называется **противостоянием**. Эта конфигурация наиболее благоприятна для наблюдений планеты, так как в это время планета находится ближе всего к Земле, повернута к ней своим освещенным полушарием и, находясь на небе в противоположном Солнцу месте, бывает в верхней кульминации около полуночи. Следует отметить, что у верхних планет нижнего соединения не бывает, поэтому не имеет

смысла единственное соединение называть верхним.

Если угол между направлениями с Земли на верхнюю планету и на Солнце составляет  $90^\circ$ , то говорят, что планета находится в **квадратуре**. Различают западную и восточную квадратуры. В конфигурации западной квадратуры планета восходит около полуночи, а в восточной — заходит около полуночи. Моменты конфигураций планет и условия их видимости ежегодно публикуются в астрономических справочниках и календарях.

### 5. Синодические и сидерические периоды обращения планет.

Промежуток времени, в течение которого планета совершает полный оборот вокруг Солнца по орбите относительно звезд, называется **звездным** или **сидерическим периодом обращения планеты**.

Одноименные конфигурации планет наступают в разных точках их орбит. Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями планет называется **синодическим периодом** обращения планеты. Он отличается от звездного периода. Слово «синодический» происходит от греческого «синодос» — соединение, т. е. синодический период — это период между двумя последовательными соединениями (противостояниями).

Скорость движения планет тем больше, чем они ближе к Солнцу. Поэтому синодический период верхней планеты — это промежуток времени, по истечении которого Земля обгоняет планету на  $360^\circ$  при их совместном движении вокруг Солнца. Для нижних планет, обращающихся быстрее, Земля будет отставать на  $360^\circ$ .

Теория Коперника позволяет установить взаимосвязь синодического и сидерического периодов обращения планет.

Пусть  $T$  — сидерический (звездный) период обращения планеты, а  $T_0$  — сидерический период обращения Земли (звездный год);  $S$  — синодический период обращения планеты. Среднее значение дуги, которую проходит планета за одни сутки, называется средним движением ( $n$ ) и будет равно  $n = \frac{360^\circ}{T}$ , а среднее движение Земли —  $n_0 = \frac{360^\circ}{T_0}$ . У нижних планет  $T < T_0$  и  $n > n_0$ . Одноименные соединения таких планет (например, нижние соединения — рис. 6.7) наступают через синодический период обращения  $S$ , за который Земля проходит дугу

$$L_0 = n_0 S = \frac{360^\circ}{T_0} S, \quad (6.1)$$

а планета, забегая вперед, совершает один оборот вокруг Солнца и догоняет Землю, проходя угловой путь  $L = 360^\circ + L_0$ , равный

$$L = nS = \frac{360^\circ}{T} S. \quad (6.2)$$

Вычитая равенство (6.1) из (6.2), получим уравнение синодического движения для нижних планет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}. \quad (6.3)$$

Для верхних планет уравнение синодического движения примет вид:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}, \quad (6.4)$$

так как  $T > T_0$  и  $n < n_0$ .

Уравнения (6.3) и (6.4) дают средние значения синодических периодов обращения планет. С помощью этих уравнений по наблюдаемому синодическому периоду обращения планеты легко подсчитать сидерический период ее обращения вокруг Солнца.

### Вопросы и упражнения

1. Чем отличаются прямое и попятное движения планет?
2. Наблюдается ли у Луны попятное движение?
3. Почему системы мира древних гре-



Рис. 6.7. Синодический период последовательных нижних соединений (1 и 2) нижней планеты

ков и Птолемея оказались несостоятельными, хотя частично и давали объяснение небесным явлениям? 4. В чем заключается революционность научных взглядов Коперника? 5. Как, исходя из гелиоцентрической системы мира, объясняется петлеобразное движение планет? 6. Каким образом Галилей подтвердил учение Коперника? 7. Что понимают под конфигурациями планет? Какие конфигурации различают? Опишите их. 8. Дайте определения синодическому и сидерическому периодам обращения планеты. В чем состоит их отличие? 9. Звездный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния? 10. Какова должна быть продолжительность звездного и синодического периодов обращения планеты в случае их равенства?

### III § 7. ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ЛУНЫ

**1. Видимое годичное движение Солнца.** По непрерывно изменяющимся координатам Солнца  $\delta$  и  $\alpha$  на небесной сфере можно отметить большой круг, представляющий видимый путь центра солнечного диска в течение года. Этот круг древние греки назвали эклиптической. Поскольку годичное движение Солнца отражает реальное обращение Земли по орбите, эклиптика является следом от сечения небесной сферы плоскостью, параллельной плоскости земной орбиты. Эта плоскость называется **плоскостью эклиптики**.

Кроме двух равноденственных точек, о которых мы уже говорили в § 2, на эклиптике выделяются две промежуточные между ними и противоположные друг другу точки, в которых склонение Солнца бывает наибольшим по абсолютной величине. В **точке летнего солнцестояния**, которая обозначается значком ☊, Солнце имеет максимальное склонение  $\delta = +23^{\circ}27'$  (около 22 июня). В **точке зимнего солнцестояния**, обозначаемой значком ☋, Солнце имеет минимальное склонение  $\delta = -23^{\circ}27'$  (около 22 декабря).

Созвездия, через которые проходит эклиптика, называются **эклиптическими созвездиями**. Таких созвездий 13. Из них 12 (табл. 7.1) совпадают по названиям с зодиакальными знаками (от греческого слова «зоон» — животное). Созвездие Змееносца, являясь эклиптическим, однако, не входит в число знаков зодиака. Это связано с тем, что представление о знаках зодиака сложилось несколько тысяч лет назад, когда эклиптика еще не проходила по данному созвездию.

В Древнем Междуречье возникло деление пояса зодиака на 12 частей, которое переняли греки. Жители Междуречья делили год на двенадцать солнечных месяцев равной длины, а зодиакальный круг — на четыре части, соответствующие четырем сезонам (по три

Таблица 7.1

#### ЗОДИАКАЛЬНЫЕ СОЗВЕЗДИЯ. ИХ ЗНАКИ И ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ СОЛНЦА В ЗНАКАХ ЗОДИАКА

♈ — Овен (21 марта — 19 апреля)	♎ — Весы (23 сентября — 23 октября)
♉ — Телец (20 апреля — 20 мая)	♏ — Скорпион (24 октября — 21 ноября)
♊ — Близнецы (21 мая — 21 июня)	♐ — Стрелец (22 ноября — 21 декабря)
♋ — Рак (22 июня — 22 июля)	♑ — Козерог (22 декабря — 19 января)
♌ — Лев (23 июля — 22 августа)	♒ — Водолей (20 января — 18 февраля)
♍ — Дева (23 августа — 22 сентября)	♓ — Рыбы (19 февраля — 20 марта)

месяца в каждом). Следует заметить, что символика знаков зодиака до сих пор не расшифрована.

Первоначально каждый конкретный знак зодиака связывался с определенными неподвижными звездами. Это объясняется тем, что знаки зодиака были названы в честь реальных созвездий, располагавшихся в их границах. Позднее сложилось представление о знаках зодиака как о двенадцати равных частях эклиптики. Начало отсчета знаков установлено от точки весеннего равноденствия ♈. В древности точных границ созвездий не существовало, и знаки соответствовали созвездиям символически. В настоящее время зодиакальные знаки и созвездия не совпадают. Например, точка весеннего равноденствия и зодиакальный знак Овна находятся в созвездии Рыб.

**2. Суточное движение Солнца в Северном полушарии.** В § 2 мы уже вели речь о годичном движении Солнца среди звезд по воображаемой линии, называемой эклиптикой. Всю эклиптику ( $360^{\circ}$ ) Солнце проходит за один год, однако это движение кажущееся, так как происходит вследствие обращения Земли вокруг Солнца. Точно так же кажущимся является суточное движение Солнца и других небесных светил с востока на запад, так как это происходит по причине собственного вращения Земли с запада на восток. Напомним, что видимое движение светил (в том числе и Солнца), происходящее из-за собственного вращения Земли вокруг оси, называется **суточным движением**, а период вращения Земли вокруг своей оси — **сутками**.

Рассмотрим суточное движение Солнца на различных широтах.

В средних широтах Солнце восходит всегда в восточной стороне неба, постепенно поднимается над горизонтом, в полдень достигает наивысшего положения на небе, затем начинает опускаться к горизонту и заходит в западной части неба. В Северном полушарии это

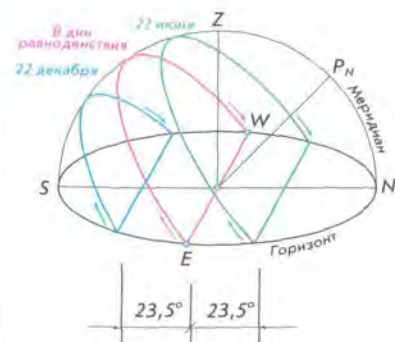


Рис. 7.1. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях в средних географических широтах

поллярная ночь. На экваторе Солнце, как и другие светила, восходит и заходит перпендикулярно плоскости истинного горизонта и видно в течение полусуток.

**3. Изменение суточного пути Солнца в течение года.** Изменение суточного пути Солнца над горизонтом в разные времена года для средних географических широт Северного полушария показано на рис. 7.1. Определяя в течение года высоту Солнца в полдень, можно заметить, что дважды в году оно бывает на небесном экваторе. Это происходит в дни весеннего (около 21 марта) и осеннего (около 23 сентября) равноденствий. Плоскость горизонта делит небесный экватор пополам. Поэтому в дни равноденствия пути Солнца над и под горизонтом равны; соответственно, продолжительность дня

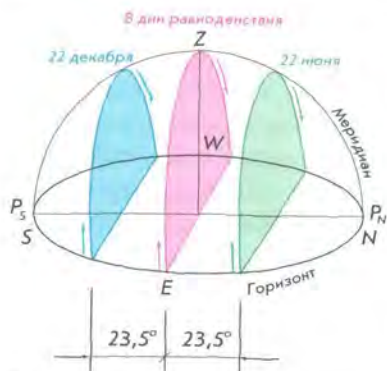


Рис. 7.2. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях на экваторе Земли

движение происходит слева направо, а в Южном — справа налево. Наблюдатель в Северном полушарии Земли при этом будет видеть Солнце на юге, а находящийся в Южном полушарии — на севере. Дневной путь Солнца на небе симметричен относительно направления север — юг.

За полярным кругом, где  $|\varphi| > 66,5^\circ$ , суточный путь Солнца практически параллелен горизонту. На полюсе Солнце в течение полугода не заходит, описывая круги над горизонтом. Это полярный день. Затем на полгода Солнце заходит и наступает полярная ночь.

и ночи одинакова. Самый короткий день выпадает на 22 декабря, а самый длинный — на 22 июня. Большой круг эклиптики пересекает большой круг небесного экватора под углом  $23,5^\circ$  (точнее,  $23^\circ 26'$ ). На столько же Солнце бывает ниже экватора в день зимнего солнцестояния — 22 декабря. В этот день высота Солнца в верхней кульминации уменьшается по сравнению с 22 июня почти на  $47^\circ$ .

Для наблюдателей, находящихся на земном экваторе, суточные пути Солнца над горизонтом в течение года показаны на рис. 7.2.

Ежедневно изменяющуюся полуденную высоту  $h$  Солнца можно определить по формуле:  $h = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot$ , где  $\varphi$  — географическая широта местности,  $\delta_\odot$  — склонение Солнца. С изменением  $\delta_\odot$  меняются также точки восхода и захода Солнца.

**4. Видимое движение и фазы Луны.** Луна — естественный спутник Земли. Это ближайшее к Земле небесное тело, оно светит отраженным солнечным светом. Луна движется вокруг Земли приблизительно по эллиптической орбите в ту же сторону, в какую Земля вращается вокруг своей оси. Поэтому мы видим Луну перемещающейся среди звезд навстречу вращению неба. Для земного наблюдателя за сутки Луна перемещается на  $13,2^\circ$ .

Полный оборот по орбите вокруг Земли Луна совершает за 27,3 суток (**сидерический месяц**). И за такое же время она делает один оборот вокруг своей оси, поэтому к Земле всегда обращено одно и то же полушарие Луны.

Движение Луны вокруг Земли очень сложное, и его изучение составляет одну из труднейших задач небесной механики. Видимое движение Луны сопровождается непрерывным изменением ее вида — сменой фаз. Происходит это оттого, что Луна занимает различные положения относительно освещающего ее Солнца и Земли (рис. 7.3). **Лунной фазой** называется видимая в солнечном освещении часть лунного диска.

Рассмотрим фазы Луны начиная с **новолуния**. Эта фаза наступает, когда Луна проходит между Солнцем и Землей и обращена к нам своей темной стороной (см. на рис. 7.3 положение 1). Луна совсем не видна с Земли.

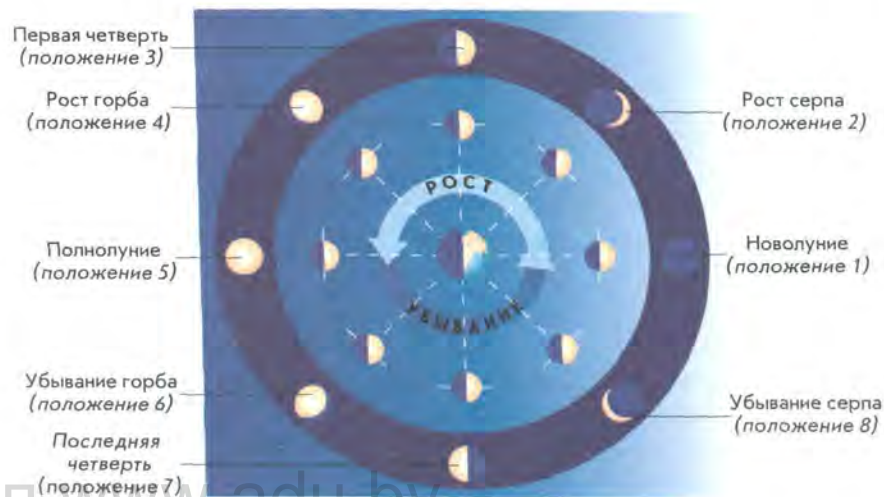


Рис. 7.3. Смена лунных фаз



Спустя один-два дня в западной части неба появляется и продолжает расти узкий яркий серп «молодой» Луны (положение 2). Иногда на фоне неба заметна (благодаря тусклому сероватому свечению — так называемый **пепельный свет** Луны) и остальная часть лунного диска. Явление пепельного света объясняется тем, что лунный серп освещается непосредственно Солнцем, а остальная лунная поверхность — рассеянным солнечным светом, отраженным Землей. Спустя 7 суток уже будет видна вся правая половина лунного диска — наступает **фаза первой четверти** (положение 3). В этой фазе Луна восходит днем, к вечеру видна в южной области неба и заходит ночью. Далее фаза увеличивается (положение 4), и через 14—15 суток после новолуния Луна приходит в противостояние с Солнцем (положение 5). Ее фаза становится полной, наступает **полнолуние**. Солнечные лучи освещают все лунное полушарие, обращенное к Земле. Полная Луна восходит при заходе Солнца, заходит при его восходе, а в середине ночи видна в южной стороне неба.

После полнолуния Луна постепенно приближается к Солнцу с запада и освещается им слева (положение 6). Примерно через неделю наступает фаза третьей, или **последней, четверти** (положение 7). При этом Луна восходит около полуночи, к восходу Солнца оказывается в южной стороне неба и заходит днем. При дальнейшем сближении спутника Земли с Солнцем убывающие фазы Луны становятся серповидными (положение 8). Луна видна только под утро, незадолго до восхода Солнца, а заходит в светлое время суток, перед заходом Солнца. Узкий серп Луны на этот раз выпуклостью обращен к востоку. Затем снова наступает новолуние, и Луна перестает быть видимой на небе.

От одного новолуния до следующего проходит около 29,5 суток. Этот период смены лунных фаз называют **синодическим месяцем**. Синодический (или лунный) месяц продолжительнее сидерического (или звездного) месяца, так как и Луна, и Земля движутся в пространстве в прямом направлении.

**5. Солнечные и лунные затмения.** В своем движении Луна часто заслоняет (или, как говорят астрономы, покрывает) звезды зодиакальных созвездий. Значительно реже происходят покрытия Луной планет и Солнца. Покрытие Солнца Луной называется **солнечным затмением**.

Солнечное затмение имеет различный вид для разных точек земной поверхности. Так как диаметр Луны в 400 раз меньше диаметра Солнца и она находится примерно в 400 раз ближе к Земле, на небе Солнце и Луна кажутся дисками одинакового размера. Поэтому при полном солнечном затмении Луна может целиком покрыть яркую поверхность Солнца, оставляя при этом открытой солнечную атмосферу (см. рис. 20.3 и 20.7).

Рассмотрим схему полного солнечного затмения (рис. 7.4). Проходя между Солнцем и Землей, маленькая Луна не может полностью затенить Землю. Диск Солнца будет целиком закрыт только для наблюдателя А, находящегося внутри конуса лунной тени, максимальный диаметр которой на поверхности Земли не превышает 270 км. Только отсюда, с этой сравнительно узкой области земной поверхности, куда падает тень от Луны, будет видно полное солнечное затмение. Там же, куда падает полутень от Луны, внутри так называемого конуса лунной полутени, будет видно (для наблюдателей В и С) **частное солнечное затмение**.

Если в момент затмения Луна, перемещаясь по своей эллиптической орбите, будет находиться на значительном удалении от Земли, то видимый диск Луны окажется слишком малым, чтобы полностью покрыть Солнце. Тогда наблюдатель А (рис. 7.5) сможет видеть вокруг темного диска Луны сияющий ободок солнечного диска. Это — **кольцеобразное затмение**. Для наблюдателей В и С такое солнечное затмение будет частным.

За пределами лунной полутени затмения вообще не наблюдаются. Солнечное затмение видно не на всей поверхности Земли, а только там, где пробегает тень и полутень Луны. Путь лунной тени по земной поверхности называется **полосой полного солнечного затмения**.

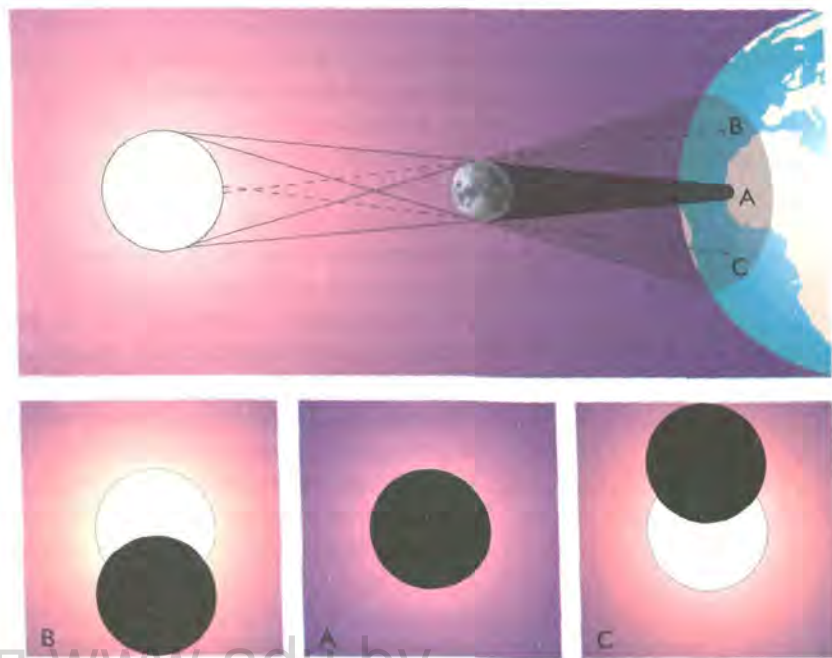


Рис. 7.4. Схема полного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

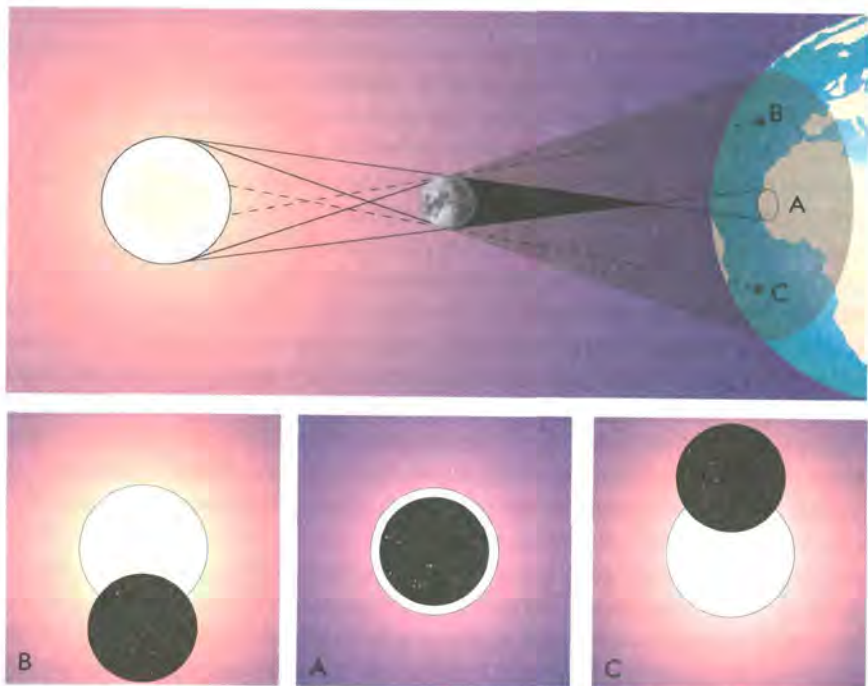


Рис. 7.5. Схема кольцеобразного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

Ежегодно бывает от двух до пяти солнечных затмений, в последнем случае — обязательно частных. В среднем в одном и том же месте Земли полное солнечное затмение можно наблюдать чрезвычайно редко — лишь раз в 200—300 лет, а длительность полной или кольцеобразной фазы составляет всего лишь 2—3 мин. Продолжительность полного солнечного затмения не превышает 7 мин 40 с. Поэтому астрономы тщательно готовятся к наблюдениям затмения, чтобы успеть изучить внешние оболочки Солнца.

**Лунные затмения** происходят тогда, когда Луна попадает в земную тень, которая также имеет форму конуса и окружена полутенью (рис. 7.6). При частичном погружении Луны в земную тень лунное затмение называется **частным теневым**, а при полном погружении — **полным теневым затмением**. Так как земная тень направлена в сторону, противоположную Солнцу, Луна может пройти сквозь нее только в полнолуние. Луна постепенно погружается в земную тень своим левым краем. При полном затмении она становится бурого или темно-красного цвета (рис. 7.7), поскольку солнечный свет, преломляясь в земной атмосфере, освещает Луну преимущественно красными лучами, которые менее всего рассеиваются и ослабляются земной атмосферой.

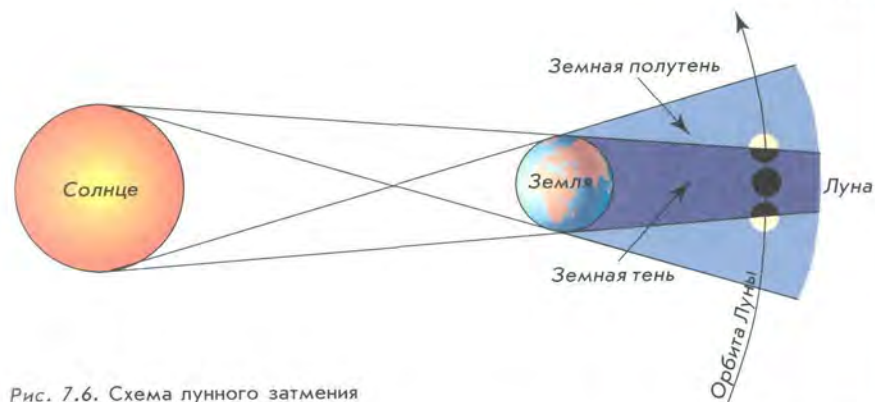


Рис. 7.6. Схема лунного затмения

Как правило, ежегодно происходит одно-два лунных затмения, но выдаются годы, когда затмений совсем не бывает. Лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли, где в это время Луна находится над горизонтом. Поэтому в каждой данной местности они наблюдаются чаще солнечных затмений, хотя происходят примерно в 1,5 раза реже. Максимальная продолжительность лунного затмения достигает 1 ч 40 мин.

Еще в VI в. до н. э. было установлено, что примерно через 18 лет и 11,3 суток все затмения повторяются в одной и той же последовательности. Этот период назвали **саросом** (в переводе с египетского — период, повторение). На протяжении сароса в среднем происходит 70—71 затмение, из которых 42—43 солнечных и 28 лунных.

Зная продолжительность сароса, можно приблизительно предсказывать время наступления затмений. В наше время солнечные и лунные затмения с большой точностью вычислены на тысячи лет назад и сотни лет вперед (см. Приложение 5). Астрономы неоднократно уточняли даты исторических событий, которые, по свидетельству летописей, совпадали с такими неординарными природными явлениями.

Почему солнечные и лунные затмения бывают не каждый месяц? С чем связано явление сароса? Казалось бы (см. рис. 7.4—7.6), затмения должны происходить при каждом обороте Луны вокруг Земли. На самом деле такого не случается, так как плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью



Рис. 7.7. Вид Луны при полном лунном затмении



Рис. 7.8. Плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики

эклиптики. Видимый путь движения Луны на небе пересекается под углом  $5^{\circ}09'$  с эклиптикой — видимым путем движения Солнца на фоне звезд. Поэтому Луна во время новолуния или полнолуния может находиться далеко от плоскости эклиптики, и тогда ее диск проходит выше или ниже диска Солнца или конуса тени Земли. Затмения же наступают только тогда, когда Луна находится вблизи точек пересечения лунной орбиты с эклиптикой (рис. 7.8).

### Вопросы и упражнения

1. Каковы особенности суточного движения Солнца на различных широтах? 2. Может ли у нас в стране Солнце наблюдаться в зените? Почему? 3. Почему Луна обращена к Земле всегда одной и той же своей стороной? 4. В чем состоит отличие сидерического и синодического месяцев? Чем обусловлена их различная продолжительность? 5. Что понимают под лунной фазой? Опишите фазы Луны. 6. Серп Луны обращен выпуклостью вправо и близок к горизонту. В какой стороне горизонта он находится? 7. Почему происходят солнечные и лунные затмения? 8. Охарактеризуйте полные, частные и кольцеобразные солнечные затмения. 9. Как отличить фазу затмения Луны от одной из ее обычных фаз? 10. Почему солнечные затмения происходят не каждое новолуние, а лунные — не каждое полнолуние? 11. Что такое сарос? Какова его периодичность?

## § 8. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

**1. Первый закон Кеплера.** До конца XVI в. ученым с помощью существовавших в то время теорий не удавалось точно рассчитать относительное положение планет на несколько лет вперед. Теоретические выкладки давали заметное расхождение с результатами наблюдений. Причина состояла в ошибочном предположении, что планеты равномерно движутся по строго круговым орбитам вокруг Солнца. Кинематические законы движения планет были открыты лишь в начале XVII в. австрийским астрономом и математиком Иоганном Кеплером. Он впервые разрушил укоренившийся предрассудок о «совершенности» орбит планет, показав их эллиптическую.

Кеплер установил, что *планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце*. Данная закономерность получила название **первого закона Кеплера**.

Отрезок  $AB$  (рис. 8.1) называется **большой осью**, а отрезок  $CD$  — **малой осью** эллипса. Отрезки  $AO = OB = a$ ,  $CO = OD = b$  называются соответственно **большой и малой полуосями** эллипса. Отношение

$$e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a} \quad (8.1)$$

называется **эксцентриситетом** эллипса. Чем больше эксцентриситет эллипса, тем больше смещены фокусы по отношению к центру и тем больше будет разность между большой и малой полуосями. То есть эксцентриситет служит мерой «сплюснутости» эллипса.

Для эллипса  $0 < e < 1$ . Отметим, что при  $e = 0$  можно рассматривать окружность как частный вид эллипса ( $b = a$ ).

Допустим, что Солнце находится в фокусе  $F_1$ , тогда ближайшую к Солнцу точку ( $A$ ) орбиты планеты называют **перигелием**, а наиболее удаленную ( $B$ ) — **афелием**. Обозначим  $AF_1 = q$  — **перигелийное расстояние**, а  $F_1B = Q$  — **афелийное расстояние**. Из рис. 8.1 следует, что  $q + OF_1 = a$ ;  $OF_1 = a \cdot e$ , тогда

$$q = a - a \cdot e = a(1 - e), \quad (8.2)$$

$$Q = a(1 + e). \quad (8.3)$$

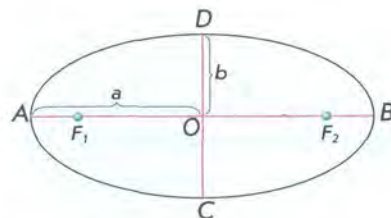


Рис. 8.1. Элементы эллипса

У земной орбиты  $e = 0,017$ . Земля находится в перигелии 2 января, тогда перигелийное расстояние равно 147 млн км, а в афелии — 3 июня, когда афелийное расстояние равно 152 млн км.

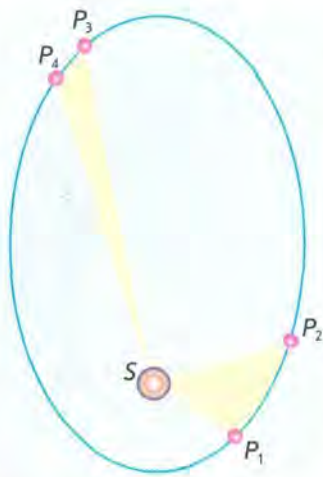


Рис. 8.2. Иллюстрация второго закона Кеплера

**2. Второй закон Кеплера.** Изучая движение Марса в пространстве, Кеплер заметил, что планета движется по орбите неравномерно — зимой быстрее, чем летом. Он стал искать закономерность, по которой происходит изменение скорости Марса, и выдвинул гипотезу, что скорость должна быть обратно пропорциональна расстоянию от Марса до Солнца. Для перигелия и афелия предположение подтвердилось. Тогда Кеплер условно разбил орбиту Марса на 360 частей и начал проверять свою гипотезу для различных ее участков. Наблюдения и расчеты показали, что за равные промежутки времени Марс проходит равные площади секторов орбиты.

Современная формулировка этой зависимости, распространенная на все планеты и носящая название **второго закона Кеплера**, заключается в следующем: *радиус-вектор планет (линия, соединяющая центр Солнца и центр планеты) за равные промежутки времени описывает равные площади.*

Второй закон Кеплера, или закон площадей, проиллюстрирован на рис. 8.2. При движении планеты ( $P$ ) вокруг Солнца ( $S$ ) ее радиус-вектор за равные промежутки времени описывает равные по площади фигуры —  $P_1SP_2$  и  $P_3SP_4$ . Таким образом, скорость движения планеты по орбите меняется, принимая максимальное значение в перигелии и минимальное в афелии.

**3. Третий закон Кеплера.** Сравнивая размеры орбит и периоды обращения планет вокруг Солнца, Кеплер обнаружил, что квадраты периодов обращения планет пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца (или отношение  $r^3/T^2$  одинаково для всех планет).

Например, среднее расстояние Земли от Солнца относится к среднему расстоянию Марса от Солнца как 1:1,52 (по данным Кеплера), а их периоды обращения вокруг Солнца — как 1:1,88. Возведя первое отношение в куб, а второе отношение в квадрат, получим почти равные величины:  $1/3,53$  и  $1/3,54$ .

**Третий закон Кеплера** формулируется следующим образом: *квадраты сидерических периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad (8.4)$$

Если в этой формуле принять сидерический период обращения Земли вокруг Солнца равным 1 (один год) и большую полуось земной орбиты равной 1 (одна астрономическая единица), то формула (8.5) примет вид:

$$T = \sqrt{a^3} \quad (8.5)$$

На основе открытых законов Кеплер после многолетних вычислений составил в 1627 г. таблицы, по которым можно было найти на небе положение каждой планеты в любой момент времени.

### Вопросы и упражнения

1. Сформулируйте законы, лежащие в основе небесной механики.
2. У Земли эксцентриситет орбиты равен 0,017, а у Плутона — 0,25. Орбита какой из планет более вытянута?
3. Меняется ли скорость планеты, движущейся по круговой орбите?
4. Считая орбиты Земли и Марса круговыми, рассчитайте продолжительность года на Марсе. При решении задачи следует учесть, что Марс находится дальше от Солнца, чем Земля, в 1,5 раза.
5. Определите период обращения искусственного спутника Земли, если наивысшая точка его орбиты над Землей 5000 км, а наинизшая — 300 км. Землю считайте шаром радиусом 6370 км.

## § 9.

### ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА

**1. Небесная механика.** После появления работ Коперника, Галилея и Кеплера к середине XVII в. завершился описательный (или геометрический) период изучения движения планет. Была выявлена кинематика их движений, но оставалось неясным, почему планеты движутся? Что заставляет их обращаться вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет? Чем объясняется устойчивость планетной системы?

Все материальные тела, если они ничем не поддерживаются, падают под действием силы тяжести на поверхность Земли. До тех пор, пока Земля считалась чем-то исключительным и единственным в мире, сила тяжести рассматривалась только как земное явление, не имеющее отношения ко Вселенной. Однако открытия Коперника и его последователей показали, что Земля — это рядовая планета, которая движется вокруг Солнца, как и другие планеты. Поэтому появилось предположение, что сила тяжести присуща не только Земле, но и другим небесным телам. На материальные тела, нахо-

дящиеся над поверхностью планет (например, Луны или Марса), действует сила тяжести, которая направлена к центру планеты так же, как на Земле. Таким образом был поставлен вопрос о взаимодействии тел. На основе опытных данных Ньютон открыл три основных закона движения тел (закон инерции, закон динамики материальной точки, закон действия и противодействия). На основании третьего закона Кеплера и закона динамики Ньютон строго математически обосновал **закон всемирного тяготения**, который гласит: *два тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.*

Математическое выражение закона всемирного тяготения имеет вид:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (9.1)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы двух тел, притягивающихся друг к другу,  $r$  — расстояние между ними. Коэффициент пропорциональности  $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  называют **постоянной тяготения** или **гравитационной постоянной**, он является одной из основных физических констант.

Формула (9.1) справедлива для тел (материальных точек), размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними. Два протяженных шарообразных тела со сферически-симметричным распределением масс притягиваются друг к другу так же, как и материальные точки, т. е. как если бы их массы были сосредоточены в центре тел. А расстояние  $r$  следует отсчитывать от центров этих тел.

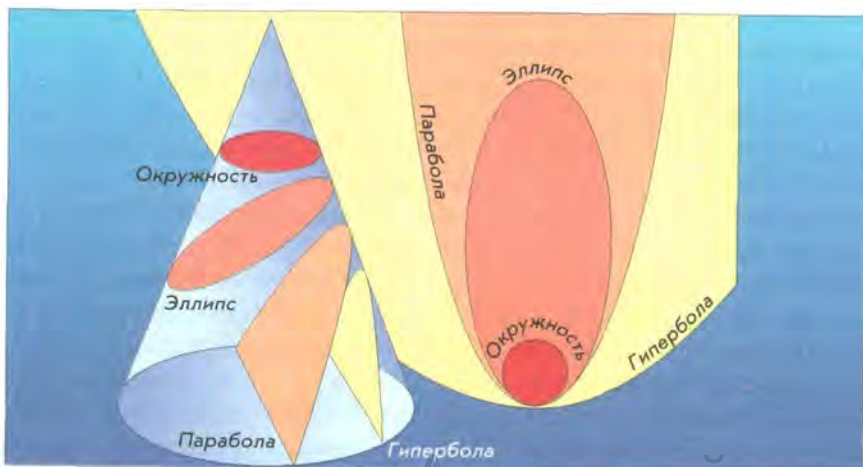


Рис. 9.1. Получение орбитальных кривых при сечении конуса плоскостью

На основании закона всемирного тяготения и законов механики Ньютон математически доказал, что под действием силы тяготения (гравитационной силы) тело массой  $m$  будет двигаться относительно тела массой  $M$  по одной из кривых: по эллипсу, параболе или гиперболу.

Таким образом, Ньютон уточнил и обобщил первый закон Кеплера, который в новой формулировке гласит: *под действием тяготения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — эллипсу, окружности, параболе или гиперболу (рис. 9.1). При движении по эллипсу притягивающее тело всегда находится в одном из фокусов.*

Наука, основывающаяся на законах Кеплера и Ньютона и изучающая движение небесных тел, называется **небесной механикой**. Небесная механика исследует движение небесных тел с учетом создаваемых ими полей тяготения. Основная задача данной науки заключается в том, чтобы, зная начальное положение тела (материальной точки) и его начальную скорость, определить его положение в любой другой момент времени.

**2. Возмущения в движении небесных тел.** Движение тел, строго подчиняющееся законам Кеплера, называется **невозмущенным**. Такая идеализация предполагает учет взаимодействия только двух тел и описывает, например, движение планеты под действием только притяжения Солнца. Задача двух тел полностью была решена Ньютоном (закон всемирного тяготения).

Истинные же движения тел Солнечной системы значительно сложнее. Это объясняется тем, что планеты не только притягиваются Солнцем, но и взаимодействуют между собой. Отклонения в движениях тел от законов Кеплера называются **возмущениями**, а реальное движение тел — **возмущенным движением**.

Возмущения тел Солнечной системы имеют очень сложный характер. Они невелики, так как массы отдельных планет по сравнению с массой Солнца очень малы.

В качестве примера рассмотрим, как изменяются возмущающие силы, действующие на Землю в поле тяготения Юпитера, в течение одного года. Земля за это время делает один оборот, а Юпитер — лишь 1/12 оборота вокруг Солнца (рис. 9.2). Стрелками показаны направления возмущающих сил через каждую четверть года. Следовательно, в положении 2 скорость Земли будет замедляться

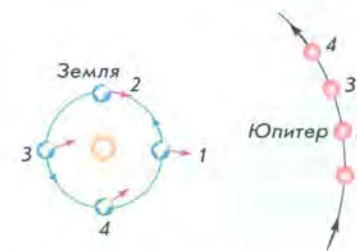


Рис. 9.2. Объяснение возмущений Земли, вызываемых Юпитером, с периодом в 1 год

благодаря притяжению Юпитера и по этой же причине в положении 4 увеличиваться.

Решение уравнения движения даже для трех тел — задача исключительной сложности, однако анализ возмущений позволяет довольно точно определить массу и положение возмущающего тела. Наиболее ярким примером этому в истории астрономии стало открытие планеты Нептун на основе анализа возмущений, имеющих в движении Урана.

Между теоретическими расчетами движения Урана и результатами наблюдений обнаруживались систематические расхождения. Теоретически необъясненные возмущения в движении Урана привели немецкого ученого Ф. Бесселя к заключению, что вне орбиты Урана имеется неизвестная планета, которая и вносит наблюдаемые отклонения в его движение. Теперь требовалось определить положение и массу неизвестной планеты по производимым ею возмущениям. На основе расчетов, которые практически одновременно, но независимо друг от друга выполнили английский астроном Дж. Адамс и французский астроном У. Леверье, в 1846 г. немецкий астроном И. Галле обнаружил новую планету всего в  $1^\circ$  от предварительно вычисленного места. Ее назвали Нептуном. Открытие Нептуна «на кончике пера» стало убедительным подтверждением справедливости учения Коперника и законов небесной механики.

Возмущающее влияние планет испытывают астероиды и кометы. Установлено, что Юпитер определяет эволюцию астероидного кольца, поэтому пренебрегать возмущающим влиянием этого гиганта, хотя оно и невелико, нельзя.

Ни одно небесное тело в Солнечной системе не может двигаться точно по окружности, эллипсу, параболе или гиперболе. Все отклонения (возмущения) от «классических» орбит носят сложный характер, а их учет чрезвычайно труден.

**3. Определение массы Земли.** Одной из важнейших характеристик небесного тела является его масса. Закон всемирного тяготения позволяет определять массу небесных тел, в том числе и массу Земли.

На тело массой  $m$ , находящееся вблизи поверхности Земли, действует сила тяжести  $F = mg$ , где  $g$  — ускорение свободного падения. Если тело движется только под действием силы тяжести, то, используя закон всемирного тяготения (9.1), ускорение свободного падения равно:

$$g = G \frac{M}{R_{\oplus}^2}$$

и направлено к центру Земли.

Следовательно, зная, что ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  и радиус Земли  $R_{\oplus} = 6370 \text{ км}$ ,

можно по формуле  $M = \frac{gR^2}{G}$  определить массу Земли:  $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ .

Среднюю плотность Земли можно определить, зная ее массу и объем. Средняя плотность равна  $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Однако плотность Земли не является постоянной величиной. С глубиной она возрастает.

**4. Определение масс небесных тел.** Массы небесных тел можно измерить несколькими способами.

1. Путем измерения силы тяжести на поверхности данного небесного тела.

2. По третьему обобщенному закону Кеплера.

3. На основе анализа наблюдаемых возмущений, производимых небесным телом в движениях других небесных тел.

Первый способ мы рассмотрели выше применительно к Земле.

Прежде чем рассматривать второй способ, давайте проверим выполнение третьего закона Кеплера для случая кругового движения планеты со скоростью  $v_k$ .

Пусть тело массой  $m$  движется с линейной скоростью  $v_k$  вокруг тела  $M$  ( $m \ll M$ ) по окружности радиуса  $r_k$  (рис. 9.3). Это возможно, если движение происходит под действием силы, создающей центростремительное ускорение  $a = \frac{v_k^2}{r_k}$ . Силой, создающей центростре-

мительное ускорение, является сила тяготения, равная  $\frac{GMm}{r^2}$ . Приравняв  $\frac{v_k^2}{r_k}$  к ускорению  $\frac{GM}{r^2}$ , создаваемому тяготением, получим, что

$$v_k^2 = \frac{GM}{r_k} \quad (9.2)$$

Если период обращения тела  $m$  вокруг тела  $M$  составляет время  $T$ , то линейная скорость движения этого тела по орбите равна

$$v_k = \frac{2\pi r_k}{T} \quad (9.3)$$

Подставляя (9.3) в (9.2), получим:

$$\left( \frac{2\pi r_k}{T} \right)^2 = \frac{GM}{r_k}, \text{ или}$$

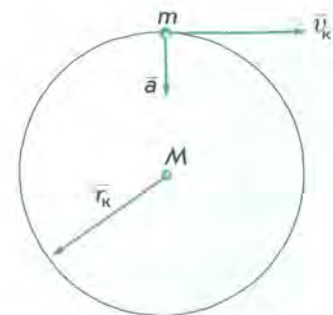


Рис. 9.3. Круговое движение тел

$$\frac{r_k^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \quad (9.4)$$

Для эллиптического движения формула (9.4) также справедлива, если вместо радиуса окружности  $r_k$  подставить большую полуось  $a$  эллиптической орбиты. В таком случае получим соотношение

$$\frac{a^3}{T^2 M} = \frac{G}{4\pi^2}, \quad (9.5)$$

которое можно сформулировать следующим образом: *отношение куба большой полуоси орбиты тела к квадрату периода его обращения и массе центрального тела есть величина постоянная.*

Если массой  $m$  меньшего тела нельзя пренебрегать по сравнению с массой  $M$  центрального тела, то в третий закон Кеплера, как показал Ньютон, вместо массы войдет сумма масс  $(m + M)$  и соотношение (9.5) запишется в виде:

$$\frac{a^3}{T^2 (M + m)} = \frac{G}{4\pi^2}. \quad (9.6)$$

Обобщив (9.6) для двух небесных тел массами  $M_1$  и  $M_2$ , получим формулу:

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (9.7)$$

т. е. квадраты сидерических периодов спутников ( $T_1^2$  и  $T_2^2$ ), умноженные на сумму масс главного тела и спутника ( $M_1 + m_1$  и  $M_2 + m_2$ ), относятся как кубы больших полуосей орбит спутников ( $a_1^3$  и  $a_2^3$ ).

На основе уточненного Ньютоном третьего закона Кеплера (9.7) можно вторым способом вычислить массы планет, имеющих спутники, а также массу Солнца.

Массы планет, не имеющих спутников, могут быть определены по возмущениям, которые они вызывают в движении Земли, Марса, астероидов, комет, а также по возмущениям, оказываемым ими друг на друга.

### Вопросы и упражнения

1. Какие задачи решает небесная механика? 2. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Каковы особенности использования данного закона для проведения расчетов? 3. Ньютону было известно, что период обращения

Луны вокруг Земли составляет  $T = 27,3$  суток, а расстояние  $r$  от центра Земли до Луны в 60 раз больше радиуса Земли. Определите центростремительное ускорение Луны, обусловленное силой тяготения. 4. Охарактеризуйте невозмущенное и возмущенное движение небесных тел. 5. Как понимают в астрономии «задачу двух тел»? «Задачу трех тел»? 6. Что значит: планета Нептун была открыта «на кончике пера»? 7. Как Ньютон обобщил законы Кеплера? 8. Каким образом можно подсчитать массу Земли, Солнца?

## § 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ И РАССТОЯНИЙ ДО НИХ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

**1. Определение размера Земли.** Шарообразность Земли позволяет определить ее размеры способом, который впервые применил в III в. до н. э. греческий ученый *Эратосфен Киренский*. Идея Эратосфена заключается в следующем. На одном и том же географическом меридиане земного шара выберем две точки  $O_1$  и  $O_2$  (рис. 10.1). Обозначим длину дуги меридиана  $O_1 O_2$  через  $\ell$ , а ее угловое значение через  $n$  (в градусах). Тогда длина дуги  $1^\circ$  меридиана  $\ell_0$  будет равна:

$$\ell_0 = \frac{\ell}{n},$$

а длина всей окружности меридиана:

$$L = 360^\circ \cdot \ell_0 = \frac{360^\circ \cdot \ell}{n} = 2\pi R,$$

где  $R$  — радиус земного шара. Отсюда  $R = \frac{180^\circ \cdot \ell}{\pi n}$ .

Длина дуги меридиана между выбранными на земной поверхности точками  $O_1$  и  $O_2$  в градусах равна разности географических широт этих точек, т. е.  $n = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Для определения величины  $n$  Эратосфен использовал то обстоятельство, что города Сиена и Александрия расположены на одном меридиане и расстояние между ними известно. С помощью простого прибора, который ученый назвал «скафис», было установлено, что

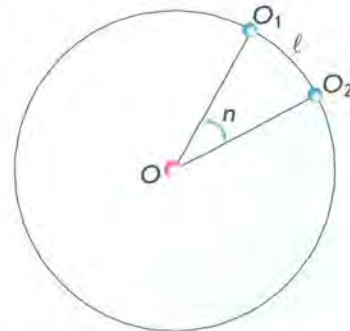


Рис. 10.1. Вычисление радиуса Земли

если в Сиене в полдень дня летнего солнцестояния Солнце освещает дно глубоких колодцев (т. е. находится в зените), то в это же время в Александрии Солнце отстоит от вертикали на  $1/50$  долю окружности ( $7^\circ 15'$ ). Таким образом, определив величину длины дуги  $\ell$  и угол  $n$ , Эратосфен подсчитал, что длина земной окружности составляет 39 690 км. Учитывая грубость измерительных приборов того времени и ненадежность исходных данных, результат измерений был весьма удовлетворительным (действительная средняя длина окружности Земли равна 40 010 км).

Непосредственное точное измерение расстояния  $\ell$  между точками  $O_1$  и  $O_2$  (см. рис. 10.1) затруднено из-за естественных препятствий (гор, рек, лесов и т. п.). Поэтому длина дуги  $\ell$  определяется путем вычислений, требующих измерения только сравнительно небольшого расстояния — **базиса** и ряда углов. Этот метод разработан в геодезии и называется **триангуляцией** (от латинского *triangulum* — треугольник).

Суть его состоит в следующем. По обе стороны дуги  $O_1O_2$ , длину которой необходимо определить, выбирается несколько точек  $A, B, C, \dots$  на взаимных расстояниях до 50 км с таким расчетом, чтобы из каждой были видны по меньшей мере две другие точки (рис. 10.2).

Во всех точках устанавливаются геодезические сигналы в виде вышек пирамидальной формы высотой от 6 до 55 м в зависимости от условий местности. Наверху каждой вышки имеется площадка для размещения наблюдателя и установки угломерного инструмента — теодолита. Расстояние между какими-либо двумя соседними точками, например  $O_1A$ , выбирается на совершенно ровной поверхности и принимается за базис триангуляционной сети. Длину базиса очень тщательно измеряют специальными мерными лентами.

Измеренные углы в треугольниках и длина базиса позволяют по тригонометрическим формулам вычислить стороны треугольников, а по ним — длину дуги  $O_1O_2$  с учетом ее кривизны.

Триангуляционные измерения показали, что длина дуги  $1^\circ$  меридиана не одинакова под разными широтами: около экватора она равна 110,6 км, а около полюсов — 111,7 км, т. е. увеличивается к полюсам. Это показывает, что кривизна поверхности Земли в поляр-

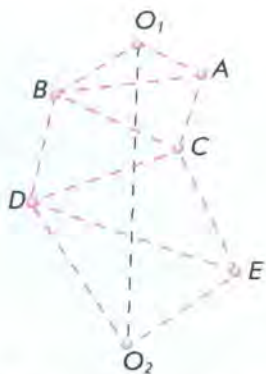


Рис. 10.2. Метод триангуляции

ных областях меньше, чем в экваториальных. Следовательно, Земля не имеет форму идеального шара, а близка к форме эллипсоида

вращения со сжатием  $\epsilon = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298,3}$ , где  $a$  — большая полуось, лежащая в плоскости экватора;  $b$  — малая полуось, совпадающая с осью вращения Земли. Разность между средними экваториальным и полярным радиусами Земли составляет 21,4 км.

Истинная форма Земли не может быть представлена ни одним из известных геометрических тел. Например, разность между наибольшим и наименьшим экваториальными радиусами Земли составляет 213 м. Поэтому в геодезии и гравиметрии форму Земли считают **геоидом**, т. е. телом с поверхностью, близкой к поверхности спокойного океана и продолженной под материками.

В настоящее время созданы триангуляционные сети со сложной радиолокационной аппаратурой, установленной на наземных пунктах, и с отражателями на геодезических искусственных спутниках Земли, что позволяет точно вычислять расстояния между пунктами. Большой вклад в развитие космической геодезии внес уроженец Беларуси — известный геодезист, гидрограф и астроном И. Д. Жонголович (см. Приложение 16). На основе изучения динамики движения искусственных спутников Земли он уточнил сжатие нашей планеты и несимметричность Северного и Южного полушарий.

**2. Определение расстояний методом горизонтального параллакса.** Кажущееся смещение светила, обусловленное перемещением наблюдателя, называется **параллактическим смещением** или **параллаксом** светила. Параллактические смещения светила тем больше, чем ближе оно к наблюдателю и чем больше перемещение наблюдателя.

Определение расстояний до тел Солнечной системы основано на измерении их горизонтальных параллаксов. Угол  $p$ , под которым со светила виден радиус Земли, перпендикулярный к лучу зрения, называется **горизонтальным параллаксом** (рис. 10.3). Чем больше расстояние до светила, тем меньше угол  $p$ .

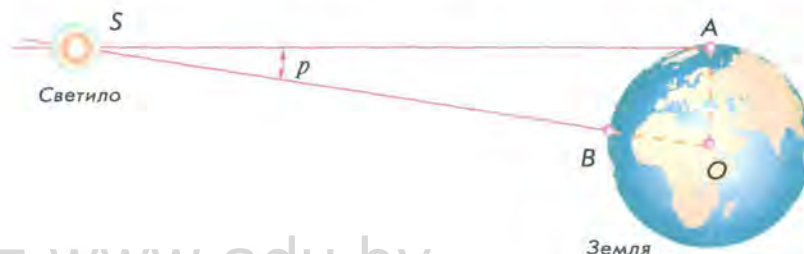


Рис. 10.3. Горизонтальный параллакс светила



Зная горизонтальный параллакс светила, можно определить его расстояние  $D = SO$  от центра Земли. Расстояние до светила

$D = \frac{R_{\oplus}}{\sin p}$ , где  $R_{\oplus}$  — радиус Земли. Приняв  $R_{\oplus}$  за единицу, можно выразить расстояние до светила в земных радиусах.

Например, параллакс Солнца  $p_{\odot} = 8,8''$ . Параллаксу Солнца соответствует среднее расстояние от Земли до Солнца, примерно равное 150 млн км. Это расстояние принимается за одну **астрономическую единицу** (1 а. е.). В астрономических единицах удобно измерять расстояние между телами Солнечной системы.

При малых углах  $\sin p \approx p$ , если угол  $p$  выражен в радианах. Если угол  $p$  выражен в секундах дуги, то вводится множитель

$$\sin 1'' = \frac{1}{206\,265},$$

где 206 265 — число секунд в одном радиане. Тогда

$$\sin p'' = p'' \sin 1'' = \frac{p''}{206\,265''} \quad \text{и} \quad D = \frac{206\,265''}{p''} R_{\oplus}.$$

Эта формула значительно упрощает вычисление расстояния  $D$  до светила по известному параллаксу  $p$ .

**3. Радиолокационный метод.** Для определения расстояний до тел Солнечной системы используются наиболее точные методы измерений — **радиолокационные измерения**. Измерив время  $t$ , необходимое для того, чтобы радиолокационный импульс достиг небесного тела, отразился и вернулся на Землю, вычисляют расстояние  $D$  до этого тела по формуле:

$$D = c \frac{t}{2},$$

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

С помощью радиолокации определены наиболее точные значения расстояний до тел Солнечной системы (см. Приложение 7), уточнены расстояния между материками Земли, более точно определена астрономическая единица (1 а. е. = 149 597 870 км).

Методы лазерной локации (например, специальные отражатели, доставленные на Луну) позволили измерить расстояние от Земли до Луны с точностью до нескольких сантиметров.

**4. Определение размеров тел Солнечной системы.** При наблюдениях небесных тел Солнечной системы можно измерить угол, под которым они видны наблюдателю с Земли. Зная **угловой радиус светила**  $\rho$  (рис. 10.4) и расстояние  $D$  до светила, можно вычислить линейный радиус  $R$  этого светила по формуле:

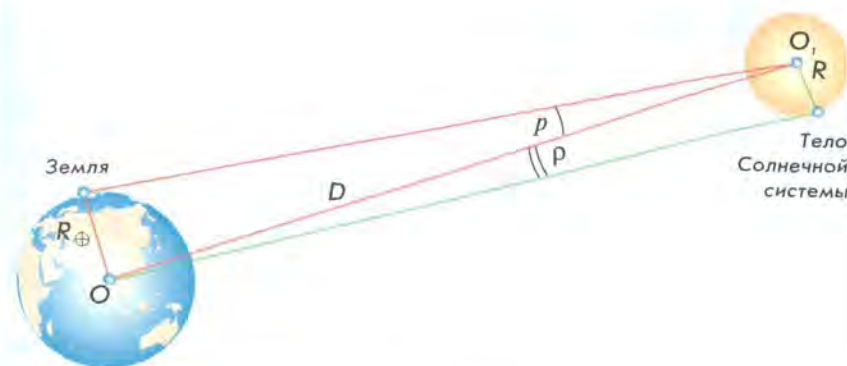


Рис. 10.4. Определение линейных размеров тел Солнечной системы

$$R = D \cdot \sin p.$$

По определению горизонтального параллакса, радиус Земли  $R_{\oplus}$  виден со светила под углом  $p$ , тогда получим:

$$R = \frac{\sin \rho}{\sin p} R_{\oplus}.$$

Так как значения углов  $\rho$  и  $p$  малы, окончательно имеем:

$$R = \frac{\rho}{p} R_{\oplus}.$$

Определение размеров небесных тел таким способом возможно только тогда, когда виден их диск.

### Вопросы и упражнения

1. Каким образом греческий ученый Эратосфен определил размеры Земли?
2. Как определяют длину дуги меридиана триангуляционным методом?
3. Опишите форму Земли по результатам последних измерений.
4. Что понимают под горизонтальным параллаксом?
5. Как определить расстояние до светила, зная его горизонтальный параллакс?
6. Что такое астрономическая единица?
7. На каком расстоянии от Земли находится Сатурн, если его горизонтальный параллакс равен  $0,9''$ ?
8. В чем состоит радиолокационный метод определения расстояний до небесных тел?
9. Что необходимо знать, чтобы вычислить размеры какого-либо тела Солнечной системы?
10. Наибольший горизонтальный параллакс Марса равен  $23''$ . Чему равно расстояние от Земли до Марса?

## § 11. ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**1. Космические скорости.** Наиболее простой случай движения тел вблизи поверхности Земли под действием силы тяжести — свободное падение с начальной скоростью, равной нулю. В этом случае тело движется прямолинейно с ускорением свободного падения по направлению к центру Земли. Если тело имеет начальную скорость, величина которой отлична от нуля и вектор направлен не по вертикали, то тело под действием силы тяжести начнет двигаться с ускорением свободного падения по криволинейной траектории.

Рассмотрим тело, находящееся за пределами земной атмосферы. Предположим, что вектор начальной скорости этого тела направлен по касательной к поверхности Земли. В зависимости от значения начальной скорости дальнейшее движение тела может быть различным:

а) при малых начальных скоростях ( $v_{01}, v_{02}, v_{03}, \dots$ ) тело может упасть на Землю;

б) при некотором определенном значении скорости  $v_1$  (**первая космическая скорость**) тело может стать искусственным спутником и начать обращаться вокруг Земли, подобно ее естественному спутнику — Луне;

в) при еще большем увеличении значения скорости и достижении следующего определенного значения  $v_2$  (**вторая космическая скорость**) тело может уйти от Земли так далеко, что сила земного притяжения практически не будет влиять на его движение. Тело начнет обращаться вокруг Солнца, подобно искусственной планете;

г) наконец, если скорость тела достигнет определенного значения  $v_3$  (**третья космическая скорость**), то данное тело навсегда уйдет из Солнечной системы в мировое пространство.

Рассмотрим случай, когда тело становится искусственным спутником Земли, т. е. определим первую космическую скорость  $v_1$ . Найдем эту скорость по второму закону Ньютона из условия, что под действием силы тяготения тело приобретает центростремительное ускорение:

$$G \frac{mM}{R_{\text{орб}}^2} = ma_{\text{ц}} \quad (11.1)$$

где  $R_{\text{орб}} = R + h$  — средний радиус орбиты тела (рис. 11.1),  $R$  — радиус Земли,  $h$  — высота тела над поверхностью Земли,  $M$  — масса Земли,  $m$  — масса тела (спутника).



Рис. 11.1. Движение спутника по круговой орбите

Для центростремительного ускорения  $a_{\text{ц}} = \frac{v_1^2}{R_{\text{орб}}} = \frac{v_1^2}{R+h}$ . Подставляя это выражение в (11.1), после сокращений получаем:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R+h}}$$

С учетом выражения для ускорения свободного падения  $g = G \frac{M}{R^2}$  для первой космической скорости имеем:

$$v_1 = \sqrt{\frac{gR^2}{R+h}} = R \sqrt{\frac{g}{R+h}}$$

У поверхности Земли можно положить  $R \gg h$ , тогда первая космическая скорость (без учета сопротивления воздуха) равна

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,8 \cdot 6,37 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} \quad (11.2)$$

Таким образом, тело, скорость которого равна 7,9 км/с и направлена по касательной относительно поверхности Земли, становится искусственным спутником, движущимся по круговой орбите над Землей. В небесной механике первая космическая скорость называется также **круговой скоростью**.

Вторая космическая скорость определяется из условия, что тело должно уйти из сферы земного тяготения и стать спутником Солнца. Расчеты дают следующее выражение для определения второй космической скорости (без учета сопротивления воздуха):

$$v_2 = \sqrt{2gR} \quad (11.3)$$

где  $R$  — радиус Земли.

Используя выражение (11.2), находим:

$$v_2 = v_1 \sqrt{2} \quad (11.4)$$

Подставляя в (11.4) уже известное нам значение первой космической скорости, получим, что у поверхности Земли  $v_2 = 11,2 \cdot 10^3$  м/с. Вторая космическая скорость называется также скоростью освобождения (убегания, ускользания), или **параболической скоростью**.

Третья космическая, или **гиперболическая, скорость**, — это наименьшая начальная скорость, с которой тело должно преодолеть земное притяжение и выйти на околосолнечную орбиту со скоростью, необходимой для того, чтобы навсегда покинуть пределы Солнечной системы.

Расчеты дают следующую формулу для нахождения величины этой скорости:

$$v_3 = \sqrt{(\sqrt{2}-1)^2 v^2 + v_2^2}, \quad (11.5)$$

где  $v \approx 29,8 \cdot 10^3$  м/с — скорость Земли на круговой орбите движения вокруг Солнца.

Подставляя значение второй космической скорости  $v_2$  в (11.5) и проведя расчет, получим, что тело должно иметь минимальную скорость  $v_3 \approx 16,7 \cdot 10^3$  м/с, чтобы покинуть пределы Солнечной системы.

Примечательно, что космические скорости не зависят от массы тела, которому они сообщаются. Это видно из формул (11.2), (11.3) и (11.5).

Космические скорости могут быть вычислены и для поверхностей других небесных тел. Например, для Луны первая космическая скорость составляет  $1,7 \cdot 10^3$  м/с, вторая —  $2,4 \cdot 10^3$  м/с. Вторая космическая скорость для Венеры и Марса равна, соответственно,  $10,4 \cdot 10^3$  и  $5 \cdot 10^3$  м/с. Для того чтобы выйти из сферы притяжения Фобоса (одного из спутников Марса), необходима скорость всего лишь 14 м/с.

**2. Орбиты космических аппаратов.** Расчеты траекторий полетов космических аппаратов связаны с использованием законов небесной механики. Следует заметить, что движение космических аппаратов описывается по законам небесной механики только после выключения реактивных двигателей. На пассивном участке траектории (т. е. после выключения двигателей) космические аппараты движутся под действием притяжения Земли и других тел Солнечной системы.

Элементы орбиты искусственных спутников Земли взаимосвязаны между собой формулой:

$$v_0^2 = GM \left( \frac{2}{r_0} - \frac{1}{a} \right), \quad (11.6)$$

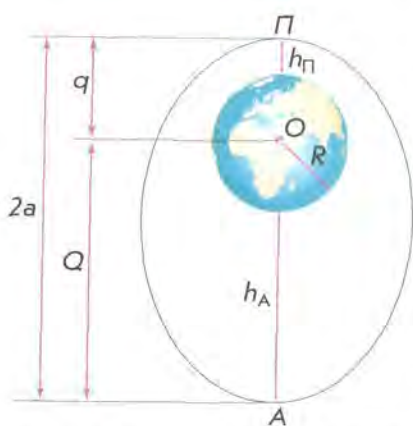


Рис. 11.2. Эллиптическая орбита искусственного спутника Земли

где  $v_0$  — начальная скорость спутника,  $M$  — масса Земли,  $r_0$  — расстояние точки выхода спутника на орбиту от центра Земли,  $a$  — большая полуось орбиты спутника.

Эксцентриситет орбиты  $e$  при горизонтальном запуске спутника равен:

$$e = 1 - \frac{q}{a}, \quad (11.7)$$

где  $q$  — расстояние перигея (ближайшей точки орбиты от центра Земли).

В случае эллиптической орбиты (рис. 11.2):  $q = a(1-e) = R + h_{\Pi}$ ,

где  $h_{\Pi}$  — линейная высота перигея над поверхностью Земли. Расстояние апогея (наиболее удаленной точки орбиты от центра Земли):  $Q = a(1+e) = R + h_A$ , где  $h_A$  — высота апогея над земной поверхностью,  $R$  — радиус Земли.

До начала полета космического аппарата на ту или иную планету его орбита должна быть очень точно рассчитана. Сделать это достаточно сложно, поскольку необходимо учитывать множество различных факторов. Однако как бы ни были выполнены расчеты, небольшие отклонения космического аппарата от расчетной орбиты неизбежны. На рис. 11.3 показаны орбиты космических аппаратов без учета возмущений, т. е. когда аппараты остаются вблизи Земли. Но когда космический аппарат удалится от Земли на значительное расстояние, то на дальнейшее его движение будет оказывать влияние прежде всего притяжение Солнца. Радиус сферы действия Земли принимают равным примерно 930 тыс. км; на границе этой сферы влияние Солнца и Земли на космический аппарат одинаково. Момент достижения границы сферы действия Земли считается моментом выхода космического аппарата на орбиту относительно Солнца.

При запуске космических аппаратов к другим планетам исходят из следующего:

1) геоцентрическая скорость космического аппарата при выходе на орбиту относительно Земли должна превышать вторую космическую скорость;

2) гелиоцентрическая орбита космического аппарата должна пересекаться с орбитой данной планеты;

3) момент запуска необходимо выбрать так, чтобы орбита была наиболее оптимальной (выгодной) с точки зрения сроков полета, затрат топлива и ряда других требований.

Приближенные расчеты траекторий космических аппаратов производят с учетом того, что внутри сферы действия Земли космический аппарат движется по геоцентрической орбите под действием силы тяготения одной только Земли, а после выхода из этой сферы — по гелиоцентрической орбите под действием силы притяжения Солнца.

Одним из классов межпланетных траекторий являются энергетически оптимальные орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы Земли.

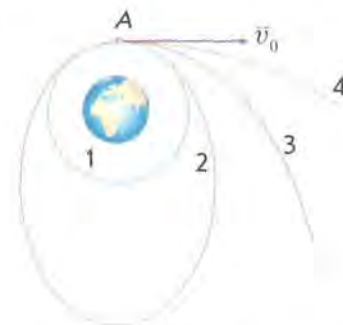


Рис. 11.3. Формы орбит космических аппаратов

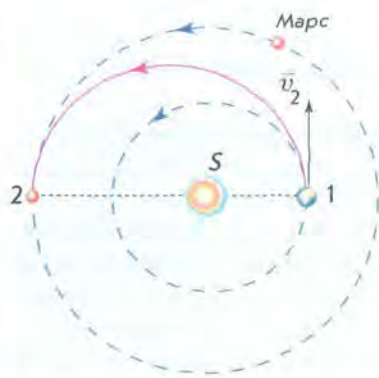


Рис. 11.4. Гомановская траектория перелета с Земли на Марс

по касательной к орбите Земли. Момент запуска следует подобрать так, чтобы космический аппарат и Марс, двигаясь по своим орбитам, достигли одновременно точки 2. Буквой  $S$  обозначено Солнце. Расчеты показывают, что время полета с Земли до Марса по указанной траектории составит 259 суток (не считая сравнительно короткого времени полета до границы сферы действия Земли).

Аналогичным образом можно рассмотреть гомановскую траекторию полета к Венере (рис. 11.5). Космический аппарат стартует с Земли (точка 1) и достигает точки 2, где в этот момент будет находиться Венера, через 146 суток.

Траектории космических аппаратов могут быть весьма сложными вследствие коррекции орбит полетов. Для примера рассмотрим схематическую траекторию автоматической межпланетной станции «Пионер-11» (рис. 11.6). В момент запуска станции 6 апреля 1973 г.



Рис. 11.5. Гомановская траектория перелета с Земли на Венеру

На рис. 11.4 показана такая траектория перелета на Марс, построенная на предположении, что орбиты Земли и Марса круговые. Данная орбита носит название гомановской, так как названа в честь немецкого астронома *Вальтера Гомана*, занимавшегося теорией межпланетных полетов.

В момент запуска космического аппарата Земля находится в точке 1. Гелиоцентрическая скорость  $v_2$  космического аппарата должна быть направлена так же, как и гелиоцентрическая скорость Земли, — по

касательной к орбите Земли. Момент запуска следует подобрать так, чтобы космический аппарат и Марс, двигаясь по своим орбитам, достигли одновременно точки 2. Буквой  $S$  обозначено Солнце. Расчеты показывают, что время полета с Земли до Марса по указанной траектории составит 259 суток (не считая сравнительно короткого времени полета до границы сферы действия Земли). Аналогичным образом можно рассмотреть гомановскую траекторию полета к Венере (рис. 11.5). Космический аппарат стартует с Земли (точка 1) и достигает точки 2, где в этот момент будет находиться Венера, через 146 суток. Траектории космических аппаратов могут быть весьма сложными вследствие коррекции орбит полетов. Для примера рассмотрим схематическую траекторию автоматической межпланетной станции «Пионер-11» (рис. 11.6). В момент запуска станции 6 апреля 1973 г. Земля находилась в точке 1. В конце 1974 г. станция приблизилась к Юпитеру (точка 2) и передала на Землю информацию об этой планете и ее спутниках, а затем проследовала дальше. Но при этом притяжение Юпитера как бы развернуло космическую станцию на  $3/4$  оборота (т. е. заставило сделать петлю вокруг планеты) и перевело ее на траекторию по направлению к Сатурну. Почти через 5 лет после встречи с Юпитером станция достигла Сатурна (точка 3), прошла мимо него на небольшом

расстоянии, выполнила программу исследований и этой планеты, а затем ушла дальше в межпланетное пространство.

**3. Проблемы и перспективы космических исследований. Космонавтика** — комплексная отрасль науки и техники, обеспечивающая исследование и использование космического пространства с помощью автоматических и пилотируемых космических аппаратов. Главными целями космонавтики (в порядке их достижения) являются: вывод искусственного спутника на орбиту Земли, полет человека в космос, полет человека на Луну, полет человека на другие планеты, полет к звездам. Первые три цели достигнуты.

Начало космической эры было положено в СССР запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. Вторая важнейшая дата космической эры — 12 апреля 1961 г. В этот день Ю. А. Гагарин впервые в истории человечества совершил полет в космос на космическом корабле «Восток». Третье историческое событие космонавтики — первая лунная экспедиция, осуществленная 16—24 июля 1969 г. американскими астронавтами Н. Армстронгом, М. Коллинзом и Э. Олдрином. Значительный вклад в исследование космического пространства внесли и белорусские космонавты П. И. Климук и В. В. Коваленок, неоднократно проводившие космические исследования в 1973—1978 гг. в составе различных экипажей. Полеты человека в космос для нас стали уже почти обычным явлением.

Современная теория космических полетов — **астродинамика** — основана на классической небесной механике и теории управления движением летательных аппаратов.



Рис. 11.6. Траектория полета автоматической межпланетной станции «Пионер-11» к Юпитеру и Сатурну



Первый в мире космонавт Ю. А. Гагарин



Экипаж космического корабля «Союз-30» — белорусский космонавт П. И. Климук и М. Гермашевский (Польша)

Космонавтика нуждается в тщательной разработке оптимальных траекторий космических аппаратов с учетом ряда условий и ограничений.

Создание ракетно-космических комплексов — также весьма сложная научно-техническая проблема. Большие ракеты-носители достигают стартовой массы до 3000 т и имеют длину свыше 100 м. Мощность двигательных установок измеряется десятками миллионов киловатт. При этом приходится решать сложные задачи охлаждения работающего двигателя, добиваться устойчивости процесса горения, синхронности работы двигателей и т. д. Космические аппараты должны обладать способностью к длительному самостоятельному функционированию в условиях космического пространства, кроме того, возникает ряд дополнительных медико-биологических проблем (защита от космической среды, жизнеобеспечение экипажа и т. д.). Все это требует разработки специальных систем. Обеспечение полета космических аппаратов осуществляется широкой сетью наземных служб управления.

### Вопросы и упражнения

1. Опишите первую, вторую и третью космические скорости. 2. Как можно определить первую и вторую космические скорости для других планет, кроме Земли? 3. По каким орбитам могут двигаться космические аппараты? Каким геометрическим линиям соответствуют орбиты космических аппаратов для первой, второй и третьей космических скоростей? 4. Какие орбиты космических аппаратов называют гомановскими? Вычертите гомановские орбиты для полета на Марс и Венеру. 5. Расскажите об общих проблемах космонавтики. 6. Рассчитайте время полета от Земли к Марсу по гомановской орбите.

## IV РАЗДЕЛ

# Сравнительная планетология

### § 12. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**1. Строение и состав Солнечной системы.** Под Солнечной системой понимается все космическое пространство и вся материя, находящаяся в сфере притяжения Солнца. Солнечная система включает в себя: звезду Солнце, расположенную в центре системы; планеты со спутниками; малые тела (астероиды, кометы, метеорные тела), а также межпланетную пыль, плазму и физические поля в указанных границах (рис. 12.1).

В Солнечной системе находится 9 больших планет. По мере удаления от Солнца они расположены в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон.

**Планетой** называют большое небесное тело, движущееся вокруг Солнца в его гравитационном поле и светящееся отраженным солнечным светом. Выделяют планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Отдельно стоит Плутон, являющийся самым крупным объектом астероидного пояса Койпера. Массы планет слишком

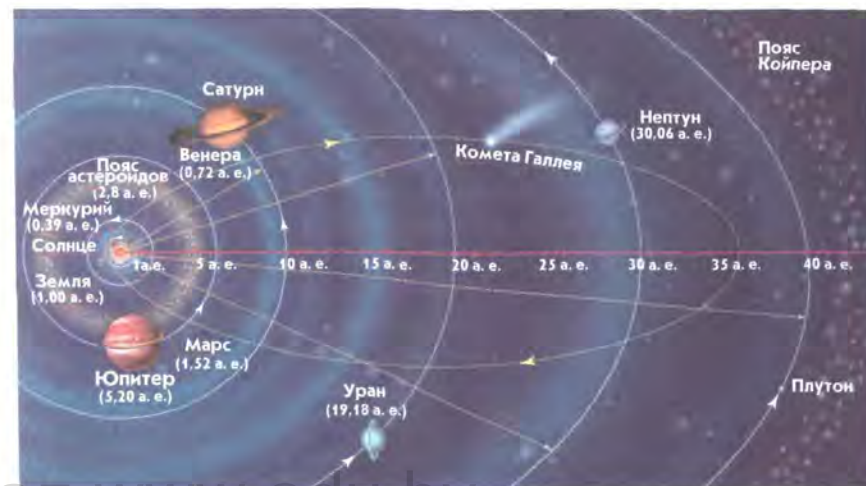


Рис. 12.1. Схема Солнечной системы

малы, чтобы внутри их могли протекать характерные для звезд ядерные реакции. Вокруг планет, кроме Меркурия и Венеры, обращаются спутники, которых сейчас известно уже больше ста.

По гелиоцентрическим орбитам, преимущественно между Марсом и Юпитером, движутся **малые планеты**, или **астероиды**. Их размеры составляют от десятков метров до тысячи километров. Твердые тела небольшого размера, движущиеся в межпланетном пространстве, называются **метеоритными телами**. Кроме того, по сильно вытянутым орбитам движутся ледяные тела — **кометы**, резко меняющие свой облик с приближением к Солнцу.

Основные характеристики планет Солнечной системы приведены в Приложениях 7—9.

**2. Особенности строения Солнечной системы.** Характерные черты строения Солнечной системы, известные по астрономическим наблюдениям и космическим исследованиям, заключаются в следующем.

1. Основная масса вещества Солнечной системы сосредоточена в Солнце, которое представляет собой рядовую звезду. На массу всех других составляющих системы приходится 1/700 часть массы Солнца (рис. 12.2). Таким образом, доминирующим в Солнечной системе является гравитационное поле Солнца.

2. Орбиты планет и большинства астероидов лежат почти в одной плоскости, незначительно наклоненной к плоскости солнечного экватора. Наклон эклиптики к плоскости солнечного экватора составляет  $7^{\circ}15'$ . Орбиты планет почти круговые, т. е. их эксцентриситеты мало отличаются от нуля. Наибольшим наклоном и эксцентриситетом обладает Плутон.

3. Все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении. Вращение Солнца вокруг своей оси происходит в ту же сторону, что и движение планет вокруг Солнца. Планеты вращаются вокруг своих осей в направлении, совпадающем с направлением их обращения вокруг Солнца. Исключение составляют Венера, Уран и Плутон, которые вращаются в противоположную сторону. Причем ось враще-

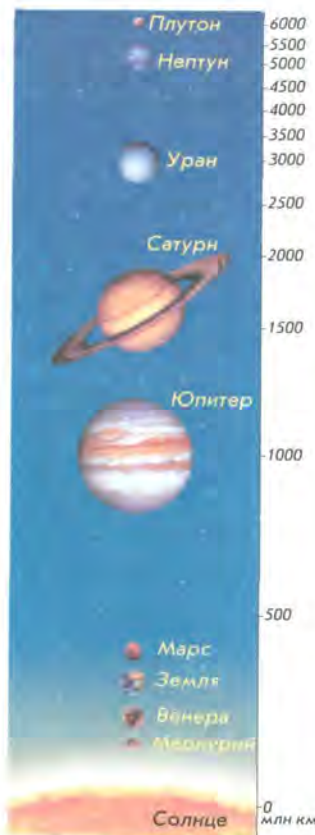


Рис. 12.2. Сравнительные размеры Солнца и планет

ния Урана почти лежит в плоскости орбиты планеты. Наклон оси вращения других планет не превышает  $60^{\circ}$  к плоскостям их орбит.

4. Величины больших полуосей планетных орбит возрастают согласно **правилу планетных расстояний Тициуса — Боде**:  $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2n$ , где  $a$  — большая полуось планетной орбиты в астрономических единицах. Показатель  $n$  принимает значения: для Меркурия  $n = -\infty$ , для Венеры  $n = 0$ , для Земли  $n = 1$ , и далее 2, 3, ..., 6 для других планет. Согласно этому правилу, между Марсом и Юпитером должна находиться планета, но ее место занято поясом астероидов. Планета Нептун не попадает под это правило.

5. Планеты разделяются на две резко различающиеся группы: земного типа и планеты-гиганты. **Планеты земного типа** — твердые тела, сравнительно небольшие, маломассивные, но с большой плотностью, более медленным вращением и малым числом спутников (или без них). Они расположены вблизи Солнца. К планетам земного типа относятся по мере удаления их орбит от Солнца — Меркурий, Венера, Земля, Марс. **Планеты-гиганты** — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун — массивнее планет земной группы, большие по размерам и с меньшей средней плотностью, большой скоростью вращения и многочисленными спутниками. Планеты-гиганты обладают мощными атмосферами, состоящими в основном из водорода и гелия.

6. Момент количества движения ( $m \cdot v \cdot r$ ) между Солнцем и планетами распределяется неравномерно. На долю Солнца, в котором сосредоточена почти вся масса Солнечной системы, приходится только 2% ее полного количества движения.

7. Орбиты большинства спутников планет близки к круговым. Движение спутников по орбитам происходит в том же направлении, в каком планеты движутся вокруг Солнца. Орбиты крупных спутников в основном имеют малый наклон к плоскостям экваторов своих планет.

Перечисленные особенности необходимо учитывать при построении модели (теории) формирования всего комплекса тел Солнечной системы, проходившего миллиарды лет тому назад.

**3. Происхождение Солнечной системы.** Для построения теории происхождения Солнечной системы необходимо знать возраст небесных тел. Возраст твердых тел определяется по отношению содержания изотопов свинца ( $Pb^{206}$  и  $Pb^{207}$ ), образовавшихся в исследуемых породах при радиоактивном распаде изотопов урана ( $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ), к природному изотопу свинца ( $Pb^{204}$ ). Согласно этому методу, возраст древнейших пород Земли достигает 4,64 млрд лет. Анализ пород, доставленных с Луны, соответствует возрасту от 2 до 4,5 млрд лет. Возраст железных и каменных метеоритов оценивается от 0,5 до 5 млрд лет. Возраст отдельных звезд и Солнца определяется на ос-

нове теории строения и эволюции звезд. Для Солнца это приблизительно 5 млрд лет, что совпадает с возрастом других тел системы. Последнее позволяет заключить, что Солнце и планеты сформировались из единого облака газа и пыли.

Впервые идея об образовании Солнца и планет из вещества единой газовой туманности была сформулирована И. Кантом в 1755 г. и доработана П. Лапласом в 1796 г. Согласно этой гипотезе, Солнечная система образовалась из вращающегося газового облака, которое сжималось под воздействием гравитации и распалось на фрагменты (рис. 12.3). Однако эта гипотеза оказалась несостоятельной из-за множества противоречий. Данные физико-химических исследований метеоритов и земных пород подсказывали, что эти тела образовались не из газовых сгустков, а из твердого вещества. В 1944 г. систематической разработкой теории образования планет из твердых частиц околосолнечного допланетного облака занялся О. Ю. Шмидт. Эта теория развивается и в настоящее время.

Можно выделить следующие основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы:

1. Около 4,6 млрд лет назад произошел взрыв сверхновой звезды вблизи места рождения Солнечной системы. Ударная волна от взрыва распространилась в космическом пространстве. Под ее действием газопылевое облако, состоящее из водорода, гелия и разных по составу частичек, содержащих как металлы, так и редкие изотопы тяжелых химических элементов, начало сгущаться. В нем образовались уплотнения,



Рис. 12.3. Гипотеза образования Солнечной системы П. Лапласа

обогащенные веществом сверхновой звезды. Изначально медленно вращающееся уплотнение под действием сил гравитации начало сжиматься и превращаться в дискообразное газопылевое облако. (В дальнейшем в центре этого дискообразного облака образуется молодое Солнце.)

2. Постепенно в диске газопылевого облака мельчайшие пылинки стали объединяться, захватывая газы из окружающего пространства. Из мелких частиц образовывались более крупные комки, именно из них формировались зародыши будущих планет (размерами в несколько километров) — **планетезимали**, а позднее и сами планеты. Во внутренней зоне легкие элементы (водород, гелий) под действием светового давления покидали центральные области диска, уходя на периферию. Поэтому вблизи Солнца планетезимали формировались полностью из каменных минералов и соединений металлов и в конце концов превратились в планеты земного типа. Частички в средней холодной зоне покрывались льдом, ядра будущих планет-гигантов быстро росли, захватывая окружающий газ. В самой холодной внешней части диска конденсирующее вещество было почти все ледяным. Множество отдельных ледяных планетезималей и глыб породили ядра комет и объекты пояса Койпера.

Планеты земной группы почти достигли своих размеров примерно через 100 млн лет.

3. Последующее гравитационное сжатие поднимало температуру в недрах протопланет до температуры плавления железа. С этого времени тяжелые компоненты стали отделяться и стремиться к центру планет, а наиболее легкие вещества — подниматься к поверхности. В течение миллиардов лет шло образование коры — наружного слоя планет земной группы. Разогревание Земли, например, сопровождалось выделением газов и водяных паров. Постепенно водяные пары конденсировались и образовывали моря и океаны, а газы — атмосферу. По составу первичная атмосфера существенно отличалась от современной.

У планет-гигантов образовались вначале массивные твердые ядра. Этот процесс занял меньше всего времени у Юпитера. Он продолжался 30 млн лет. У Сатурна процесс образования ядра продолжался 200 млн лет; у Урана и Нептуна — около 1 млрд лет. Юпитер и Сатурн быстро набирали массу, поглощая одновременно и пылинки, и газы. Планеты-гиганты состоят преимущественно из водорода и гелия. Уран и Нептун формировались за счет ледяных планетезималей.

Спутники планет, движущиеся в направлении вращения планет, появились в результате тех же процессов, что и сами планеты. Спутники, обладающие обратным движением, были захвачены планетой.

## Вопросы и упражнения

1. Что понимают под Солнечной системой? 2. Что называют планетой? Какие планеты входят в состав Солнечной системы? 3. Укажите основные особенности строения Солнечной системы. 4. Какие планеты относятся к планетам земного типа? Дайте их обобщенную характеристику. 5. Какие планеты относятся к планетам-гигантам? Дайте их обобщенную характеристику. 6. Как с помощью радиоактивного распада определяют возраст пород Земли? Каков возраст древнейших пород Земли? Минералов, доставленных с Луны? Метеоритов, упавших на Землю? 7. В чем состоит суть гипотез И. Канта, П. Лапласа, О. Ю. Шмидта о происхождении Солнца и планет? 8. Укажите основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы.

## § 13. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

**1. Меркурий.** Меркурий — самая близкая к Солнцу планета (рис. 13.1). Она постоянно «прячется» в солнечных лучах и поэтому труднонаблюдаема.

По размерам и массе Меркурий ближе к Луне, чем к Земле. У Меркурия нет атмосферы, и его поверхность не защищена от палящих солнечных лучей днем и космического холода ночью. Днем на поверхности планеты температура поднимается до +430 °С, а ночью опускается до -170 °С. Перепад температур происходит медленно, потому что солнечные сутки на Меркурии равны 176 земным.

Вся каменистая поверхность Меркурия покрыта многочисленными кратерами (рис. 13.2). Большинство из них образовались в результате



Рис. 13.1. Меркурий

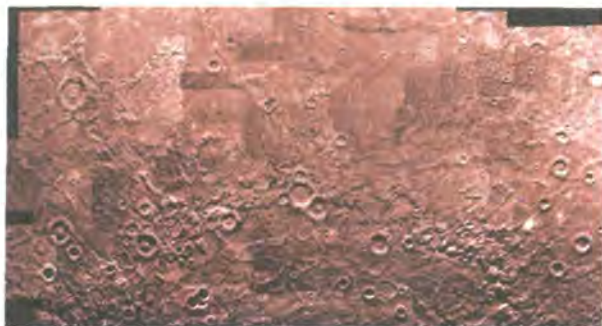


Рис. 13.2. Бассейн Калорис на Меркурии

## ПАРАМЕТРЫ МЕРКУРИЯ

Звездная величина	0,0	Диаметр по экватору	4875 км
Среднее расстояние до Солнца	57,9 млн км	Масса (Земля = 1)	0,055
Период обращения вокруг Солнца	0,387 а. е.	Средняя плотность	$5,4 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Период вращения вокруг оси	88 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
	58,8 земных суток	Температура поверхности	от -170 до +430 °С



падения метеоритов. Кратеры на картах Меркурия названы в честь выдающихся представителей мировой культуры: Бетховен, Гомер, Достоевский, Пушкин, Толстой и др.

Угол наклона оси вращения Меркурия перпендикулярен его орбите, поэтому дно околополярных кратеров никогда не освещается Солнцем. Эти области служат хранилищами водяного льда, перемешанного с горной породой.

Горы, встречающиеся на Меркурии, достигают высоты всего 2—4 км. На планете обнаружены уступы высотой 2—3 км, тянущиеся на сотни километров (рис. 13.3). Вероятно, они появились при образовании планеты из-за неравномерного сжатия в ходе охлаждения.

Вблизи поверхности Меркурия обнаружены атомы гелия и водорода, а также аргона и натрия. Их источниками являются солнечный ветер и вещество планеты, подверженное нагреванию и облучению Солнца.

Магнитное поле планеты очень мало, его напряженность в 100 раз меньше, чем у земного.

**2. Венера.** Венера — вторая от Солнца планета Солнечной системы (рис. 13.4). Она почти такого же размера, как и Земля, а ее масса составляет более 80 % земной массы. На небе

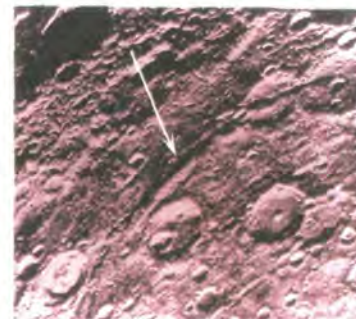


Рис. 13.3. Крутые уступы на поверхности Меркурия



Рис. 13.4. Венера. Фотоснимок выполнен в ультрафиолетовых лучах



## ПАРАМЕТРЫ ВЕНЕРЫ

Звездная величина	-4,4
Среднее расстояние до Солнца	108,2 млн км
Период обращения вокруг Солнца	0,723 а. е.
Период вращения вокруг оси	224,7 земных суток
	243 земных суток

Диаметр по экватору	12 104 км
Масса (Земля = 1)	0,816
Средняя плотность	$5,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,9
Температура поверхности	470 °С

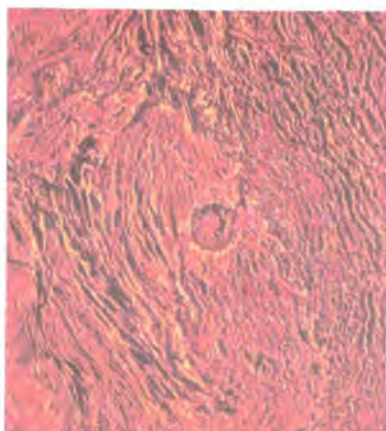
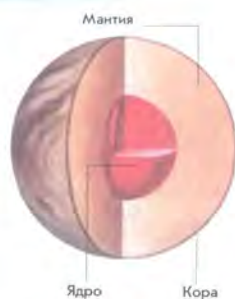


Рис. 13.5. Венера. Район Гор Максвелла: огромный кратер диаметром около 100 км

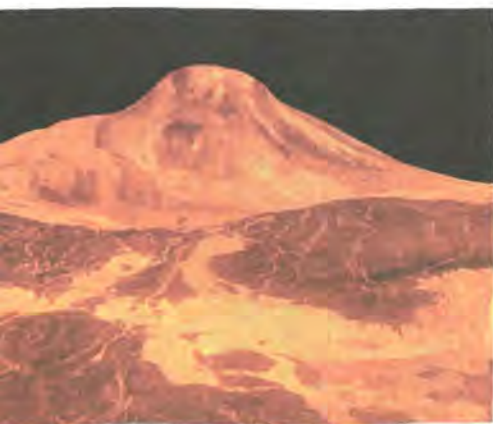


Рис. 13.6. Гора Маат — потухший вулкан на Венере

ее можно наблюдать утром или вечером в виде очень яркого светила. Густая атмосфера Венеры долго скрывала тайны ее поверхности. Ученые еще в середине XX в. думали, что планета покрыта тропическими лесами. Но достигшие планеты советские космические аппараты «Венера» сфотографировали безжизненную раскаленную пустыню. Температура поверхности достигает 470 °С и почти не изменяется в течение суток. Густые облака пропускают мало солнечного света и создают «сумеречную» освещенность даже тогда, когда Солнце находится высоко над горизонтом.

Большую часть поверхности Венеры занимают равнины. Самые высокие горы поднимаются на 11 км над средним уровнем поверхности — Горы Максвелла. Обнаружены на Венере кратеры диаметром до сотен километров (рис. 13.5). Крупные кратеры названы в честь выдающихся женщин мира (Ахматова, Войнич, Дункан, Орлова) или просто женскими именами (Антонина, Валентина, Зоя, Ирина, Нана, Оля и др.). Обширные возвышенности-материки носят имена: Земля Афродиты, Земля Иштар, Земля Лады и др.

Около 500 млн лет назад на Венере произошла глобальная геологическая катастрофа. Сотни тысяч действующих вулканов извергли огромное количество лавы, которая покрыла всю поверхность планеты. Самый высокий потухший вулкан (рис. 13.6) — гора Маат, названная так в честь египетской богини истины и порядка, вздымается над окружающей ее равниной почти на 8 км. Отдельные вулканы достигают высоты 3 км при ширине у подножия 500 км. Многочисленные застывшие пузыри лавы имеют куполообразную форму (рис. 13.7).

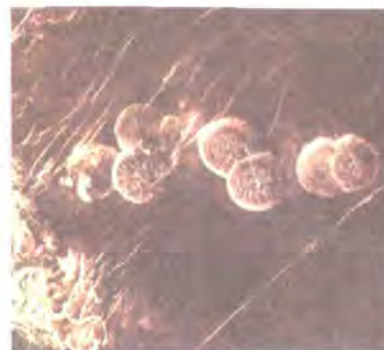


Рис. 13.7. Застывшие пузыри вулканической лавы на Венере. Радиолокационное изображение, переданное космическим кораблем «Магеллан» в 1991 г.

Для исследования рельефа планеты был использован метод радиолокации. Автоматическая межпланетная станция «Магеллан» с 1990 по 1994 г. провела глобальную радиолокацию поверхности Венеры. На основе полученных данных были составлены рельефные карты, и появилась возможность воссоздать детали поверхности в объемном изображении (рис. 13.8).

Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа (см. Приложение 8). Давление у поверхности планеты в 95 раз выше, чем у поверхности Земли. Благодаря такому химическому составу, а также большой плотности атмосфера Венеры представляет собой огромный парник. Парниковый эффект и обуславливает высокую температуру поверхности.

Облака Венеры имеют слоистую структуру. Они располагаются на высотах от 48 до 70 км и содержат капельки серной кислоты. Скорость ветра у поверхности составляет около 1 м/с. В атмосфере наблюдаются молнии.

Магнитное поле Венеры очень мало по причине медленного вращения планеты вокруг оси. Его напряженность в 105 раз меньше земного. Магнитосфера почти полностью отсутствует, поэтому поток заряженных частиц, идущий от Солнца, сталкивается с атмосфе-

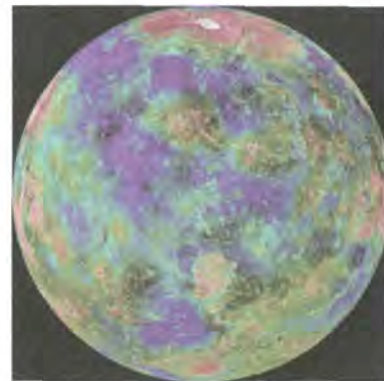


Рис. 13.8. Рельефная карта поверхности Венеры, составленная по данным радиолокационных исследований космического аппарата «Магеллан»

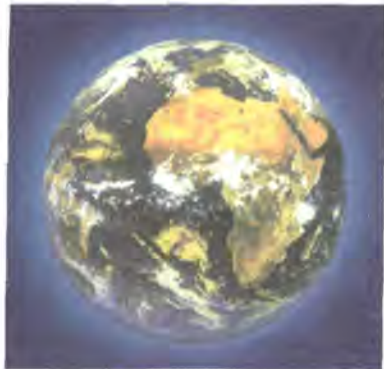


Рис. 13.9. Фотография Земли из космоса

рой планеты и увлекает за собой ее вещество, формируя ионный шлейф. Космическая обсерватория SOHO определила, что этот «хвост» растягивается на 45 млн км, т. е. достигает Земли.

**3. Земля.** Земля — третья по счету планета Солнечной системы. Из космоса наша планета выглядит красивым голубым шаром (рис. 13.9). Сквозь облачный покров можно рассмотреть материки и океаны.

Детали поверхности Земли и условия жизни хорошо вам известны,

поэтому мы остановимся более подробно на строении недр. Модели внутреннего строения Земли и остальных планет земной группы примерно схожи.

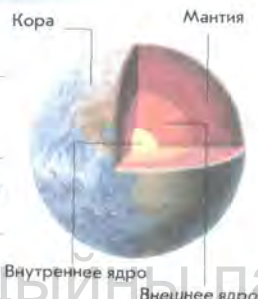
По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях — **сейсмограммам** — было установлено, что внутреннее строение планеты по вертикали слоистое. По химическому составу и физическим характеристикам выделяют 3 основные сферические оболочки: твердая кора, мантия (оболочка) и ядро. Самый тонкий внешний слой — **твердая кора**. У Земли она простирается в среднем на глубину 35 км (океаническая кора — 10 км, континентальная кора — 70 км). По химическому составу земная кора состоит преимущественно из оксидов кремния (55%), алюминия (15%), кальция (8%), железа (6%), магния (5%). Общая масса земной коры составляет всего 0,8% общей массы Земли. Кора отделяется от следующей за ней **мантии** отчетливой границей.

**Ядро** — наиболее плотная часть планетных недр. В центре Земли плотность вещества достигает  $13\,500\text{ кг/м}^3$ , а температура оценивается

#### ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛИ

Угол наклона экватора к плоскости орбиты	23,5°
Среднее расстояние до Солнца	149,6 млн км
	1 а. е.
Продолжительность года	365,24 земных суток
Период вращения вокруг оси	23,93 ч

Диаметр по экватору	12 742 км
Масса	$5,97 \cdot 10^{24}\text{ кг}$
Средняя плотность	$5,5 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$
Температура поверхности	от -90 до +60 °С



в 6000 К. Радиус ядра составляет 55% от радиуса Земли, а масса — около 30% массы планеты. Земное ядро подразделяется на внешнее и твердое внутреннее радиусом 1270 км. Переходная зона между внешней и внутренней частями ядра очень тонкая — около 5 км. У Венеры аналогичное ядро. Наиболее мощным ядром обладает Меркурий, радиус которого составляет 70% радиуса планеты, а масса — 60% массы всей планеты. У Марса небольшое ядро массой всего 7% от всей массы планеты, а его радиус составляет 28% радиуса Марса. Ядра планет в основном состоят из железа с примесью сернистого железа. Жидкий внешний слой ядра, вероятно, есть у Меркурия и Венеры.

Источниками нагрева недр планет служат:

- выделение тепла при распаде радиоактивных элементов;
- энергия, выделяющаяся при ударах тел различного размера (астероидов и др.) о поверхность планеты;
- нагревание за счет сжатия вещества планеты и гравитационной дифференциации.

**Гравитационная дифференциация** представляет собой процесс постепенного перераспределения вещества по плотности — тяжелые элементы стремятся к центру, а легкие элементы поднимаются к поверхности. Этот процесс у Земли еще не завершился. Движения вещества внутри планеты влияют на кору, вызывая землетрясения, горообразование, тектонические и вулканические процессы.

Магнитное поле Земли генерируется в жидком металлическом слое ядра.

Земная атмосфера состоит в основном из азота и кислорода (см. Приложение 8).

**4. Марс.** Марс — четвертая по счету планета Солнечной системы (рис. 13.10). Для наблюдателя она предстает в виде яркого красного светила. С помощью любительских телескопов можно увидеть полярные шапки Марса и некоторые крупные детали его поверхности.

Полученные космическими аппаратами телеизображения поверхности Марса показали, что она представляет собой безжизненную пустыню, значительная часть которой покрыта красноватым песком и усеяна камнями. Красный цвет поверхности Марса объясняется высоким содержанием в почве окислов железа (рис. 13.11).



Рис. 13.10. Марс



Рис. 13.11. Поверхность Марса. Фотография сделана спускаемым аппаратом «Викинг-1»



Рис. 13.12. Снег на поверхности Марса. Фотография сделана спускаемым аппаратом «Викинг-2»

На поверхности Марса большие суточные колебания температуры из-за того, что атмосфера очень разрежена: если днем на экваторе температура поднимается до  $+15^{\circ}\text{C}$ , то ночью опускается до  $-65^{\circ}\text{C}$ . Зимой на поверхности Марса наблюдаются снег и иней (рис. 13.12), но вода в жидком состоянии там существовать не может. Давление у поверхности планеты в 100–170 раз меньше, чем на Земле. В условиях низкого атмосферного давления вода закипает при температуре  $+2^{\circ}\text{C}$  и сразу же испаряется.

На Марсе очень много ударных кратеров большого размера. Это свидетельствует о том, что планета пережила множество катастроф, которые изменяли условия на ее поверхности. Кратеры на Марсе названы в честь ученых, посвятивших свою деятельность изучению Марса и планет Солнечной системы.

Поверхность Марса характеризуется четко выраженной асимметрией. Южное гористое полушарие в среднем на 5 км выше Северного. На снимках марсианской поверхности хорошо видны много-

### ПАРАМЕТРЫ МАРСА

Звездная величина	$-2,0$
Среднее расстояние до Солнца	227,9 млн км
Период обращения вокруг Солнца	1,88 а. е.
Период вращения вокруг оси	24,62 ч

Диаметр по экватору	6780 км
Масса (Земля = 1)	0,107
Средняя плотность	$3,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
Температура поверхности	от $-130$ до $+30^{\circ}\text{C}$



численные крупные и мелкие каньоны. Их ширина достигает 600 км, глубина — 5 км. Самый большой — Долина Маринера — тянется почти на 5000 км (на рис. 13.10 он виден как темная структура, пересекающая диск планеты).

Поражают своими масштабами потухшие вулканы Марса. Самый высокий — гора Олимп (рис. 13.13) — поднимается над поверхностью на 27 км. Диаметр его основания достигает 600 км. Возраст данных структур — около 400 млн лет.



Рис. 13.13. Гора Олимп на Марсе

Знаменитые полярные шапки Марса образованы толстыми, порядка 3 км, слоями льда, смешанного с пылью. Верхний слой полярных шапок состоит из «сухого льда» (замерзшего углекислого газа —  $\text{CO}_2$ ) с небольшой примесью обычного льда ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Температура здесь опускается ниже  $-110^{\circ}\text{C}$ . Когда на одном из полушарий начинается зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает  $57^{\circ}$  широты в Северном полушарии и  $45^{\circ}$  в Южном. С приходом весны шапки начинают таять. Осенью, когда формируются полярные шапки, можно наблюдать голубовато-белые облака в атмосфере планеты.

Загадочные марсианские долины, похожие на высохшие русла рек (рис. 13.14), были созданы водными потоками, которые иссякли более миллиарда лет назад. Об обилии воды на Марсе в давние времена свидетельствуют многие факты. В 1999 г. были опубликованы исследования, доказывающие, что на Марсе раньше существовал океан воды. Это удалось установить с помощью фотоснимков (переданных на Землю станцией «Марс Глобал Сурвейер») по особенностям рельефа, представляющим древнюю береговую линию. Океан мог существовать, пока температура поверхности Марса была достаточно высока. Планета начала охлаждаться около миллиарда лет назад. Тонкая



Рис. 13.14. Так выглядят высохшие русла марсианских рек

атмосфера Марса не препятствовала «улетучиванию» воды в межпланетное пространство. При понижении температуры замерзшая вода вперемешку с песком образовала подповерхностную ледяную оболочку — **криосферу**. Криосфера Марса содержит количество воды, эквивалентное слою толщиной около 1 км по всей планете.

Атмосфера Марса имеет низкую плотность и состоит в основном из углекислого газа (см. Приложение 8). Скорость ветра у поверхности планеты не превышает 15 м/с. Марс — единственная планета, где наблюдаются глобальные пылевые бури. Они создают антипарниковый эффект, так как облака пыли не пропускают солнечное излучение к поверхности. Поэтому поверхность сильно охлаждается, а пыль и окружающая атмосфера, напротив, разогреваются. В атмосфере Марса наблюдаются песчаные вихри, закручивающие столбы пыли до 8 км высотой. Частицы облаков состоят из силикатных и ледяных пылинок. Посадочный модуль «Патфайндер», исследовавший Марс в 1997 г., показал: пыль на Марсе поднимается так высоко в атмосферу, что закрывает гору Олимп.

Марс обладает слабым магнитным полем напряженностью в 500 раз меньше земного.

#### Вопросы и упражнения

1. Из каких оболочек состоят планеты? 2. Перечислите источники нагрева недр планет. 3. Что называют гравитационной дифференциацией? 4. Из каких основных химических элементов состоит поверхность Земли? Меркурия? Марса? 5. Опишите поверхности планет земной группы. 6. Каковы особенности атмосфер планет земной группы?

## § 14. ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ. ПЛУТОН

**1. Юпитер.** Юпитер — самая большая из планет-гигантов (рис. 14.1). Его масса намного превышает массу всех других планет, вместе взятых. Юпитер представляет собой газообразное тело с чрезвычайно мощной атмосферой, состоящей главным образом из водорода и гелия. По средней плотности, преобладанию водорода и гелия Юпитер похож на звезды. В отличие от планет земной группы, у гигантов нет твердой поверхности. То, что мы наблюдаем, — это вершины облаков, плавающих в атмосфере. Из-за быстрого вращения планет-гигантов и сильных ветров облака вытягиваются в полосы, параллельные экватору. Окраску облакам придают примеси аммиачных образований, метан и другие сложные соединения.

### ПАРАМЕТРЫ ЮПИТЕРА

Звездная величина	-2,7	Диаметр по экватору	142 800 км
Среднее расстояние до Солнца	778,3 млн км	Масса (Земля = 1)	318
Период обращения вокруг Солнца	5,203 а. е.	Средняя плотность	$1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период вращения вокруг оси	11,86 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	2,6
	9,93 ч	Температура верхнего слоя облаков	-133 °C



Самую загадочную структуру облаков имеет Юпитер. В экваториальной зоне (от +9 до -9°) газовые течения направлены строго с запада на восток. Скорость движения газовых масс достигает 100 м/с. Вблизи широт от +20 до -20° вещество движется в противоположную сторону, с востока на запад, со скоростью около 50 м/с. Между основными течениями существуют вихри и струи.

Светлые и темные полосы атмосферы Юпитера объясняются различными зонами давления. Светлые зоны — это области высокого давления, а темные — низкого. Теплые газы поднимаются вверх в области зон и остывают, достигнув верхней границы облаков. Охлаждаясь, они падают в соседние полосы, где давление низкое.

Исследования межпланетной космической станции «Галилео» показали, что ветры в атмосфере Юпитера могут двигаться со скоростью 180 м/с и вызываются внутренним источником тепла. Эти ветры похожи на реактивные струи.

Для Юпитера, как и для всех планет-гигантов, характерны светлые и темные овальные пятна. Наиболее примечательное из них — Большое Красное пятно (рис. 14.2), наблюдающееся в течение трех веков. Это огромный и очень устойчивый



Рис. 14.1. Юпитер. Фотография получена космическим аппаратом «Кассини». На фоне планеты хорошо просматривается спутник Ио



Рис. 14.2. Большое Красное пятно на Юпитере

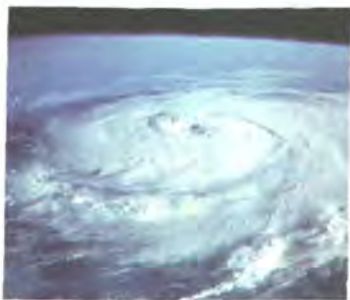


Рис. 14.3. Тропический циклон над Южной Америкой

В полярных облаках Юпитера наблюдается явление, подобное земному северному сиянию (рис. 14.4). Представления о внутреннем строении планет-гигантов получены на основе наблюдений и теоретических моделей, основанных на свойствах водорода.

На дне уплотняющейся вглубь на 1500 км атмосферы Юпитера находится слой жидкого водорода. Затем атмосфера переходит в особое газожидкое состояние.

На уровне примерно 0,77 радиуса планеты начинается оболочка, где водород приобретает свойства металла. Здесь он сжимается так сильно ( $4 \cdot 10^{12}$  Па), что электроны покидают свои атомы и свободно перемещаются. Это приводит к появлению магнитного поля Юпитера, напряженность которого на границе облачного слоя в 12 раз выше, чем у земного магнитного поля.

В центре Юпитера находится твердое ядро, состоящее из оксидов кремния, магния и железа с примесями. Диаметр внутреннего ядра — около 25 тыс. км, температура в его центре составляет 23 000 К. Такая высокая температура объясняется медленным гравитационным сжатием планеты.

В 1979 г. космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» обнаружили у Юпитера кольца (рис. 14.5). Они состоят из очень мелких пылинок (0,2—200 мкм). Эти пылинки постепенно падают в атмосферу Юпитера, а их место занимают другие, которые образуются при столкновении малых

спутников, особенно Амальтеи, с метеоритными телами.

спутников, особенно Амальтеи, с метеоритными телами.

**2. Сатурн.** Сатурн — это вторая по величине планета-гигант, окруженная красивыми кольцами (рис. 14.6). Диск планеты заметно сплюснут у полюсов. Это вызвано тем, что у Сатурна самая низкая плотность из всех планет Солнечной системы.

Кольца Сатурна (рис. 14.7) заметил еще Галилео Галилей: в 1610 г. он обнаружил по обе стороны диска непонятные придатки. Но только Христиан Гюйгенс в 1655 г. различил тонкое плоское кольцо, не соприкасающееся с планетой. С Земли в телескоп можно увидеть несколько колец, отделенных друг от друга темными промежутками.

На основе спектральных исследований в 1895 г. русский ученый А. А. Белопольский установил, что кольца не монолитные, а состоят из отдельных мелких тел. Снимки, полученные космическим аппаратом «Вояджер-2», показали, что систему колец образуют тысячи узких колечек. Каждое из них состоит из бесчисленного множества обломков льда размером от мельчайших пылинок до нескольких метров. Толщина колец, видимая с ребра, не превышает 2 км, а толщина отдельного колечка — больше 30 м.



Рис. 14.6. Сатурн. Фотография сделана Космическим телескопом Хаббла

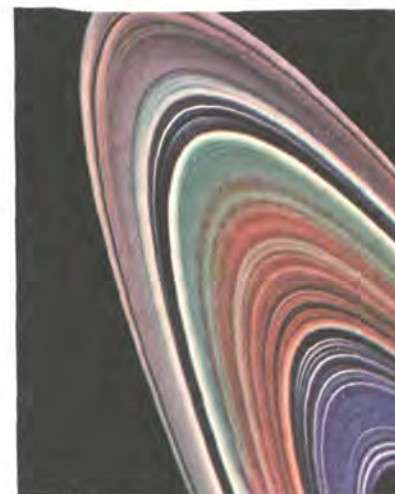


Рис. 14.7. Тонкая структура колец Сатурна (цвета не натуральные — они подчеркивают различие минералогического состава колец)

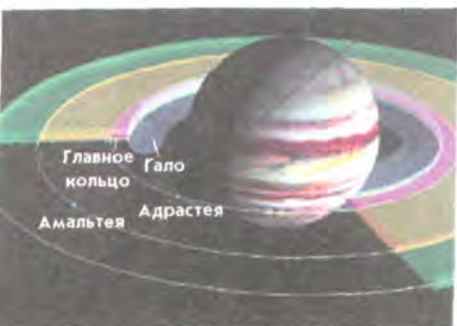


Рис. 14.5. Схема колец Юпитера

### ПАРАМЕТРЫ САТУРНА

Звездная величина	0,7	Диаметр по экватору	120 536 км
Среднее расстояние до Солнца	1427 млн км	Масса (Земля=1)	95,1
Период обращения вокруг Солнца	9,54 а. е.	Средняя плотность	$0,7 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Период вращения вокруг оси	10,65 ч	Сила притяжения на экваторе (Земля=1)	1,1
		Температура верхнего слоя облаков	-170 °C



Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна, которая имеет наклон  $27^\circ$  к плоскости орбиты. При движении Сатурна по орбите кольца, сохраняя положение в пространстве, дважды за одно обращение планеты вокруг Солнца оказываются повернутыми к Земле своим ребром. А так как толщина их мала, то в небольшие телескопы они в это время не видны. Диаметр по наружному краю кольца составляет 272 тыс. км, а по внутреннему — 144 тыс. км. Суммарная масса колец составляет около  $3 \cdot 10^{-8}$  массы Сатурна.

Напряженность магнитного поля Сатурна близка к земной.

**3. Уран.** Уран — третья по величине планета-гигант. Планета очень красивого зеленовато-голубоватого цвета (рис. 14.8). Причина этого кроется в составе атмосферы планеты и ее температуре. При температуре  $-217^\circ\text{C}$  (см. табл. 14.1) в верхних слоях водородно-гелиевой атмосферы Урана образовалась метановая дымка. Метан хорошо поглощает красные лучи и отражает голубые и зеленые. Поэтому планета и приобрела красивый бирюзовый цвет. В атмосфере Урана не наблюдается никаких заметных возмущений.

В 1977 г. были открыты кольца Урана. Снимки, сделанные «Вояджером-2» в 1986 г., подтвердили их существование. Уран окружен одиннадцатью узкими кольцами, располагающимися в плоскости экватора на расстоянии от 42 до 51,4 тыс. км (или 1,65—2,02 радиуса) от центра планеты. Типичная ширина колец от 1 до 8 км, только у самого большого она меняется от 22 до 93 км. Толщина колец не превышает 1 км. Кольца Урана состоят из мелкой пыли и небольших твердых темных частиц.

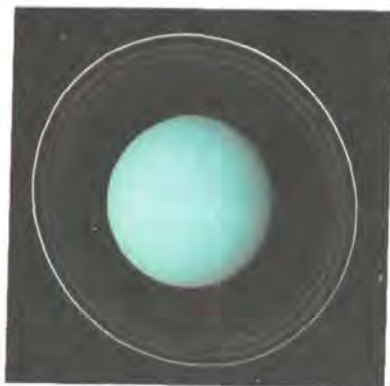


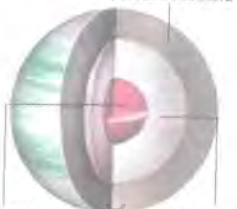
Рис. 14.8. Уран. Фотография получена Космическим телескопом Хаббла

#### ПАРАМЕТРЫ УРАНА

Звездная величина	5,5
Среднее расстояние до Солнца	2871 млн км 19,18 а. е.
Период обращения вокруг Солнца	84,0 земного года
Период вращения вокруг оси	17,24 ч

Диаметр по экватору	51 177 км
Масса (Земля=1)	14,6
Средняя плотность	$1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Сила притяжения на экваторе (Земля=1)	0,9
Температура верхнего слоя облаков	$-217^\circ\text{C}$

Атмосфера из водорода, гелия и метана



Каменное ядро  
Мантия из замерзших воды, метана и аммиака

Магнитное поле Урана имеет одну интересную особенность. Ось вращения планеты почти лежит в плоскости орбиты, и линии магнитного поля скручены вращением Урана в длинный штопор позади планеты. Напряженность магнитного поля почти равна земной.

**4. Нептун.** Нептун — самый маленький гигант. Находится почти на самом краю Солнечной системы и получает очень мало солнечной энергии. Но, несмотря на это, планета очень активна. На фотографиях Нептуна хорошо видны облака, появляющиеся и исчезающие в атмосфере планеты (рис. 14.9). Примечательной деталью Нептуна является и Большое Темное пятно, схожее по структуре с Большим Красным пятном Юпитера.

Скорость ветра в атмосфере Нептуна достигает рекордного значения — 600 м/с.

Предположение о существовании колец у Нептуна было выдвинуто в 1984 г. на основе наблюдений по покрытию звезд планетой. Три замкнутых и одно незамкнутое кольцо видны на снимках, полученных космическим кораблем «Вояджер-2» в 1989 г. Располагаются кольца на расстоянии от 1,7 до 2,5 радиуса планеты. Ширина колец — 1700, 15, 5000 и 50 км соответственно. Они состоят из мелких силикатных пылинок, отражающих 6 % солнечного света.

Напряженность магнитного поля Нептуна в 3 раза меньше, чем у Земли.

**5. Плутон.** Плутон — самая далекая планета Солнечной системы. Он был открыт только в 1930 г. Орбита Плутона имеет самый большой наклон к эклиптике ( $17^\circ$ ) среди планет Солнечной системы и вытянута настолько, что пересекает орбиту Нептуна.



Рис. 14.9. Нептун с Большим Темным пятном. Фотография сделана космическим аппаратом «Вояджер-1»

#### ПАРАМЕТРЫ НЕПТУНА

Звездная величина	7,8
Среднее расстояние до Солнца	4498 млн км 30,1 а. е.
Период обращения вокруг Солнца	164,8 земного года
Период вращения вокруг оси	16,04 ч

Диаметр по экватору	49 528 км
Масса (Земля=1)	17,2
Средняя плотность	$1,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Сила притяжения на экваторе (Земля=1)	1,1
Температура верхнего слоя облаков	$-214^\circ\text{C}$

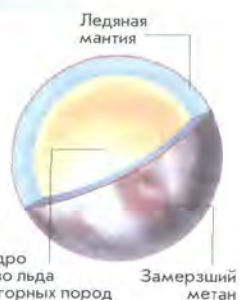
Атмосфера из водорода, гелия и метана



Каменное ядро  
Рыхлая смесь из замерзших воды, аммиака и метана

## ПАРАМЕТРЫ ПЛУТОНА

Звездная величина	14	Диаметр по экватору	2304 км
Среднее расстояние до Солнца	5915 млн км	Масса (Земля=1)	0,002
Период обращения вокруг Солнца	39,4 а. е.	Средняя плотность	$2,0 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Период вращения вокруг оси	247,7 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля=1)	0,07
	6,4 земных суток	Температура поверхности	-230 °С



Американский астроном Джеймс Кристи 22 июня 1978 г. открыл у Плутона спутник, названный Хароном. Благодаря этому появилась возможность уточнить массу Плутона, которая оказалась меньше массы Земли в 460 раз. Харон обладает массой в 7,2 раза меньшей, чем Плутон (рис. 14.10), и почти в 2 раза меньше по размерам.

Плутон и Харон по плотности занимают положение между планетами-гигантами и планетами земной группы. Они состоят из каменных пород и льда.

Периоды обращения Харона вокруг Плутона и вращения самой планеты одинаковы и равны 6,4 суток. Следовательно, если бы наблюдатель находился в одном полушарии Плутона, то Харон всегда, и днем и ночью, наблюдался бы на небе в одном и том же месте, а в другом полушарии вообще никогда бы не был виден.

Поверхность Плутона покрыта метановым льдом и поэтому имеет сероватый оттенок в отличие от красноватого Харона, где преобладают обычные скальные породы и водяной лед. Так как Плутон находится очень далеко, до сих пор не удалось получить четких снимков его поверхности (рис. 14.11). При прохождении перигелия (этот период можно считать «летом» для Плутона) у планеты



Рис. 14.10. Плутон и Харон. Фотография получена Космическим телескопом Хаббла



Рис. 14.11. Карта поверхности Плутона, выполненная на основе исследований с помощью Космического телескопа Хаббла

появляется очень разреженная метано-азотная атмосфера, давление которой в 7 тыс. раз меньше, чем у поверхности Земли. Температура на Плуtone в этот период колеблется (по разным оценкам) от  $-228$  до  $-206$  °С.

Плутон является самой маленькой среди больших планет. Кроме того, он обладает самым массивным спутником (по отношению масс спутник — планета). Ледяной Плутон больше похож на астероид или спутник планеты-гиганта, чем на полноценную планету. Поэтому Плутон в марте 1999 г. Международным Астрономическим союзом был переведен в разряд планет-астероидов, с присвоением порядкового номера астероида и с сохранением статуса планеты Солнечной системы.

Таблица 14.1

## АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

Характеристики	Планеты			
	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Химический состав, %	Н — 89; Не — 11 (по объему); NH <sub>3</sub> — 0,2; CH <sub>4</sub> — 0,1; сероводород — 0,002	Н — 94; Не — 6; NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> — доли процента	Н — 83; Не — 15; CH <sub>4</sub> — 2	Н — 84; Не — 15; CH <sub>4</sub> — 1
Температура (на уровне облаков), °С	-133	-170	-217	-214
Скорость ветров (на уровне облаков), м/с	180	480	200	600

## Вопросы и упражнения

1. Укажите на отличие основных физических характеристик планет-гигантов от планет земной группы.
2. Зная углы наклона осей планет-гигантов к плоскостям их орбит и периоды их обращения вокруг Солнца, проанализируйте, как происходит смена времен года на Сатурне, Уране и Нептуне.
3. Расскажите об особенностях строения планет-гигантов.
4. Что представляют собой кольца планет?
5. Почему иногда даже в крупных телескопы не видны кольца Сатурна?

## § 15. ЛУНА. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ

**1. Физические условия на Луне.** Луна — единственный естественный спутник Земли (см. Приложение 10). Это тело шарообразной формы радиусом 1738 км. Масса Луны всего в 81 раз меньше массы Земли. Средняя плотность Луны равна 0,6 плотности Земли, а ускорение свободного падения в 6 раз меньше земного, т. е. на лунной поверхности предметы весят в 6 раз меньше, чем на Земле. Солнечные сутки на Луне продолжаются синодический месяц (29,5 земных суток). На Луне нет воды в жидком состоянии и практически нет атмосферы. За лунный день, который длится около 15 земных суток, поверхность успевает нагреться до +130 °С, а ночью охладиться до -170 °С. При высоких температурах скорость газовых молекул превышает вторую космическую скорость для поверхности Луны, равную 2,38 км/с, поэтому газы, выделяющиеся из недр спутника Земли или образующиеся при падении метеорных тел, быстро покидают Луну. Без газовой атмосферы Луна подвержена воздействию всех видов электромагнитного излучения Солнца, а также ударам метеоритных тел разного размера.

Невооруженным глазом на лунной поверхности различимы светлые и темные участки. На темные, относительно ровные области поверхности, названные «морями», приходится 16,9 % всей поверхности Луны. Более светлые гористые участки, так называемые «материки», занимают оставшуюся поверхность и характеризуются наличием горных хребтов, кольцевых гор, кратеров (рис. 15.1). Первую подробную лунную карту составил в 1647 г. польский астроном Ян Гевелий. С того времени до наших дней сохранились названия морей — Море Спокойствия, Море Кризисов и др. Названия горных



Рис. 15.1. Вид Луны в телескоп

### ПАРАМЕТРЫ ЛУНЫ

Звездная величина	-12,7
Среднее расстояние до Земли	384,4 млн км
	60,3 радиуса Земли
Период обращения вокруг Земли	27,32 земных суток
Период вращения вокруг оси	27,32 земных суток

Диаметр по экватору	3476 км
Масса (Земля = 1)	0,012
Средняя плотность	$3,34 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,17
Температура поверхности	от -170 до +130 °С



Рис. 15.2. Карта-схема крупнейших деталей видимого в телескоп с Земли полушария Луны

хребтов, тянущихся обычно вдоль окраин морей, созвучны земным — Апеннины, Кавказ, Карпаты и др. Апеннины имеют максимальную высоту около 6 км, а Карпаты — лишь 2 км (рис. 15.2).

Самыми многочисленными образованиями на лунной поверхности являются кратеры (рис. 15.3). Их размеры колеблются от микроскопических до более 100 км в диаметре. Кратер состоит из кольцевого вала и внутренней равнины. У большинства «молодых» кратеров на дне возвышаются центральные горки (рис. 15.4). В полнолуние у «молодых» кратеров, имеющих метеоритное про-



Рис. 15.3. Часть поверхности Луны. Фотография получена станцией «Зонд»



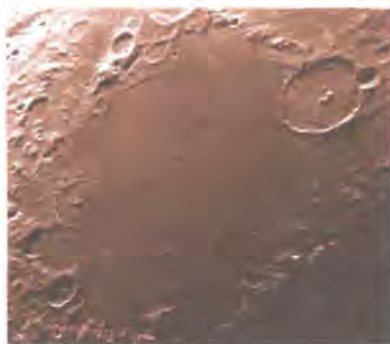


Рис. 15.4. Крупные кратеры метеоритного происхождения

исхождение, можно видеть лучевые системы — светлые полосы, радиально отходящие от кратера и тянущиеся на сотни километров.

Удар крупного метеорита или небольшого астероида о поверхность Луны сопровождается взрывом. При этом происходит выброс лунного вещества под разными углами. Значительная его часть попадает в космос, однако некоторая доля падает обратно на поверхность. Из струй измельченного

вещества и формируются лучевые системы. Для наблюдателя лучи кажутся более светлыми потому, что они лучше отражают свет, чем плотное вещество того же состава.

Крупные и средние кратеры названы в честь выдающихся ученых: Птолемей (диаметр 146 км), Архимед (73 км), Платон (100 км), Коперник (93 км), Тихо (85 км).

Космические исследования существенно углубили наши знания о Луне. В 1959 г. советским аппаратом «Луна-3» была впервые сфотографирована обратная, невидимая сторона Луны. В 1965 г. появилась первая полная карта Луны, составленная под научным руководством Ю. Н. Липского.

Нил Армстронг и Эдвин Олдрин стали первыми людьми, ступившими на поверхность Луны 20 июля 1969 г. Астронавты, находясь на Луне, могли видеть на ее небе нашу Землю (рис. 15.5). Американские космические корабли серии «Аполлон» в течение последующих трех лет шесть раз доставляли в разные места Луны экспедиции (12 астронавтов занимались исследованиями в местах посадок, им удалось собрать более 360 кг лунных образцов). Лунные породы доставляли и советские автоматические станции «Луна».

Поверхностный слой естественного спутника Земли состоит из мелкообломочного материала — **реголита** (рис. 15.6) и имеет толщину около 10 м. В состав лунного реголита входят также стеклянные сферические микрочастицы (рис. 15.7). Дробление лунных пород происходит в основном из-за микрометеоритной бомбардировки и резких перепадов температуры.



Рис. 15.5. Земля на небе Луны

Реголит обладает малой плотностью (верхний слой —  $1200 \text{ кг/м}^3$ ) и очень низкой теплопроводностью (в 20 раз меньше воздуха), поэтому уже на глубине около 1 м колебания температуры практически не ощутимы.

По химическому составу лунные породы очень близки к земным — типа базальтов. Породы лунных морей отличаются высоким содержанием окислов железа и титана, материковые — высоким содержанием окислов алюминия.

В последнее время космические станции обнаружили запасы водяного льда в полярных областях Луны. Поскольку угол наклона лунного экватора к эклиптике всего  $1,5^\circ$ , то дно даже неглубоких кратеров в полярных областях никогда не освещается солнечными лучами. При постоянной температуре  $-200^\circ\text{C}$  дно полярных кратеров покрывает смесь реголита со льдом. Источником возникновения и накопления лунных полярных льдов могут быть упавшие в эти области кометы, которые представляют собой ледяные тела.

Внутреннее строение Луны изучено благодаря записям сотрясений от ударов метеоритов, которые фиксировались доставленными на Луну сейсмографами. Под слоем реголита располагается кора, толщина которой на видимой (обращенной к Земле) стороне составляет 60 км, а на обратной — 100 км. Под корой находится мантия толщиной около 1000 км. Зона глубже 1600 км напоминает земную мантию, имеет толщину 430 км и температуру около 1800 К. Последние исследования подтвердили, что в центре Луны существует металлическое ядро радиусом около 300 км, масса которого составляет около 3% от общей массы Луны.

Возраст лунных пород, доставленных астронавтами и автоматическими станциями, около 4,5 млрд лет. Таким образом, Луна немного моложе Земли — всего на 60–100 млн лет.

Существует несколько гипотез образования Луны. По одной из самых популярных, Луна образовалась вместе с Землей из одной планетезимали. Согласно другой, Луна в свое время могла быть захвачена Землей. Выдвигалось даже предположение, что Земля могла разделиться на две части и что впадина Тихого океана — это «яма», оставшаяся после того, как Луна «вырвалась» из Земли.



Рис. 15.6. Основные типы частиц лунного реголита



Рис. 15.7. Стеклянные сферические микрочастицы лунного реголита

Некоторые ученые полагают, что Луна образовалась путем объединения крошечных камешков, обращавшихся вокруг Земли 4,5 млрд лет назад. Накопление частиц под действием сил гравитации, действующих вблизи Земли, стало «уменьшенным» вариантом такого же процесса, который происходил в первичной солнечной туманности и привел к рождению планет.

Рассматривается и такой механизм образования Луны: Земля, прошедшая основные стадии дифференциации вещества, столкнулась с крупным небесным телом (размером с Марс). Косой удар разрушил только верхние слои земных недр. На околоземную орбиту было выброшено вещество земной коры и мантии, из которого путем слияния сформировался спутник Земли.

**2. Спутники планет.** В Солнечной системе на начало 2003 г. известно 102 естественных спутника планет. Семь спутников, включая нашу Луну, имеют диаметр больше диаметра планеты Плутон, а Ганимед и Титан (табл. 15.1) даже превосходят по размеру Меркурий. Еще 9 спутников «перешагнули» 1000-километровый рубеж, размеры большинства меньше 500 км.

Небольшие спутники размером в десятки километров представляют собой каменные или ледяные тела неправильной формы. Их поверхности усеяны кратерами и покрыты мелкой пылью. Средние спутники (в несколько сотен километров) в основном шарообразные и имеют малую плотность. По внешнему виду их поверхность напоминает лунную. Отличаются разнообразием 7 крупнейших спутников. По своему строению они больше похожи на планеты земной группы. Крупнейшие спутники Юпитера были открыты давно, еще в 1610 г., Галилеем. Однако основные сведения о природе крупных спутников планет-гигантов получены в результате исследований с помощью космических аппаратов.

Таблица 15.1

## КРУПНЫЕ СПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Характеристики	Спутники						
	Ганимед	Титан	Каллисто	Ио	Луна	Европа	Тритон
Планета	Юпитер	Сатурн	Юпитер	Юпитер	Земля	Юпитер	Нептун
Диаметр, км	5270	5150	4820	3640	3480	3120	2710
Масса, $\times 10^{23}$ кг	1,48	1,40	1,08	0,893	0,735	0,480	0,214
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1940	1900	1840	3530	3340	3010	2070
Температура поверхности, К	-140	94	-140	130	От -100 до 400	-140	38



Рис. 15.8. Ио — спутник Юпитера. На фотографии, сделанной межпланетным аппаратом «Галилео», видно извержение вулкана (слева)



Рис. 15.9. Европа — спутник Юпитера

Модель внутреннего строения крупных спутников предусматривает наличие у них трех оболочек: коры, мантии и ядра. Ядром, содержащим соединения железа и занимающим от 0,3 до 0,6 радиуса спутника, обладают Ио (рис. 15.8), Европа (рис. 15.9) и Ганимед. У Тритона и Каллисто (рис. 15.10) каменные ядра такие же или даже крупнее.

Силикатная (каменистая) кора Ио имеет толщину 30 км. Под ней на глубине 100 км находится жидкая магма, температура которой достигает 2000 К. Магма питает многочисленные вулканы Ио. Остальные спутники покрыты ледяной оболочкой разной толщины, под которой расположена каменная мантия.

На поверхности Тритона и Ганимеда видны следы тектонической деятельности: разломы, сжатия, трещины, мелкие хребты. Каллисто отличается от них наличием многочисленных кратеров ударного происхождения.

Ледяную оболочку Европы пересекает сеть светлых и темных узких полос. Это трещины в толстой ледяной коре, вызываемые приливными воздействиями Юпитера. Многолетние наблюдения за рисунком, который образуют трещины, показали, что ледяные массы немного смешиваются относительно друг друга. Это значит, что подо льдом находится вода. В некоторых местах ледяного панциря Европы космический аппарат «Галилео» сфотографировал странные хаотические нагромождения старых



Рис. 15.10. Каллисто — спутник Юпитера

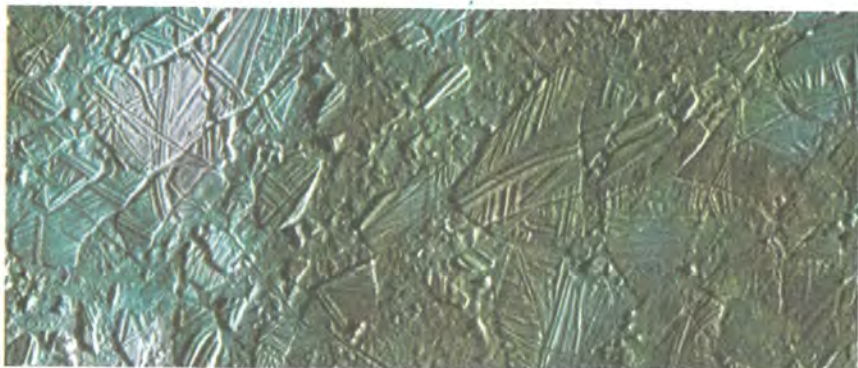


Рис. 15.11. Хаосы на спутнике Европа

льдин, замороженных в свежий лед. Эти структуры называются «хаосы» (рис. 15.11). Они свидетельствуют о том, что время от времени лед подтаивает, но потом снова застывает. Не успевшие растаять льдины оказываются замороженными в новый лед. О том, что ледяная поверхность Европы молода, свидетельствует и почти полное отсутствие на ней ударных кратеров.

На Ио нет признаков существования значительного количества воды ни внутри спутника, ни тем более на его поверхности. Зато там открыты многочисленные вулканические извержения. Выброшенные вулканами и оседающие на поверхности соединения серы придают спутнику окраску от белой до ярко-красной и черной (см. рис. 15.8). При этом цвет зависит от температуры вещества. Из жерла вулканов газы выбрасываются на высоту около 200 км со скоростью истечения примерно 1 км/с. Газовые гейзеры замечены над полярной шапкой Тритона. Струи темного вещества вырываются вверх с его поверхности и достигают высоты 8 км.



Рис. 15.12. Спутник Сатурна — Титан имеет очень плотную атмосферу

Наиболее мощную атмосферу имеет Титан (рис. 15.12). Она на 60% более густая, чем на Земле, и примерно на 85% состоит из азота. Давление у поверхности в 1,5 раза превышает земное. Метановые облака и дымка не позволяют разглядеть поверхность Титана. Ученые полагают, что поверхностная среда спутника может быть подобна земной среде того периода, пока жизнь не начала пополнять атмосферу нашей планеты кислородом. Скорее всего, на поверхности Титана существуют моря



Рис. 15.13. Спутник Марса — Фобос. На переднем плане кратер Стикни

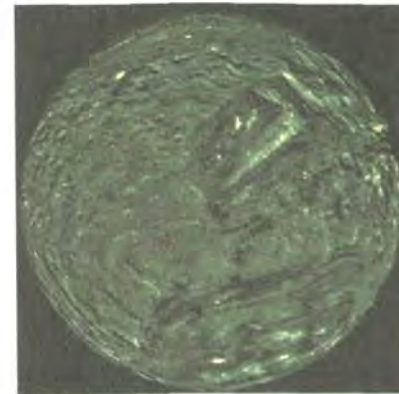


Рис. 15.14. Спутник Урана — Миранда

и озера из ацетилена, этана, этилена, которые могут быть покрыты замороженным метаном и аммиаком. Также предполагается наличие водяного льда.

Разреженную атмосферу из азота и метана имеет Тритон ( $10^{-5}$  земной). Слабая атмосфера из молекулярного кислорода окутывает Ганимед и Европу ( $10^{-9}$  и  $10^{-11}$  земной). Образуется она так: солнечный свет, космические лучи и микрометеориты выбивают с ледяной поверхности молекулы воды, которые под действием ультрафиолетового излучения распадаются на атомы водорода и кислорода. Атомы водорода сразу же покидают атмосферу, а атомы кислорода объединяются в молекулы. Разреженная атмосфера из углекислого газа есть у Каллисто, такой же разреженной атмосферой из окислов серы и вулканических газов обладает Ио ( $10^{-9}$  земной).

У нескольких крупных спутников обнаружены собственные магнитные поля.



Рис. 15.15. Спутник Сатурна — Мимас. Большой кратер имеет диаметр свыше 100 км



Рис. 15.16. Спутник Сатурна — Энцелад

Из планет земной группы, кроме Земли, только Марс имеет два спутника, открытых в 1877 г. американским астрономом Асафом Холлом. Это небольшие каменные тела неправильной формы размером  $27 \times 19$  км — Фобос (рис. 15.13) и  $16 \times 11$  км — Деймос.

Изображения некоторых примечательных спутников планет Солнечной системы представлены на рис. 15.14—15.16.

### Вопросы и упражнения

1. Охарактеризуйте физические условия на Луне. Чем они отличаются от привычных для нас условий на Земле? 2. Какие детали на Луне видны невооруженным глазом и в телескоп? 3. Приведите примеры названий некоторых лунных кратеров, морей и хребтов. 4. Почему обратную сторону Луны удалось сфотографировать только при ее облете на космическом аппарате? 5. Ось вращения Луны почти перпендикулярна к плоскости ее орбиты. Будет ли на небе Луны  $\alpha$  Малой Медведицы играть роль Полярной звезды? 6. Что собой представляет лунный грунт? Сильно ли он отличается от земного? 7. Опишите внутреннее строение Луны. Каким образом оно было изучено? 8. Какие гипотезы образования Луны вы знаете? 9. Назовите крупнейшие спутники планет Солнечной системы. Расскажите о некоторых характерных особенностях каждого из них.

IV

## § 16. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**1. Астероиды.** Еще Иоганн Кеплер пришел к выводу, что совершенству Солнечной системы мешает большой пустой промежуток между орбитами Марса и Юпитера, и предположил, что там должна находиться планета. Эту гипотезу Кеплера подтвердило правило планетных расстояний, открытое Иоганном Тициусом в 1766 г. Согласно этому правилу, на расстоянии 2,8 а. е. от Солнца должна находиться планета. Астрономы пытались ее отыскать на протяжении многих лет. Наконец, итальянский астроном Джузеппе Пиацци 1 января 1801 г. обнаружил новый небесный объект примерно на нужном расстоянии. Но размеры объекта оказались очень малы. Так была открыта первая малая планета — астероид Церера, имеющая диаметр около 1000 км. К 1807 г. удалось обнаружить еще 3 малые планеты: Палладу, Юнону и Весту, обращающиеся вокруг Солнца на расстоянии 2,4—2,8 а. е. С применением фотографии в астрономии (рис. 16.1) темпы открытия астероидов резко возросли. Только в 1999 г. было открыто 340 астероидов. К октябрю 2000 г. каталог содержал более 18 200 астероидов, из которых почти 9 тыс. имели названия.

Значительная часть (98 %) астероидов движется в плоскостях, близких к эклиптике, по орбитам с малым эксцентриситетом, располагаясь между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии 2,2—4,5 а. е. от Солнца. Вокруг Солнца астероиды обращаются в ту же сторону, что и большие планеты. Область пространства между орбитами Марса и Юпитера, где находится подавляющее большинство астероидов, называется Главным поясом астероидов. Суммарная масса всех астероидов составляет примерно  $10^{-3}$  массы Земли.

В Главном поясе астероидов 30 малых планет имеют размеры, превышающие 200 км. Форма большинства из них вытянутая, время вращения вокруг оси — несколько часов. Температура поверхности на таком большом удалении от Солнца составляет от  $-100$  до  $-150$  °С. Астероиды не имеют атмосферы.

Астероиды представляют собой остатки некогда существовавшего множества планетезималей. Процесс формирования их в планету был когда-то приостановлен из-за возмущений со стороны быстро вращающегося гиганта Юпитера. В результате этого объединение вещества сменилось на дробление. Возмущения планет-гигантов изменяют орбиты астероидов, заставляя их сталкиваться друг с другом, с планетами и их спутниками.

В 1951 г. американский астроном *Джерард Койпер* предсказал существование пояса астероидов за орбитой Нептуна. Теоретически этот пояс должен быть расположен на расстоянии 35—50 а. е. от Солнца. Возможно, это остаток первоначальной туманности, из которой сформировалась Солнечная система. Суммарная масса тел пояса Койпера сопоставима с массой Земли. В результате систематических поисков этих объектов к июню 1999 г. удалось открыть 113 больших астероидов. Размеры астероидов пояса Койпера колеблются от 100 до 1000 км.

Впервые фотографии астероидов получил межпланетный космический аппарат «Галилео». Он, следуя к Юпитеру, сфотографировал астероиды Гаспра, Ида (рис. 16.2) и Дактиль.



Рис. 16.1. След, оставленный движущимся астероидом на фотопластинке



Рис. 16.2. Астероиды Ида и Дактиль

IV

Первую мягкую посадку на поверхность астероида совершил космический аппарат 12 февраля 2001 г. Астероид Эрос оказался каменистым телом неправильной формы с размерами  $33 \times 13 \times 13$  км и равномерной плотностью  $2700 \text{ кг/м}^3$ , близкой к плотности пород земной коры. Поверхность астероида покрыта пылью и усеяна кратерами и валунами (диаметром до 100 м).

В настоящее время в Солнечной системе на расстоянии, не превышающем 100 а. е., находится около 1 млн малых тел размерами до 1 км. Из-за гравитационных сил со стороны планет-гигантов почти круговые орбиты астероидов увеличивают свой эксцентриситет до 0,8. Благодаря этому некоторые из них проникают внутрь орбит Марса, Земли и даже Меркурия. Число астероидов, имеющих диаметр более 1 км и пересекающих орбиту Земли, оценивается в 6500 объектов. Такие небесные тела могут сталкиваться с Землей не реже чем один раз в 20 млн лет. Существует не менее 200 тыс. астероидов с поперечником 100 м и более, орбиты которых могут пересекать орбиту Земли. Вероятность столкновения с таким телом — примерно 1 раз в 5 тыс. лет, при этом на Земле образуется кратер с поперечником около 1 км.

19 января 1996 г. на опасно близком расстоянии от Земли (450 тыс. км) пролетел астероид размером 1,5 км. Поэтому в США, России и других странах созданы Службы по слежению за опасными астероидами, чтобы в случае угрозы Земле какого-либо из них провести работу по изменению орбиты или его уничтожению.

Первоначально астероидам присваивали имена мифологических богинь, потом просто женские имена. Когда иссякли и они, астероиды стали называть в честь известных ученых, различных стран и городов. В настоящее время новому астероиду присваивается номер. Любой астроном или любитель, открыв новый астероид, после уточнения орбиты имеет право выбрать для него имя. Среди астероидов есть такие, названия которых связаны с Республикой Беларусь. В астероидном поясе обращаются малые планеты Минск, Белоруссия, Брест, Хатынь, Шагал и др. (см. Приложение 11).

**2. Метеориты.** В межпланетном пространстве движется огромное количество каменных и железных обломков самых разнообразных размеров — от пылинок до глыб в несколько метров. Это **метеоритные тела**. При вторжении с космической скоростью такого тела в атмосферу Земли оно в результате трения о воздух нагревается, начинает плавиться и светиться — на небе появляется огненный шар, который движется к Земле с ярким свечением и шумом. Это явление получило название **болид** (от греч. слова «болидос» — метательное копьё). В ночное время болид ярко освещает местность на десятки и сотни километров вокруг. Очень яркие болиды видны даже

днем при полном солнечном освещении. За огненным шаром вдоль его траектории остается след, представляющий в своем начале свечение ионизированных молекул воздуха и заканчивающийся струями пыли. Пылинки — это продукты разрушения метеоритного тела во время его движения в атмосфере, так как при полете с огромной скоростью тело нагревается до нескольких тысяч градусов. Вещество на его поверхности непрерывно расплавляется и частично испаряется: немедленно срывается потоками воздуха и разбрызгивается в виде мельчайших капелек. Они и составляют пылевой след болида. Нарастающее уплотнение воздуха создает вокруг метеоритного тела ударную волну. Она вызывает такие звуковые явления, как грохот и гул.

Уцелевший от полного разрушения остаток метеоритного тела падает на поверхность Земли. Это и есть **метеорит**. Метеориты представляют собой обломки астероидов. Как правило, они получают свои названия по ближайшему к месту падения населенному пункту или географическому объекту.

Метеоритное тело, имеющее огромную начальную массу в десятки и сотни тысяч тонн, проходит всю толщу атмосферы, сохраняя космическую скорость в несколько километров в секунду. В результате удара происходит взрыв, на месте удара образуется метеоритный кратер. Он может иметь размеры от нескольких метров до 100 км. Наиболее известен Аризонский кратер диаметром 1200 м, глубиной 180 м и высотой вала около 50 м (рис. 16.3). Возможно, он появился 30 тыс. лет назад. Кратеры большого размера (например, хорошо сохранившиеся на поверхности Луны) на Земле обнаружить сложно. Они быстро разрушаются из-за воздействия воздуха, воды, ветра, растительности, заносятся слоем песка и грунта. Ученые с помощью космических снимков научились находить древние метеоритные кратеры на Земле. Сегодня обнаружено более 100 астроблем — «звездных ран», как их образно называют ученые. На территории Беларуси к астроблемам относят Логойскую впадину. Диаметр этого древнего кратера 17 км. Он расположен в 6–8 км северо-западнее города Логойска Минской области.

Все метеориты по составу подразделяются на 3 основных класса: каменные, железные и железо-ка-



Рис. 16.3. Метеоритный кратер в Аризоне (США)

Каменные метеориты близки по составу к земным горным породам: содержат оксиды железа, кремния, магния. Около 85 % каменных метеоритов содержат **хондры** — сферические частицы размером от микроскопических зерен до горошины. Такие каменные метеориты называются **хондритами**, остальные каменные метеориты — **ахондритами**.

Самый крупный по массе метеорит найден в 1920 г. близ населенного пункта Гоба в Юго-Западной Африке. Это железный метеорит массой около 60 т. Однако такие крупные тела падают редко. На территории Республики Беларусь найдено шесть крупных метеоритов: например, в 1954 г. железный метеорит массой 300 кг у деревни Гресск Слуцкого района Минской области. Как правило, массы большинства метеоритов колеблются от сотни граммов до нескольких килограммов.

**3. Кометы.** О кометах, «хвостатых звездах», известно еще с давних времен. Первые китайские записи о кометах относятся к третьему тысячелетию до н. э. Вдали от Солнца комета выглядит слабым туманным объектом. По мере приближения к Солнцу она становится ярче, увеличивается в размерах и у нее появляется хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. Неожиданное появление яркой кометы, нарушающей небесную гармонию, всегда привлекало внимание людей и внушало им суеверный ужас. Комета считалась предвестницей войн, эпидемий и других несчастий (рис. 16.4).

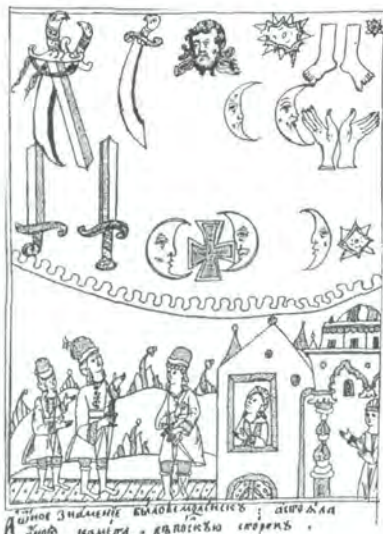


Рис. 16.4. Древняя гравюра, рассказывающая о появлении кометы в Смоленске

За историю человечества уже наблюдалось примерно 2000 комет. Зарегистрированы в каталогах около 1000 из них и определены элементы их орбит. Почти все кометы движутся по вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом, близким к единице. По типам орбит кометы подразделяются на **короткопериодические** (с периодом обращения меньше 200 лет) и **долгопериодические**. Первую периодическую комету обнаружил английский астроном Эдмунд Галлей. Он вычислил орбиты 24 ярких комет. Анализируя свой кометный каталог, Галлей заметил сходство элементов орбит комет 1531, 1607 и 1682 гг. и предположил, что это последователь-

ное возвращение одной и той же кометы, которая движется по сильно вытянутой эллиптической орбите с периодом почти 76 лет. В полном соответствии с предсказанием Галлея ее увидели в 1758 г. За этой кометой закрепилось название «комета Галлея» (рис. 16.5). Она движется по орбите с большой полуосью  $a = 17,94$  а. е. в направлении, противоположном движению Земли.



Рис. 16.5. Комета Галлея. 9 декабря 1985 г.

В строении кометы выделяются следующие составные элементы: ядро, голова и хвост.

Ядро кометы — это небольшое твердое ледяное тело, включающее тугоплавкие частицы и органические соединения. До 80 % ядра кометы состоит из водяного льда, а также из замерзшего углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), угарного газа, метана, аммиака ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ) и вкрапленных в них металлических частиц. Есть в кометных льдах и более сложные вещества, вплоть до аминокислот. По результатам исследований, выполненных космическими аппаратами, например, ядро кометы Галлея представляет собой монолитное тело неправильной формы размерами  $16 \times 8$  км, массой около  $3 \cdot 10^{14}$  кг и малой плотностью порядка  $600 \text{ кг/м}^3$  (рис. 16.6).

При приближении к Солнцу на расстоянии 1,5–2 а. е. у кометы образуется голова. Она возникает в результате нагрева ядра, испарения и выделения с его поверхности газов и пыли. Видимые поперечники голов комет с приближением к Солнцу достигают размеров  $10^4$ – $10^6$  км. Под действием давления солнечного излучения на газы, окружающие голову кометы, образуется хвост. Хвосты ярких комет тянутся на сотни миллионов километров. Например, хвост кометы Хиякутаки (рис. 16.7) — примерно на 300 млн км. Плотность частиц в хвостах комет очень низка и сравнима с межпланетной средой.

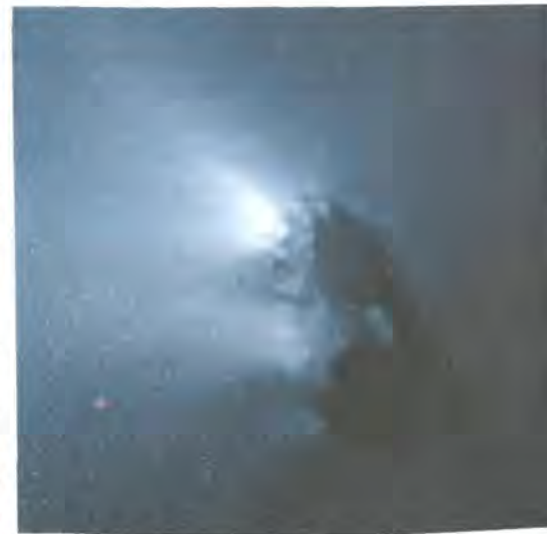


Рис. 16.6. Фотография головы кометы Галлея, полученная космическим аппаратом «Джотто»



Рис. 16.7. Комета Хиякутаки.  
Март 1996 г.

В зависимости от своей формы кометные хвосты подразделяются на несколько типов:

1) хвост образуется при ускорении солнечным ветром кометных ионов и направлен в сторону, противоположную Солнцу;

2) хвост несколько изогнут, состоит из пылинок, имеющих размер от долей до десятков микрометров;

3) хвост, состоящий из еще более крупной пыли, сильно изогнут под воздействием магнитного поля;

4) выброс из головы кометы направлен прямо к Солнцу; его часто называют «антихвост».

Каждое возвращение кометы к Солнцу не проходит бесследно. Ядро кометы теряет около 1/1000 своей массы. Поэтому, например, время жизни кометы Галлея оценивается в 20 тыс. лет. Но кометы могут существовать и меньше, так как они подвергаются разрушениям вследствие внутренних напряжений, возникающих из-за прогрева Солнцем или приливного воздействия Солнца и Юпитера. Погибают кометы также при столкновении с планетами, метеоритными телами. Документально зарегистрировано более 20 комет, распавшихся на отдельные компоненты на глазах наблюдателей. Так, в 1992 г. комета Шумейкеров — Леви сблизилась с Юпитером. В результате мощного гравитационного воздействия она развалилась на 22 осколка. Спустя два года, обогнув по орбите Юпитер, осколки вошли в атмосферу планеты со скоростью 60 км/с (рис. 16.8). В результате возникли гигантские вихревые темные образования, сравнимые по размерам с Землей.



Рис. 16.8. Падение кометы Шумейкеров — Леви на Юпитер

**4. Метеоры и метеорные потоки.** При движении мелкие тела Солнечной системы пересекают земную орбиту. Частичка, входя с космической скоростью в атмосферу Земли, образует светящийся след и вызывает явление **метеора**, или «падающей звезды» (рис. 16.9). Сама частичка в этом случае называется **метеорным телом** или **метеороидом**.

Размеры метеорных тел, вызывающих явление метеора, находятся в пределах от нескольких микрон для пылинок (тогда их можно наблюдать только в телескоп) до нескольких сантиметров (дают очень яркое свечение). По некоторым оценкам, приток метеорного вещества на Землю составляет около 50 тыс. тонн в год.

Около 1 % метеорных тел, встречающихся с Землей, прилетают из межзвездного пространства. Космические тела вторгаются в земную атмосферу со скоростью от 11 до 72 км/с, встречая на своем пути сильное и быстро нарастающее сопротивление воздуха. Поверхность метеорного тела разогревается до нескольких тысяч градусов и превращается в раскаленный газ, который ионизирует окружающие молекулы воздуха. В результате этого наблюдатель на Земле видит светящийся огненный след.

Свечение метеора начинается на высоте 120 км и исчезает на уровне 60—80 км от поверхности Земли, когда тело полностью испарится в земной атмосфере. Весь полет метеорного тела длится от десятых долей до нескольких секунд. Время наблюдения явления метеора зависит от скорости метеорного тела.

Свойства и природу метеорного вещества помогают изучать визуальные, фотографические, спектральные и радиолокационные наблюдения. Исследования показали, что весь комплекс метеорного вещества подразделяется на случайные (спорадические) метеорные тела и метеорные частицы, принадлежащие к метеорным роям.

Метеоры, появляющиеся в определенное время года и падающие десятками в час, принадлежат к **метеорным потокам**, или «звездным дождям». Метеорные потоки наблюдаются, когда Земля пересекает орбиту метеорного роя. Видимые пути метеоров одного потока, спроектированные на небесную сферу и продолженные в обратном направлении, пересекаются в одной области на небе, называемой **радиантом** (рис. 16.10).



Рис. 16.9. Яркий метеор



Рис. 16.10. Радиант метеорного потока

Один раз в 33 года наблюдаются метеорные дожди с радиантом в созвездии Льва, когда Земля встречается с самой плотной частью роя. Этот рой вызывает **метеорный поток Леонид** (рис. 16.11), наблюдающийся в середине ноября. Орбита данного метеорного роя практически совпадает с орбитой кометы 1866 I. Таким образом, установлено родство метеорных роев с кометами. Комета, разрушаясь, порождает метеорный рой.



Рис. 16.11. Метеорный дождь Леонид. Старинная гравюра. 1833 г.

Метеорный поток носит имя того созвездия или звезды, вблизи которых находится радиант, например Дракониды, Ориониды и др.

Среди метеорных потоков встречаются такие, интенсивность которых из года в год не меняется. Это значит, что метеорные частички распределены почти равномерно вдоль орбиты роя.

Подобным метеорным потоком является поток Персеид, наблюдающийся ежегодно в августе. Орбита этого роя совпадает с орбитой кометы 1862 III.

### Вопросы и упражнения

1. Расскажите, что такое астероид. Какие крупнейшие астероиды вы знаете? 2. Почему на астероидах нет атмосферы? 3. Какова связь комет с метеорами и астероидами? 4. Охарактеризуйте смысл понятий «метеор», «метеорит», «болид». 5. Какова природа происхождения «звездных дождей»? 6. Можно ли наблюдать метеоры на Луне? 7. Что такое радиант метеорного потока? 8. Определите ширину метеорного роя Драконид, если он действует с 6 по 10 октября. 9. Оцените массу ядра кометы Хейла — Боппа, считая, что она имеет шарообразное ядро радиусом 20 км и плотность кометного вещества  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

## V РАЗДЕЛ

# Методы исследования небесных тел

## § 17. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

**1. Электромагнитное излучение.** В исследовании природы небесных тел большое внимание уделяется изучению их электромагнитного излучения. Небесные тела в зависимости от своего физического состояния излучают электромагнитные волны различной длины.

В вакууме электромагнитные волны всегда распространяются с одинаковой скоростью  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Очень важным свойством электромагнитного излучения является то, что скорость его распространения не зависит ни от длины волны, ни от скорости движения источника. Волна характеризуется частотой  $\nu$  и длиной  $\lambda$ , между которыми существует зависимость:

$$c = \nu \lambda.$$

Электромагнитные волны, имеющие разную длину волны, взаимодействуют с веществом по-разному. Соответственно методы исследования электромагнитного излучения отличаются. В связи с этим электромагнитное излучение условно делится на несколько диапазонов (табл. 17.1).

Излучение с длиной волны от 390 до 760 нм человеческий глаз воспринимает как **свет**, причем разным длинам волн соответствуют разные цвета (от фиолетового до красного). Для обнаружения излучения в других диапазонах требуются специальные приборы.

Таблица 17.1

### ДИАПАЗОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ДИАПАЗОНЫ	ДЛИНА ВОЛНЫ, $\lambda$
Радиоволны	Больше 1 мм
Инфракрасные лучи	От 760 нм до 1 мм
Видимые лучи	От 390 до 760 нм
Ультрафиолетовые лучи	От 10 до 390 нм
Рентгеновские лучи	От 0,01 до 10 нм
Гамма-лучи	Меньше 0,01 нм