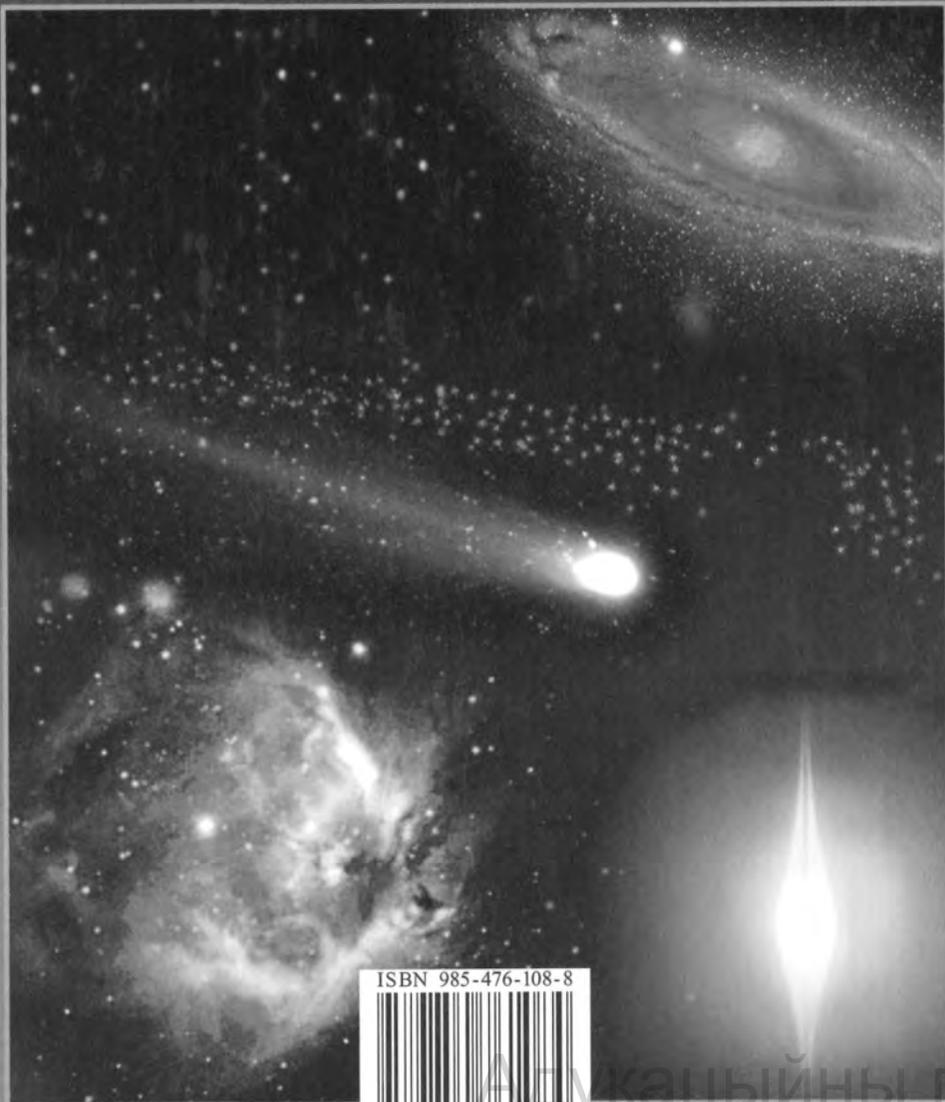


1416

Издательский центр БГУ



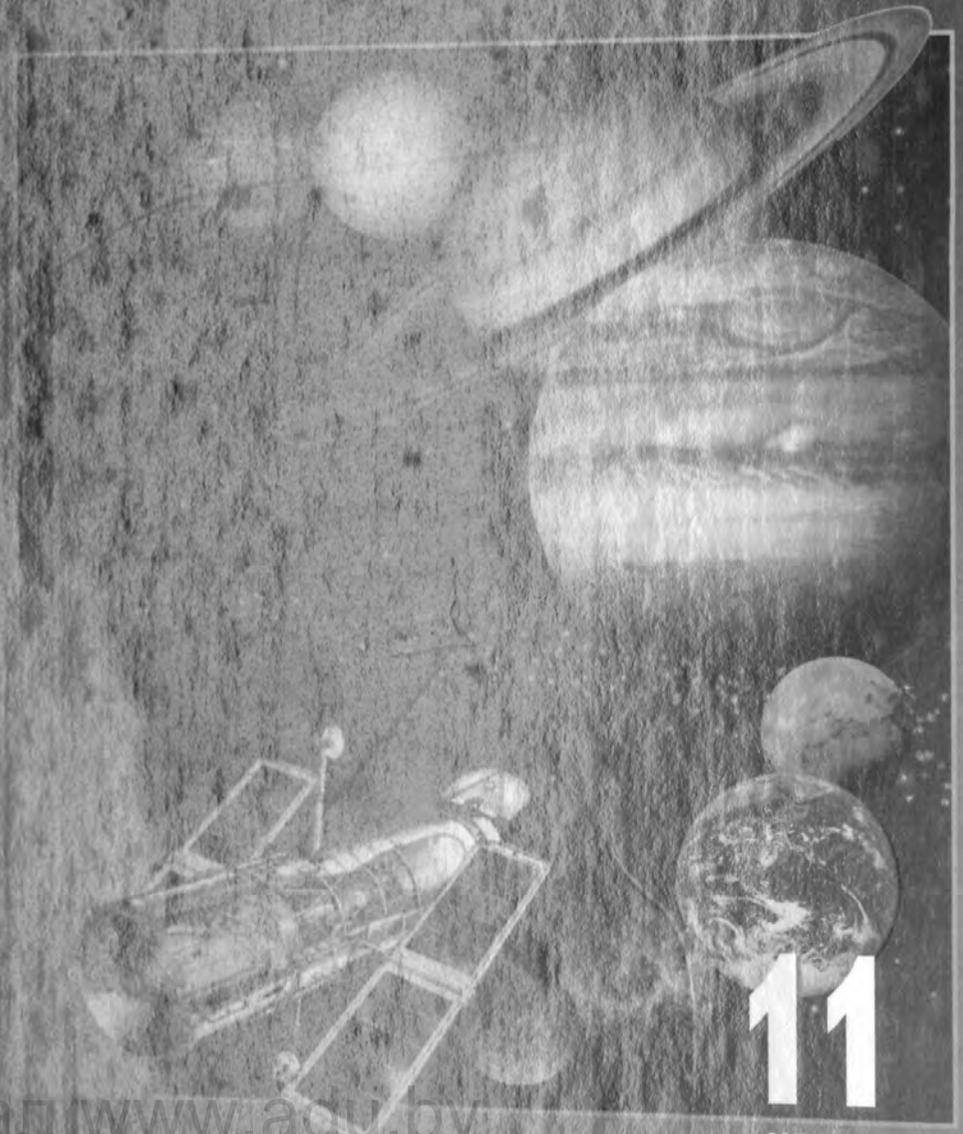
ISBN 985-476-108-8



9 780954 761084

И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалева

АСТРОНОМИЯ

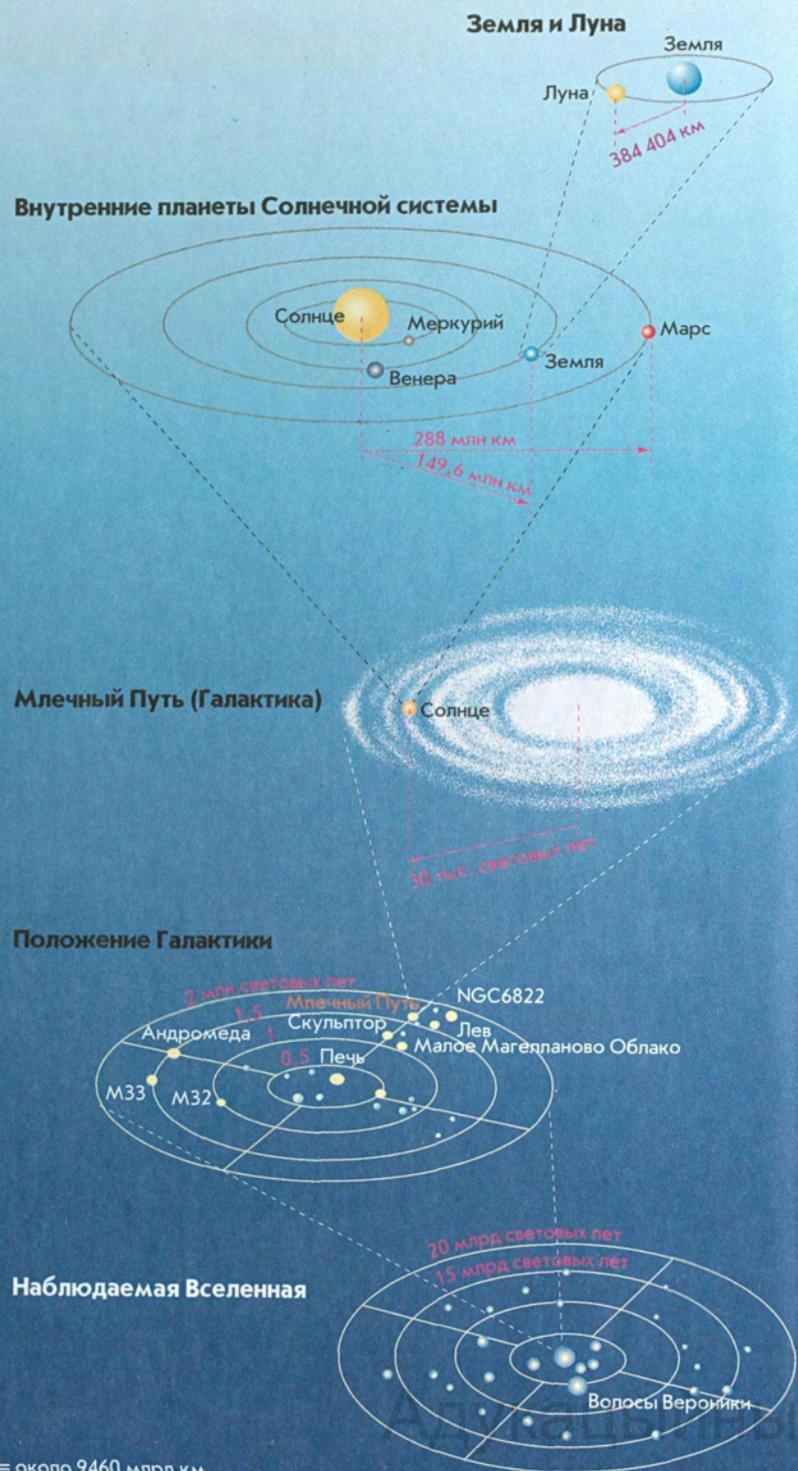


11

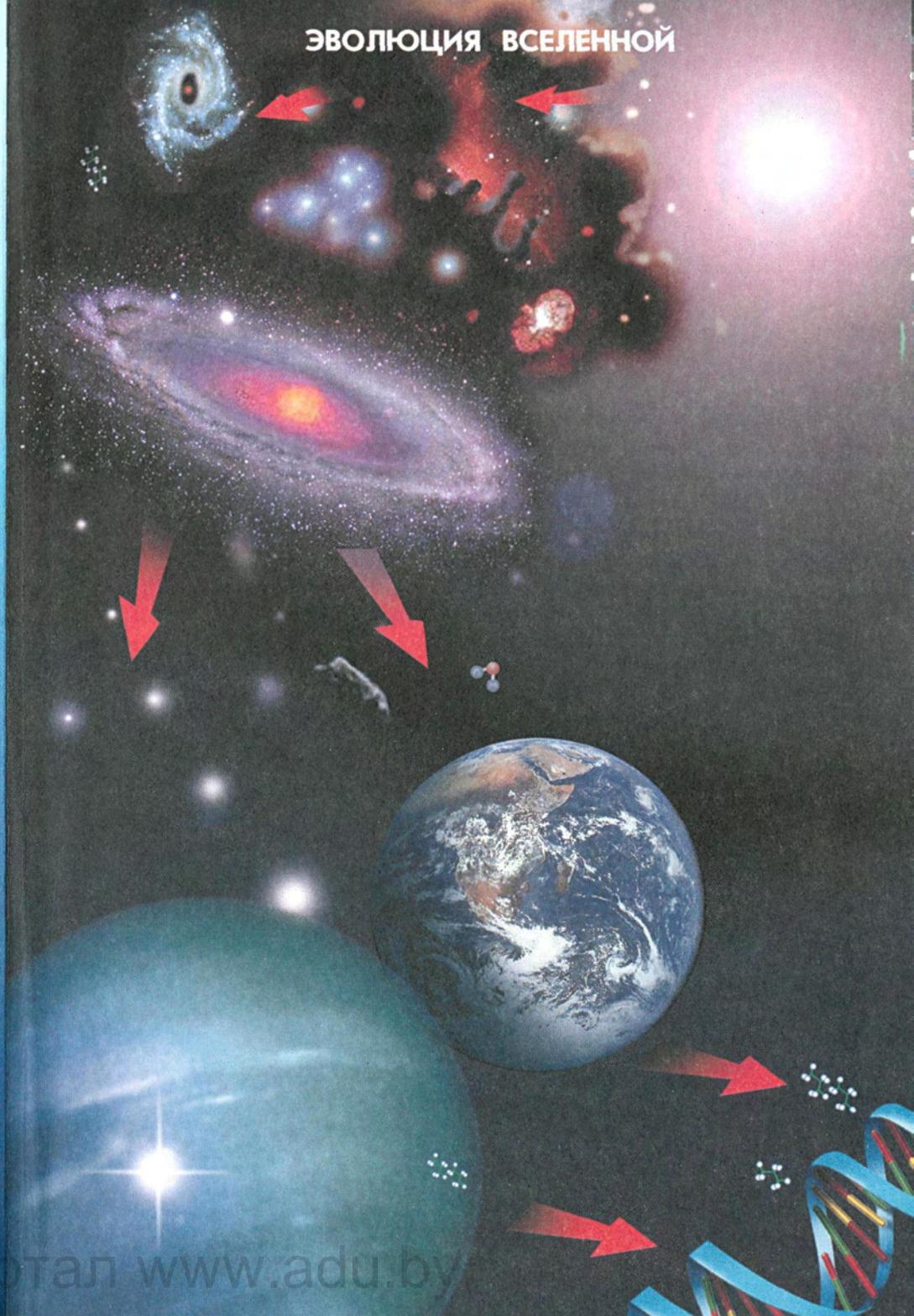
класс

Адукацыйны партал www.edu.by

СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ



ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ



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. Шимбалева. — 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., Шимбалева 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.

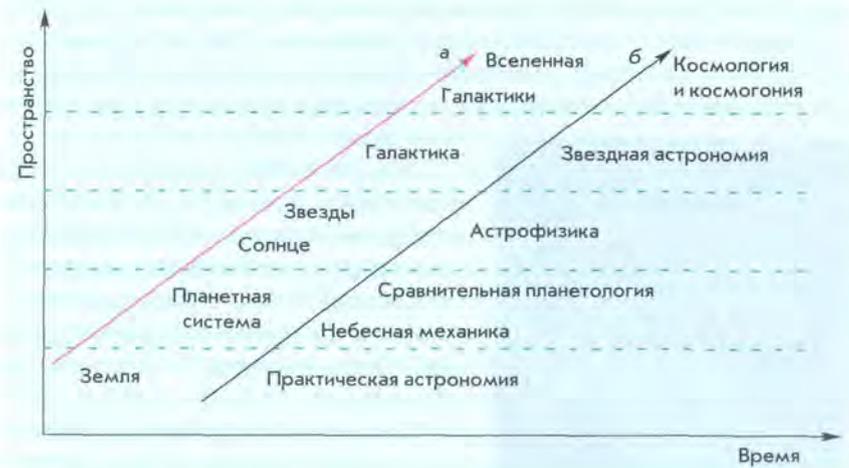


Рис. 1.3. Становление и развитие астрономической науки:
а — объекты изучения разделов астрономии;
б — последовательность возникновения разделов астрономии



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



Тигпарх (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 α соответствует самой яркой звезде в созвездии, β — второй по яркости звезде и т. д. Например, Сириус — α Большого Пса — это самая яркая звезда в созвездии Большого Пса; Ригель — β 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 α (например, 61 Лебедя).

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

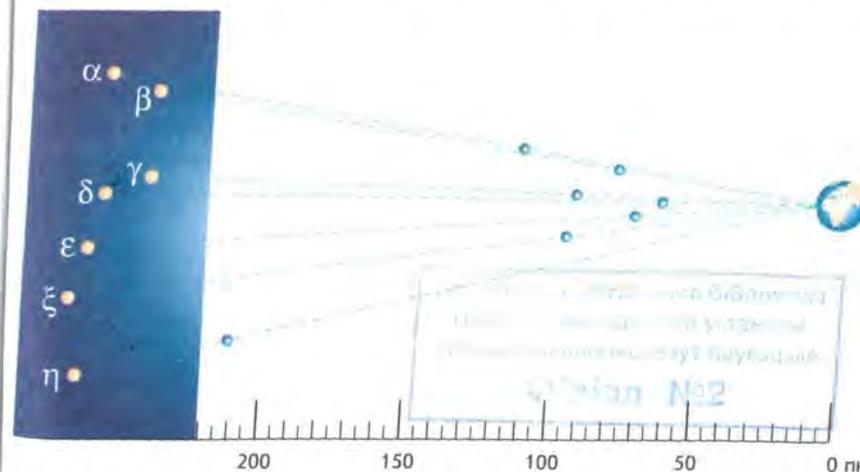


Рис. 2.6. Схема проецирования звезд в созвездии на небесной сфере



Рис. 2.5. Суточные дуги светил в полярной области неба

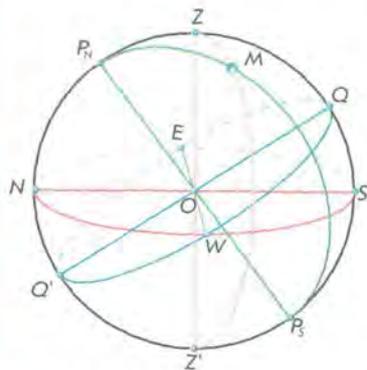


Рис. 2.7. Небесная сфера:
 O — центр небесной сферы (место нахождения наблюдателя); P_N — северный полюс мира; P_S — южный полюс мира; $P_N P_S$ — ось мира (полярная ось); Z — зенит; Z' — надир; E — восток; W — запад; N — север; S — юг; Q — верхняя точка небесного экватора; Q' — нижняя точка небесного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

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 (γ) и осеннего (ω) 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.

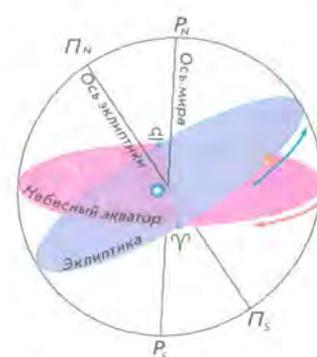


Рис. 2.8. Эклиптика — путь Солнца на небесной сфере

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° 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° .

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: $z + h = 90^\circ$.

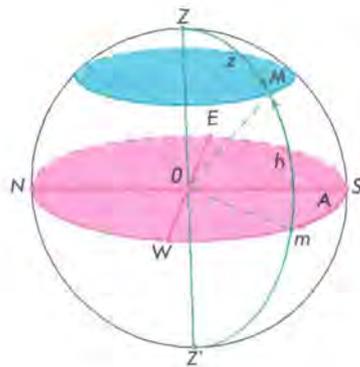


Рис. 3.1. Горизонтальная система координат: h — высота светила M над горизонтом; z — зенитное расстояние; A — азимут

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** (δ) и **прямое восхождение** (α).

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° к южному полюсу мира.

За начальную точку отсчета на небесном экваторе принимается точка весеннего равноденствия Υ , 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° в градусной мере или от 0 до 24^h в часовой мере.

Для некоторых астрономических задач (связанных с измерением времени) вместо прямого восхождения (α) 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 (α , δ) 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

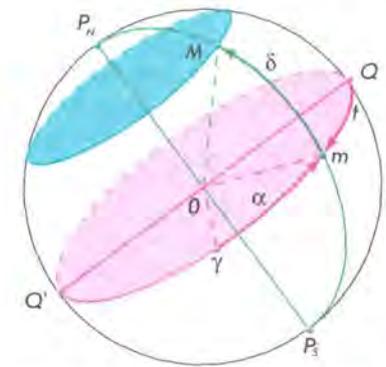


Рис. 3.2. Экваториальная система координат: δ — склонение светила M ; α — прямое восхождение; t — часовой угол



Рис. 3.3. Высота полюса мира над горизонтом

звездой была звезда α Дракона, через 12 000 лет Полярной станет α 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 φ . 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 δ_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 светил 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 φ . 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 δ , получим формулу для определения высоты звезды в ее верхней кульминации:

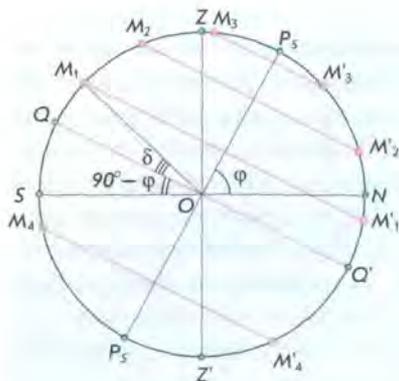


Рис. 4.1. Кульминация светил

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

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° , а азимуты звезд в нижней кульминации M'_1 и M'_2 равны 180° .

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 (δ) звезды, находящейся в зените, будет равно φ .

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 приближенно 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

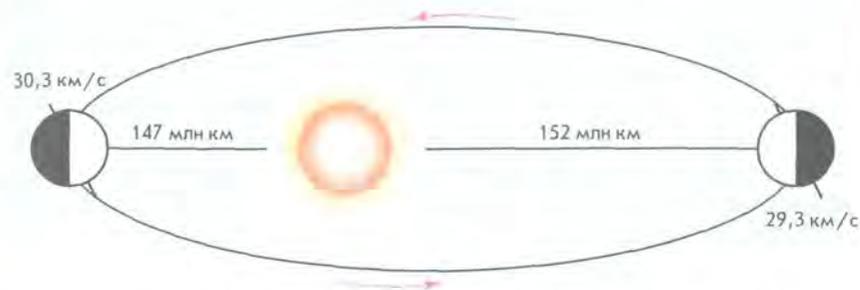


Рис. 5.1. Объяснение причин изменения длительности истинных солнечных суток

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 η . Тогда можно записать следующее равенство:

$$\eta = T_{\text{сп}} - T_{\odot}.$$

Величина уравнения времени η 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 η равно нулю. Это происходит примерно 14 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. Уравнение времени η 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° , то разность времени двух мест в 1 час соответствует и разности долгот в 15° (в часовой мере 1 час).

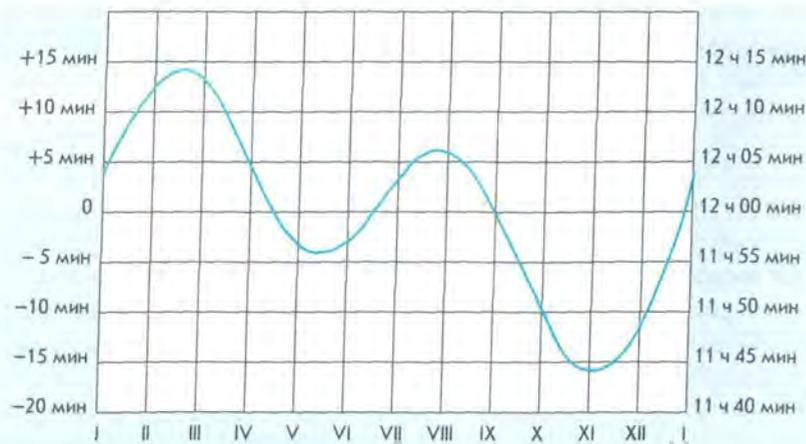


Рис. 5.2. График уравнения времени

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 λ_1 и λ_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 λ будет T_λ . 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_λ), которое определяется из астрономических наблюдений.

С другой стороны, зная долготу места наблюдения (λ) 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° (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

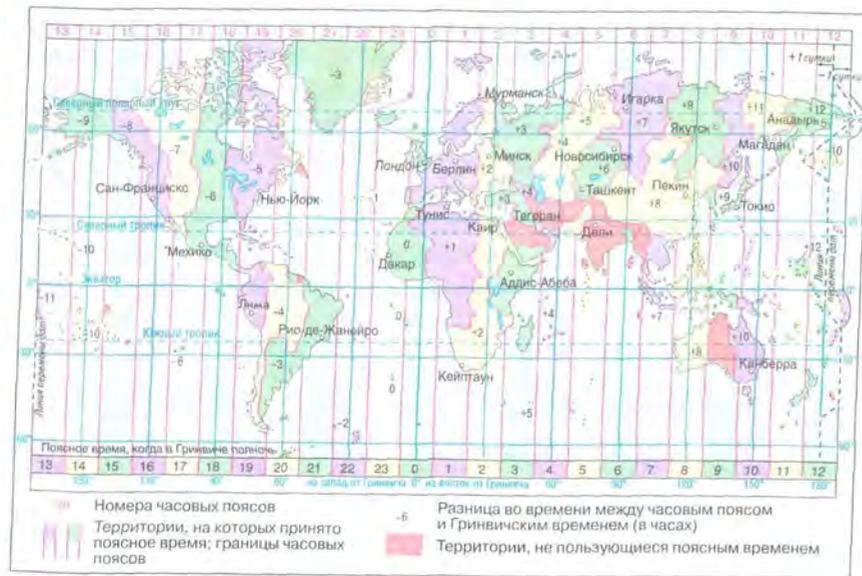


Рис. 5.3. Границы часовых поясов

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 λ (T_λ):

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

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°). 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 прохождениими 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.

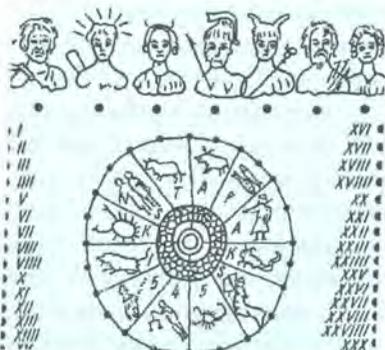


Рис. 5.4. Древний римский календарь

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 L 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-

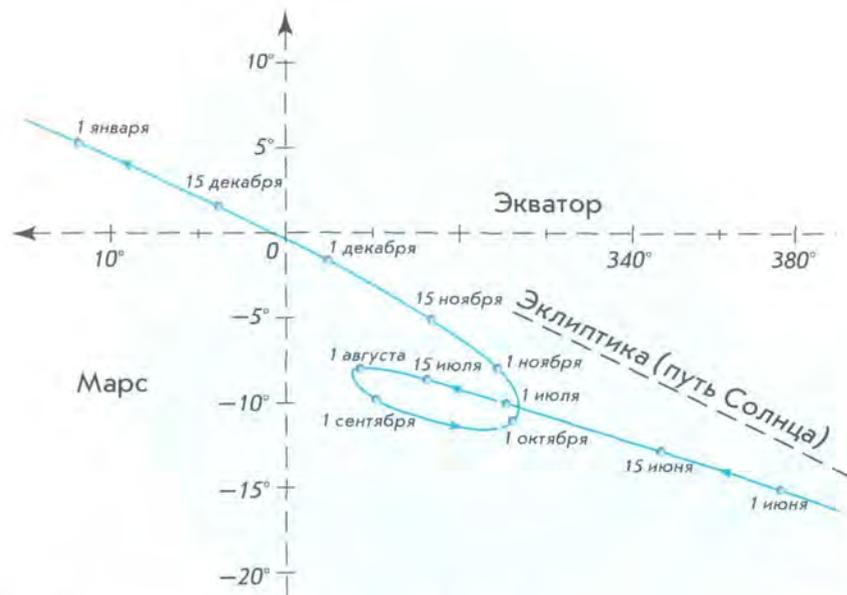


Рис. 6.1. Видимое петлеобразное движение Марса

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,

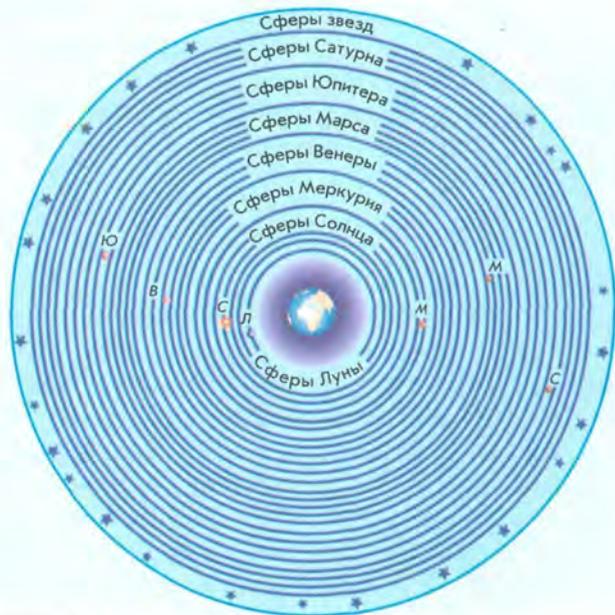


Рис. 6.2. Сферы Евдокса

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.

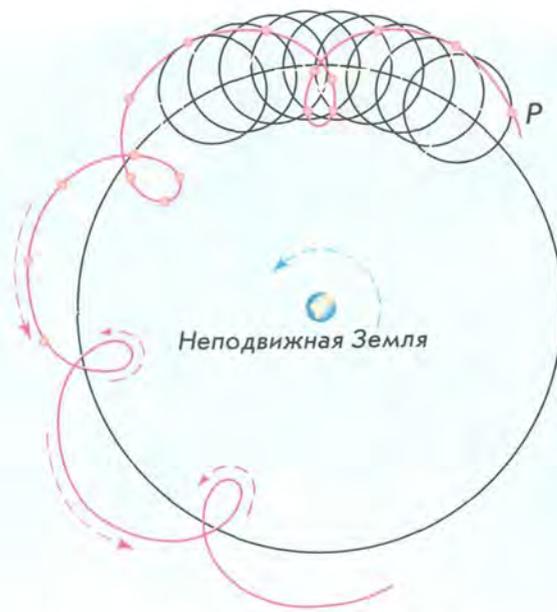


Рис. 6.3. Траектория планеты согласно теории Птолемея

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.

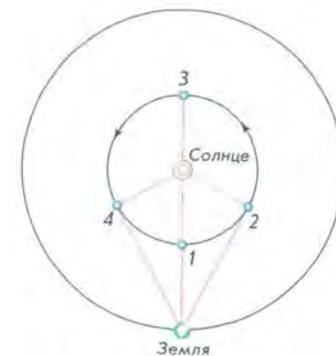


Рис. 6.5. Схема конфигураций планет: 1 — нижнее соединение; 2 — наибольшая западная элонгация; 3 — верхнее соединение; 4 — наибольшая восточная элонгация

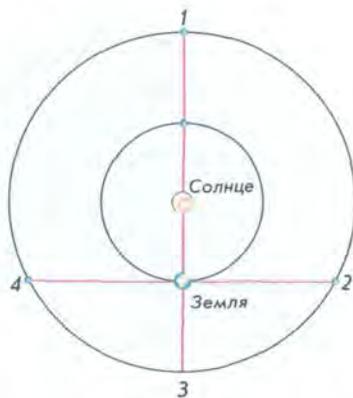


Рис. 6.6. Схема конфигураций верхних планет: 1 — соединение; 2 — западная квадратура; 3 — противостояние; 4 — восточная квадратура

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° , 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° при их совместном движении вокруг Солнца. Для нижних планет, обращающихся быстрее, Земля будет отставать на 360° .

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-

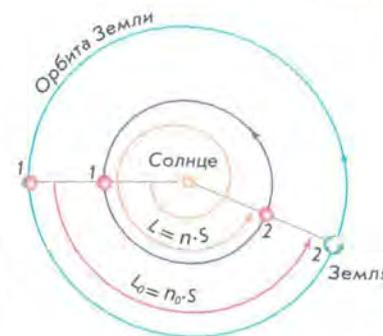


Рис. 6.7. Синодический период последовательных нижних соединений (1 и 2) нижней планеты

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 δ и α 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°) 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

III

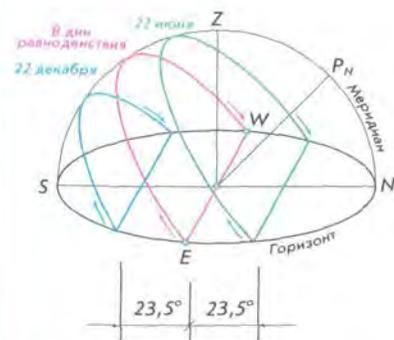


Рис. 7.1. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях в средних географических широтах

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

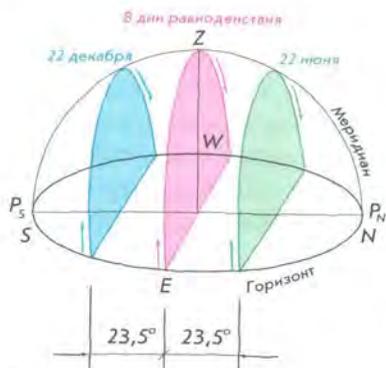


Рис. 7.2. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях на экваторе Земли

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° .

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 φ — географическая широта местности, δ_\odot — склонение Солнца. С изменением δ_\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.

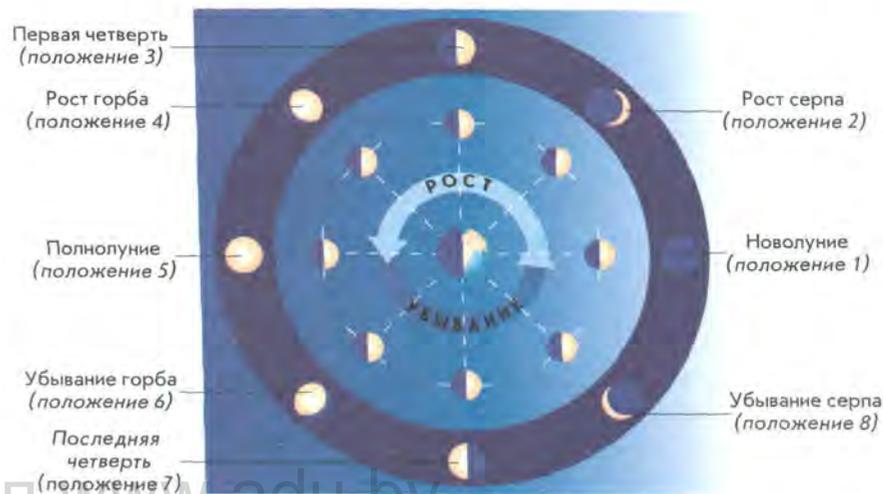


Рис. 7.3. Смена лунных фаз

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**.

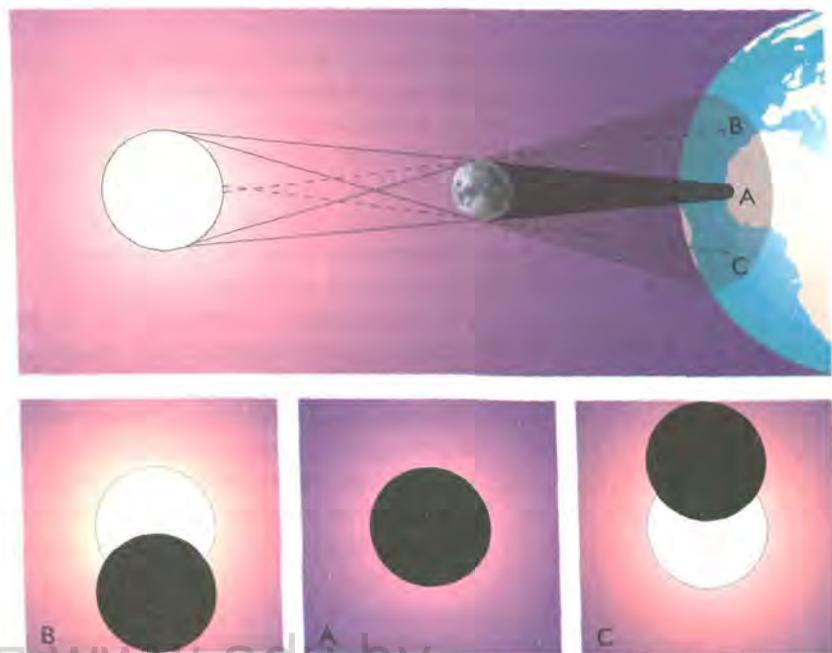


Рис. 7.4. Схема полного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

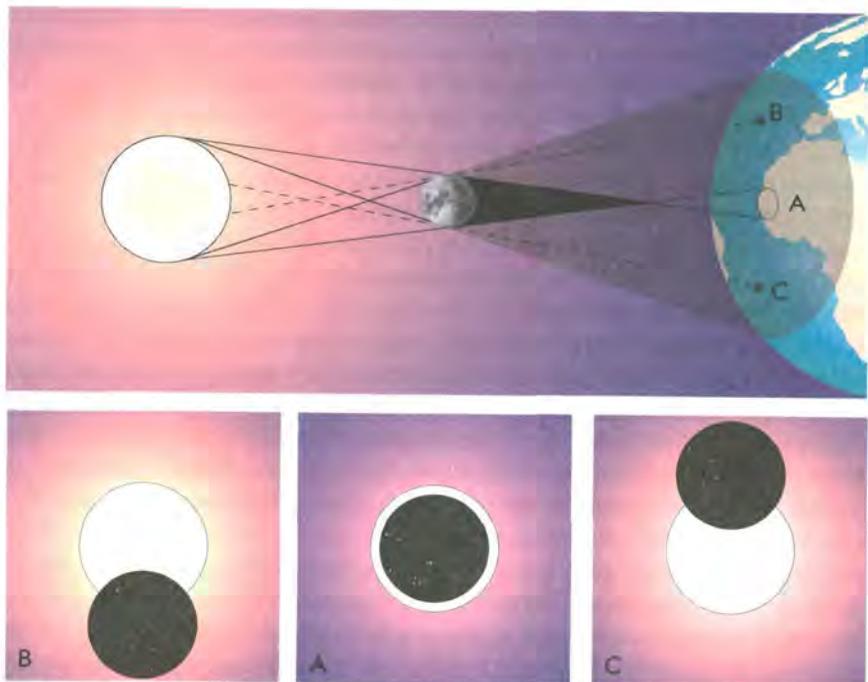


Рис. 7.5. Схема кольцеобразного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

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.

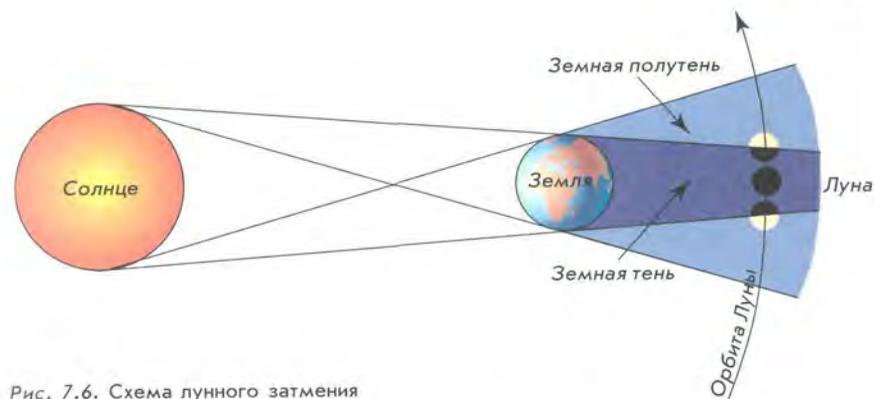


Рис. 7.6. Схема лунного затмения

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

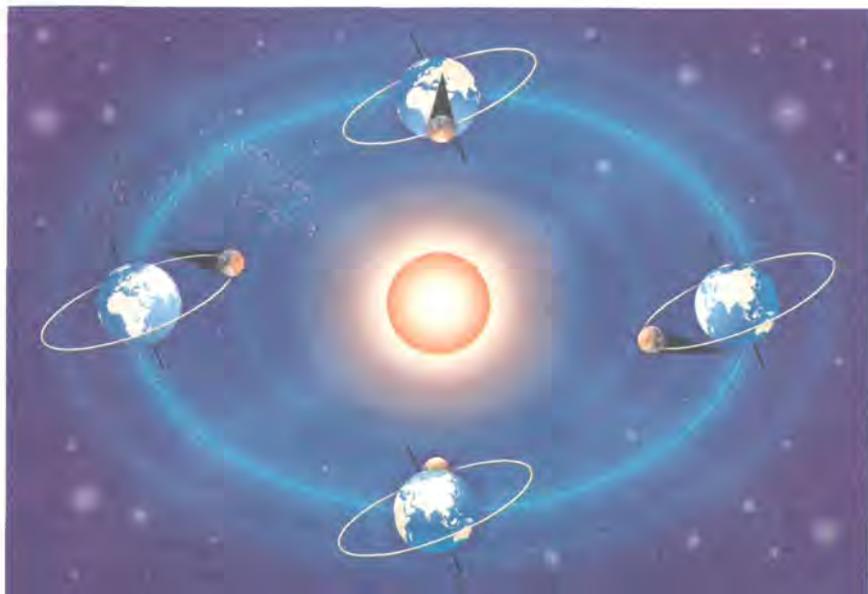


Рис. 7.8. Плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики

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

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

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

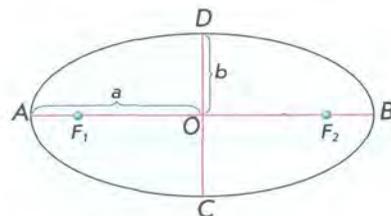


Рис. 8.1. Элементы эллипса

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.

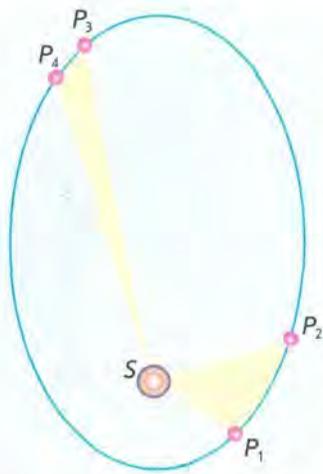


Рис. 8.2. Иллюстрация второго закона Кеплера

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.

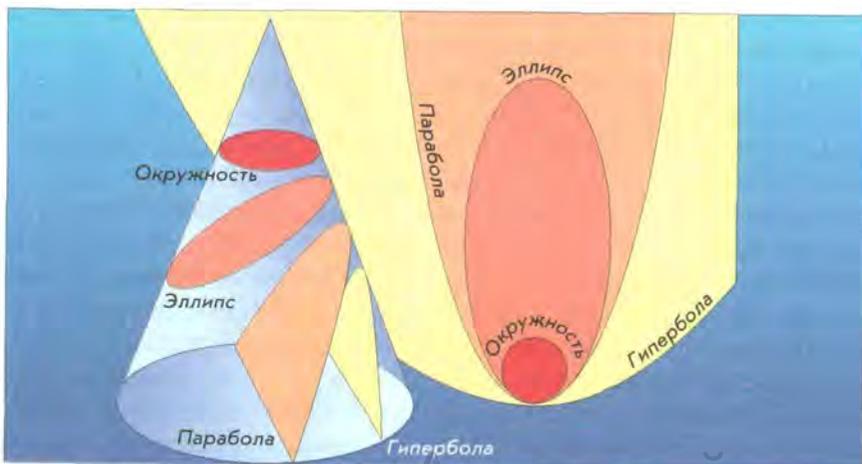


Рис. 9.1. Получение орбитальных кривых при сечении конуса плоскостью

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

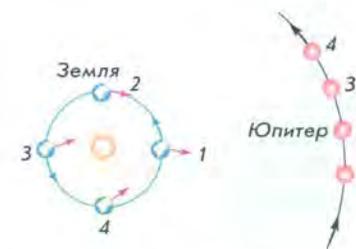


Рис. 9.2. Объяснение возмущений Земли, вызываемых Юпитером, с периодом в 1 год

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° 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:

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

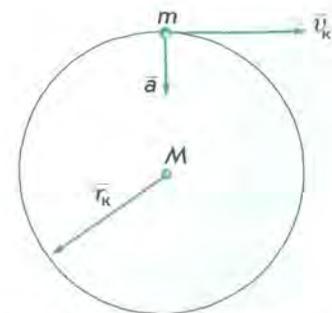


Рис. 9.3. Круговое движение тел

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

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 ℓ , а ее угловое значение через n (в градусах). Тогда длина дуги 1° меридиана ℓ_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

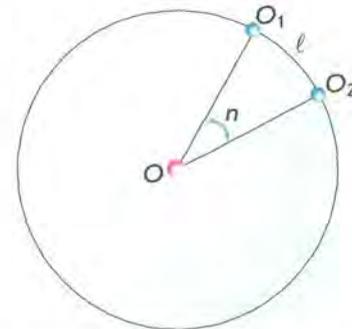


Рис. 10.1. Вычисление радиуса Земли

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 ℓ 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 ℓ 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 ℓ 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° 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-

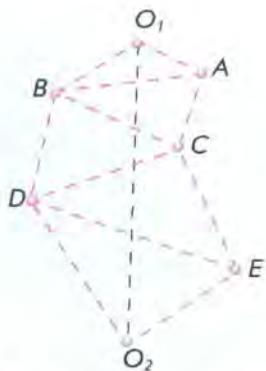


Рис. 10.2. Метод триангуляции

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 .

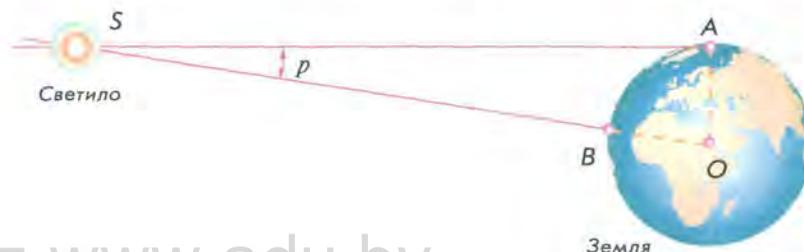


Рис. 10.3. Горизонтальный параллакс светила

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** ρ (рис. 10.4) и расстояние D до светила, можно вычислить линейный радиус R этого светила по формуле:

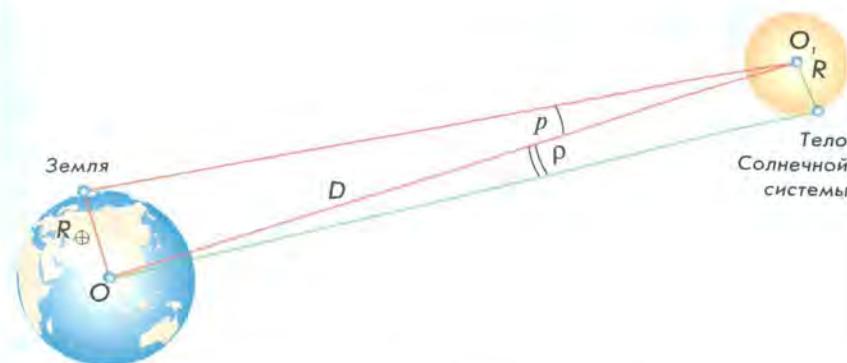


Рис. 10.4. Определение линейных размеров тел Солнечной системы

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

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 ρ 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).

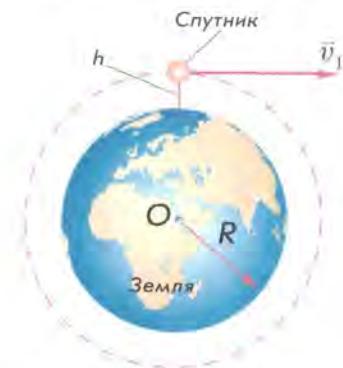


Рис. 11.1. Движение спутника по круговой орбите

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 $v_2 = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$. 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:

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

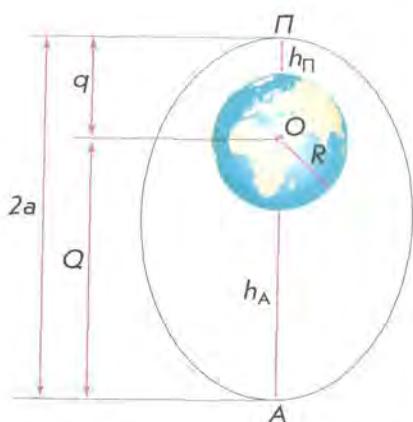


Рис. 11.2. Эллиптическая орбита искусственного спутника Земли

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_{Π} — 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.

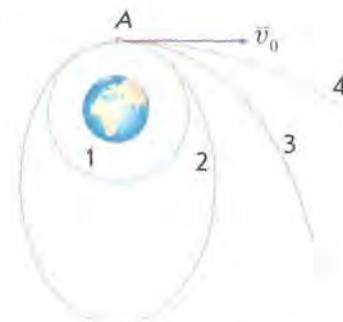


Рис. 11.3. Формы орбит космических аппаратов

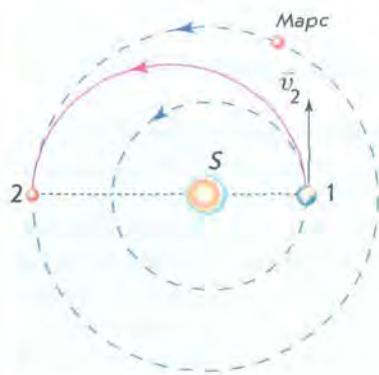


Рис. 11.4. Гомановская траектория перелета с Земли на Марс

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. Климуков 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. Климуков 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-

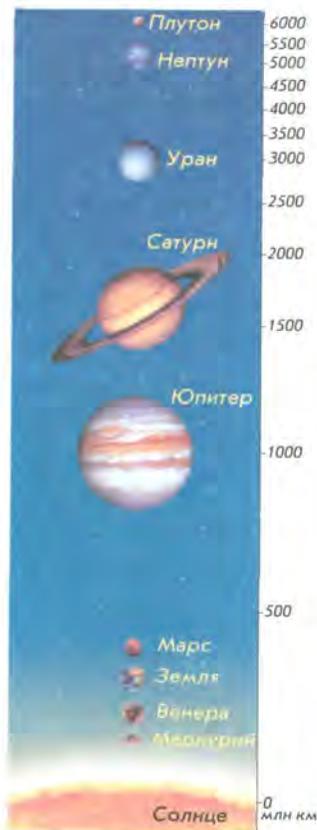


Рис. 12.2. Сравнительные размеры Солнца и планет

ния Урана почти лежит в плоскости орбиты планеты. Наклон оси вращения других планет не превышает 60° 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 $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ночью опускается до $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перепад температур происходит медленно, потому что солнечные сутки на Меркурии равны 176 земным.

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



Рис. 13.1. Меркурий

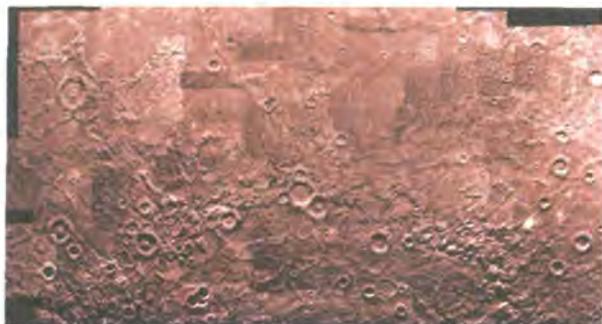
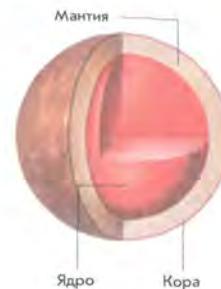


Рис. 13.2. Бассейн Калорис на Меркурии

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	$5,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период вращения вокруг оси	88 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
	58,8 земных суток	Температура поверхности	от -170 до $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$



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

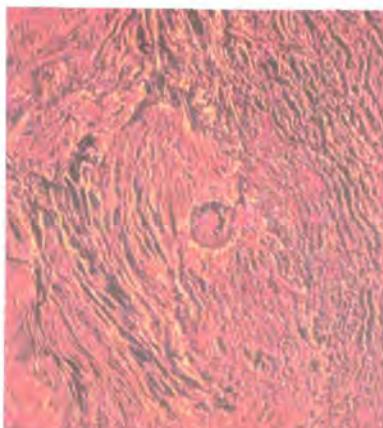
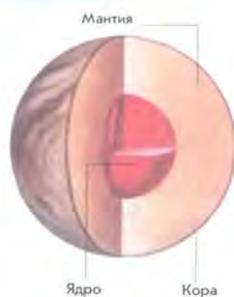


Рис. 13.5. Венера. Район Гор Максвелла: огромный кратер диаметром около 100 км



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-

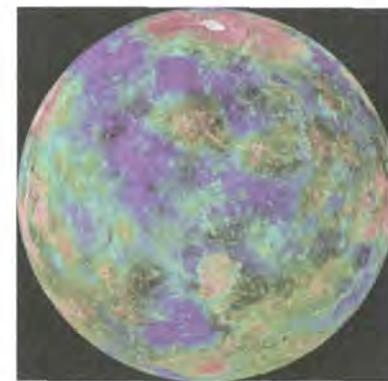


Рис. 13.8. Рельефная карта поверхности Венеры, составленная по данным радиолокационных исследований космического аппарата «Магеллан»



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.

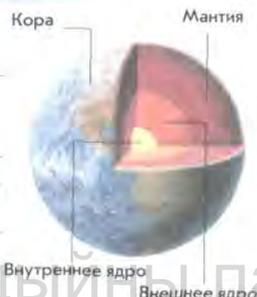
По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях — **сейсмограммам** — было установлено, что внутреннее строение планеты по вертикали слоистое. По химическому составу и физическим характеристикам выделяют 3 основные сферические оболочки: твердая кора, мантия (оболочка) и ядро. Самый тонкий 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 оксидов 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°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 — CO_2) с небольшой примесью обычного льда (H_2O). Температура здесь опускается ниже -110°C . Когда на одном из полушарий начинается зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает 57° широты в Северном полушарии и 45° 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

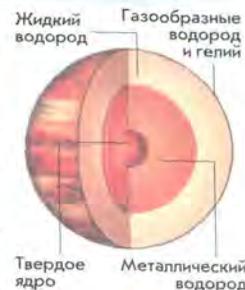
1. Из каких оболочек состоят планеты? 2. Перечислите источники нагрева недр планет. 3. Что называют гравитационной дифференциацией? 4. Из каких основных химических элементов состоит поверхность Земли? Меркурия? Марса? 5. Опишите поверхности планет земной группы. 6. Каковы особенности атмосфер планет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

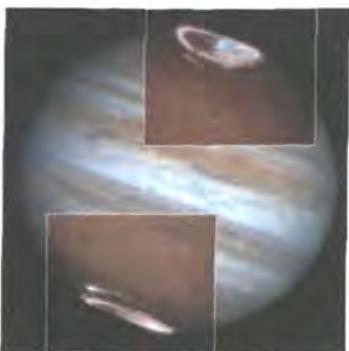


Рис. 14.4. Северное сияние на Юпитере. Фотография Космического телескопа Хаббла

вихрь, похожий на земной ураган. Для сравнения мы привели сделанную из космоса фотографию (рис. 14.3) тропического урагана над Южной Америкой. На обоих снимках хорошо просматриваются турбулентные потоки.

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

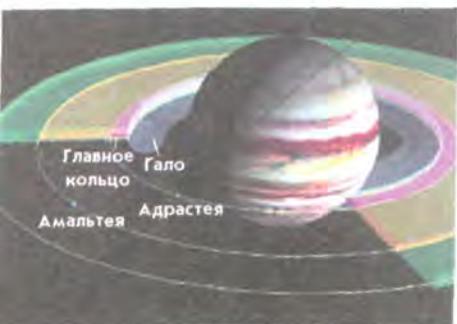


Рис. 14.5. Схема колец Юпитера

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.

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.

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	$0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период вращения вокруг оси	10,65 ч	Сила притяжения на экваторе (Земля=1)	1,1
		Температура верхнего слоя облаков	$-170 \text{ }^\circ\text{C}$



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)

Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна, которая имеет наклон 27° 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°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.

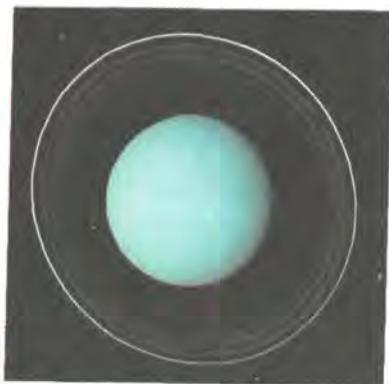


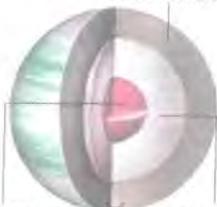
Рис. 14.8. Уран. Фотография получена Космическим телескопом Хаббла

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°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°) 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°C

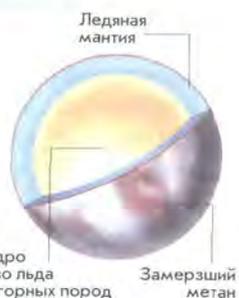
Атмосфера из водорода, гелия и метана



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 ³
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; He — 11 (по объему); NH ₃ — 0,2; CH ₄ — 0,1; сероводород — 0,002	Н — 94; He — 6; NH ₃ , CH ₄ — доли процента	Н — 83; He — 15; CH ₄ — 2	Н — 84; He — 15; CH ₄ — 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	Диаметр по экватору	3476 км
Среднее расстояние до Земли	384,4 млн км	Масса (Земля = 1)	0,012
Период обращения вокруг Земли	27,32 земных суток	Средняя плотность	$3,34 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период вращения вокруг оси	27,32 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,17
		Температура поверхности	от -170 до +130 °С

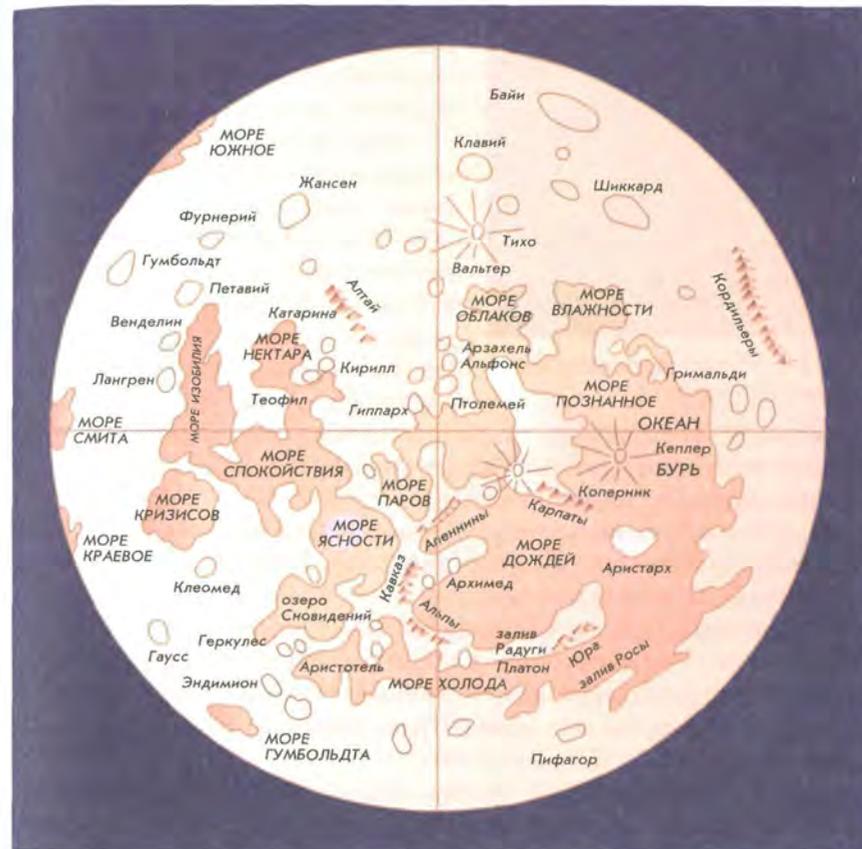
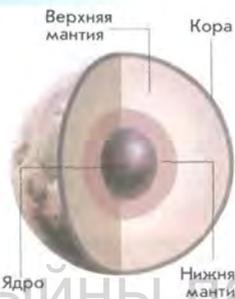


Рис. 15.2. Карта-схема крупнейших деталей видимого в телескоп с Земли полушария Луны

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».



Рис. 15.5. Земля на небе Луны

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.

Реголит обладает малой плотностью (верхний слой — 1200 кг/м³) 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°, то дно даже неглубоких кратеров в полярных областях никогда не освещается солнечными лучами. При постоянной температуре –200 °С 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

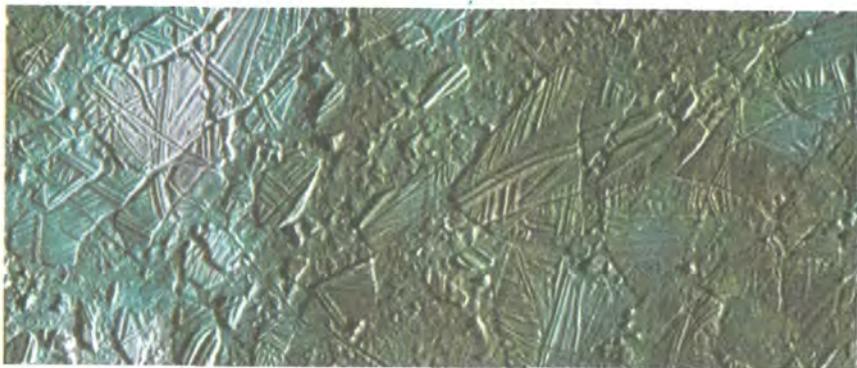


Рис. 15.11. Хаосы на спутнике Европа

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 27×19 км — Фобос (рис. 15.13) и 16×11 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 α 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 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).

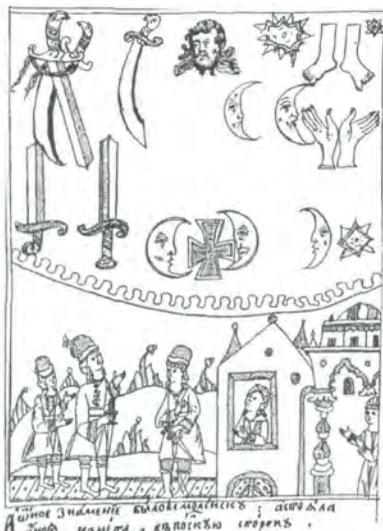


Рис. 16.4. Древняя гравюра, рассказывающая о появлении кометы в Смоленске

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 (CO_2), угарного газа, метана, аммиака (CO , CH_4 , 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 16×8 км, массой около $3 \cdot 10^{14}$ кг и малой плотностью порядка 600 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 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 ν и длиной λ , 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, λ
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



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 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 ν и длиной λ , 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, λ
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



Рис. 17.1. Распространение излучения небесных тел в атмосфере Земли

В зависимости от своего физического состояния одни небесные тела излучают энергию в узких интервалах частот спектра электромагнитных волн (например, светлые газовые туманности), другие — во всем его диапазоне: от гамма-лучей до радиоволн включительно (например, звезды). Изучение физической природы небесных тел в широком диапазоне электромагнитного излучения привело к появлению в науке следующих разделов: гамма-астрономия, рентгеновская астрономия, инфракрасная астрономия, радиоастрономия и др.

Изучение электромагнитных волн, испускаемых небесными телами, затрудняется из-за того, что атмосфера Земли пропускает излучение лишь в определенных диапазонах длин волн: от 300 до 1000 нм, от 1 см до 20 м и в нескольких «окнах» инфракрасного диапазона (рис. 17.1). Излучение, достигающее до поверхности Земли, исследуют с помощью оптических телескопов (видимый свет) и радиотелескопов.



Рис. 17.2. Орбитальная станция «Скайлэб» на околоземной орбите



Рис. 17.3. Пилотируемый комплекс «Салют-7» — «Союз Т-5» на околоземной орбите

Сильнее всего земная атмосфера поглощает коротковолновую область диапазона электромагнитного излучения: ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи. Наблюдения в этих диапазонах возможны только с помощью приборов, поднятых на большую высоту (на самолетах или зондах) либо установленных на межпланетных космических станциях (рис. 17.2), комплексах (рис. 17.3), искусственных спутниках Земли и ракетах.

2. Телескопы и их характеристики. Изучать далекие недоступные небесные объекты можно одним способом — собрав и проанализировав их излучение. Для этой цели и служат телескопы. При всем своем многообразии телескопы, принимающие электромагнитное излучение, решают две основные задачи:

- 1) собрать от исследуемого объекта как можно больше энергии излучения определенного диапазона электромагнитных волн;
- 2) создать по возможности наиболее резкое изображение объекта, чтобы можно было выделить излучение от отдельных его точек, а также измерить угловые расстояния между ними.

В зависимости от конструктивных особенностей оптических схем телескопы делятся на линзовые системы — рефракторы, зеркальные системы — рефлекторы и смешанные зеркально-линзовые системы, к которым относятся телескопы конструкции Б. Шмидта, Д. Д. Максудова и др.

Телескоп-рефрактор (рис. 17.4) в основном используется для визуальных наблюдений. Он имеет объектив и окуляр. Телескоп-рефрактор, совмещенный с фотокамерой, называют **астрографом** или астрономической камерой. Астрограф по сути представляет собой большой фотоаппарат: в фокальной плоскости его устанавливается кассета с фотопластинкой. Диаметр объективов рефракторов ограничен из-за трудностей отливки крупных однородных блоков оптического стекла: их прогибов и светопоглощения. Наибольший диаметр объектива телескопа-рефрактора, применяемого в настоящее время, — 102 см (Йеркская обсерватория, США). Недостатками такого типа телескопов считаются их значительная длина и искажение изображения. Для устранения этих недостатков используют многолинзовые объективы с просветленной оптикой (рис. 17.5).



Рис. 17.4. Ход лучей в телескопе-рефракторе



Рис. 17.5. 300-миллиметровый телескоп-рефрактор обсерватории Московского планетария

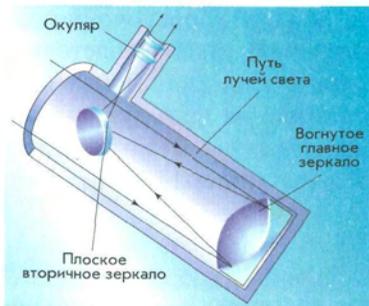


Рис. 17.6. Ход лучей в телескопе-рефлекторе

В рефлекторах с диаметром зеркала свыше 2,5 м в главном фокусе иногда устанавливают кабину для наблюдателя. С увеличением размеров зеркала в таких телескопах приходится применять специальные системы разгрузки зеркал, исключаящие их деформации из-за собственной массы, а также принимать меры для предотвращения их температурных деформаций. Сооружение крупных рефлекторов (с диаметром зеркала 4–6 м) сопряжено с большими техническими трудностями. Поэтому разрабатываются конструкции с составными мозаичными зеркалами, отдельные элементы которых требуют точной настройки с помощью специальной следящей аппаратуры, либо конструкции, содержащие несколько параллельных телескопов, сводящих изображение в одну точку.

В небольших и средних по размерам рефлекторах для удобства наблюдения свет отражается дополнительным плоским (вторичным) зеркалом к стенке трубы, где находится окуляр (рис. 17.6). Рефлекторы используют преимущественно для фотографирования неба, фотоэлектрических и спектральных исследований.

В **зеркально-линзовых телескопах** изображение получается с помощью сложного объектива, содержащего как зеркала, так и линзы. Это позволяет значительно снизить оптические искажения телескопа



Рис. 17.7. Ход лучей в зеркально-линзовом телескопе

Телескоп-рефлектор имеет зеркальный объектив. В простейшем рефлекторе объектив — это одиночное, обычно параболическое зеркало; изображение получается в его главном фокусе. По сравнению с рефракторами телескопы-рефлекторы имеют намного большие размеры.

В рефлекторах с диаметром зеркала свыше 2,5 м в главном фокусе иногда устанавливают кабину для наблюдателя. С увеличением размеров

зеркала в таких телескопах приходится применять специальные системы разгрузки зеркал, исключаящие их деформации из-за собственной массы, а также принимать меры для предотвращения их температурных деформаций. Сооружение крупных рефлекторов (с диаметром зеркала 4–6 м) сопряжено с большими техническими трудностями. Поэтому разрабатываются конструкции с составными мозаичными зеркалами, отдельные элементы которых требуют точной настройки с помощью специальной следящей аппаратуры, либо конструкции, содержащие несколько параллельных телескопов, сводящих изображение в одну точку.

по сравнению с зеркальными или линзовыми системами. В телескопах системы Б. Шмидта оптические искажения главного сферического зеркала устраняются с помощью специальной коррекционной пластинки сложного профиля, установленной в объективе. В телескопах системы Д. Д. Максудова искажения главного сферического или эллиптического зеркал исправляются мениском, установленным перед зеркалом (рис. 17.7). Мениск — это линза

с мало отличающимися радиусами кривизны поверхности. Такая линза почти не влияет на общий ход лучей, но заметно исправляет искажения оптического изображения.

Основными оптическими параметрами телескопа являются: видимое увеличение и разрешающая способность.

Видимое увеличение (G) оптической системы — это отношение угла, под которым наблюдается изображение, даваемое оптической системой прибора, к угловому размеру объекта при наблюдении его непосредственно глазом. Видимое увеличение телескопа можно рассчитать по формуле:

$$G = \frac{F_{об}}{F_{ок}},$$

где $F_{об}$ и $F_{ок}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Для получения значительного увеличения объективы в телескопах должны быть длиннофокусными (фокусное расстояние в несколько метров), а окуляры — короткофокусными (несколько миллиметров). Непокойная атмосфера Земли вызывает дрожание и искажение изображения, размывает его детали. Поэтому даже на крупных телескопах редко устанавливают увеличение более 500 раз.

Под **разрешающей способностью** оптического телескопа понимают наименьшее угловое расстояние между двумя звездами, которые могут быть видны в телескоп раздельно. Теоретически разрешающая способность (в секундах дуги) визуального телескопа для желто-зеленых лучей, к которым наиболее чувствителен глаз человека, может быть оценена при помощи формулы:

$$\psi = \frac{140''}{D},$$

где D — диаметр объектива телескопа в миллиметрах. На практике из-за постоянных перемещений воздушных масс разрешающая способность телескопов снижается. В итоге наземные телескопы, как правило, обеспечивают разрешающую способность около 1", и только в редких случаях, при весьма благоприятных атмосферных условиях, удается достичь разрешающей способности в несколько десятых долей секунды.

С 1995 г. работают два одинаковых 10-метровых телескопа «Кек-1» и «Кек-2» в обсерватории Мауна-Кеа (США). Каждое зеркало в них состоит из 36 сегментов. Качеством изображения телескопов руководит адаптивная оптика, управляющая каждым сегментом зеркала. По разрешающей способности такой телескоп приближается к космическому. Обсерватория расположена на высоте 4250 м над Тихим океаном на Гавайских островах.

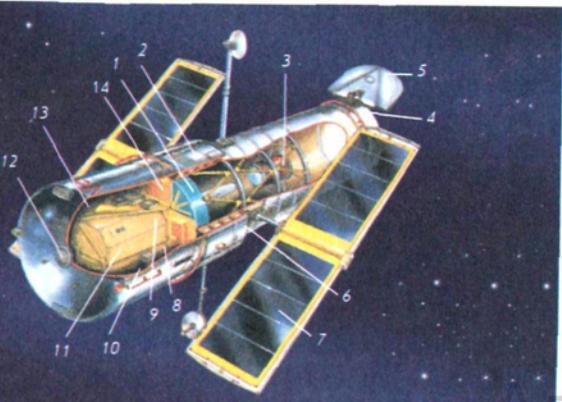
Оптика Космического телескопа Хаббла (рис. 17.8) приближается к идеальной оптической системе. Вне атмосферы зеркало этого телескопа диаметром 2,4 м позволяет достичь разрешения 0,06".

Значительными возможностями обладает телескоп VLT (от англ. *Very Large Telescope* — очень большой телескоп), принадлежащий европейским странам и установленный на горе Параналь (высота 2635 м) на севере Чили. Телескоп VLT состоит из четырех телескопов диаметром по 8,2 м каждый. Крайние телескопы разнесены один от другого на расстояние 200 м, что позволяет всему комплексу приборов работать в режиме **оптического интерферометра**. Это означает, что если телескопы направлены на одну и ту же звезду, то собранное ими излучение суммируется, а разрешающая способность совместно работающих телескопов эквивалентна применению зеркала диаметром 200 м.

Количество построенных во всем мире телескопов с диаметром зеркала более шести метров приближается к двадцати (см. Приложение 13).

Собранное объективом телескопа излучение регистрируется и анализируется приемником излучения. На протяжении первых двух с половиной веков с начала телескопической эры единственным приемником излучения служил человеческий глаз. Однако это не только не очень чувствительный, но и достаточно субъективный приемник излучения. С середины XIX в. в астрономии стали широко применяться фотографические методы. Фотографические материалы (фотопластинки, фотопленки) обладают рядом ценных преимуществ по сравнению с человеческим глазом. Фотоэмульсия способна суммировать падающую на нее энергию, т. е., увеличивая выдержку на негативе, можно собрать больше света. Фотография позволяет документировать события, так как негативы могут храниться в течение

Рис. 17.8. Космический телескоп Хаббла (США): 1 — главное зеркало; 2 — модуль обслуживающих систем; 3 — вторичное зеркало; 4 — приспособление для защиты от боковых лучей; 5 — крышка; 6 — отсек оборудования; 7 — солнечные батареи; 8 — камера слабых объектов; 9 — высокоскоростной спектрограф; 10 — широкоугольная и планетная камеры; 11 — инструментальный отсек; 12 — спектрограф слабых объектов; 13 — спектрограф высокого разрешения; 14 — датчики точного гидирования



долгого времени. Фотопластинки обладают панорамностью, т. е. могут одновременно и точно фиксировать множество объектов.

Современные самые крупные телескопы управляются компьютерами, а полученные изображения космических объектов фиксируются в форме, которая обрабатывается компьютерными программами. Фотография почти вышла из употребления. В последние десятилетия получили широкое распространение **фотоэлектрические приемники излучения**, сведения от которых передаются непосредственно на компьютер. К таким приборам относятся ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью). ПЗС-матрица — это интегральная схема, размещенная на полупроводниковом материале, которая превращает световую энергию излучения в энергию электрического тока. Сила тока пропорциональна интенсивности светового потока. Такие приборы обладают высокой эффективностью в регистрации световых квантов (квантовым выходом): используется до 80 % от общего их количества. Для сравнения: квантовый выход нашего глаза — 3 %, а фотоэмульсии — всего 1 %. Это значит, что телескоп, оборудованный ПЗС-матрицей, может регистрировать свет от объектов почти в 20 раз более слабых, чем при визуальном наблюдении. Кроме того, полученная информация записывается на магнитные носители в цифровом формате и сохраняется со временем (в отличие от фотографической эмульсии); может быть многократно скопирована и разслана разным исследователям. Компьютерная обработка изображения позволяет избавиться от помех и фона, создаваемых рассеянием света в атмосфере Земли и турбулентностью атмосферы.

3. Радиотелескопы. Изучением космических радиоисточников занимается радиоастрономия. Она зародилась в 1931 г., когда случайно было обнаружено радиоизлучение Млечного Пути. Спустя 15 лет в созвездии Лебедя нашли первый точечный источник радиоволн — слабую галактику, которую впоследствии удалось разглядеть в оптическом диапазоне.

Доходящее до Земли радиоизлучение большинства небесных объектов очень слабое. Для обнаружения и приема космического радиоизлучения используются приборы, которые получили название **радиотелескопов**. Радиотелескопы состоят из антенного устройства и чувствительной приемной системы. Приемная система, или радиометр, усиливает принятое антенной радиоизлучение и преобразует его в удобную для дальнейшей обработки форму.

Основное назначение антенного устройства — собрать максимальное количество энергии, приносимой радиоволнами от объекта. В качестве антенны используется сплошное металлическое или сетчатое зеркало, имеющее форму параболоида. Антенна радиотелескопа отличается от обычных антенн радиосвязи высокой направленностью,



Рис. 17.9. Северный сектор радиотелескопа РАТАН-600

Радиотелескопы очень большого размера могут быть построены из отдельных зеркал, каждое из которых фокусирует принимаемое излучение на один облучатель. Примером является российский радиотелескоп РАТАН-600 (рис. 17.9). Антенна этого телескопа представляет собой замкнутое кольцо диаметром около 600 м, состоящее из 895 плоских зеркал размером $2,1 \times 7,4$ м, образующих сегменты параболоида. Каждое зеркало может перемещаться немного назад-вперед и, главное, поворачиваться вверх в пределах 70° . Управление панелями ведется с помощью компьютера, поэтому во время наблюдений антенна может оставаться наведенной на одну и ту же точку вращающегося небесного свода.

Мощность радиосигнала, поступающего на вход приемника, прямо пропорциональна площади антенны. Поэтому антенна большего размера с одним и тем же приемником дает лучшую чувствительность, т. е. позволяет обнаружить слабые источники с малой мощностью излучения. Антенны крупнейших радиотелескопов достигают сотен метров. Крупный радиотелескоп с вращающимся металлическим рефлектором диаметром 100 м находится недалеко от города Бонна в Германии. Неподвижная антенна в Аресибо (Пуэрто-Рико), располагающаяся в кратере потухшего вулкана, имеет диаметр 305 м (рис. 17.10). Для того чтобы изменить направление приема излучения, в этом радиотелескопе делают перестановку облучателя.



Рис. 17.10. Гигантский радиотелескоп в чаше кратера (Пуэрто-Рико)

т. е. способностью выделять радиоизлучение небольшого участка неба. В фокусе параболоида помещается облучатель — устройство, собирающее радиоизлучение, направленное на него зеркалом. Облучатель передает принятую энергию на приемное устройство, где сигнал усиливается, детектируется и регистрируется.

Если радиоизлучение источника одновременно воспринимается двумя и более антеннами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, и затем эти сигналы суммируются, то вследствие интерференции радиосигналов раз-

решающая способность телескопов значительно возрастает. Такой инструмент называется **радиоинтерферометром**. На рис. 17.11 показана схема работы радиоинтерферометра, состоящего из двух радиотелескопов, находящихся друг от друга на расстоянии D , которое может составлять сотни и даже тысячи километров. Например, многоэлементный радиоинтерферометр VLA (штат Нью-Мексико, США) состоит из 27 индивидуальных 25-метровых параболоидов, разнесенных на 25 км. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой объединяют радиотелескопы, разнесенные на тысячи километров. С их помощью удалось получить угловое разрешение порядка $0,0001''$.

Радиоволны свободно проходят сквозь огромные межзвездные газопылевые облака и атмосферу Земли. Поэтому методы радиоастрономии очень важны для изучения, например, центральных районов Млечного Пути и других галактик, так как оптические волны, идущие из этих областей, полностью поглощаются. Так, исследование излучения межзвездного водорода на волне 21 см позволило лучше понять структуру нашей Галактики и выявить ее спиральные рукава. Благодаря радиоастрономии были открыты квазары и пульсары.

В большей или меньшей степени радиоизлучательной способностью обладают все галактики. Но некоторые из них отличаются повышенной активностью. (На рис. 17.12 показано совмещение оптической фотографии и линий интенсивности радиоизлучения радиогалактики Центавр А.)

Все известные космические радиоисточники в 1980-х гг. были сведены в каталог, который насчитывает свыше 100 тыс. объектов.

В 1958 г. астрономы США получили первое радарное эхо от другой планеты — Венеры. Отражения радарных сигналов от других планет дают самые точные измерения расстояний. Эти же методы позволили проникнуть через плотную атмосферу Венеры и исследовать

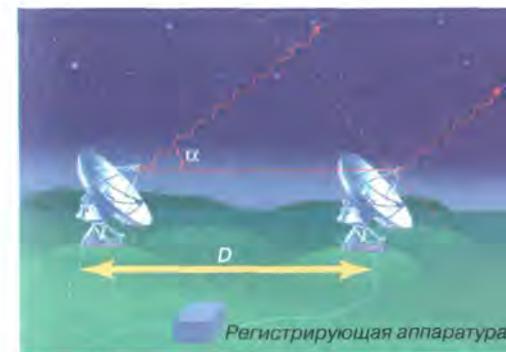


Рис. 17.11. Схема работы радиоинтерферометра



Рис. 17.12. Оптическое и радиоизлучение галактики Центавр А

рельеф ее поверхности. В 1994 г. американский космический аппарат «Магеллан» провел радарные исследования с орбиты вокруг Венеры и получил точные данные о деталях поверхности этой планеты. С помощью радара были точно определены периоды вращения Венеры и Меркурия.

4. Внеатмосферная астрономия. Молодой раздел астрономии — **внеатмосферная астрономия** — изучает небесные объекты при помощи аппаратуры, вынесенной за пределы земной атмосферы. Различные приборы, установленные на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и автоматических межпланетных станциях (АМС), позволяют изучать космические объекты во всем диапазоне длин волн, начиная от жесткого гамма-излучения до километровых радиоволн. Поэтому современная астрономия стала, можно сказать, всеволновой.

Применение **инфракрасного излучения** в астрономии началось с того, что с его помощью ученые провели точные измерения температуры поверхности и атмосферы планет Солнечной системы: Так в атмосферах Марса, Венеры и Юпитера был найден углекислый газ. Инфракрасные наблюдения планет-гигантов позволили узнать структуру их атмосфер и обнаружить лед на спутниках. Сенсационным открытием инфракрасной астрономии стала вода, обнаруженная в космосе в большом количестве. Она присутствует в газопылевых туманностях, кометах и на малых планетах.

Так как земная атмосфера сильно экранирует **ультрафиолетовое излучение**, его приемники приходится размещать на искусственных спутниках Земли. Активные исследования космических ультрафиолетовых лучей проводит американский спутник FUSE (спектроскопический зонд дальнего ультрафиолетового диапазона), запущенный в 1998 г.

Проведенные в 1999 г. наблюдения дали очень интересные научные результаты. Оказалось, что в нашей Галактике широко распространены массы сильно нагретого (до полумиллиона градусов) межзвездного газа, находящегося на расстоянии от 5 до 10 тыс. световых лет от центральной плоскости Млечного Пути. Этот газ нагревается, скорее всего, в результате вспышек сверхновых звезд.



Рис. 17.13. Рентгеновское изображение Крабовидной туманности

Источниками **гамма-излучения** являются вспышки на Солнце, ядра активных галактик, квазары. Исследования гамма-излучения проводила космическая гамма-обсерватория им. Комптона (США), запущенная в 1991 г.

Самый чувствительный приемник рентгеновского излучения (рентгеновский телескоп) размещен на спутнике «Чандра», запущенном в 1999 г. При помощи этой обсерватории исследуются сверхновые звезды, туманности (рис. 17.13), нейтронные звезды, солнечная корона и вспышки на Солнце.

На околоземные орбиты ИСЗ выводят уникальные ультрафиолетовые, инфракрасные и оптические телескопы. Постепенно увеличиваются диаметры их главных зеркал, совершенствуется светоприемная аппаратура, повышается чувствительность приборов, разрабатываются новые методы стабилизации телескопов на орбите.

Вопросы и упражнения

1. На какие диапазоны подразделяется весь спектр электромагнитного излучения? 2. Почему с поверхности Земли нельзя вести изучение небесных объектов во всех диапазонах электромагнитного излучения? 3. Какие основные задачи решают в астрономии с помощью телескопов? 4. Как можно определить видимое увеличение оптической системы телескопа? 5. Докажите, что увеличение телескопа при визуальных наблюдениях равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра. 6. Что понимают под разрешающей способностью телескопа? 7. Чем отличаются оптические телескопы от радиотелескопов? 8. Чем отличается радиоинтерферометр от радиотелескопа? 9. Что понимают под внеатмосферной астрономией?

§ 18. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В АСТРОНОМИИ

1. Виды спектров. В 1666 г. Исаак Ньютон, пропуская пучок солнечного света через трехгранную стеклянную призму, заметил, что тот не только преломляется к основанию призмы, но и распадается на цветные составляющие (рис. 18.1). Полученная на экране цветная полоска, состоящая из семи основных цветов, постепенно переходящих один в другой, была названа **спектром**.



Рис. 18.1. Образование непрерывного спектра

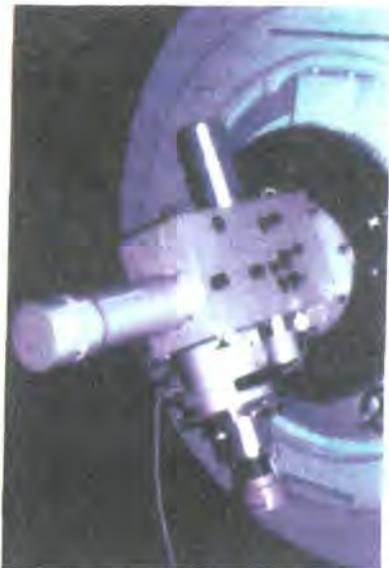


Рис. 18.2. Спектрограф, установленный на телескопе

Для наблюдения и исследования спектров применяют прибор — **спектроскоп**. Для получения и регистрации спектров небесных тел используют специальный оптический прибор — **спектрограф** (рис. 18.2).

Спектры сравнительно ярких светил фотографируют с помощью шелевых спектрографов, состоящих из коллиматора, призмы и фотокамеры (рис. 18.3). Фотографический снимок спектра небесного тела называется **спектрограммой**. Спектрограммой называют также график зависимости интенсивности (мощности) излучения небесного тела от длины волны или частоты.

Любое светящееся тело создает спектр испускания. Спектры бывают сплошные (непрерывные), линейчатые и полосатые.

Сплошной спектр имеет вид непрерывной полосы, цвета которой постепенно переходят один в другой (см. рис. 18.1). Все твердые тела, расплавленные металлы, светящиеся газы и пары, находящиеся под очень большим давлением, дают сплошной спектр. Такой спектр можно, например, получить от дугового фонаря и горящей свечи.

Иной вид имеет спектр, если в качестве источника света использовать раскаленные газы или пары, когда их давление мало отличается от нормального и газы находятся в атомарном состоянии. В этом случае говорят о **линейчатом спектре** (атомном). Он состоит из отдельных резких цветных линий, разделенных темными промежутками (рис. 18.4). Многие газы и пары состоят из отдельных атомов, например инертные газы (гелий, неон, аргон и др.), пары металлов. Газы и пары, состоящие из молекул (например, водород, кислород, пары йода), могут при опре-

деленных условиях распадаться на атомы (диссоциировать). Такие атомарные газы и пары также дают линейчатые спектры. Установлено, что каждый химический элемент в состоянии раскаленного газа, состоящего из атомов, испускает присущий только ему одному линейчатый спектр с характерными цветными линиями, всегда расположенными на определенном месте.

Полосатый спектр (молекулярный) состоит из отдельных линий, сливающихся в полосы (четкие с одного края и размытые с другого), разделенные темными промежутками. Такой спектр испускают молекулы газов и паров.

Наряду со спектрами испускания различают спектры поглощения.

Как нам уже известно, наблюдая свет от дугового фонаря через спектроскоп, мы получим сплошной спектр. Если поместить перед щелью спектроскопа обычное зеленое стекло, то сплошной спектр предстанет в виде узкой зеленой полоски, а все остальные цвета будут отсутствовать — на их месте будет темная полоса. Подобно цветным стеклам, газы и пары веществ также способны поглощать определенные лучи спектра. Например, если лучи от дугового фонаря будут проходить сквозь пары натрия, температура которых ниже, чем температура раскаленных углей фонаря, то в сплошном спектре возникнут близко расположенные темные линии на том самом месте, где получаются желтые линии в спектре испускания натрия. Если же свет от дугового фонаря будет проходить через газы и пары других веществ, то в сплошном спектре, наблюдаемом в спектроскоп, мы увидим также ряд темных линий, характерных для этих веществ.

Сплошной спектр, пересеченный темными линиями или полосами в результате прохождения белого света через раскаленные газы или пары, называется **спектром поглощения**. Исследование явления возникновения спектров поглощения показало, что *вещество поглощает лучи тех длин волн, которые оно может испускать в данных условиях (закон Кирхгофа)*.

Таким образом, для каждого химического элемента его линейчатый спектр испускания и спектр поглощения обладают обратимостью. Это значит, что расположение темных линий поглощения в точности соответствует расположению цветных линий испускания.

Спектр содержит важнейшую информацию об излучении. Общий вид спектра и детальное распределение энергии в нем зависят от тем-

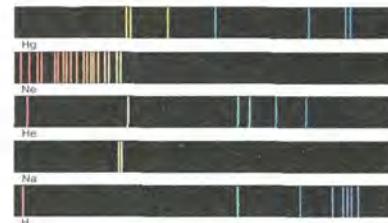


Рис. 18.4. Линейчатые спектры некоторых веществ (Hg, Ne, He, Na, H)

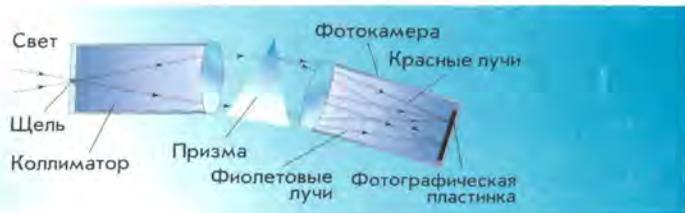


Рис. 18.3. Схема щелевого спектрографа

пературы, химического состава и физических свойств источника, а также от скорости его движения. Метод исследования химического состава тел и их физического состояния с помощью спектров испускания и поглощения называется **спектральным анализом**.

2. Химический состав небесных тел. В 1814 г. немецкий физик *Йозеф Фраунгофер*, наблюдая спектр Солнца при помощи сделанного им спектроскопа с дифракционной решеткой, обратил внимание на то, что сплошной спектр Солнца содержит значительное число темных линий. Ученый установил, что эти линии (названные впоследствии его именем) не случайны и всегда присутствуют в спектре Солнца на строго определенных местах. **Фраунгоферовы линии** — не что иное, как линии поглощения паров различных веществ, находящихся вблизи источника сплошного спектра — яркой поверхности Солнца (между фотосферой и спектральным прибором). Солнце окружено газовой оболочкой, имеющей более низкую температуру и меньшую плотность, чем фотосфера. Таким образом, спектр Солнца есть, по существу, спектр поглощения этих паров.

При детальной классификации фраунгоферовых линий один за другим на Солнце обнаружили все земные элементы. После осуществления большой по объему работы по установлению соответствия фраунгоферовых линий определенным элементам оказалось, что несколько спектральных линий не принадлежат ни одному земному элементу. Так был открыт новый элемент — гелий (солнечный). И только через 26 лет гелий обнаружили на Земле.

Сравнивая длины волн линий поглощения, наблюдаемых в спектрах небесных тел, с полученными в лаборатории или рассчитанными теоретически спектрами различных веществ, можно определить химический состав излучающего космического объекта, находящегося на очень большом расстоянии. Спектральный анализ позволяет определить состав не только Солнца, но и других объектов — звезд, туманностей. Анализ спектров — основной метод изучения физической природы космических объектов, который используется в астрофизике.

3. Температура. Законы Вина и Стефана — Больцмана. Всякое, даже слабо нагретое тело излучает электромагнитные волны (тепловое излучение). При температурах, не превышающих 10^3 К, излучаются главным образом инфракрасные лучи и радиоволны. По мере дальнейшего нагревания спектр теплового излучения меняется: во-первых, увеличивается общее количество излучаемой энергии, во-вторых, появляются лучи все более и более коротких длин волн — видимые (от красных до фиолетовых), ультрафиолетовые, рентгеновские и т. д.

При тепловом излучении внутренняя энергия теплового движения атомов и молекул тела переходит в энергию испускаемых электромаг-

нитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода электромагнитной энергии во внутреннюю энергию тела.

Тело, которое абсолютно не поглощало бы излучение и полностью отражало все падающие на него лучи, называют в физике **абсолютно белым телом**. Наблюдаемый цвет такого тела полностью определяется спектральным составом освещающего его излучения. Тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение, называется **абсолютно черным телом**. При освещении такого тела посторонним источником света оно ничего не отражает и представляется нам черным.

Следует заметить, что в природе абсолютно белых и абсолютно черных тел нет. Реальные тела, которые мы называем черными (бархат, сажа), хорошо поглощают только излучение видимой области спектра, да и то не полностью.

При каждом определенном значении температуры нагретое тело излучает сильнее всего в некоторой области спектра. Температура небесных тел, имеющих непрерывный спектр, может быть измерена по распределению энергии в спектре. От распределения энергии в спектре зависит цвет источника, поэтому цвет тела оказывается связанным с его температурой.

Распределение энергии в непрерывном спектре тел разной температуры можно представить в виде графика (рис. 18.5). С увеличением температуры максимум излучения абсолютно черного тела смещается в коротковолновую область спектра. Длина волны λ_{\max} , которой соответствует максимум в распределении энергии, связана с абсолютной температурой T соотношением, которое называют **законом смещения Вина**:

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

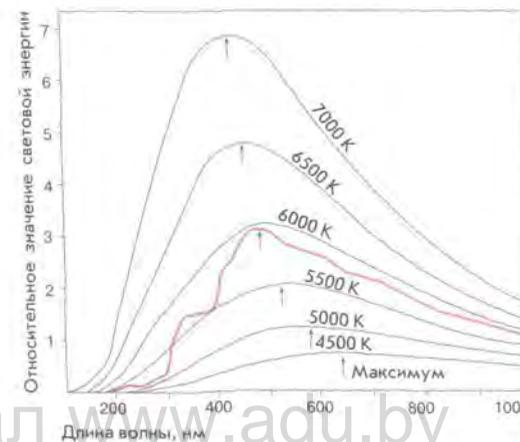


Рис. 18.5. Распределение энергии в непрерывных спектрах тел, нагретых до разных температур. Красная кривая — спектр Солнца

Если T выражать в градусах Кельвина, а λ_{max} — в микрометрах, то постоянная $b \approx 2900 \text{ К} \cdot \text{мкм}$. Данный закон выполняется не только для оптического, но и для любого другого диапазона электромагнитного излучения.

В спектрограмме Солнца наибольшая интенсивность излучения приходится на длину волны $\lambda = 480 \text{ нм}$, поэтому температура солнечной фотосферы близка к 6000 К .

По мере увеличения температуры меняется не только цвет излучения, но и его мощность. В результате экспериментов и теоретических расчетов было обосновано, что *мощность излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана — Больцмана)*. Каждый квадратный метр поверхности абсолютно черного тела излучает за 1 с по всем направлениям во всех длинах волн энергию

$$\varepsilon = \sigma T^4,$$

где ε — мощность излучения единицы поверхности нагретого тела, T — абсолютная температура, σ — постоянная Стефана — Больцмана. Постоянная Стефана — Больцмана равна $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Зная количество энергии, приходящей от звезды к земной поверхности, можно по закону Стефана — Больцмана определить ее температуру. Законы Вина и Стефана — Больцмана справедливы для излучения абсолютно черного тела. В первом приближении можно считать, что звезды, и в частности Солнце, излучают как абсолютно черное тело.

4. Эффект Доплера. В астрофизике широко используется эффект Доплера, возникающий при движении источника излучения относительно наблюдателя. Суть эффекта Доплера заключается в следующем: если источник излучения движется по лучу зрения наблюдателя со скоростью v_r , называемой лучевой скоростью, то вместо длины волны λ_0 , которую излучает источник, наблюдатель фиксирует волну длиной λ , так что

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v_r}{c} \right),$$

где c — скорость света.

Скорость v_r положительна при удалении источника света от наблюдателя ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 > 0$) и отрицательна при приближении к нему ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 < 0$).

С эффектом Доплера мы часто сталкиваемся в акустике. Например, если вы стоите на платформе, мимо которой проходит поезд, то можете заметить, что пока он приближался, звуковой сигнал был более высоким, а когда стал удаляться, высота звука сразу снизилась.

Аналогичное явление наблюдается и в оптике: свет от приближающегося источника становится более синим (частота увеличивается), а от удаляющегося — более красным (частота уменьшается). Это изменение сказывается на положении спектральных линий в спектре: они смещаются в синюю или красную область спектра.

Для измерения смещения спектральных линий рядом со спектром исследуемой звезды на ту же фотопластинку фотографируют спектр лабораторного источника, в котором имеются известные спектральные линии. Потом при помощи микроскопов, снабженных точными микрометрами, измеряют смещение линий объекта по отношению к лабораторной системе длин волн и тем самым находят величину $\Delta\lambda$. Затем по формуле

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c},$$

которая следует из приведенной выше, вычисляют лучевую скорость v_r .

Приведенная выше формула Доплера пригодна лишь для скоростей v_r в пределах до $0,1$ скорости света. При движении источников излучения со скоростями, близкими к скорости света, необходимо учитывать законы теории относительности.

Сдвиг спектральных линий теоретически предсказал в 1842 г. австрийский физик Х. Доплер. Правильность формулы Доплера подтвердил в 1899 г. лабораторными опытами и наблюдениями спектров звезд русский астрофизик А. А. Белопольский.

Вопросы и упражнения

1. Что такое спектр? Какие явления доказывают сложный состав света?
2. Что можно узнать о космическом объекте, изучая его спектр?
3. Назовите и дайте определения трем основным видам спектров.
4. Что такое спектральный анализ? Какое применение он находит в астрономии?
5. Для чего предназначен и как устроен спектрограф? Что такое спектрограмма?
6. Сформулируйте и запишите закон смещения Вина и закон Стефана — Больцмана.
7. Рассчитайте, на какую область спектра приходится максимум излучения тела, нагретого до комнатной ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) температуры.
8. Какую температуру должна иметь звезда, чтобы максимум в ее спектре приходился на область ультрафиолетового излучения?
9. В чем заключается эффект Доплера? Какое применение находит эффект Доплера в астрономии?
10. Измерения спектрограммы звезды показали, что линия железа ($\lambda = 530,2 \text{ нм}$) в ее спектре сдвинута в сравнении с линиями лабораторного источника в сторону более коротких волн на $0,02 \text{ нм}$. Чему равна скорость звезды по лучу зрения?

VI РАЗДЕЛ Солнце — дневная звезда

§ 19. СОЛНЦЕ КАК ЗВЕЗДА

1. Общие сведения. Солнце занимает исключительное положение в жизни человечества. Оно обеспечивает нас светом, теплом и является источником всех видов энергии, используемых людьми. Солнце влияет на магнитное поле и верхние слои атмосферы Земли, вызывая магнитные бури, ионизацию и циркуляцию атмосферы. Солнечная «погода» влияет на климат, биосферу и земную жизнь в целом. Эту основную роль Солнца человек осознал еще в древности.

Солнце — центральное тело Солнечной системы, типичная звезда, представляющая собой раскаленный плазменный шар. Солнце — одна из 100 млрд звезд нашей Галактики. Детально изучая физическую природу Солнца, мы получаем важнейшие сведения о природе остальных звезд. Диск Солнца, видимый с Земли, — ослепительно желтый круг со средним угловым диаметром 32'. Свет от него доходит до нас за 8½ мин.

Диаметр Солнца равен 1 млн 392 тыс. км, или 109 диаметров Земли. Объем Солнца, таким образом, более чем в миллион раз превосходит объем Земли, но масса его составляет $M = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг, что примерно равно 330 000 земных масс. Зная массу Солнца и его размеры, можно определить среднюю плотность солнечного вещества $\rho = 1,409 \cdot 10^3$ кг/м³, что почти в 4 раза меньше средней плотности Земли. Но Солнце неоднородно. Плотность его быстро возрастает вглубь.

Измерения за пределами земной атмосферы показали, что на площадку 1 м², расположенную перпендикулярно солнечным лучам, ежесекундно поступает 1,37 кВт энергии. Эта величина практически не меняется в течение длительного промежутка времени, поэтому она получила название **солнечной постоянной**. Максимум солнечного излучения приходится на оптический диапазон.

Светимость Солнца, или полное количество энергии, излучаемое Солнцем по всем направлениям в единицу времени, определим следующим образом: величину солнечной постоянной умножим на площадь сферы с радиусом r в одну астрономическую единицу (1 а. е. = 149,6 · 10⁹ м). Она получится равной

$$L_{\odot} = 4\pi r^2 \cdot 1370 \text{ Вт} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

На Землю попадает ничтожная часть солнечной энергии, составляющая около половины миллиардной доли указанного выше значения. (Другие основные сведения о Солнце представлены в Приложении 14.)

2. Спектр и химический состав.

Почти все наши знания о Солнце основаны на изучении его спектра. Химические элементы, которые присутствуют в атмосфере Солнца, поглощают из непрерывного спектра, излучаемого фотосферой, свет определенной частоты. В результате в непрерывном спектре появляются темные линии. Как мы уже говорили, Й. Фраунгофер впервые изучил и зарисовал 576 темных линий солнечного спектра. Ученый правильно указал, что источник темных спектральных линий — солнечная атмосфера. По положениям в спектре (т. е. длинам волн) и интенсивностям этих фраунгоферовых линий можно установить, какие химические элементы присутствуют в солнечной атмосфере (рис. 19.1).

Уже отождествлено свыше 30 тыс. линий для 70 химических элементов, присутствующих в атмосфере Солнца. Для лучшего разрешения фраунгоферовых линий спектр Солнца максимально «растягивают» с помощью оптических приборов (рис. 19.2). Для удобства весь спектр разрезан на части и каждая полоска последовательно помещена внизу одна под другой. Как видим, даже на таком сильно «растянутом» рисунке спектра многие линии сливаются воедино. Фраунгоферовы линии по интенсивности и ширине чрезвычайно разнообразны.

Анализ интенсивностей спектральных линий показал, что преобладающим элементом на Солнце является водород.

3. Внутреннее строение. Основываясь на сведениях о радиусе, массе, светимости Солнца, на физических законах (которые в силу своей универсальности применимы и для других небесных тел), можно получить данные о давлении, плотности, температуре и химическом составе на разных расстояниях от центра Солнца. При приближении к центру Солнца растут, достигая максимальных значений, температура,

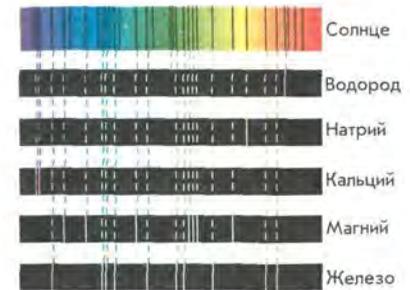


Рис. 19.1. Соответствие между положением фраунгоферовых линий солнечного спектра и линиями химических элементов



Рис. 19.2. Общий вид спектра Солнца

Таблица 19.1

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ СОЛНЦА

Расстояние от центра R/R_{\odot}	Температура T , К	Давление P , Па	Плотность ρ , $\times 10^3$ кг/м ³
0	$1,5 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^{16}$	150
0,2	$1,0 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^{15}$	36
0,5	$3,4 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^{13}$	1,3
0,8	$1,3 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^{11}$	0,035
0,98	$1,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^9$	0,001

давление и плотность. Химический состав Солнца на разных глубинах тоже различается: процентное содержание водорода меньше всего в центре.

Высокое давление внутри Солнца обусловлено действием вышележащих слоев. Силы тяготения стремятся сжать Солнце. Им противодействуют упругость горячего газа и давление излучения, идущие из недр. Эти силы стремятся расширить Солнце. Тяготение, с одной стороны, а упругость газов и давление излучения, с другой — уравновешивают друг друга. Равновесие имеет место во всех слоях от поверхности до центра Солнца. Такое состояние Солнца и звезд называется **гидростатическим равновесием**. Эта простая идея была выдвинута в 1924 г. английским астрофизиком *Артуром Эддингтоном*. Она позволила составить уравнения, по которым рассчитывают модели внутреннего строения Солнца, а также других звезд. Такие модели представляют собой совокупность параметров звездного вещества (температура, давление, плотность и т. д.) на разных глубинах. В табл. 19.1 приведена так называемая модель внутреннего строения Солнца, т. е. зависимость его физических свойств от глубины.



Рис. 19.3. Внутреннее строение Солнца

Как видно из таблицы, температура в недрах Солнца достигает 15 млн градусов. Именно в этой области генерируется энергия Солнца. Солнечное вещество в основном состоит из водорода. При огромных давлениях и температурах протоны (ядра водорода) движутся со скоростями в сотни километров в секунду. Внутри Солнца (на расстояниях до 0,3 радиуса от центра; рис. 19.3) создаются условия, благоприятные для протекания термоядерных реакций слияния атомов легких химических

элементов в атомы более тяжелые. Из ядер водорода образуется второй из легчайших элементов — гелий. Для образования одного ядра гелия требуется 4 ядра водорода. На промежуточных стадиях образуются ядра тяжелого водорода (дейтерия) и ядра изотопа He^3 . Эта реакция называется **протон-протонной** (рис. 19.4). При реакции небольшое количество массы реагирующих ядер водорода теряется, преобразуясь в огромное количество энергии. Выделяющаяся энергия поддерживает излучение Солнца. Через слои, окружающие центральную часть звезды, эта энергия передается наружу. В области от 0,3 до 0,7 радиуса от центра Солнца находится зона лучистого равновесия энергии, где энергия распространяется через поглощение и излучение γ -квантов. Рождающиеся в центре Солнца гамма-кванты имеют энергию в миллионы раз большую, чем энергия квантов видимого света. Длина волны гамма-квантов очень мала. В процессе поглощения квантов атомами и дальнейшего их переизлучения происходит постепенное уменьшение их энергии и увеличение длины волны. Мощные гамма-кванты постепенно дробятся на обладающие меньшей энергией: возникают рентгеновские, ультрафиолетовые и, наконец, видимые и инфракрасные лучи.

На протяжении последней трети радиуса Солнца находится **конвективная зона**. Здесь энергия передается не излучением, а посредством конвекции (перемешивания) (рис. 19.5). Причина возникновения конвекции в наружных слоях Солнца та же, что и в кипящем сосуде с водой: количество энергии, поступающее от нагревателя, гораздо больше того, которое отводится теплопроводностью. Поэтому вещество вынужденно приходит в движение и само начинает переносить тепло. Конвективная зона простирается практически до самой видимой поверхности Солнца (фотосферы).

4. Источники энергии. Анализ химического состава земных, лунных пород и метеоритов указывает на то, что Солнечная система

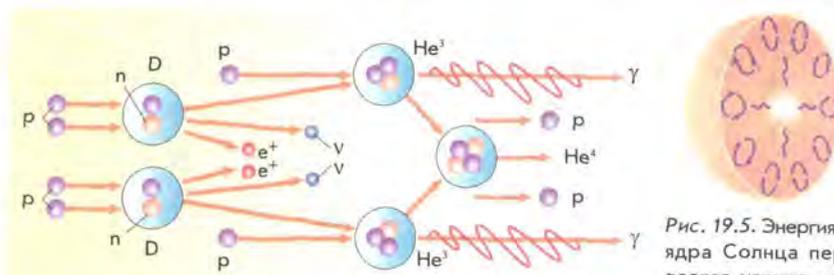


Рис. 19.4. Схема протон-протонной реакции: p — протон; n — нейтрон; D — ядро дейтерия; He^3 , He^4 — ядра изотопов гелия; e^+ — позитрон; ν — нейтрино; γ — квант излучения

Рис. 19.5. Энергия от ядра Солнца передается излучением. У поверхности главным переносчиком энергии становится конвекция

образовалась около 4,7 млрд лет назад. Солнце, по современным данным, существует около 5 млрд лет. За последние 3 млрд лет светимость его почти не изменилась. Тогда полная энергия Солнца, выделенная за это время, равна $E_{\odot} \approx L_{\odot} t = 3,6 \cdot 10^{43}$ Дж. Разделив эту величину на полную массу Солнца, получим, что каждый килограмм солнечного вещества выделил около $1,8 \cdot 10^{13}$ Дж энергии. Реально эта величина еще больше, так как мы не учли еще первые 2 млрд лет. Ни одно химическое горючее не может обеспечить такую величину внутренней энергии, выделяемой 1 кг солнечного вещества.

В среднем Солнце теряет примерно 4 млн тонн водорода в секунду. На первый взгляд эта величина может показаться огромной. Однако она ничтожна по сравнению с полной массой Солнца. Расчеты показывают, что водорода в недрах достаточно для поддержания свечения Солнца на современном уровне еще на протяжении 5 млрд лет.

Вопросы и упражнения

1. Как можно вычислить массу Солнца? 2. Что такое солнечная постоянная? Как ее определили? 3. Что понимают под светимостью Солнца? Чему она равна? 4. Какие химические элементы являются преобладающими для Солнца? 5. Опишите внутреннее строение Солнца. 6. На какие зоны условно подразделяются недра Солнца? Какие процессы происходят в каждой из этих зон? 7. Что является источником солнечной энергии?

VI

§ 20. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

1. Фотосфера. Диск Солнца кажется резко очерченным. Это происходит потому, что практически все видимое излучение Солнца исходит из очень тонкого слоя — **фотосферы**. Толщина фотосферы не превышает 300 км. Самые заметные объекты на Солнце — это темные пятна (см. рис. 19.3), одно из которых в увеличенном виде показано на рис. 20.1. Диаметры пятен иногда достигают 200 тыс. км. Совсем маленькие пятна называют **порами**. Вся фотосфера Солнца выглядит как совокупность ярких пятен — **гранул**, разделенных между собой узкими и менее яркими промежутками. Размер каждой из гранул

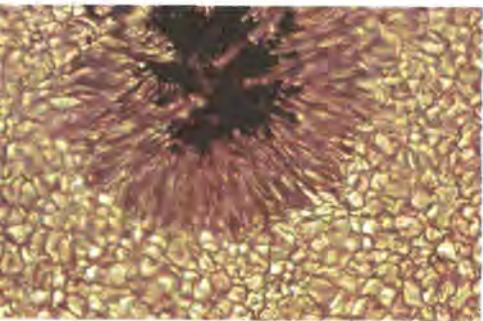


Рис. 20.1. Одно из солнечных пятен и фотосферная грануляция

около 700 км. Рисунок, который образуют гранулы, постоянно изменяется (буквально за 5—10 мин они успевают появиться и исчезнуть). Плазма в гранулах поднимается вверх, а в межгранульных пространствах опускается вниз. Поэтому разность температур гранул и темных промежутков достигает 600 К. Процесс постоянного возникновения и исчезновения гранул в фотосфере Солнца называется **грануляцией**.

Картина солнечных пятен, хотя и несколько медленнее, также постоянно меняется: пятна появляются, растут и распадаются (рис. 20.2). Время жизни групп пятен составляет два или три оборота Солнца вокруг своей оси. Пятна холоднее окружающего их вещества и поэтому на общем фоне солнечного диска выглядят темнее. Солнечные пятна обычно появляются группами в пределах небольшой области, вытянутой параллельно экватору. По размерам в группе выделяются два пятна: головное (западное) пятно, идущее впереди по вращению Солнца, и хвостовое.

Систематические наблюдения солнечных пятен показывают, что Солнце вращается в направлении движения планет и плоскость солнечного экватора наклонена к плоскости эклиптики под углом $7^{\circ}15'$. Также обнаружено, что угловая скорость вращения Солнца убывает от экватора к полюсам. Период вращения Солнца изменяется от 25 суток на экваторе до 30 суток у полюсов.

Многолетние наблюдения образования пятен на Солнце показали, что имеются циклические колебания числа пятен. Иногда их не бывает совсем, а иногда одновременно возникают десятки крупных пятен. Средняя продолжительность такого цикла составляет примерно 11 лет.

Кроме пятен, в фотосфере наблюдаются **факелы** — яркие образования, видимые в белом свете преимущественно вблизи края диска Солнца. Факелы имеют сложную волокнистую структуру, их температура на несколько сотен градусов превышает температуру фотосферы.

Обычно факелы появляются раньше пятен и продолжают существовать некоторое время после их исчезновения. Площадь факельных площадок в несколько раз превосходит площадь соответствующей группы пятен. В центре диска Солнца факелы практически не видны, так как их контрастность очень

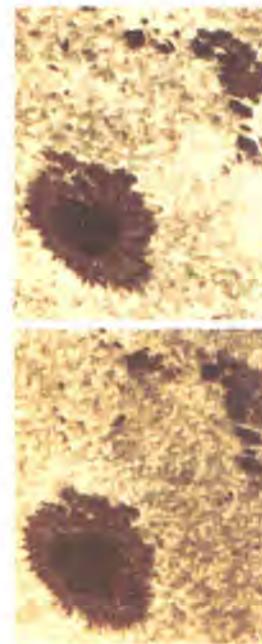


Рис. 20.2. Динамика изменения группы солнечных пятен (фотографии сделаны с интервалом в 2 ч 40 мин)

VI



Рис. 20.3. Хромосфера Солнца, наблюдаемая во время полного солнечного затмения

женность достигает 10—15 тыс. км. Температура в хромосфере с высотой не падает, а растет от 4500 К до нескольких десятков тысяч. Излучение хромосферы в сотни раз меньше фотосферного, поэтому для ее наблюдения применяют специальные методы, позволяющие выделять слабое излучение. Хромосфера весьма неоднородна и представляется наблюдателю в виде продолговатых вытянутых язычков или зубчиков — **спикул** — длиной порядка 10 тыс. км, придающих ей вид горячей травы (рис. 20.4). Спикулы выбрасываются из нижней хромосферы со скоростью до 30 км/с; время их жизни составляет несколько минут. Одновременно на Солнце существует до 250 тыс. спикул.

На краю солнечного диска хорошо видны **протуберанцы** (см. рис. 19.3) — гигантские арки или выступы, как бы опирающиеся на хромосферу. Изменение и форма протуберанцев (рис. 20.5) тесно связаны с магнитным полем Солнца.

Рис. 20.4. Строение солнечной атмосферы: 1 — фотосфера; 2 — пятна; 3 — протуберанец; 4 — вспышка; 5 — хромосфера; 6 — солнечная корона; 7 — корональные лучи



мала. Средняя продолжительность их существования — 15 суток, но может достигать почти 3 месяцев.

Образование пятен и факелов связано с магнитным полем Солнца. Как показывают исследования, индукция магнитного поля Солнца в среднем в два раза выше, чем на поверхности Земли, однако в местах появления солнечных пятен она увеличивается в тысячи раз.

2. Внешние слои атмосферы: хромосфера и корона. Над фотосферой простирается **хромосфера** Солнца (рис. 20.3). Общая ее протя-



Рис. 20.5. Изменения протуберанца, наблюдавшегося в течение нескольких часов

В хромосфере наблюдаются мощные и быстро развивающиеся процессы — **вспышки** (рис. 20.6). Эти яркие образования существуют от нескольких минут до нескольких часов. Обычно солнечные вспышки проходят вблизи быстро развивающихся групп солнечных пятен. Они сопровождаются выбросами вещества. По характеру явления (быстрота развития и огромное энерговыделение) вспышки представляют собой взрывные процессы. Внешние слои атмосферы Солнца — хромосфера и еще выше располагающаяся **солнечная корона** (рис. 20.7) — хорошо видны во время полных солнечных затмений.

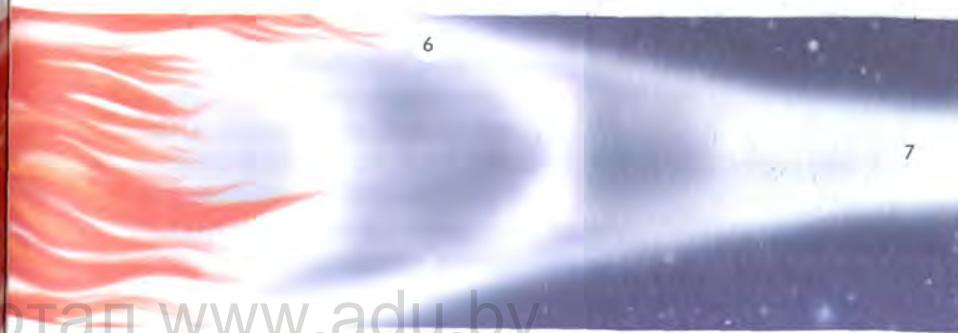
Корона — самая внешняя разреженная и горячая оболочка Солнца, распространяющаяся от него на несколько солнечных радиусов и имеющая температуру плазмы до 1 млн градусов. Яркость солнечной короны в миллион раз меньше, чем фотосферы, поэтому наблюдать солнечную



Рис. 20.6. Хромосферная вспышка на Солнце



Рис. 20.7. Солнечная корона во время затмения Солнца



корону можно во время полных солнечных затмений или с помощью специальных телескопов-коронографов. Высокую температуру и разреженность короны подтверждает спектральный анализ. В ее спектре наблюдались неизвестные в земных условиях спектральные линии, которые приписывались гипотетическому химическому элементу «коронию». И только в 1940-х гг. было установлено, что линии «корония» принадлежат многократно ионизированному железу и другим хорошо известным химическим элементам, но находящимся в необычно высоких состояниях ионизации и возбуждения. Позже высокая температура короны была измерена по ее радиоизлучению, а затем и по рентгеновскому излучению. Нагревание короны до высоких температур осуществляется за счет передачи энергии колебательных (конвективных) движений вещества из фотосферы. Волны (с частотой звуковых колебаний) в короне, где плотность вещества быстро убывает, становятся ударными. Они быстро затухают, происходит преобразование механической энергии волн в тепло. Из-за высокой температуры плотность короны убывает медленно, поэтому самые внешние слои атмосферы Солнца тянутся вплоть до орбиты Земли.

3. Магнитные поля и активные образования. Масса, радиус, количество энергии, излучаемой Солнцем, остаются практически постоянными, но на всех уровнях солнечной атмосферы наблюдаются структурные образования, изменяющие свои физические параметры во времени. Совокупность нестационарных процессов, периодически возникающих в солнечной атмосфере, называется **солнечной активностью**. Проявлением солнечной активности являются пятна, факелы в фотосфере, протуберанцы, вспышки и выбросы вещества в атмосфере и короне. Места, где они возникают, называются **активными областями** (рис. 20.8). Все активные образования взаимосвязаны с помощью изменяющихся магнитных полей, которые всегда присутствуют в активных областях Солнца. Центры активности, зарождаясь на некоторой глубине под фотосферой, простираются в виде ярусов далеко в солнечную корону.

Не только появление пятен, но и солнечная активность в целом имеют 11-летнюю цикличность (колебание циклов фактически проходит в пределах от 7,5 до 16 лет).

Различают магнитные поля солнечных пятен, активных областей вне пятен и общее магнитное поле



Рис. 20.8. Солнце в рентгеновских лучах. Наиболее яркие места — области проявления солнечной активности

Солнца. Общее магнитное поле невелико и имеет напряженность около 80 А/м. В активных областях магнитное поле увеличивается в сотни и тысячи раз. Структура магнитных полей в активных областях очень сложна; происходит чередование магнитных полюсов различной полярности. Встречаются также локальные магнитные области с большой напряженностью вне солнечных пятен.

Вопросы и упражнения

1. Что такое фотосфера Солнца? 2. Какие объекты характерны для фотосферы Солнца? 3. Вычислите линейный размер пятна, если его угловой диаметр равен 17,6". 4. Почему солнечные пятна темнее, чем фотосфера? 5. Что понимают под грануляцией? 6. Что понимают под хромосферой и короной Солнца? 7. Какие явления наблюдаются в хромосфере и короне Солнца? 8. Что такое солнечная активность и какова ее цикличность?

§ 21. ВЛИЯНИЕ СОЛНЦА НА ЖИЗНЬ ЗЕМЛИ

1. Интенсивность солнечного излучения вне оптического диапазона. Электромагнитное излучение Солнца, максимум которого приходится на видимую часть спектра, проходит строгий отбор в земной атмосфере. Она «прозрачна» только для видимого света и частично ультрафиолетового и инфракрасного излучений, а также для радиоволн в сравнительно узком диапазоне.

В ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах мощность солнечного излучения резко уменьшается — в сотни тысяч раз по сравнению с мощностью излучения в оптическом диапазоне. Но если в оптическом диапазоне Солнце является постоянной звездой, то излучение в коротковолновой области спектра зависит от солнечной активности, увеличиваясь или уменьшаясь в несколько раз в течение 11-летнего солнечного цикла. Сильно возрастает поток коротковолнового излучения во время хромосферных вспышек. Из нижних слоев хромосферы исходит ультрафиолетовое излучение, максимальная интенсивность которого может в 2 раза превышать минимальное значение в 11-летнем цикле. Основное рентгеновское излучение исходит из короны Солнца.

Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение Солнца поглощается в верхних слоях атмосферы Земли. Оно ионизирует газы земной атмосферы. Ионизированный слой верхней части атмосферы Земли называется **ионосферой**. Слабая ионизация регистрируется уже на высоте 60 км, а максимум концентрации электронов и ионов наблюдается

на высоте 250—400 км от поверхности Земли. Ионосфера Земли полностью определяет распространение коротких радиоволн между удаленными пунктами земной поверхности. При сильных всплесках солнечного рентгеновского излучения от хромосферных вспышек происходит нарушение связи на коротких волнах.

Длинноволновое (мягкое) ультрафиолетовое излучение Солнца способно проникать в атмосферу Земли до высоты 30—35 км. Там оно разделяет молекулы кислорода O_2 на два составляющих атома. Свободные атомы, соединяясь с молекулами кислорода, образуют новое вещество — **озон**, каждая молекула которого состоит из трех атомов кислорода.

Озоновый слой поглощает практически все ультрафиолетовое излучение Солнца, оставляя лишь малую долю, достигающую поверхности Земли и вызывающую у людей загар. Когда толщина озонового слоя уменьшается, солнечное ультрафиолетовое излучение может возрасти в 1,5—2 раза. Оно биологически активно и вызывает увеличение количества заболеваний раком кожи.

2. Солнечный ветер. Непрерывный расширяющийся поток плазмы, исходящий приблизительно радиально от Солнца вдоль линий напряженности магнитного поля и заполняющий собой межпланетное пространство, называется **солнечным ветром**. В его состав входят протоны, электроны, а также α -частицы и в незначительном количестве ряд высокоионизированных атомов (кислород, кремний, сера, железо). Скорость частиц солнечного ветра увеличивается по мере их удаления от Солнца. Вблизи Земли скорость солнечного ветра достигает 450 км/с, а плотность составляет несколько частиц в кубическом сантиметре.

Поток энергии, уносимый солнечным ветром, достигает примерно 10^{-8} светимости Солнца. Поток солнечной плазмы не может преодолеть противодействие магнитного поля Земли и обтекает его. При этом образуется полость — **магнитосфера** (рис. 21.1). Магнитосфера имеет каплеобразную форму.



Рис. 21.1. Схема образования магнитосферы Земли

Магнитосфера имеет каплеобразную форму. Со стороны Солнца она сжата давлением солнечного ветра. Граница магнитосферы, обращенная к Солнцу, находится на расстоянии в среднем 10—12 радиусов Земли. С противоположной (ночной) стороны магнитосфера вытянута подобно хвосту кометы, и ее протяженность достигает расстояния, равного 6000 радиусов Земли. С изменением скорости и плотности частиц солнечного ветра изменяется и форма магнитосферы.

3. Солнечно-земные связи. Солнечная активность оказывает сильное влияние в первую очередь на внешние оболочки Земли — магнитосферу и ионосферу. Во время мощных солнечных вспышек частицы могут разгоняться до 100 000 км/с, т. е. возникают космические лучи солнечного происхождения. Под воздействием солнечных космических лучей в атмосфере образуется окись азота NO , которая, взаимодействуя с озоном, активно его разрушает за счет реакции $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$. После мощных вспышек на Солнце наблюдается понижение содержания озона в стратосфере над полярными шапками Земли.

С помощью специальных приборов — коронографов, установленных на космических аппаратах, регистрируют грандиозные выбросы вещества из возмущенной короны Солнца. Оторвавшийся от Солнца сгусток корональной плазмы, несущий внутри себя замкнутую петлю магнитного поля, называется **корональным выбросом массы**. Скорость выброса доходит иногда до 1000 км/с. На расстоянии нескольких радиусов Солнца корональный выброс имеет размер, сравнимый с радиусом Солнца. При движении к Земле это плазменное облако расширяется в десятки раз, растягиваясь до 30 млн км. В годы максимума солнечной активности частота корональных выбросов масс увеличивается в 5 раз. Плазменное облако с «вымороженным» магнитным полем достигает Земли за 1,5—2 дня.

Столкновение плазменного облака с магнитосферой Земли приводит к сильным ее возмущениям. Воздействие коронального выброса приводит к возникновению сильных магнитных бурь, к разогреву и ускорению плазмы внутри магнитосферы. При этом быстрые протоны и электроны, сталкиваясь с молекулами воздуха на высоте

100—200 км, ионизуют их и заставляют светиться. В результате ионизации на Земле, преимущественно в околополярных широтах, наблюдаются полярные сияния (рис. 21.2). При высокой геомагнитной активности сияния появляются на высоте 300—400 км, и их можно наблюдать даже на широтах Республики Беларусь. По форме полярные сияния необычайно разнообразны: дуги, спирали, полосы, ленты, занавесы и т. д. Полярные сияния бывают чаще и ярче в годы максимума солнечной активности. Сияния могут происходить и в атмосферах других планет, например в атмосфере Венеры.



Рис. 21.2. Полярное сияние

Во время магнитной бури изменяются электрические поля над поверхностью Земли. Это, во-первых, приводит к возникновению перегрузок в линиях электропередач (до нескольких сотен ампер) и их отключению. Во-вторых — к наведению сильных токов в трубах газо- и нефтепроводов и к выходу из строя их систем управления. Последствия магнитной бури также сказываются на бортовых электронных системах космических аппаратов.

Магнитные бури приводят к изменению давления в тропосфере (нижнем слое атмосферы Земли), в результате развиваются циклоны.

На тот факт, что Солнце влияет на биологические объекты, в том числе и на здоровье человека, впервые еще в 1915 г. обратил внимание А. Л. Чижевский. Проанализировав исторические документы, ученый пришел к выводу, что в прошлом вспышки эпидемий приходились преимущественно на годы максимумов солнечной активности. На основании выведенной связи ученый попытался предсказать некоторые эпидемии на 35 лет вперед. Его прогнозы сбылись в семи случаях из восьми.

К колебаниям солнечной активности особенно чувствительна нервная система человека. Статистически достоверно установлено, что число больных, поступающих в клиники, резко увеличивается в дни подъема солнечной активности. Предполагается, что солнечная активность влияет на человека через возмущения магнитного поля Земли.

Чтобы всесторонне исследовать происходящие на Солнце явления, ученые проводят непрерывные наблюдения Солнца, которые называют **Службой Солнца**. В этих наблюдениях участвуют крупные астрофизические обсерватории, а также множество специальных станций. Для более эффективного решения проблем солнечно-земных связей организуются специальные международные комплексные программы исследований, выполняемые в определенные периоды времени («Международный геофизический год», «Международный год спокойного Солнца» и т. д.).

Вопросы и упражнения

1. Как земная атмосфера влияет на прохождение различных видов солнечного излучения к Земле? 2. Почему на Земле часто наблюдается нарушение связи на коротких радиоволнах? 3. Какова роль озонового слоя в атмосфере Земли? Каким образом активность Солнца может влиять на толщину озонового слоя Земли? 4. Что такое солнечный ветер? Как он возникает? 5. Что называют магнитосферой Земли? Какое влияние на нее оказывает солнечный ветер? 6. Каким образом влияет межпланетное магнитное поле на магнитосферу Земли? 7. Каковы причины и последствия магнитных бурь на Земле? 8. Каковы причины происхождения полярных сияний?

VII РАЗДЕЛ

Звезды

§ 22. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД. СВЕТИМОСТЬ

1. Видимая звездная величина. При первоначальном знакомстве со звездным небом (§ 2) мы рассмотрели понятие «звездная величина» (m). Вы уже знаете, что звезды 1-й звездной величины создают в 2,512 раза большую освещенность, чем звезды 2-й звездной величины, которые в свою очередь дают световые потоки в 2,512 раза больше, чем звезды 3-й звездной величины, и т. д. Таким образом, за интервал в видимую 1 звездную величину (обозначается 1^m) принято отношение освещенностей (E) в 2,512 раза. Данное число выбрано для удобства так, чтобы его десятичный логарифм в точности равнялся 0,4, а интервал в 5^m соответствовал бы отношению в 100 раз. В виде формулы эти соотношения выразил *Н. Поггон*:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1} \quad (22.1)$$

Видимая звездная величина Луны в полнолуние равна $-12,7^m$, а в фазе первой четверти составляет $-9,0^m$. По формуле (22.1) можем найти, что освещенность Луны в полнолуние (E_n) больше освещенности Луны в фазе первой четверти (E_l) в 30 раз:

$$\frac{E_n}{E_l} = 2,512^{m_l - m_n} = 2,512^{-9+12,7} = 2,512^{3,7} \approx 30.$$

Видимую звездную величину Солнца определил *В. К. Цераский*. Она оказалась равной $-26,8^m$. Шкала звездных величин позволяет выражать в звездных величинах блеск слабых светил, невидимых невооруженным глазом. В настоящее время крупнейшие телескопы с диаметром зеркал 8–10 м и современной приемной аппаратурой позволяют регистрировать объекты до 28-й звездной величины.

2. Определение расстояний до звезд. Ученые давно предполагали, что звезды имеют такую же физическую природу, как и наше Солнце. Из-за колоссальных расстояний диски звезд не видны даже в сильные телескопы. Чтобы сравнивать звезды между собой и с Солнцем, необходимо найти методы определения расстояний до них. Основным таким методом является метод параллактического смеще-

ния звезд, рассмотренный нами ранее. Так как радиус Земли слишком мал по сравнению с расстоянием до звезд, необходимо выбрать больший базис для измерения параллактического смещения звезд. Еще Н. Коперник понимал, что согласно его гелиоцентрической системе близкие звезды на фоне далеких звезд должны описывать эллипсы в результате годового движения Земли вокруг Солнца.

Кажущееся перемещение более близкой звезды на фоне очень далеких звезд происходит по эллипсу с периодом в 1 год и отражает движение наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца (рис. 22.1). Положение Земли на орбите и видимые с Земли положения звезды на небе на данном рисунке обозначены одинаковыми цифрами. Маленький эллипс, описываемый звездой, называется параллактическим эллипсом. В угловой мере большая полуось этого эллипса равна величине угла, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты, перпендикулярная направлению на звезду. Этот угол называется **годовым параллаксом** (π). Параллактические смещения звезд служат неопровержимым доказательством обращения Земли вокруг Солнца.

Расстояния до звезд определяются по их годовому параллактическому смещению, которое обусловлено перемещением наблюдателя (вместе с Землей) по земной орбите.

Из рис. 22.2 видно, что если $CT = a$ есть средний радиус земной орбиты, $MC = r$ — расстояние до звезды M от Солнца C , а угол π — годичный параллакс звезды, то

$$r = \frac{a}{\sin \pi}$$

Так как годовые параллаксы звезд оцениваются десятичными долями секунды, а 1 радиан равен $206\,265''$, то расстояние до звезды можно определить из соотношения:

$$r = \frac{206\,265''}{\pi''} \text{ а. е.} \quad (22.2)$$

При измерении расстояний до звезд астрономическая единица (а. е.) — среднее расстояние от Земли до Солнца — слишком мала. Поэтому для удобства определения расстояний до звезд в астрономии применяется специальная единица длины — парсек (пк), название которой происходит от слов

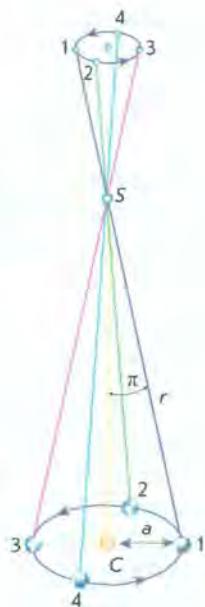


Рис. 22.1. Параллактическое смещение звезды на протяжении года: C — Солнце; S — звезда; a — полуось земной орбиты; π — годичный параллакс



Рис. 22.2. Годичный параллакс звезды: C — Солнце; M — звезда; T — Земля

«параллакс» и «секунда». Парсек — это расстояние, с которого радиус земной орбиты был бы виден под углом в $1''$.

Согласно формуле (22.2), $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км}$. Таким образом, расстояние до звезд в парсеках будет определяться выражением:

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{ пк.} \quad (22.3)$$

В астрономических единицах обычно выражаются расстояния до небесных тел Солнечной системы. Расстояния до небесных тел, находящихся за пределами Солнечной системы, обычно выражаются в парсеках, килопарсеках ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ пк}$) и мегапарсеках ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$), а также в световых годах ($1 \text{ св. г.} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63\,240 \text{ а. е.} = 0,3067 \text{ пк}$ или $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. г.}$). **Световой год** — расстояние, которое электромагнитное излучение (в вакууме) проходит за 1 год.

Нижний предел измерений тригонометрических параллаксов не превышает $0,005''$, что позволяет определять расстояния не свыше 200 пк. Расстояния до еще более далеких объектов определяются менее точно иными методами.

3. Абсолютная звездная величина. Видимый блеск звезд не характеризует их реального излучения. Он определяется двумя факторами: истинным излучением звезды и расстоянием до нее. Солнце, например, гораздо ближе к Земле, чем любая другая звезда, поэтому оно — самое яркое светило на небе. Следовательно, для сравнения истинного блеска звезд необходимо вычислять их звездную величину на определенном одинаковом расстоянии. За такое одинаковое (или стандартное) расстояние принято 10 пк. Видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк, называется **абсолютной звездной величиной**.

На расстоянии r видимая звездная величина звезды пусть будет равна m , а освещенность, создаваемая этой звездой, — E . По определению, видимая звездная величина с расстояния $r_0 = 10 \text{ пк}$ будет равна абсолютной звездной величине M , а E_0 — освещенность (или излучение) звезды с расстояния 10 пк. Тогда, используя формулу (22.1), можем записать:

$$\frac{E}{E_0} = 2,512^{M-m} \quad (22.4)$$

Из физики известно, что освещенности, создаваемые одним и тем же источником излучения, обратно пропорциональны квадратам расстояний до него, т. е.

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}. \quad (22.5)$$

Подставляя (22.5) в (22.4), получим, что $2,512^{M-m} = 100r$. Прологарифмировав данное равенство и упростив его, получим

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (22.6)$$

Учитывая, что $r = \frac{1}{\pi}$, формулу (22.4) можно записать в виде:

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi. \quad (22.7)$$

По формуле (22.6) вычислим абсолютную звездную величину Солнца. Расстояние до Солнца $r = 1 \text{ а. е.} = \frac{1}{206265} \text{ пк}$; видимая звездная величина Солнца $-26,8^m$. После подстановки этих значений получим, что $M_{\odot} = -26,8^m + 5^m + 26,6^m$. Это означает, что со стандартного расстояния в 10 пк Солнце выглядит слабой звездочкой почти 5-й звездной величины.

Абсолютные звездные величины звезд колеблются от -9^m до 19^m , т. е. отличаются на 28^m , или по освещенности в 160 миллиардов раз, друг от друга.

4. Светимость звезд. Зная абсолютную звездную величину звезды, можно вычислить действительное общее излучение звезды или ее светимость. **Светимостью** называется полная энергия, излучаемая звездой за 1 с. Светимость звезды можно выразить в ваттах, но чаще ее выражают в светимостях Солнца. Напомним, что светимость Солнца равна $3,85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ (см. § 19).

Используя формулу (22.1), можно записать соотношение между светимостями и абсолютными звездными величинами какой-либо звезды и Солнца:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{M_{\odot} - M}, \quad (22.8)$$

где L и L_{\odot} — светимости звезды и Солнца; M и M_{\odot} — соответственно их абсолютные звездные величины. Если принять $L_{\odot} = 1$ и с учетом того, что $M_{\odot} = 4,8^m$, формула (22.8) примет вид:

$$L = 2,512^{4,8 - M}.$$

Звезды-сверхгиганты, имеющие $M = -9^m$, обладают мощностью излучения больше нашего Солнца в 330 тыс. раз, а самые неяркие звезды с абсолютной звездной величиной $M = 19^m$ излучают свет в 480 тыс. раз слабее нашего Солнца.

Вопросы и упражнения

1. Чем отличается абсолютная звездная величина от видимой звездной величины? 2. Звездные величины компонентов двойной звезды соответственно равны $2,4^m$ и $4,0^m$. Невооруженным глазом они воспринимаются одиночной звездой. Какова суммарная звездная величина этой двойной системы? 3. Что понимают под годичным параллаксом звезды? 4. Что понимают под светимостью звезды? Какова светимость Солнца? 5. Определите расстояние (в парсеках и световых годах) до звезды, имеющей годичный параллакс $0,762''$. 6. Новая звезда в момент вспышки имела видимую звездную величину $3,2^m$. Большинство новых звезд этого типа имеют абсолютную звездную величину -8^m . Определите расстояние до звезды. 7. Определите светимость Полярной звезды, если ее абсолютная звездная величина $M = -4,6^m$.

§ 23. ТЕМПЕРАТУРА И РАЗМЕРЫ ЗВЕЗД

1. Температура звезд. В первом приближении можно считать, что звезды излучают как абсолютно черные тела. Тогда температуру T поверхности (фотосферы) звезд можно определить, воспользовавшись законом излучения Стефана — Больцмана и законом смещения Вина, как мы это уже делали при определении температуры Солнца (см. § 19):

$$T = 4 \sqrt{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}. \quad (23.1)$$

Напомним, что подсчитанную таким методом температуру называют **эффективной температурой**. Однако этот метод применяется ограниченно, так как достаточно точное значение радиусов измерено примерно у нескольких десятков ярких гигантских звезд.

Что же касается остальных звезд, то их температура может быть найдена по распределению энергии в их непрерывном спектре. Для этого измеряют интенсивность излучения в различных диапазонах длин волн непрерывного спектра звезды. В полученной спектрограмме звезды устанавливают, в какой длине волны интенсивность излучения максимальна, а затем, используя закон смещения Вина (см. § 18), определяют температуру звезды. Температура, вычисленная по закону смещения Вина, называется **цветовой температурой звезды**. Цветовая температура несколько отличается от эффективной температуры, так как определяется по узкому участку спектра.

Температуры звезд сильно различаются. Холодные красные звезды имеют температуру около 3000 К. Наше Солнце с температурой фотосферы 6000 К относится к желтым карликам. Температура горячих звезд достигает 50 000 К. Основная часть излучения горячих звезд приходится на ультрафиолетовую часть спектра, и мы их воспринимаем как звезды голубого цвета. Наиболее горячими являются немногочисленные молодые звезды типа Вольфа — Райе. Температуры фотосфер у них очень высоки: от 60 000 до 100 000 К.

2. Спектральная классификация звезд. Звезды отличаются большим разнообразием, однако среди них можно выделить отдельные группы, обладающие общими свойствами. При первом знакомстве со звездным небом обращает на себя внимание тот факт, что звезды различаются по цвету. Гораздо сильнее это заметно при рассмотрении спектров. Важнейшие различия спектров звезд заключаются в количестве и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, а также в распределении энергии в непрерывном спектре. С учетом видов спектральных линий и их интенсивности строится **спектральная классификация звезд**, которая утвердилась в 20-е гг. XX в.

Последовательность спектральных классов (в так называемой гарвардской системе) обозначается заглавными буквами латинского алфавита: O, B, A, F, G, K, M, L. Тонкие различия внутри каждого класса дополнительно подразделяют на 10 подклассов — от 0 до 9. Например, наше Солнце принадлежит к спектральному классу G2.

Данная последовательность спектральных классов отражает уменьшение температуры атмосфер (фотосфер) звезд от класса O к классу L. Спектральная последовательность одновременно является и цветовой (см. табл. 23.1). Для ее запоминания используется следующая фраза (мнемоническое правило):

O B A F G K M L
Один Бритый Англичанин Финики Жевал Как Мелкий Лук

Химический состав атмосфер большинства звезд почти одинаков. Наружные слои звезд состоят из водородно-гелиевой смеси с очень малой добавкой более тяжелых элементов. Например, аналогичные нашему Солнцу звезды содержат в своих атмосферах 73 % водорода, 25 % гелия и 2 % всех остальных элементов.

Различия в спектрах звезд определяются главным образом различиями температур. В фотосферах холодных звезд могут существовать простейшие молекулы. Поэтому характерными деталями спектров звезд классов M и L являются широкие полосы поглощения молекул, например C₂H. При более высоких температурах молекулярные

Таблица 23.1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ

Класс	Цвет	Температура t , $\times 10^3$ К	Характерные признаки спектра	Типичные звезды
O	Голубой	55—30	Характерны линии ионизированного гелия; видны линии многократно ионизированного углерода, кислорода, кремния и азота	λ Ориона, λ Цефея
B	Голубоватобелый	30—10	Максимальное количество линий нейтрального гелия с постепенным ослаблением к классу B9; хорошо видны линии ионизированного кремния, азота и углерода	α Девы (Спика), γ Ориона (Беллатрикс)
A	Белый	10—7,5	В спектре преобладают водородные линии; линии гелия ослабляются; в классе A2 появляется линия нейтрального кальция, а в классе A5 — линия нейтрального железа	α Большого Пса (Сириус), α Лыры (Вега)
F	Желтоватый	7,5—6	Водородные линии все еще интенсивны, но заметны многочисленные линии металлов (ионизированных и нейтральных); очень интенсивны линии кальция	α Малого Пса (Процион), α Киля (Канопус)
G	Желтый	6—5	Водородные линии не главные среди мощных спектральных линий металлов	Солнце, α Возничего (Капелла)
K	Красноватый	5—3,5	Очень сильны линии нейтральных металлов; в классе K5 появляются следы полос поглощения молекул окиси титана	α Волопаса (Арктур), α Тельца (Альдебаран)
M	Красный	3,5—2,5	Особенно выделяются полосы окиси титана; встречаются спектры с одной или несколькими водородными линиями	α Ориона (Бетельгейзе), α Скорпиона (Антарес)
L	Коричневый	Около 2	Сильная полоса поглощения C ₂ H; линии редких щелочных металлов, цезия, рубидия	GL229B

соединения распадаются. В таких спектрах пропадают спектральные полосы молекулярных соединений, зато появляются линии, соответствующие нейтральным металлам. Таким образом, спектральная классификация звезд — это температурная классификация звездных спектров, основанная на оценках относительной интенсивности и вида спектральных линий.

Около 99% всех звезд принадлежат к спектральным классам В — М. Спектры небольшого количества звезд, которые не укладываются в рассмотренную последовательность или имеют особенности, отмечаются дополнительными буквами (например: A0n, A3s, B0k, B2e). Встречаются сложные спектры, в которых смешиваются характеристики двух и даже трех спектральных классов. Их обозначают, например, так: G0A2 или G0+A2.

В настоящее время спектральной классификацией охвачено более 500 тыс. звезд.

3. Размеры звезд. Линейный радиус звезды можно определить, если известны ее угловой радиус ρ'' и расстояние до звезды r или годичный параллакс π'' по формуле:

$$R = r \cdot \sin \rho''.$$

Так как $r = 206\,265''/\pi''$ а. е., для углового радиуса $\sin \rho'' = \rho''/206\,265''$, то имеем $R = \rho''/\pi''$ а. е.

Линейные радиусы звезд принято выражать в радиусах Солнца. В радиусах Солнца 1 а. е. = $149,6 \cdot 10^6$ км; $0,696 \cdot 10^6$ км = 215. Используя это соотношение, получим формулу для определения линейных радиусов звезд в радиусах Солнца в следующем виде:

$$R = 215 \rho'' / \pi''.$$

Звезды настолько далеки от нас, что их угловые размеры меньше предела разрешения крупнейших телескопов. Для ярких близких звезд угловой радиус находят по интерференционной картине, которая получается в результате перекрытия изображений звезды, построенной двумя широко расставленными телескопами. Например, с помощью оптического интерферометра, состоящего из двух сферических зеркал диаметром 6,6 м каждое, разнесенных на максимальное расстояние 180 м, удалось измерить угловой диаметр ϵ Ориона. Он оказался равным $0,000\,72''$, а так как годичный параллакс звезды равен $\pi'' = 0,002\,4''$, то $R = 0,000\,36''/0,002\,4'' = 32R_{\odot}$.

Радиусы звезд могут быть вычислены по их мощности излучения (светимости) и температуре. Запишем значение полной мощности излучения для выбранной звезды и для Солнца:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4.$$

где L и L_{\odot} , R и R_{\odot} , T и T_{\odot} — соответственно светимости, линейные радиусы и абсолютные температуры звезды и Солнца.

Принимая $L_{\odot} = 1$ и $R_{\odot} = 1$, получим:

$$L = R^2 \frac{T^4}{T_{\odot}^4},$$

или окончательно в линейных радиусах Солнца:

$$R = \sqrt{L} \left(\frac{T_{\odot}}{T} \right)^2. \quad (23.2)$$

Размеры звезд сильно отличаются: от диаметров, сравнимых с диаметром орбиты Юпитера (красные сверхгиганты), до размеров планет Солнечной системы (белые карлики) или даже до нескольких километров у нейтронных звезд (рис. 23.1).

Вопросы и упражнения

1. Каким образом, используя законы Стефана — Больцмана и Вина, можно определить температуру звезды? 2. В чем заключается отличие эффективной и цветовой температур звезды? 3. По каким принципам производится спектральная классификация звезд? 4. Укажите классы и подклассы спектральной классификации звезд. 5. К каким классам принадлежит основное количество звезд? К какому классу и подклассу спектральной классификации звезд относится наше Солнце? 6. Кратко охарактеризуйте общие

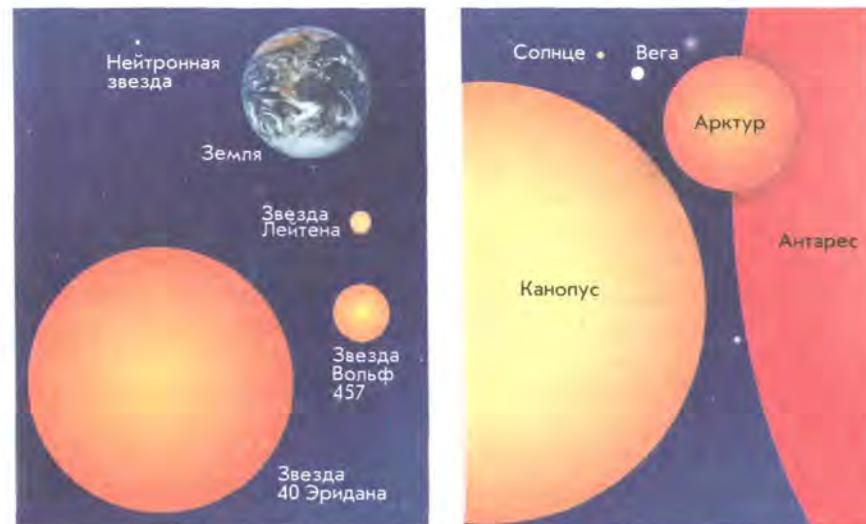


Рис. 23.1. Размеры некоторых звезд в сравнении с размерами Земли (слева) и Солнца (справа)

признаки спектров каждого класса спектральной классификации звезд. 7. Из каких химических элементов в основном состоят звезды? 8. Опишите способы определения линейных радиусов звезд. 9. Вычислите линейный радиус звезды α Малого Пса (Процион), если светимость ее в 7 раз больше светимости Солнца, а температура — 6800 К. 10. Вычислите размер звезды α Малого Пса (Процион), если угловой ее диаметр, измеренный звездным интерферометром, оказался равным $0,00571''$, а годичный параллакс $\pi'' = 0,288''$. Сравните полученный результат с ответом предыдущей задачи.

§ 24. ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ. МАССА ЗВЕЗД

1. Типы двойных звезд. Наблюдения показывают, что многие звезды во Вселенной образуют пары или являются членами сложных систем. **Двойными звездами** называют близко расположенные пары звезд. Различают оптические и физические двойные звезды. **Оптические двойные звезды** (пары) состояются из весьма далеких друг от друга в пространстве звезд, которые случайным образом проектируются на небесную сферу по лучу зрения. **Физические двойные звезды** представляют собой системы близко расположенных в пространстве звезд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс.

Звезды физических двойных пар часто имеют различный цвет. Так, у Антареса — очень яркой красной звезды в созвездии Скорпиона — имеется слабый зеленый (при наблюдении в телескоп) спутник.

Первая известная еще в древности звездная пара — это Мицар (конь) и Алькор (всадник). Мицар — средняя звезда ручки «ковша» созвездия Большой Медведицы, которая имеет видимую звездную величину $2,2^m$. На угловом расстоянии $12'$ от нее расположена слабая звезда Алькор со звездной величиной $4,0^m$. Звездная пара Мицар и Алькор — пример оптической двойной звезды. В свою очередь, даже в школьный телескоп хорошо видно: Мицар состоит из двух очень близких звезд, неразличимых невооруженным глазом. Компоненты звездной пары Мицар А и Мицар В отстоят друг от друга на расстоянии $14''$ и имеют звездные величины $2,4^m$ и $4,0^m$ соответственно. Звездная пара Мицар — пример физической двойной звезды.

Физические двойные звезды в зависимости от способа их наблюдений подразделяются на **визуально-двойные звезды** (их компоненты можно увидеть при помощи телескопа визуально или сфотографировать), **затменно-двойные звезды** (их компоненты периодически загораживают друг друга от наблюдателя), **спектрально-двойные звезды**

(двойственность проявляется в периодических смещениях или раздвоениях линий их спектров), **астрометрически-двойные звезды** (одна звезда не видна и возмущает правильное движение соседней).

Первый список двойных звезд составил в 1803 г. английский астроном *Уильям Гершель*. Этот перечень содержал несколько сотен объектов. Систематические наблюдения двойных звезд проводил основатель Пулковской обсерватории *В. Я. Струве*. Его каталог, опубликованный в 1827 г., содержал 3110 звездных пар. К настоящему времени известно около 100 тыс. визуально-двойных звезд.

Периоды обращения компонентов у визуально-двойных систем заключены в пределах от нескольких лет до нескольких тысяч лет.

Двойные звезды являются частным случаем **кратных звезд**, состоящих иногда из нескольких компонентов. Существуют звезды тройные, четверные и даже более высокой кратности. К кратным звездам принято причислять звезды, имеющие менее 10 компонентов. Системы с большим числом звезд называются **звездными скоплениями**.

Двойственность и кратность в звездном мире — широко распространенное явление.

2. Затменно-двойные звезды. Затменно-двойные, или **затменно-переменные**, звезды представляют собой тесные пары, обращающиеся с периодом от нескольких часов до нескольких лет по орбитам, большая полуось которых сравнима с самими звездами. По этой причине мы не можем увидеть отдельно их компоненты, так как угловое расстояние между звездами очень мало. Судить о двойственности системы можно лишь по периодическим колебаниям блеска. Так как луч зрения при наблюдении таких звезд и плоскости их орбит практически совпадают, у таких звезд обнаруживается явление затмений, когда один из компонентов проходит впереди или сзади другого относительно наблюдателя. Рассмотренную ситуацию поясняет рис. 24.1, на котором приведена кривая изменения блеска m затменно-двойной звезды, связанного с периодическими затмениями одного



Рис. 24.1. Изменение блеска затменно-двойной звезды

компонента другим. Цифры на графике относятся к соответствующим положениям одного из компонентов звезды на орбите. Разность звездных величин в минимуме и максимуме блеска называется **амплитудой**, а промежуток времени между двумя последовательными наименьшими минимумами — **периодом переменности**.

Типичный пример затменно-переменной звезды — звезда β Персея (Алголь), которая регулярно затмевается на 9,6 ч с периодом 2,867 суток. Падение блеска в минимуме у этой звезды составляет 2,3 звездной величины.

Изменение вида кривой блеска затменно-переменной звезды позволяет определить характеристики орбит ее компонентов: наклонение плоскости орбиты, эксцентриситет, период обращения. Если у затменно-переменной звезды известен годичный параллакс, к тому же она наблюдается как спектрально-двойная звезда, то можно определить светимость компонентов, оценить их массы, размеры и отклонения их форм от шаровидной.

Всего известно около 4000 затменно-двойных звезд.

3. Спектрально-двойные звезды. Спектрально-двойные звезды, так же как и затменно-двойные, представляют собой очень тесные пары. Компоненты (звезды) пары обращаются в плоскости, слабо наклоненной к направлению луча зрения наблюдателя. Спектрально-двойные звезды не различимы по отдельности даже в мощные телескопы, однако легко обнаруживаются при спектроскопических наблюдениях лучевых скоростей.

Звезды, двойственность которых устанавливается лишь на основании спектральных наблюдений, называются **спектрально-двойными**.

Предположим, что наблюдатель находится в плоскости орбиты двойной системы, состоящей из более массивной и яркой звезды *A* и менее яркой и массивной звезды *B* (рис. 24.2). Каждый из компонентов — *A* и *B*, обращаясь вокруг центра масс системы, то приближается к наблюдателю, то удаляется от него. Вследствие эффекта Доплера в первом случае линии в спектре звезды будут сдвинуты к фиолетовой области спектра, во втором — к красной, причем период этих смещений равен периоду обращения. На рисунке римские цифры обозначают соответствие спектров положениям звезд на орбитах.

Постоянное совершенствование методики определения сдвига спектральных линий позволило в 1995 г. обнаружить у звезды 51 Пегаса спутник массой в половину массы Юпитера. К 2000 г. методом лучевых скоростей у 32 звезд обнаружены от одного до нескольких спутников. Они получили общее название — **экзопланеты**.

4. Астрометрически-двойные звезды. Встречаются такие тесные звездные пары, когда одна из звезд или очень мала по размерам, или

имеет низкую светимость. В этом случае такую звезду рассмотреть не удастся, но обнаружить двойственность все же можно. Яркий компонент будет периодически отклоняться от прямолинейной траектории то в одну, то в другую сторону (рис. 24.3), как будто по прямой движется центр масс системы. Такие возмущения будут пропорциональны массе спутника.

Исследования одной из ближайших к нам звезд, известной под названием Росс 614 (ее блеск $11,4^m$ и параллакс $0,25''$), показали, что амплитуда отклонений звезды от ожидаемого направления достигает $0,36''$. Период обращения звезды относительно центра масс равен 16,5 года.

Среди близких к Солнцу звезд обнаружено около 20 астрометрически-двойных звезд.

5. Масса звезд. Длительные наблюдения визуально-двойных звезд убедили астрономов, что видимое относительное движение компонентов звездной пары совершается по эллипсу и удовлетворяет закону площадей. Из этого следует, что в двойных системах обращения звезд происходят в соответствии с законами Кеплера и подчиняются закону всемирного тяготения Ньютона.

Получены оценки масс примерно для ста звезд различных типов. Анализ этих данных привел к следующим результатам:

1. Массы звезд заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца. Наибольшее количество звезд имеют от 0,4 до 3 масс Солнца.

2. Существующая зависимость между массами звезд и их светимостью дает возможность оценивать массы одиночных звезд по их светимостям. В интервале масс $0,5 M_{\odot} \leq M \leq 10 M_{\odot}$ светимость звезды пропорциональна четвертой степени ее массы $L = M^4$. При $M > 10 M_{\odot}$ показатель степени равен 2, для светимости $L = M^2$.

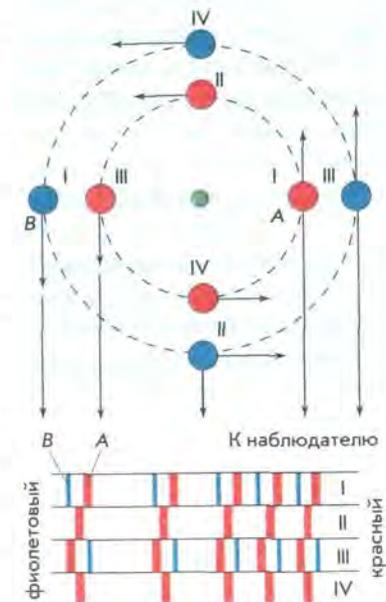


Рис. 24.2. Смещение линий в спектре двойной звезды

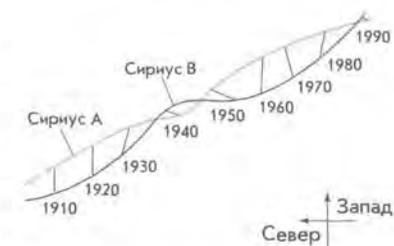


Рис. 24.3. Отклонение в движении Сириуса, вызванное гравитационным возмущением спутника

3. Масса звезды в момент ее формирования является важнейшим параметром, определяющим последующую эволюцию звезды.

Радиусы звезд имеют весьма широкие пределы, поэтому средняя плотность звезд колеблется от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^8$ кг/м³ (сравните с Солнцем — $1,4 \cdot 10^3$ кг/м³).

Вопросы и упражнения

1. Какие звезды называются двойными? Приведите их классификацию и примеры названий. 2. Что такое амплитуда и период переменности затменно-переменных звезд? 3. Дайте подробное объяснение: почему происходит смещение линий в спектрах спектрально-переменных звезд?

§ 25. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

1. Диаграмма «спектр — светимость». Существует зависимость между основными физическими характеристиками звезд. На основе наблюдений определяются спектральные классы звезд, а по известному расстоянию — абсолютные звездные величины, или светимости звезд.

В начале XX в. независимо друг от друга датский астроном *Эйнар Герцшпрунг* и несколько позже американский астрофизик *Генри Рессел* установили связь между этими характеристиками. Эту зависимость можно представить в виде диаграммы: по горизонтальной оси откладывается спектральный класс (или температура) звезд, а по вертикальной — их светимость (в абсолютных величинах или в единицах светимости Солнца). Каждой звезде соответствует точка на этой диаграмме. Такая диаграмма называется **диаграммой Герцшпрунга — Рессела** или **диаграммой «спектр — светимость»** (см. рис. на форзаце).

Звезды на диаграмме не распределяются случайным образом по всей ее площади, а образуют несколько групп, названных последовательностями. Эти последовательности, названные **классами светимости**, говорят о наличии у некоторых звездных групп индивидуальной зависимости светимости от температуры.

Большинство звезд на диаграмме лежит в пределах четко выраженной, простирающейся от левого верхнего до правого нижнего угла полосы, которая называется **главной последовательностью**.

В левой верхней части главной последовательности находятся самые горячие звезды класса О, которые в десятки тысяч раз превышают по светимости Солнце. Такие звезды называют **голубыми**

сверхгигантами. По мере уменьшения температуры светимость звезд падает. Затем полоса главной последовательности проходит через область, где находятся похожие на Солнце звезды класса G. И наконец, главная последовательность опускается к нижней правой части диаграммы. Здесь находятся звезды класса М с малой массой и относительно низкой температурой. Эти звезды называются **красными карликами**.

К звездам главной последовательности относятся хорошо известные звезды — Сириус (α Большого Пса), Вега (α Лиры), наше Солнце. Звезды с относительно низкой температурой фотосферы ($3+5 \cdot 10^3$ К) и светимостью в 100—1000 раз большей светимости Солнца образуют **последовательность красных гигантов**. К данной последовательности относятся, например, Арктур (α Волопаса), Альдебаран (α Тельца).

В верхнем правом углу диаграммы группируются **красные сверхгиганты**. Это звезды с очень высокой светимостью, низкой плотностью, в сотни раз большими диаметрами, чем у Солнца. К красным сверхгигантам причисляют звезду Бетельгейзе (α Ориона).

В левой нижней части диаграммы расположены горячие звезды слабой светимости — **белые карлики**. Их размеры сравнимы с размерами Земли, а массы близки к массе Солнца. Поэтому средняя плотность белых карликов превышает плотность земных пород в сотни тысяч раз. С другой стороны, средняя плотность звезд-сверхгигантов очень низкая — в тысячи раз меньше плотности земной атмосферы. Плотность вещества в атмосфере звезды влияет на ширину спектральных линий. Поэтому, например, у красных карликов спектральные линии шире, чем у красных гигантов и сверхгигантов. Значит, по виду спектральных линий определяется, к какой последовательности принадлежит звезда (главная, карлики, гиганты).

По последовательности оценивается абсолютная звездная величина, а затем и расстояние (см. § 23). Этот метод определения расстояний называется **методом спектральных параллаксов**.

Наиболее многочисленными звездами являются красные карлики: на 10 млн красных карликов приходится около 1 млн белых карликов, примерно 1000 гигантов и только 1 сверхгигант.

2. Рождение звезд. Процесс звездообразования идет в Галактике непрерывно — с момента ее возникновения. Подтверждением рождения звезд в настоящее время является существование массивных горячих звезд классов О и В, время жизни которых не превосходит 10 млн лет.

Продолжительность жизни звезд составляет от миллионов до десятков миллиардов лет. Это время слишком велико, чтобы проследить жизненный путь звезд, или их **эволюцию**. Поэтому основным

методом исследования эволюции звезд служит построение **моделей внутреннего строения звезд**.

При построении модели задают начальные условия физического состояния газа: химический состав, давление (плотность), температуру, массу. Затем на основании физических законов (газовых законов, закона тяготения) рассчитывают изменения этих параметров с течением времени. Правильность той или иной модели подтверждается сравнением с диаграммой Герцшпрунга — Рассела, суммирующей наблюдения большого числа звезд, находящихся на различных стадиях эволюции. Эти исследования позволили установить эволюцию звезд.

По современным представлениям, звезды образуются в результате сжатия (гравитационной конденсации) вещества межзвездной среды (рис. 25.1, 1). Звезды рождаются группами из гигантских газопылевых комплексов размерами до 100 пк и массой в десятки, а иногда и сотни тысяч солнечных масс. Газ в этих комплексах находится в молекулярном состоянии с температурой около 10 К.

Под действием гравитационных сил комплекс сжимается, плотность его растет, и он распадается на отдельные сгустки, или газопылевые облака (рис. 25.1, 2).

В газопылевом облаке случайно или под действием внешних причин возникают гравитационно-неустойчивые фрагменты, которые продолжают сжиматься. Внешними причинами, стимулирующими звездообразование, могут служить столкновения молекулярных облаков; звездный ветер от молодых горячих звезд; ударные волны, порожденные вспышками сверхновых звезд. Если масса фрагмента достаточно велика, то происходит дальнейший распад на отдельные фрагменты-сгустки (рис. 25.1, 3).

Фрагменты звездной массы, сжимающиеся под действием собственного тяготения, называют **протозвездами**. При гравитационном сжатии газ в протозвезде разогревается, и она начинает излучать

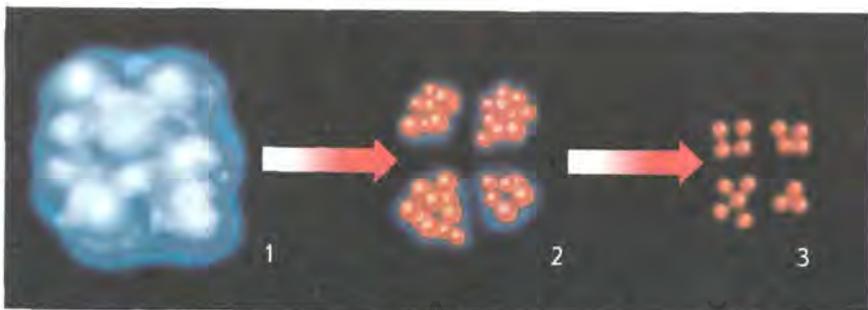


Рис. 25.1. Образование звезд из газопылевого облака

в инфракрасном диапазоне спектра. Вещество, окружающее ядро протозвезды, падает на него, увеличивая его массу и температуру. Когда давление, создаваемое излучением звезды, становится достаточно большим, падение вещества прекращается. Давление излучения ограничивает массу будущих звезд величиной в несколько десятков масс Солнца. Длительность стадии сжатия зависит от массы протозвезды: при массе меньше солнечной — сотни миллионов лет, при большей — сотни тысяч лет.

Часто у вращающейся протозвезды вокруг центрального сгустка образуется протяженный газопылевой диск, из которого потом развивается планетная система (рис. 25.2). Формирующаяся звезда в конце стадии сжатия имеет значительные размеры при еще относительно низкой температуре поверхности. Сжатие протозвезды прекращается, когда температура в центре ядра достигнет нескольких миллионов градусов, тогда включаются термоядерные источники энергии, реакции протон-протонного цикла. Момент начала термоядерных реакций есть момент рождения звезды. Теперь температура и плотность внутренних слоев становятся такими, что сила их упругости может противодействовать весу наружных слоев. После начала водородных реакций и установления равновесного состояния звезда попадает на главную последовательность диаграммы «спектр — светимость». Новорожденные звезды появляются на главной последовательности по всей ее длине (в зависимости от их массы).

3. Эволюционные перемещения. От массы в первую очередь зависит, какую температуру будет иметь ядро звезды в момент установления устойчивого равновесия. Чем больше масса сжимающегося газопылевого комплекса, затем протозвезды и наконец звезды, тем больший вес вышележащих слоев приходится выдерживать ее ядру. Поэтому нужна более высокая температура, чтобы газовое давление могло противостоять этому весу. Наблюдения показывают, что светимость звезд пропорциональна массе в четвертой степени.

С другой стороны, согласно закону Стефана — Больцмана,

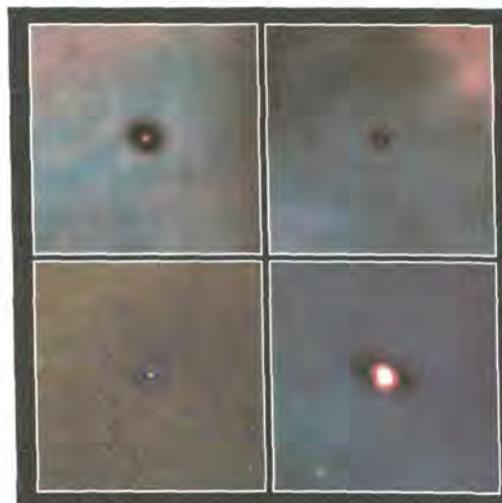


Рис. 25.2. Протозвезды с протопланетными дисками в туманности Ориона. Фотография Космического телескопа Хаббла

тепловое излучение звезды (светимость) пропорционально четвертой степени температуры (см. § 18). Это и подтверждает то, что при большей массе звезды температура ее недр и фотосферы будет выше. Самые массивные звезды, в 30—50 масс Солнца, порождают наиболее горячие звезды класса О. Температура центральных областей таких звезд составляет 30—35 млн градусов.

Большую часть времени звезда находится на главной последовательности. Но так как запасы водорода пропорциональны массе, а расход энергии (светимость) пропорционален четвертой степени массы, то водород в массивных звездах выгорает быстрее. Время пребывания звезды на главной последовательности определяется простой зависимостью:

$$t = 10^{10} \frac{1}{M^3} \text{ (лет)},$$

где M — масса звезды в массах Солнца.

По приведенной выше формуле можно подсчитать, что Солнце исчерпает свой запас водородного топлива примерно за 10 млрд лет (таким образом, Солнце, возраст которого оценивается около 5 млрд лет, «прожило» на главной последовательности лишь половину своей жизни). Звезды, равные 10 массам Солнца, — исчерпают всего за 10 млн лет. Слабо излучающие красные карлики массой около 0,5 масс Солнца — за 80 млрд лет. Горячих молодых звезд-гигантов наблюдается меньше из-за малого времени их жизни. Поэтому наиболее заполнена нижняя правая часть главной последовательности диаграммы «спектр — светимость».

После выгорания водорода в недрах звезды образуется горячее гелиевое ядро. Дальнейшая эволюция звезды зависит от массы этого ядра. Если она меньше 1,2 массы Солнца, под действием гравитационного сжатия гелиевое ядро снова разогревается (температура повышается до 100 млн градусов). Внешние слои звезды при этом расширяются и охлаждаются. Звезда словно разбухает. Светимость ее возрастает, а температура падает. Звезда сходит с главной последовательности и, в зависимости от массы, становится красным гигантом (рис. 25.3) или сверхгигантом.

Разрастающаяся атмосфера звезды постепенно удаляется от ядра, образуя **планетарную туманность**. В конце концов запасы ядерной



Рис. 25.3. Относительные размеры красного гиганта и Солнца

энергии в звезде исчерпываются. При массе 1,4 массы Солнца под действием гравитационных сил звезда сжимается и становится маленьким плотным белым карликом. Колоссальное внутреннее давление приводит к разрушению атомов и их полному сжатию. Плотность такой звезды более чем в 100 тыс. раз превосходит плотность воды.

Стадии эволюции, как и все звезды, проходит и наше Солнце. Через 5—8 млрд лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым карликом. Звезды намного массивнее Солнца превращаются в ходе эволюции в нейтронные звезды или черные дыры (рис. 25.4).



Рис. 25.4. Эволюция звезд различной массы

Вопросы и упражнения

1. По какому принципу строится диаграмма Герцшпрунга — Рессела?
2. Как на диаграмме Герцшпрунга — Рессела располагаются звезды различного размера?
3. В какой части диаграммы Герцшпрунга — Рессела располагаются звезды, которые: а) обладают большими, чем у Солнца, светимостью и температурой; б) меньшей, чем у Солнца, светимостью, но большей, чем у него, температурой; в) большей, чем у Солнца, светимостью, но меньшей, чем у него, температурой; г) меньшими, чем у Солнца, светимостью и температурой?
4. Дайте краткую характеристику звездам: голубым сверхгигантам, красным гигантам, белым карликам, красным карликам.
5. Что понимают под эволюцией звезд?
6. Опишите в общих чертах процесс образования звезд.

§ 26. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЗВЕЗДЫ

1. Общая характеристика переменных звезд. Многие звезды изменяют свой блеск вследствие идущих в них нестационарных процессов. Такие звезды называются переменными. **Физические переменные звезды** — это звезды, которые меняют свою светимость за короткие промежутки времени в результате физических процессов, происходящих в самой звезде.

В зависимости от характера протекающих внутри звезды процессов физические переменные звезды бывают пульсирующие и эруптивные.

Все переменные звезды имеют специальные обозначения, если им не были присвоены раньше буквы греческого алфавита. В каждом созвездии первые 334 переменные звезды обозначаются последовательностью букв латинского алфавита R, S, T, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, ..., AZ, QQ... с добавлением названия соответствующего созвездия. Следующие переменные звезды, которым не хватило комбинаций этих букв в своем созвездии, обозначаются V 335, V 336 и т. д.

2. Пульсирующие переменные звезды. При эволюционном превращении звезды в звезду-гиганта происходит увеличение ее объема и уменьшение средней плотности вещества. В это время внутреннее строение звезды изменяется коренным образом, что может сопровождаться нарушением равновесия между силами гравитационного притяжения и лучевого давления. Это приводит к периодическим колебаниям объема звезды: ее оболочка то расширяется, то сжимается (возвращается к своему прежнему объему). Такие периодические колебания переменных звезд называются пульсационными.

При увеличении радиуса звезды увеличивается и площадь фотосферы, а также температура и светимость. Внешние слои движутся то от наблюдателя, то к нему, что приводит к смещению спектральных линий.

Первая пульсирующая звезда была открыта немецким астрономом *Давидом Фабрициусом* в 1596 г. в созвездии Кита и названа *Мирой*. Период изменения блеска этой звезды составляет 331,6 суток.

Обширный класс очень ярких переменных звезд-гигантов и сверхгигантов классов F и G называется **цефеидами** (по типичному их представителю δ Цефея). Амплитуда блеска (звездная величина) колеблется от 0,5 до 2 звездных величин, а период колебаний — от нескольких до 70 суток.

Одновременно с изменением видимой звездной величины у цефеид меняется их спектр. По смещению его интенсивности обнаружено, что у цефеид периодически (с периодом изменения блеска) изменяется температура в среднем на 1500 градусов (рис. 26.1).

Изменение физических параметров звезды происходит таким образом, что в максимуме блеска цефеида имеет максимальную температуру, при этом ее радиус уменьшается и фотосфера звезды удаляется от нас с наибольшей скоростью. Эти явления объясняются пульсацией наружных слоев цефеид, приводящей к периоди-

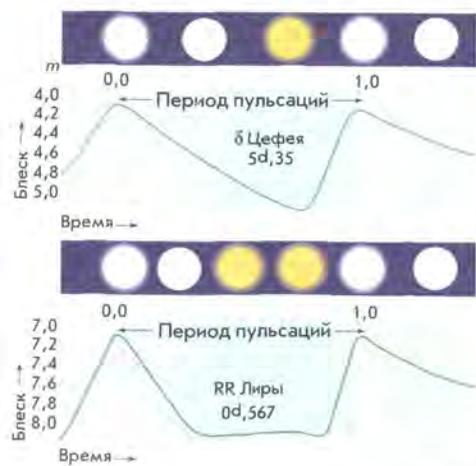


Рис. 26.1. Графики изменения блеска звезд δ Цефея и RR Лиры

ческим изменениям их светимости, температуры и радиуса в пределах $\approx 5\%$ от их средних значений.

Теоретические расчеты и практические наблюдения показывают, что только звезды-гиганты и сверхгиганты проходят через стадию цефеид. Период пульсаций звезды зависит от средней плотности ее вещества и подчиняется следующей закономерности:

$$P = \frac{\text{const}}{\sqrt{\rho}} = \frac{0,12}{\sqrt{\rho}},$$

где P — период пульсаций (сутки), ρ — средняя плотность (в единицах средней плотности Солнца). Средняя плотность вещества цефеид составляет около 10^{-2} кг/м³.

Цефеиды с большей массой имеют большую светимость, больший радиус, но меньшую плотность и, соответственно, больший период пульсации, т. е. цефеиды обладают важной зависимостью «период — светимость» (рис. 26.2). Эта зависимость описывается выражением: $M = -1,25 - 3,00 \lg P$, где P — период изменения блеска в сутках, а M — средняя абсолютная звездная величина. Таким образом, по известному из наблюдений периоду можно определить светимость или абсолютную звездную величину звезды. Сравнивая ее с наблюдаемой видимой звездной величиной, можно определить расстояние до цефеиды. Высокая светимость и переменность блеска позволяют обнаруживать цефеиды вплоть до расстояний 20 Мпк. Их наблюдают в ближайших галактиках, определяя таким образом расстояния до этих звездных систем.

Цефеиды образно называют маяками Вселенной. К настоящему времени в нашей Галактике известно свыше 700 цефеид.

Другой разновидностью пульсирующих переменных звезд являются **звезды типа RR Лиры**, имеющие более короткие периоды от 0,2 до 1,2 суток. Практически все звезды этого типа — гиганты спектрального класса A. Они очень быстро меняют блеск (см. график на рис. 26.1). Амплитуда изменения блеска достигает 1 звездной величины. У этих звезд, как и у цефеид, существует зависимость между периодом и светимостью (см. рис. 26.2).

Существуют звезды, которые пульсируют с гораздо большими периодами — от нескольких недель до года и более. Эти долгопериоди-

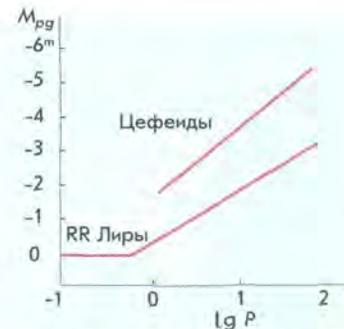


Рис. 26.2. График зависимости абсолютной звездной величины от периода изменения блеска у цефеид и звезд типа RR Лиры

ческие переменные звезды называются звездами типа Миры Кита — **миридами** (по наименованию звезды в созвездии Кита — о Кита). В переводе с латинского языка Мира означает «удивительная». Практически все звезды этого типа — старые красные гиганты огромных размеров и большой светимости. Амплитуды изменения блеска таких звезд могут достигать десяти звездных величин.

3. Новые звезды. Звезды, блеск которых внезапно увеличивается в тысячи и миллионы раз за несколько суток, после чего ослабевает до первоначального уровня в течение года и более, называются **новыми звездами**. Термин «новая звезда» не подразумевает, что звезда родилась. Так называют звезды, которые раньше были тусклыми, а затем внезапно их блеск увеличился. Например, одна из новых звезд, вспыхнувшая в июне 1918 г., увеличила свой блеск за четыре дня с 11-й до $-0,5$ -й звездной величины (т. е. в 40 тыс. раз), а затем приняла прежнее значение блеска за период чуть более 1,5 года.

Наблюдения показывают, что вспыхивающими новыми звездами в основном являются горячие белые карлики спектральных классов O — B, имеющие абсолютную звездную величину порядка $4^m + 5^m$. Во время вспышки эти звезды увеличивают свой блеск на $7^m + 16^m$ звездных величин (рис. 26.3). За время вспышки новая звезда излучает энергию около 10^{38} Дж (такая энергия излучается Солнцем примерно за 100 тыс. лет!). В максимуме вспышки спектр новых звезд похож на спектр сверхгигантов спектральных классов A и F, а линии спектра смещены в фиолетовую сторону. Эти факты указывают на то, что вспышка новой звезды представляет собой взрыв, происходящий на поверхности звезды. За счет энергии взрыва и энергии расширяющейся наружной оболочки обеспечивается сильное излучение новой звезды в период максимума блеска.

Причиной взрыва новых звезд является обмен вещества между компонентами тесных двойных пар, к которым принадлежат все до-



Рис. 26.3. График изменения блеска новой звезды

статочно детально исследованные бывшие новые звезды. Вспышки новых звезд — довольно частое явление: ежегодно астрономы делают 2—3 открытия. Благодаря высокой светимости в максимуме блеска, новые звезды астрономы обнаруживают в ближайших галактиках: около 250 зарегистрировано в туманности Андромеды и около 20 — в Магеллановых Облаках.

Многие новые звезды вспыхивают неоднократно. Если вспышка повторяется, такую звезду называют **повторной Новой**.

4. Сверхновые звезды. Сверхновые звезды — одно из самых грандиозных и захватывающих космических явлений. **Сверхновыми** называются звезды, вспыхивающие подобно Новым и достигающие в максимуме абсолютной звездной величины от -18^m до -19^m . Отдельные Сверхновые в максимуме блеска превышают светимость Солнца в десятки миллиардов раз, достигая абсолютной звездной величины $M = -20^m + 21^m$.

В китайских летописях упоминается о внезапном появлении в 1054 г. в созвездии Тельца «звезды-гостя», которая казалась ярче Венеры и была видна даже днем. Спустя два месяца эта звезда начала угасать, а еще через несколько месяцев совершенно исчезла из поля зрения. В наше время с помощью достаточно мощных телескопов в этом созвездии можно видеть туманность причудливой формы, напоминающую плывущего в воде краба. Туманность так и назвали — Крабовидная (рис. 26.4). Наблюдения показали, что она расширяется. С учетом скорости расширения можно заключить, что Крабовидная туманность — это остаток взрыва Сверхновой 1054 г.

Впервые термин «новая звезда» применил Т. Браге при описании появившейся яркой звезды в 1572 г. Несмотря на то что по нынешним представлениям это название оказалось не совсем удачным (вспышка означает не рождение звезды, а ее гибель), оно до сих пор используется в астрономии. Наиболее мощные взрывы гибнущих звезд стали по аналогии называть сверхновыми звездами.

В нашей Галактике за последнее тысячелетие зарегистрировано несколько случаев вспышек сверхновых звезд.

Фотографическим методом отмечено более 300 вспышек Сверхновых в других галактиках, причем



Рис. 26.4. Крабовидная туманность — остаток от взрыва сверхновой звезды

нередко их светимость оказывалась сравнимой с общей светимостью всей галактики, в которой произошла вспышка. Наиболее яркая сверхновая звезда, наблюдавшаяся с помощью современной техники, появилась в 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом Облаке (рис. 26.5).

Звезда вспыхивает вследствие коллапса (схлопывания) своего массивного ядра. Происходит это следующим образом. На разных этапах жизни массивной звезды в ее ядре протекают термоядерные реакции, при которых сначала водород превращается в гелий, затем гелий в углерод и так далее до образования ядер элементов группы железа (Fe, Ni, Co). Плотность центра железного ядра достигает значения 10^{12} кг/м³ при температуре $10^9 \div 10^{10}$ К. Постепенно звезда все больше и больше «расслаивается» (рис. 26.6).

Ядерные реакции с образованием еще более тяжелых химических элементов идут с поглощением энергии, поэтому звезда начинает охлаждаться и сжиматься. Внутренние слои словно обрушиваются к центру звезды; возникает ударная волна, движущаяся обратно от центра. В итоге наружные слои звезды выбрасываются с огромной скоростью. В результате катастрофического изменения структуры звезды происходит вспышка Сверхновой.

При взрыве освобождается энергия порядка 10^{46} Дж. Такую энергию наше Солнце способно излучить лишь за миллиарды лет. От огромной звезды остаются только расширяющаяся с большой скоростью газовая оболочка и нейтронная звезда (или пульсар). **Пульсар** представляет собой быстро вращающуюся нейтронную звезду, для которой характерно радиоизлучение, пульсирующее с периодом, равным периоду вращения звезды.



Рис. 26.5. Сверхновая SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке (указана стрелкой)

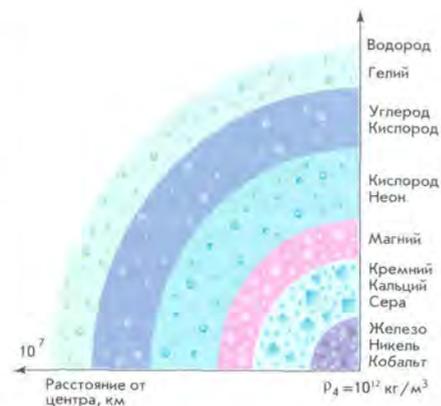


Рис. 26.6. Расслоение массивных звезд

Если звездная масса невелика, то силы гравитации сравнительно слабы, и сжатие звезды (гравитационный коллапс) прекращается. При очень высокой плотности вещества электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтральные частицы — нейтроны. Вскоре почти вся звезда будет состоять из одних нейтронов, настолько тесно прижатых друг к другу, что огромная звездная масса будет сосредоточена в очень небольшом шаре, размером порядка десяти километров (рис. 26.7). Плотность образовавшегося шара — **нейтронной звезды** — чудовищно велика: она может составлять $10^{17} \div 10^{18}$ кг/м³.

Нейтронные звезды обнаружены в 1967 г. как источники периодического радиоизлучения. Сначала наблюдатели предположили, что эти сигналы посылает иная цивилизация. Однако с открытием других таких же источников радиосигналов стало ясно, что они имеют естественное происхождение. Вдобавок от этих источников было зарегистрировано рентгеновское и гамма-излучение.

Если в недрах звезды отсутствуют силы, противодействующие ее сжатию под действием сил гравитации, то звезда и дальше будет сжиматься. Плотность вещества будет продолжать увеличиваться.

В результате массивная звезда на заключительном этапе своей эволюции превращается в неустойчиво сжимающийся объект — **черную дыру** (рис. 26.8). Поле тяготения на границе черной дыры настолько велико, что сигналы от этого объекта не выходят наружу (отсюда происходит его название). Другими словами: гравитационное поле черной дыры настолько сильное, что даже свет не в состоянии его преодолеть.

Критический радиус, до которого должна сжаться звезда, чтобы превратиться в черную дыру, называется **гравитационным радиусом** (r_g) или радиусом Шварцшильда. Для массивных звезд r_g составляет несколько десятков километров и может быть рассчитан по формуле:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$



Рис. 26.7. Относительные размеры белого карлика и нейтронной звезды



Рис. 26.8. Относительные размеры нейтронной звезды и черной дыры



Рис. 26.9. Схема черной дыры в двойной системе

где G — гравитационная постоянная, M — масса звезды, c — скорость света.

Теория относительности приводит к выводу, что вещество должно быть сжато в микроскопически малом объеме пространства в центре черной дыры. Это состояние называется сингулярностью. Границу черной дыры именуют горизонтом событий.

Так как черные дыры непосредственно наблюдать нельзя, поиски их сопряжены с большими трудностями. Чаще всего черную дыру удается обнаружить двумя способами. Во-первых, если черная дыра образовалась в двойной системе звезд, то ее положение можно определить по обращению второго компонента вокруг «пустого места» (рис. 26.9). Во-вторых, при падении вещества на черную дыру должно возникать мощное рентгеновское излучение. Источники такого излучения (Лебедь X-1, Скорпион X-1 и др.) зарегистрированы как бы «кандидатами» в черные дыры. Схематично черную дыру можно представить следующим образом: гравитационное поле невидимой черной дыры захватывает поток газа от внешних слоев голубого сверхгиганта; вблизи черной дыры газ сильно разогревается и становится источником электромагнитного излучения в рентгеновском и гамма-диапазоне.

Черные дыры также могут существовать и наблюдаться как постоянно взаимодействующие с веществом в ядрах галактик и квазарах.

Вопросы и упражнения

1. Чем отличаются физические переменные звезды от затменно-переменных звезд? 2. Какова причина пульсаций цефеид? 3. В чем состоит отличие новой звезды от Сверхновой? 4. Как часто наблюдаются новые и сверхновые звезды? 5. Как образовалась Крабовидная туманность? 6. Каковы причины взрыва новых и сверхновых звезд? 7. Почему нейтронные звезды называют пульсарами? 8. Объясните механизм радиоизлучения пульсара. 9. Какой объект называют черной дырой? Какими свойствами обладает черная дыра?

VIII

РАЗДЕЛ

Строение и эволюция Вселенной

§ 27. НАША ГАЛАКТИКА

1. Структура Галактики. На осеннем ночном небе в ясную безлунную ночь с запада на восток через зенит (широты Беларуси) тянется хорошо заметная светящаяся полоса — **Млечный Путь**. Древние греки Млечный Путь назвали **Галактикой** (от греческого слова «гала» — молоко). Еще Галилео Галилей в 1609 г. в телескоп обнаружил, что Млечный Путь состоит из огромного количества слабых звезд.

Млечный Путь проходит через оба полушария по большому кругу небесной сферы (рис. 27.1). Линия, идущая вдоль середины Млечного Пути, названа **галактическим экватором**, а образующая его плоскость — **галактической плоскостью**. Галактическая плоскость наклонена к плоскости небесного экватора под углом 63° .

Следует понимать, что термин «Галактика» относится к звездной системе, а термин «Млечный Путь» — к ее светящейся проекции на небо.

Количественные подсчеты звезд в разных направлениях от галактического экватора предпринял *У. Гершель* в 70-х гг. XVIII в. Выборочные подсчеты показали, что число звезд резко убывает по обе стороны от галактической плоскости. Дальнейшими исследованиями было установлено, что все звезды неба образуют единую звезд-

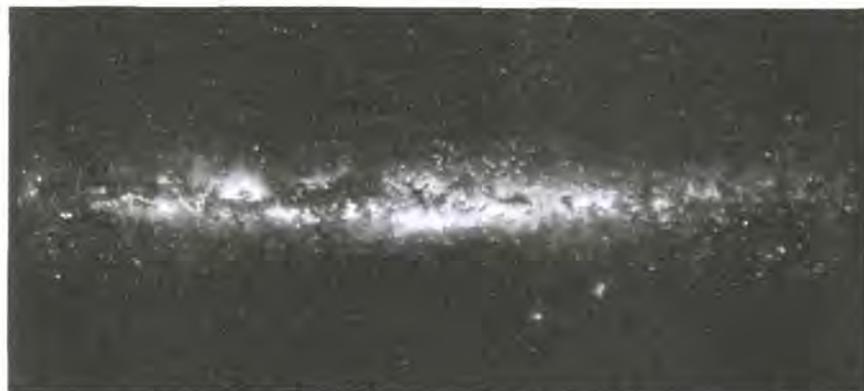


Рис. 27.1. Млечный Путь

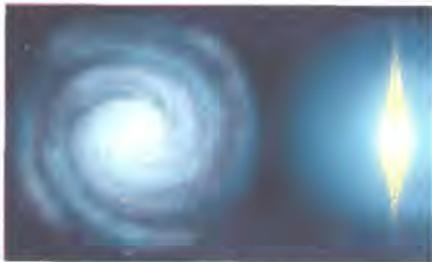


Рис. 27.2. Строение нашей Галактики

ную систему. В Млечном Пути сосредоточено подавляющее число звезд Галактики — огромной звездной системы, имеющей форму плоского линзообразного диска (рис. 27.2) поперечником около 30 и толщиной около 4 кпк (или соответственно около 100 и 12 тыс. световых лет). Шарообразное утолщение в середине диска получило название **балдж** (от английского *bulge* — вздутие). Наиболее плотная и компактная центральная часть нашей Галактики, расположенная в созвездии Стрельца, называется ядром. Звездный диск Галактики имеет структуру в виде спиральных ветвей (рукавов).

Часть звезд нашей Галактики не входят в состав диска, а образуют сферическую составляющую — **звездное гало**, радиус которого не менее 20 кпк. Гало окружает очень разреженная и большая по размерам (50—60 кпк) внешняя часть Галактики — **корона**.

Солнечная система в Галактике находится далеко от центра, на расстоянии 10 кпк, и лежит почти в галактической плоскости. Звездный состав Галактики очень разнообразен. По химическому составу, возрасту и характеру орбит звезды условно разделили на два «населения». К **населению I** относится большая часть находящихся на главной последовательности звезд классов O, B, A, F, L; большая часть звезд-гигантов; белые карлики и планетарные туманности. Возраст этих объектов — порядка нескольких миллиардов лет. Население I заполняет диск Галактики (более молодые объекты связаны со спиральными ветвями). Это молодые горячие звезды, их скопления, долгопериодические цефеиды, новые и сверхновые звезды, газ, пыль. В гало преобладают объекты **населения II**: шаровые звездные скопления, красные сверхгиганты, субкарлики, звезды с дефицитом тяжелых элементов. Это «старое население» Галактики, его возраст — порядка 15 млрд лет. В центральных областях Галактики сосредоточены красные гиганты, сверхгиганты и звезды-карлики классов M и K. Ближе к центру Галактики обнаружены потоки плотного горячего газа, расширяющегося со скоростью 100—200 км/с. В самом центре Галактики в пределах 1 пк находятся точечные источники радио-, инфракрасного и рентгеновского излучений.

2. Звездные скопления. Структурными составляющими Галактики являются звездные скопления. **Звездные скопления** — это гравитационно-связанные группы звезд, которые имеют общее происхождение. Звездные скопления движутся в поле тяготения Галактики как единое целое.

По внешнему виду они подразделяются на рассеянные и шаровые.

По внешнему виду они подразделяются на рассеянные и шаровые.

Рассеянное звездное скопление — это не имеющая правильной формы сравнительно неплотная группа звезд, содержащая от нескольких сотен до нескольких тысяч звезд. Ближайшие к нам рассеянные звездные скопления — Плеяды и Гиады — находятся в созвездии Тельца. Невооруженным глазом можно различить в Плеядах 5—7 слабых звездочек, располагающихся в виде маленького ковшика (рис. 27.3). Скопление Гиады не столь компактное, но содержит более яркие звезды. Сейчас известно около 1200 рассеянных звездных скоплений. Все они концентрируются у галактической плоскости и, подобно другим объектам плоской составляющей Галактики, участвуют во вращении вокруг ее центра. Общее же число рассеянных скоплений в Галактике оценивается в $2 \cdot 10^4$.

Шаровые звездные скопления имеют сферическую или эллипсоидальную форму, они насчитывают от десятков тысяч до миллионов звезд. Диаметры таких звездных скоплений лежат в пределах от 20 до 100 пк. Пространственная концентрация звезд резко возрастает к центру скопления, достигая десятков тысяч в кубическом парсеке (в окрестностях Солнца — $0,13 \text{ пк}^{-3}$). Шаровые скопления образуют протяженное гало вокруг центра Галактики. Всего в Галактике открыто около 130 шаровых скоплений, а их общее число достигает примерно 500. Звездное население шаровых скоплений состоит из давно проэволюционировавших звезд — красных гигантов и сверхгигантов. Шаровые скопления нашей Галактики — одни из старейших. Их возраст составляет $10 \div 15$ млрд лет. В шаровых скоплениях встречаются переменные пульсирующие звезды, что позволяет определять расстояние до них. Часто кажется, что в центре скопления звезды сливаются в единое целое (рис. 27.4), но на самом деле это всего лишь оптический эффект. Между звездами достаточно много свободного пространства, и они никак не могут сталкиваться друг с другом.



Рис. 27.3. Рассеянное звездное скопление Плеяды в созвездии Тельца; его главные звезды освещают окружающую туманность



Рис. 27.4. Шаровое звездное скопление NGC 6205 в созвездии Геркулеса

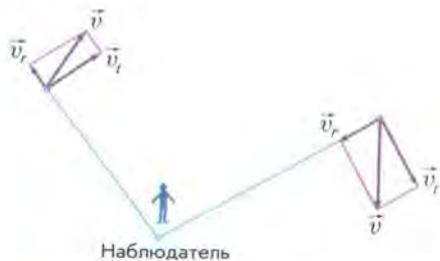


Рис. 27.5. Пространственная (v), лучевая (v_r) и тангенциальная скорости (v_t)

характеристикам звездные ассоциации похожи на большие очень молодые рассеянные скопления, но с меньшей концентрацией звезд к центру. Размеры ассоциаций от 30 до 200 пк, а число звезд достигает нескольких сотен. Возраст ассоциаций оценивается в несколько миллионов лет, и они наблюдаются внутри мощных газопылевых комплексов. Примером может служить туманность Ориона.

3. Движение звезд. В 1718 г. английский астроном *Эдмунд Галлей* сравнил наблюдавшиеся в его время положения звезд с теми, которые были приведены в каталогах Гиппарха (II в. до н. э.). Ученый заметил смещение ярких звезд Сириуса и Прокциона на $0,7^\circ$, звезды Арктура более чем на 1° . На основании этого факта был сделан вывод о пространственном движении звезд относительно Солнца. Так впервые было обнаружено, что звезды движутся.

Скорость движения небесного объекта (звезды) в пространстве относительно Солнца называется **пространственной скоростью** данного объекта. В общем случае пространственная скорость v (рис. 27.5) направлена под некоторым углом к лучу зрения наблюдателя. Вектор пространственной скорости разложим на две составляющие: по направлению луча зрения (**лучевая скорость** v_r) и перпендикулярную лучу зрения (**тангенциальная скорость** v_t). Модули пространственной, тангенциальной и лучевой скоростей связаны между собой соотношением

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

Лучевая скорость звезды определяется по доплеровскому смещению ($\Delta\lambda$) линий в ее спектре:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c.$$

Тангенциальную скорость определяют по смещению звезды на небесной сфере. Такое смещение у сравнительно близких (к наблюдателю) звезд составляет несколько секунд за десятки лет:

Помимо звездных скоплений, различают еще один тип группировок молодых звезд — **звездные ассоциации**. Этот термин в 1947 г. ввел советский академик *В. А. Амбарцумян* для разреженных групп горячих звезд высокой светимости спектральных классов О и В. Некоторые звезды в ассоциациях настолько молоды, что еще не сформировались окончательно. По своим

$$v_t = 4,74 \frac{\mu}{\pi}.$$

где μ — **собственное движение** (видимое угловое смещение звезды на небесной сфере за один год). Оно выражается секундами дуги в год (рис. 27.6). Измерения и расчеты показали, что большинство звезд, сравнительно близких к Солнцу, движутся относительно него со скоростями, не превышающими 30 км/с. Самым большим собственным движением обладает карликовая звезда Барнарда: $\mu = 10,27''$. Лучевая скорость этой звезды $v_r = -108$ км/с (знак «минус» показывает, что звезда приближается к Солнцу). Тангенциальная и пространственная скорости для этой звезды будут равны соответственно 88,4 и 140 км/с. Подавляющее же большинство измеренных собственных движений у звезд составляют сотые и тысячные доли секунды дуги в год. Не случайно поэтому звезду Барнарда называют «летающей».

Анализ собственных движений звезд привел к обнаружению также движения Солнца среди звезд. Выяснилось, что звезды с наименьшими по величине собственными движениями расположены на небе в основном вблизи Веги и Сириуса, причем те, которые находятся около Веги, двигаются по направлению к Земле, а около Сириуса — от нее. Из этого факта У. Гершель сделал вывод о движении Солнечной системы в пространстве относительно звезд в направлении Веги. Та точка на небесной сфере ($\alpha = 270^\circ$, $\delta = +30^\circ$; созвездие Геркулеса), по направлению к которой движется Солнце (со скоростью 19,4 км/с по отношению к соседним звездам), называется **апексом** Солнца (от лат. *apex* — вершина), а диаметрально противоположная точка неба называется **солнечным антиапексом**. Вследствие собственных движений звезд по истечении десятков тысяч лет вид созвездий меняется (рис. 27.7).

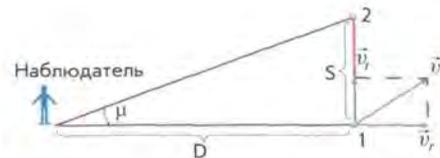


Рис. 27.6. Определение тангенциальной скорости звезды

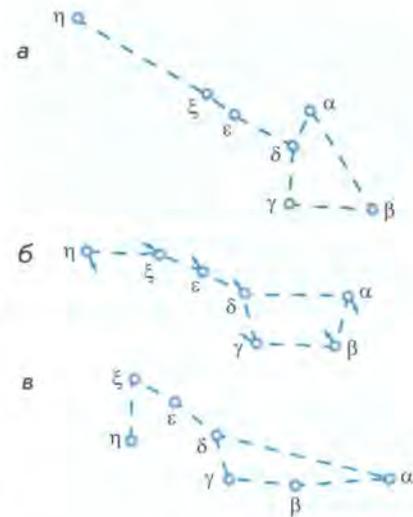


Рис. 27.7. Изменение относительного расположения звезд в «ковше» Большой Медведицы за 100 тыс. лет: а — 50 тыс. лет назад; б — в настоящее время (стрелками указаны направления тангенциальных скоростей звезд); в — через 50 тыс. лет



Рис. 27.8. Траектория звезд в Галактике (диск Галактики — тонкие линии, сферическая составляющая — утолщенные линии)

4. Вращение Галактики. Изучение лучевых скоростей звезд в различных направлениях от Солнца позволило сформулировать законы вращения Галактики.

1. *Все звезды диска Галактики обращаются вокруг ее ядра по орбитам, близким к круговым.* Это вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть на Галактику со стороны ее северного полюса, находящегося в созвездии Волосы Вероники.

2. *Угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра.* Однако это убывание происходит несколько медленнее, чем требуют законы Кеплера.

3. *Линейная скорость вращения сначала возрастает с удалением от центра Галактики, достигая максимума (около 250 км/с) на расстоянии Солнца, после чего очень медленно убывает.*

4. *Полный период обращения Солнца вокруг ядра Галактики составляет примерно 250 млн лет (галактический год).*

5. *Звезды и скопления звезд сферической составляющей Галактики движутся по сильно вытянутым и наклоненным к плоскости диска под разными углами орбитам* (рис. 27.8). Такие звезды имеют относительно Солнца очень большие скорости (до 200—300 км/с).

Как видим, движение звезд в Галактике напоминает движение тел Солнечной системы.

Зная скорость обращения и радиус круговой орбиты, можно оценить массу внутренней части Галактики. Из формулы для круговой скорости (см. § 9) следует:

$$M = \frac{v^2 r}{G}.$$

Подставив значения $v = 2,2 \cdot 10^5$ м/с, $r = 2,5 \cdot 10^{20}$ м и $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², получим, что $M = 1,8 \cdot 10^{41}$ кг, или около 150 млрд масс Солнца. Масса Галактики в пределах объема радиусом 15 кпк оценивается приблизительно в 200 млрд масс Солнца. С учетом остальной части Галактики ее масса оценивается примерно в 10^{12} масс Солнца.

Вопросы и упражнения

1. Найдите на звездной карте созвездия, через которые проходит Млечный Путь. 2. Почему наблюдателю, находящемуся на Земле, Млечный

Путь представляется прерывистым и клочковатым? 3. Как устроена наша Галактика? 4. Каково положение Солнечной системы в Галактике? 5. Чем отличаются звезды диска Галактики от звезд гало? 6. Как распределены шаровые скопления в Галактике? Чем они отличаются от рассеянных скоплений? 7. Как было доказано, что звезды движутся? 8. Что понимают под пространственной, лучевой и тангенциальной скоростями звезды? 9. Звезда, находясь на расстоянии 10 пк, имеет тангенциальную скорость 20 км/с. За сколько лет она переместится по небу на угловой размер Луны (0,5'')? 10. Каковы особенности вращения нашей Галактики?

§ 28. МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ГАЗ И ПЫЛЬ

1. Межзвездный газ. Звездное небо содержит много туманных объектов. Они бывают светящиеся и темные, поглощающие свет. Широкое применение фотографии в астрономии позволило обнаружить, описать и составить каталоги темных туманностей.

На фоне светлых областей Млечного Пути отчетливо выделяются темные пятна неправильной, клочковатой формы и различных угловых размеров. Эти темные пятна и области доказывают существование вблизи галактической плоскости холодной разреженной материи.

В начале XX в. астрономы зарегистрировали в спектрах далеких звезд узкие линии поглощения некоторых химических элементов и простейших молекул (Na, Ca, K, Ti, CN, CH), которые не участвуют в сдвиге остальных спектральных линий, обусловленном движением звезд. Эти линии вызываются поглощением межзвездными элементами и молекулами света звезд, когда свет звезд проходит сквозь полупрозрачные облака межзвездной среды.

Межзвездная среда — это вещество и поля, заполняющие межзвездное пространство внутри Галактики. Большая часть массы межзвездного вещества приходится на разреженный газ и пыль. Основной компонент межзвездной среды — **межзвездный газ**, который состоит из водорода (70 % массы) и гелия (28 %). Остальная часть массы межзвездного вещества приходится на тяжелые химические элементы (O, C, N, Ne, S, Ar, Fe и др.).

Общая масса межзвездного вещества нашей Галактики (не считая короны) оценивается в 2 % от общей массы всей Галактики. В зависимости от температурных условий и плотности межзвездный газ может находиться в трех различных состояниях: молекулярном, ионизированном и атомарном.

Основные данные о межзвездном газе получены радиоастрономическими методами, после того как в 1951 г. было обнаружено



Рис. 28.1. Туманность излучает свет, если ее освещает яркая близлежащая звезда

Основная часть межзвездного газа сосредоточена в спиральных ветвях Галактики, где он распределен также неравномерно: собран в клочковатые образования размерами в десятки и сотни парсек со средней концентрацией частиц несколько атомов в 1 см^3 . Около половины массы межзвездного газа содержится в гигантских **молекулярных облаках** со средней массой 10^5 масс Солнца и диаметром около 40 пк. Из-за низкой температуры (около 10 К) и повышенной плотности (до 10^3 частиц в 1 см^3) водород и другие элементы в этих облаках объединены в молекулы. Таких молекулярных облаков в Галактике насчитывается около 4000.

Области ионизированного водорода с температурой 8000—10 000 К проявляют себя в оптическом диапазоне как **светлые диффузные туманности**. Их свечение возбуждается ультрафиолетовым излучением близкорасположенных горячих звезд (спектральных классов В и О).

Светлая туманность излучает свет, если ее освещает близлежащая звезда (рис. 28.1). Звезды класса W, O, B способны вызвать ионизацию атомов водорода на расстоянии примерно 500 световых лет.

Диффузные туманности, имеющие неправильную, клочковатую форму, достигают размеров до 10 пк, а их плотность колеблется от 10^{-17} до 10^{-20} кг/м^3 . Распределяются области такого ионизированного водорода в плоской подсистеме Галактики (население I) и являются указателями мест, где в настоящее время идут процессы звездообразования. Так, в Большой туманности Ориона (рис. 28.2) с помощью Космического телескопа Хаббла обнаружены протозвезды, окруженные протопланетными дисками.



Рис. 28.2. Большая туманность Ориона

Если близлежащие звезды не столь горячи и не могут ионизировать водород, то туманность светится за счет отражения звездного

радиоизлучение нейтрального атомарного водорода на волне 21 см. Оказалось, что атомарный водород, имеющий температуру 100 К, образует в диске Галактики тонкий слой толщиной 200—300 пк, увеличивающийся до нескольких килопарсек на расстоянии 15—20 кпк от ее центра.

света (рис. 28.3). Данные туманности содержат много пыли. Примером такой светлой туманности является туманность в скоплении Плеяды в созвездии Тельца (см. рис. 27.3).

Некоторые из туманностей при наблюдении через фильтр видятся словно состоящими из отдельных волокон. Таковой, например, является известная Крабовидная туманность в созвездии Тельца (см. рис. 26.4), которая считается остатком взорвавшейся сверхновой звезды.

Особым типом туманностей являются **планетарные туманности**, которые выглядят как слабо светящиеся диски или кольца, напоминающие диски планет. Эти туманности представляют собой светящуюся расширяющуюся оболочку ионизированного газа, сброшенного красным гигантом на конечной стадии своей эволюции. В центре планетарной туманности находится остаток погибшего красного гиганта — горячий белый карлик или нейтронная звезда. Под действием внутреннего давления газа планетарная туманность расширяется примерно со скоростью 20—40 км/с, при этом плотность газа падает. Эти объекты обогащают межзвездную среду веществом, их известно более 1200. Планетарная туманность Песочные Часы (рис. 28.4) показывает, какие сложные процессы могут происходить на последней стадии эволюции звезды.

2. Межзвездная пыль. В межзвездном пространстве рассеяны мелкие твердые частицы (металлические, силикатные или графитовые), размерами от 0,01 до 1 мкм. Тугоплавкие частички образуются и поставляются в межзвездную среду за счет расширения оболочек новых и сверхновых звезд, планетарных туманностей, холодных красных гигантов и сверхгигантов. В межзвездном пространстве пыль везде сопутствует газу. На ее долю приходится около 1% от массы газа.

Межзвездная пыль, как и межзвездный газ, концентрируется в галактической плоскости, образуя газопылевые облака клочковатой структуры. В межзвездных



Рис. 28.3. Туманность светит отраженным светом близлежащей звезды

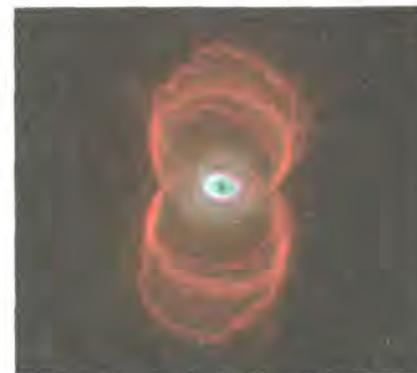


Рис. 28.4. Планетарная туманность Песочные Часы



Рис. 28.5. Облака межзвездной пыли в направлении на центр нашей Галактики

облаках мелкие пылинки быстро обрастают оболочками из наиболее распространенных элементов (H, C, N, O). За миллионы лет даже при низкой температуре в оболочках межзвездных пылинок происходят сложные химические процессы с образованием молекул воды, этилена, синильной кислоты, этилового спирта и др. Зарегистрировано около 90 типов молекул, некоторые из них содержат до 13 атомов.

Из-за пыли самые плотные газовые образования — молекулярные облака — практически непрозрачны и выглядят на небе как темные области, почти лишенные звезд (рис. 28.5). Такие газопылевые образования называются **темными туманностями** (рис. 28.6).

Благодаря развитию внеатмосферной астрономии появилась возможность наблюдать межзвездную пыль не только в нашей (рис. 28.7), но и в соседних галактиках. В результате учеными был сделан вывод, что свойства пыли во Вселенной мало чем отличаются от свойств пылинок Млечного Пути.

Таким образом, **межзвездная пыль** — это мелкие твердые частички неправильной формы размером от 0,01 до 1 мкм. Они состоят из тугоплавкого ядра и оболочки из летучих соединений. Пыль играет активную роль и участвует как существенный компонент в протекающих во Вселенной процессах.

3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле. Кроме разреженного газа и пыли, в межзвездном пространстве с огромными скоростями, близкими к световой, движется большое количество элементарных частиц и ядер различных атомов. Поток этих частиц называют **космическими лучами**. Они пронизывают все межпланет-

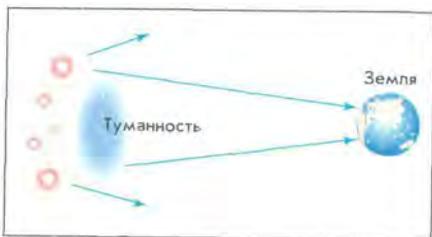


Рис. 28.6. Темная туманность заслоняет свет звезд, находящихся на большом расстоянии от Земли

ное и межзвездное пространство. На площадку в 1 м^2 ежесекундно попадает в среднем около 10 тыс. различных частиц. В составе космических лучей присутствуют электроны, ядра гелия и более тяжелых элементов, но в основном преобладают протоны (более 90%), которые имеют среднюю энергию $1,6 \cdot 10^{10}$ Дж. Не все частицы,

образующие космические лучи, приходят к нам из глубин Вселенной. Многие из них рождаются при вспышках на Солнце (см. § 21). Основными источниками космических лучей в Галактике служат остатки сверхновых звезд и пульсары (см. § 26).

Первое свидетельство существования межзвездного магнитного поля было получено итальянским физиком *Энрико Ферми* и американским ученым *Эдвардом Теллером* при изучении космических лучей.

Электроны, входящие в состав космических лучей, постепенно тормозятся в магнитном поле, теряя энергию на излучение радиоволн. Такое излучение называется **синхротронным**. Оно регистрируется радиотелескопами. Мощными источниками синхротронного излучения являются остатки сверхновых звезд. Наблюдения показывают, что синхротронное излучение приходит к нам и из областей межзвездного пространства. Следовательно, магнитное поле существует и там.

Магнитная индукция межзвездного магнитного поля невелика — около 10^{-10} Тл. Это в среднем в 100 тыс. раз меньше, чем у поверхности Земли. Линии индукции межзвездного магнитного поля в основном параллельны галактической плоскости и, изгибаясь, идут вдоль спиральных ветвей Галактики. Крупномасштабные магнитные поля обнаружены и в других галактиках.

Вопросы и упражнения

1. Что понимают под межзвездной средой? Чем она заполнена?
2. Какова масса межзвездного вещества нашей Галактики?
3. Что понимают под туманностями? Назовите основные виды туманностей. Почему одни туманности — светлые, другие — темные?
4. Что представляет собой межзвездная пыль?
5. Из каких наблюдений можно сделать вывод о существовании межзвездной пыли?
6. Каково происхождение газопылевых туманностей и молекулярных облаков?
7. Что представляют собой космические лучи? Какими свойствами они обладают?
8. Охарактеризуйте межзвездное магнитное поле. Почему оно называется синхротронным?



Рис. 28.7. Один из комплексов туманностей в созвездии Ориона. В центре выделяется темная туманность Конская Голова

§ 29. ЗВЕЗДНЫЕ СИСТЕМЫ — ГАЛАКТИКИ

1. Типы галактик. В 1924 г. с помощью крупнейшего в то время телескопа (обсерватория Маунт-Вилсон, США) *Эдвин Хаббл* установил, что туманность Андромеды образована множеством звезд, сливающихся в сплошное туманное пятно из-за огромной удаленности. Большинство других известных туманностей оказались такими же удаленными гигантскими системами, состоящими из миллионов и миллиардов звезд. Гигантские гравитационно-связанные системы звезд и межзвездного вещества, расположенные вне нашей Галактики, стали называть **галактиками**. Современные мощные телескопы сделали доступной регистрацию сотен миллиардов галактик.

Фотоснимки показали, что галактики различаются по внешнему виду и структуре. Хаббл предложил классификацию галактик по форме. Позднее его классификация стала основой современной классификационной схемы. Согласно современной классификации различают галактики следующих основных типов: эллиптические (E), спиральные (S), неправильные (Ir) и линзовидные (S0) (рис. 29.1).



Рис. 29.1. Классификация галактик Э. Хаббла



Рис. 29.2. Эллиптическая галактика М 87 в созвездии Девы

Эллиптические галактики в проекции на небесную сферу выглядят как круги или эллипсы (рис. 29.2). Число звезд в них плавно убывает от центра к краю. Звезды вращаются в такой системе в разных плоскостях. Сами эллиптические галактики вращаются очень медленно. Они содержат только желтые и красные звезды, практически не имеют газа, пыли и молодых звезд высокой светимости. Физическим характеристикам этих галактик свойствен довольно широкий диапазон: диаметры галактик — от 5 до 50 кпк, массы — от 10^6 до 10^{13} масс Солнца, светимости от 10^6 до 10^{12} светимостей Солнца. Около 25 % изученных галактик принадлежат к эллиптическому типу.

Около половины изученных галактик относятся к спиральному типу. **Спиральные галактики**



Рис. 29.3. Спиральные галактики: а — М 81; б — М 51; в — NGC 2997

это сильно сплюснутые системы с центральным уплотнением (в котором находится ядро галактики) и с заметной спиральной структурой. Размеры этих галактик достигают 40 кпк, а светимости — 10^{11} светимостей Солнца. В окружающем уплотнении диска имеются две или более клочковатые спиральные ветви (рис. 29.3). Так, к хаббловским типам спиральных галактик относится галактика М 81, тип Sa, система с туго закрученными спиральными ветвями, шарообразная часть яркая и протяженная (рис. 29.3, а). Галактика М 51 относится к типу Sb, имеет более мощные и четкие спирали, центральная часть менее выделяется (рис. 29.3, б). Галактика NGC 2997 принадлежит к типу Sc, система с развитой клочковатой спиральной структурой, шарообразная часть которой слабо просматривается на общем фоне (рис. 29.3, в).

Примерно у половины спиральных галактик в центральной части есть почти прямая звездная перемилька — **бар**, от которой начинают закручиваться спиральные рукава (рис. 29.4). Такие галактики называются **спиральными с перемилькой**.

В спиральных ветвях галактик сосредоточены самые яркие и молодые звезды, яркие газопылевые туманности, молодые звездные скопления и комплексы. Поэтому спиральный узор отчетливо виден даже у далеких галактик.

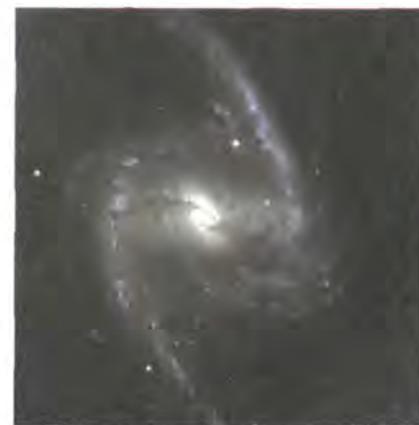


Рис. 29.4. Спиральная галактика с перемилькой (баром) NGC 1365



Рис. 29.5. Галактика туманность Андромеды

тик, хотя на долю спиральных рукавов приходится всего несколько процентов массы всей галактики. Наша Галактика является спиральной. Ближайшая звездная система, похожая по структуре и типу на нашу Галактику, — это туманность Андромеды (рис. 29.5). Свет от этой галактики доходит до нас примерно за 2 млн лет.

К неправильным галактикам относят маломассивные галактики неправильной структуры. У них не наблюдается четко выраженного ядра и вращательной симметрии. Видимая яркость таких галактик создается молодыми звездами высокой светимости и областями ионизированного водорода. Массы неправильных галактик составляют от 10^8 до 10^{10} масс Солнца, размеры этих галактик достигают 10 кпк, а светимости их не превышают 10^{10} светимостей Солнца. В таких галактиках содержится много газа — до 50 % их общей массы.

Ближайшими к нам яркими неправильными галактиками являются Магеллановы Облака (Большое и Малое). Они выглядят как два туманных облачка, серебристо светящихся в хорошую погоду на ночном небе. Они расположены в Южном полушарии и поэтому невидимы с территории Беларуси. Большое Магелланово Облако (рис. 29.6), имеющее в диаметре 7 кпк, расположено от нас на расстоянии 52 кпк. По мнению некоторых астрономов, в этой неправильной галактике можно различить зачатки спиральной структуры.

Линзовидные галактики внешне (если видны плашмя) очень похожи на эллиптические, но имеют сплюснутый звездный диск. По структуре подобны спиральным галактикам, однако не имеют плоской составляющей и спиральных ветвей. От спиральных галактик, наблюдаемых с ребра, линзовидные галактики отличаются отсутствием полосы темной материи. Немецкий астроном *Карл Шварцшильд* выдвинул теорию, согласно которой линзовидные галактики могут образовываться из спиральных в процессе «выметания» газопылевой материи.



Рис. 29.6. Большое Магелланово Облако — одна из близких к нам галактик

Рис. 29.5. Галактика туманность Андромеды

Рис. 29.6. Большое Магелланово Облако — одна из близких к нам галактик

Рис. 29.6. Большое Магелланово Облако — одна из близких к нам галактик

Галактики характеризуются показателем сжатия e :

$$e = \frac{10(a-b)}{a},$$

где a — большая и b — малая полуоси галактики.

Показатель сжатия дописывается за буквой, обозначающей тип галактики, например E3, E5. Сферическая галактика имеет показатель сжатия 0. У спиральных галактик показатель сжатия всегда больше семи, а у эллиптических — всегда меньше семи.

2. Расстояния до галактик. Закон Хаббла. Расстояния до ближайших галактик определяются по оценкам видимых звездных величин цефеид (см. § 26). Для долгопериодических цефеид установлена зависимость «период колебаний — светимость». С помощью этой зависимости определяют абсолютную звездную величину по длительности колебаний блеска: чем короче период колебаний блеска, тем цефеида слабее по абсолютной звездной величине. Расстояние r вычисляется по формуле:

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1, \quad (29.1)$$

где m и M — видимая и абсолютная звездные величины.

Для галактик, где не обнаружены цефеиды или их невозможно увидеть, в качестве индикаторов расстояний используют ярчайшие звезды — сверхгиганты, новые и сверхновые звезды, шаровые звездные скопления. Расстояния также определяют по формуле (29.1). Видимую звездную величину оценивают из наблюдений, а абсолютную считают известной (средней) для данного класса объектов. Например, сверхновые звезды, как это следует из наблюдений, имеют примерно одинаковую абсолютную величину в максимуме блеска.

Расстояния до далеких галактик определяют по их угловым размерам или по видимой звездной величине, а до очень далеких галактик — исключительно по величине красного смещения в их спектре. Красное смещение обычно измеряется относительным изменением длины волны спектральных линий

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Еще в 1912—1914 гг. американский астроном *Весто Слайфер* обнаружил, что линии в спектрах далеких галактик смещены относительно их нормального положения в сторону красного конца спектра. Это означало, что галактики удаляются от нас со скоростями в сотни километров в секунду. Позже Э. Хаббл определил расстояния до некоторых галактик и их скорости. Из наблюдений следовало, что чем дальше от нас находится галактика, тем с большей

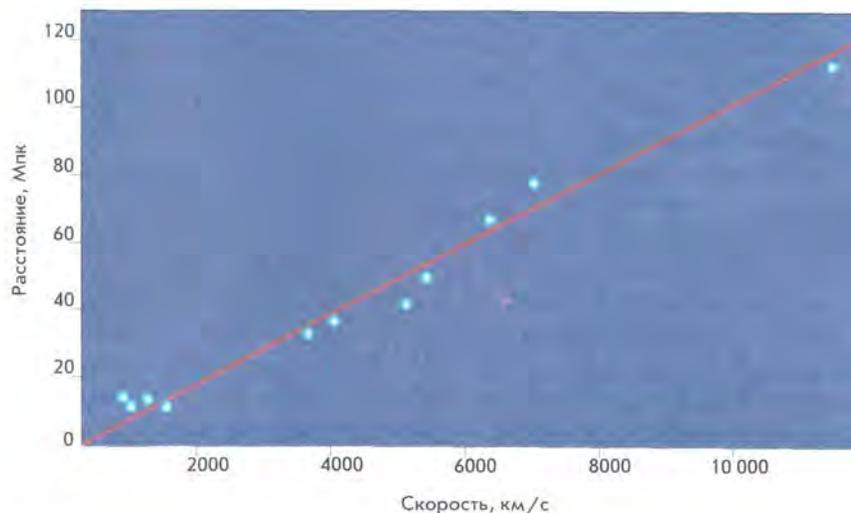


Рис. 29.7. Зависимость скорости удаления галактик от расстояний до них

скоростью она удаляется (графически данная зависимость представлена на рис. 29.7). Закон, по которому скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до нее, получил название **закона Хаббла**. Закон Хаббла можно сформулировать и таким образом: *относительное увеличение длин волн линий в спектрах галактик пропорционально расстоянию r до них*, т. е.

$$r \sim \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Предполагая, что явление красного смещения обусловлено движением галактик со скоростью v_r по лучу зрения в направлении от наблюдателя, можем найти лучевую скорость галактики по измеренному относительному смещению длины волны спектральных линий:

$$v_r = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda}. \quad (29.2)$$

С учетом закона Хаббла зависимость (29.2) можно записать в виде:

$$v_r = Hr, \quad (29.3)$$

где H — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Хаббла. Коэффициент Хаббла показывает, на сколько километров в секунду возрастает скорость галактик с увеличением расстояния до них на 1 Мпк. Значение H постоянно уточняется, по различным оценкам оно заключено в пределах от 50 до 90 км/(с·Мпк). При расчетах чаще всего принимают $H = 75$ км/(с·Мпк).

Необходимо отметить, что закон Хаббла выполняется только для далеких галактик, расстояние до которых превышает 5–10 Мпк.

3. Массы галактик. Массы галактик можно оценить на основании линейных скоростей вращения их внешних частей. Скорости вращения v устанавливают путем сравнения смещений спектральных линий в различных частях галактики.

Предположим, что вся масса M галактики сконцентрирована в ее центре и вращение происходит по законам Кеплера. Тогда из второго закона Ньютона $F = ma$ ($a = \frac{v^2}{R}$ — центростремительное ускорение), с учетом движения тела в поле сил тяготения $F = G \frac{mM}{R^2}$, получим:

$$\frac{GM}{R^2} = \frac{v^2}{R},$$

где R — радиус галактики. После преобразований получим выражение для оценки массы галактики:

$$M = \frac{Rv^2}{G}. \quad (29.4)$$

Для галактик, как и для звезд, имеется определенная зависимость между массой и светимостью. Эта зависимость была использована для вычисления масс галактик. Однако оценки масс галактик по их светимостям получались значительно меньше, чем по вращению галактик. Это явление было названо «парадоксом скрытой массы». Чтобы объяснить его, нужно предположить, что где-то в галактике расположена несветящаяся, темная материя.

В 70-х гг. XX в. с помощью методов рентгеновской астрономии был открыт горячий межгалактический газ. По температуре газа можно оценить массу его скоплений. Первые результаты рентгеновских наблюдений горячего газа в группах галактик подтвердили присутствие в них скрытой массы, не входящей в состав отдельных галактик. Сегодня астрономы убеждены: Вселенная в основном заполнена невидимым веществом. Оно образует протяженные гало галактик и заполняет межгалактическое пространство, концентрируясь в скоплениях галактик.

Спектральные наблюдения, проделанные с использованием Космического телескопа Хаббла и крупных современных наземных телескопов, подтвердили наличие больших масс (около 50 млн масс Солнца) несветящегося вещества в ядрах ряда галактик (рис. 29.8). Вместе с тем природа невидимого вещества до конца не выяснена. Возможно, что «скрытая масса» создается не только межгалак-

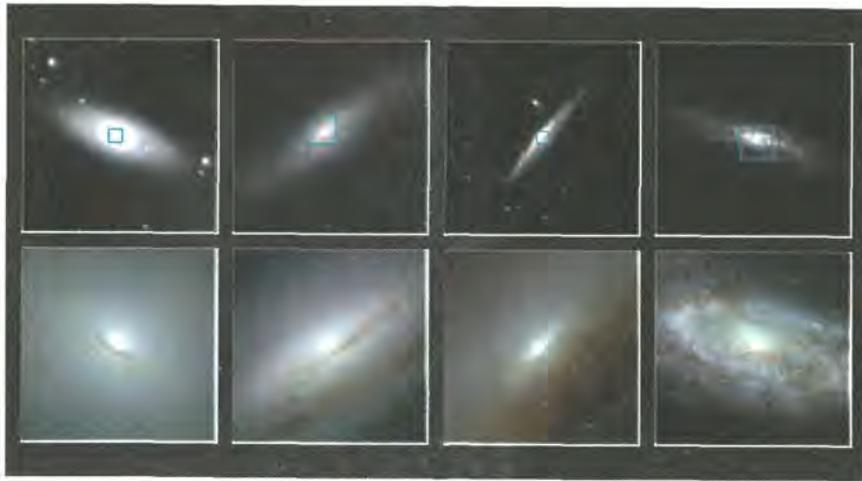


Рис. 29.8. Ядра галактик содержат массивные черные дыры. Нижний ряд фотографий ядер галактик получен с помощью Космического телескопа Хаббла

тическим газом, но и какими-то еще не открытыми новыми элементарными частицами. Необходимо отметить следующий факт: все изучавшиеся до сих пор человечеством астрономические объекты составляют лишь незначительную долю космического вещества. (По расчетам невидимая масса во много раз превышает видимую!)

4. Галактики с активными ядрами. У большинства галактик можно выделить яркую центральную часть — ядро. Эта область отличается большой звездной плотностью, достигающей 10^6 – 10^8 пк⁻³. Но, несмотря на это, столкновений ядер и звезд в этой области не происходит.

Исследования последних лет показали, что ядро — не просто более плотное место галактики: в самом центре его можно обнаружить еще одно уплотнение — ядрышко. Так, при наблюдении ядра туманности Андромеды (его размеры 100 пк) удалось выделить яркое ядрышко поперечником 1–14 пк. Оно вращается как твердое тело (с периодом обращения 500 тыс. лет). Масса ядрышка составляет примерно 13 млн солнечных масс. Плотность — около 1500 солнечных масс на 1 пк³, т. е. в 20 тыс. раз больше, чем около Солнца. Ядрышко ведет себя таким образом, как будто это самостоятельное образование, «вложенное» в галактику.

Радиоисследования нашей Галактики показали, что в ее центре также имеется ядрышко размером примерно в 6 пк.

В ядрах некоторых галактик происходит колоссальное выделение энергии, которое нельзя объяснить излучением или взрывами обычных звезд. Такие галактики получили название галактик с активными ядрами или сейфертовских галактик (по имени американского ас-

тронома Карла Сейферта, впервые описавшего их в 1943 г.).

Галактики с высокой активностью ядер составляют несколько процентов от всех наблюдаемых галактик. Формы проявления активности ядер сейфертовских галактик, или просто сейфертов, различны. Это может быть большая мощность излучения в инфракрасной, оптической или рентгеновской области спектра, причем меняющаяся за сравнительно небольшое время (несколько лет, месяцев или даже дней). В некоторых случаях наблюдается быстрое движение газа в ядре (со скоростями ~ 1000 км/с). Иногда газ образует длинные прямолинейные газовые струи — джеты (рис. 29.9).



Рис. 29.9. Ядро галактики выбрасывает газовые струи — джеты

Наиболее вероятная гипотеза, объясняющая активность ядер, предполагает наличие черной дыры (массой в десятки или сотни миллионов масс Солнца) в центре галактики.

В 1998 г. Космический телескоп Хаббла передал снимки центральной области галактики Центавр А (NGC 5128), расположенной на расстоянии 10 млн световых лет. Находящаяся там массивная черная дыра «захватывает» маленькую соседнюю галактику. Снимки показали окружающий галактику NGC 5128 темный пояс из пыли со множеством светящихся голубым цветом недавно рожденных звезд и пылевых сгущений, погруженных в газовые облака (рис. 29.10). Снимки, сделанные в инфракрасных лучах, помогли астрономам заглянуть за пылевой занавес. Они открыли диск горячего газа, который закручивается и всасывается в черную дыру. Размеры этого диска по космическим меркам невелики, однако сравнимы с размерами нашей Солнечной системы, а масса равна многим миллионам солнечных масс.

5. Взаимодействующие галактики. Расположенные близко одна к другой галактики иногда бывают связаны между собой полосой светящейся материи. Часто эти светящиеся голубоватого цвета полосы являются продолжением спиральных ветвей. Полосы состоят из горячих молодых звезд. Нередко галактики



Рис. 29.10. Активное ядро галактики Центавр А



Рис. 29.11. Так, возможно, будет выглядеть на нашем небе туманность Андромеды через несколько миллиардов лет

погружены в общий «звездный туман», тогда их называют **взаимодействующими**. В большинстве случаев особенности форм взаимодействующих галактик объясняются возмущающими приливными силами, действующими на звезды одной галактики со стороны другой. Многие исследователи считают, что взаимодействующие галактики сближаются, а наблюдения в современные крупные телескопы показывают, что среди таких галактик очень много сталкивающихся. Даже наша Галактика является взаимодействующей. В настоящий момент она поглощает одну карликовую галактику, находящуюся на противоположной от нас стороне галактического диска. Через несколько миллиардов лет наша Галактика «проглотит» Магеллановы Облака, а через 5 млрд лет столкнется с туманностью Андромеды (M31) (рис. 29.11). Но при этом очень мала вероятность того, что будут сталкиваться отдельные звезды, так как они удалены одна от другой на расстояния, в сотни миллионов раз превышающие их диаметр.

Столкновения галактик, напротив, возможны — ведь промежутки между ними превосходят их размеры лишь в десятки и сотни раз. Часто карликовая галактика врывается в большую звездную спираль и, проходя сквозь нее, притягивает к себе отдельные звезды. Сегодня изучено взаимодействие галактик разных типов: спиральных, эллиптических и неправильных, которые или пролетают мимо друга на близком расстоянии, или задевают одна другую, или просто сталкиваются. Гравитационная сила взаимодействия, как правило, существенно изменяет внешний вид таких взаимодействующих галактик.



Рис. 29.12. Сталкивающиеся галактики NGC 4038 и NGC 4039. Красным цветом светятся газопылевые облака, падающие на черные дыры в ядрах галактик, голубым — молодые горячие звезды, рождающиеся благодаря возмущениям газопылевых масс

Ближе всего к нам находится пара сталкивающихся крупных галактик NGC 4038 и NGC 4039 в созвездии Ворона (рис. 29.12). Эта взаимодействующая система удалена на 63 млн световых лет. Под влиянием сил тяготения у галактик появились длинные «антенны», состоящие из газа и звезд,

поэтому их часто называют «антенными» галактиками. Эти образования возникли в результате соударения звездных систем. Астрономы открыли в «антенных» галактиках более тысячи недавно образовавшихся звездных скоплений. В каждом из них содержится до миллиона звезд. Возраст скоплений не превышает 100 млн лет. Они образовались под действием приливных сил, возбужденных сближением двух систем.

Сила тяготения галактики существенно влияет не на всю соседнюю галактику в целом, а лишь на ее близлежащие области. Таким образом возникают приливные силы, возмущающие и искажающие первоначальную форму галактики. Результат столкновения галактик зависит от геометрии удара и скорости. При скорости сближения около 200 км/с звездные системы чаще всего сливаются; 600 км/с — проходят одна сквозь другую. Если же сближение идет со скоростью до 1000 км/с, галактики разлетаются в клочья.

6. Квазары. В начале 60-х гг. XX в. по радиоизлучениям были обнаружены объекты, подобные активным ядрам галактик, — **квазары**. Слово «квазар» образовано от словосочетания «квазизвездные радиоисточники», т. е. похожие на радиоизлучающие звезды. Спектры квазаров содержат яркие эмиссионные линии, сильно смещенные в красную сторону, как у далеких галактик. Расстояния, определенные по красному смещению, оказались более 5 млрд световых лет. На фотографиях квазары выглядят очень яркими по сравнению с удаленными галактиками и в радиодиапазоне излучают так же сильно, как близкие радиоисточники. Некоторые из квазаров наблюдаются с таких расстояний, на которых обычные галактики с помощью современного оборудования уже обнаружить не удастся. Вокруг десятков близких квазаров расположены слабые протяженные оптические туманности. Их средний размер около 90 000 пк, а светимость в несколько раз меньше светимости ярчайших галактик. Пока неизвестно, есть ли в этих туманностях звезды.

До открытия квазаров считалось, что самые грандиозные проявления взрывных процессов — это вспышки Сверхновых, однако активность квазаров не похожа на активность обычных звезд. Природа активности радиоизлучения квазаров пока точно не установлена, но с определенной уверенностью можно сказать следующее:

- 1) квазары — самые далекие объекты, наблюдаемые во Вселенной;
- 2) значительная часть квазаров — это ядра далеких галактик, которые находятся в состоянии очень высокой активности;
- 3) квазары — самые мощные из известных в природе источников видимого и инфракрасного излучений, т. е. это космические объекты с колоссальной яркостью излучения.

Изучение большого количества квазаров с помощью Космического телескопа Хаббла в 1995 г. привело ученых к выводу, что неда-

лекие квазары (с красным смещением $z = 0,5$) связаны со взаимодействующими эллиптическими галактиками. Многие квазары располагаются в центрах подобных звездных систем. Это подтверждает предположение, что квазары являются массивными черными дырами, на которые происходит падение вещества. Исследуемые квазары излучают в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах.

Вместе с тем до сих пор нет единого мнения о том, какое место занимают квазары среди других космических объектов — это уникальные образования или какие-либо промежуточные звенья эволюционного развития космических систем.

Вопросы и упражнения

1. Охарактеризуйте типы галактик по классификации Э. Хаббла. Чем эллиптические и неправильные галактики отличаются от спиральных? К какому типу относится наша Галактика?
2. Какие из упомянутых в тексте данного параграфа галактик доступны и недоступны наблюдению в наших географических широтах?
3. Каким образом определяют расстояния до галактик? Объясните метод красного смещения, который применяется для определения расстояний до галактик.
4. Сформулируйте и объясните закон Хаббла.
5. Как оценивают массы галактик?
6. В чем заключается «парадокс скрытой массы»?
7. Каковы особенности галактик с активным ядром?
8. Как, основываясь на наблюдениях, можно отличить звезды от квазаров?
9. Какими особенностями обладают квазары?

VIII § 30. РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

1. Пространственное распределение галактик. Галактики, как и звезды, образуют группы и скопления. Известно около 7000 скоплений галактик. Около 40 ближайших галактик, из которых наиболее массивные — наша Галактика и туманность Андромеды, образуют систему галактик размерами в несколько сотен килопарсек, которая получила название **Местной группы галактик**.

Более крупные объединения галактик группируются в **системы галактик**. Они содержат до тысячи галактик, а их размеры достигают нескольких мегапарсек. Ближайшее крупное объединение галактик размером примерно 5 Мпк находится в направлении созвездия Девы на расстоянии около 20 Мпк (рис. 30.1). В его состав входят гигантские эллиптические и спиральные галактики, например радиогалактика Дева А, спиральная галактика «Сомбреро» (рис. 30.2) и др.

Самое удаленное скопление галактик, до которого определено расстояние (5200 Мпк), располагается в созвездии Волосы Вероники. Только с помощью самых крупных телескопов можно различить его ярчайшие галактики. Комплексы скоплений галактик размерами 30—60 Мпк, содержащие десятки скоплений, называются **сверхскоплениями галактик**. Скопление галактик в созвездии Девы является центральным сгущением в сверхскоплении галактик, в которое входит и наша Местная группа галактик. Общее число галактик нашего сверхскопления, исключая карликовые, около 2000, а размер — около 60 Мпк. Пока выявлено около 50 сверхскоплений. Скоплений более высокого ранга не обнаружено.

Сверхскопления и скопления галактик образуют в пространстве волокноподобные структуры, напоминающие собой ячейки или пчелиные соты (рис. 30.3). В «волоконнах» собраны скопления галактик, на пересечении «сот» — сверхскопления галактик. Размеры пустот «ячеек» составляют около 100—150 Мпк, толщина «волокон» — около 10 Мпк. Средняя плотность вещества в «волоконнах» — порядка 10^{-24} кг/м³. Крупномасштабная структура Вселенной имеет ячеисто-сотый вид. Средняя плотность светящегося вещества в масштабах больше 300 Мпк равна $3 \cdot 10^{-28}$ кг/м³. Это и есть среднее значение плотности светящегося вещества в наблюдаемой части Вселенной, т. е. в больших масштабах Вселенная в среднем однородна.

2. Расширение Вселенной. Совокупность наблюдаемых галактик всех типов и их скоплений, квазаров, межгалактической среды образует **Метагалактику**. Под Метагалактикой понимается вся видимая Вселенная.



Рис. 30.1. Скопление галактик в созвездии Девы



Рис. 30.2. Галактика «Сомбреро»

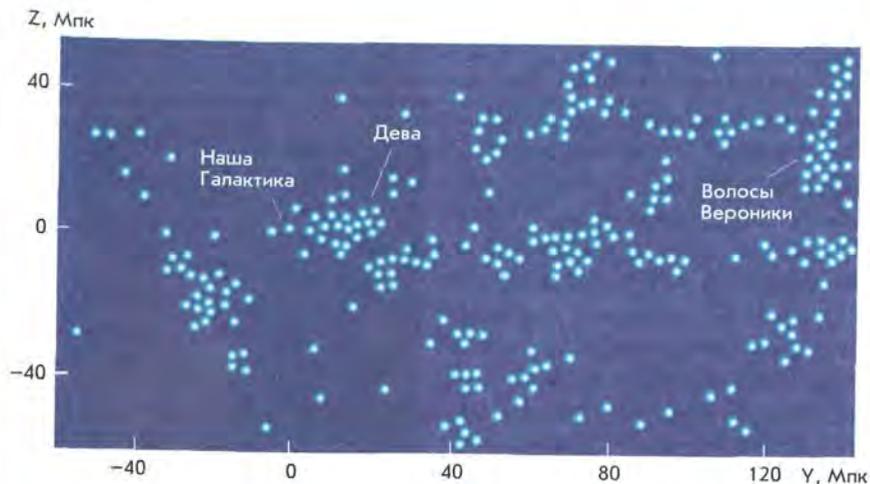


Рис. 30.3. Ячеистое распределение галактик в пространстве (в разрезе, проходящем через скопление в созвездии Волосы Вероники)

Одно из важнейших свойств Метагалактики — ее постоянное расширение, «разлет» скоплений галактик, о чем свидетельствует красное смещение в спектрах галактик. Метагалактика находится в состоянии приблизительно однородного и изотропного расширения. Однородность означает одинаковость всех свойств материи всюду в пространстве, а изотропия — одинаковость этих свойств в любом направлении. Однородность свидетельствует об отсутствии выделенных областей пространства, а изотропия — об отсутствии выделенного направления. Предположения об однородности и изотропии Вселенной называют **космологическим принципом**.

Гипотезу о расширении Вселенной на основе общей теории тяготения А. Эйнштейна и строгих расчетов выдвинул в 1922 г. русский ученый *Александр Александрович Фридман*. Расчеты показали, что Вселенная не может быть стационарной; в зависимости от средней плотности вещества во Вселенной она должна либо расширяться, либо сжиматься. Нестационарная модель Вселенной утвердилась в науке лишь после того, как Э. Хаббл обнаружил разбегание галактик (см. закон Хаббла в § 29).

Из расчетов Фридмана вытекали 3 возможных следствия: Вселенная и ее пространство расширяются с течением времени; Вселенная сжимается; во Вселенной чередуются через большие промежутки времени циклы сжатия и

расширения. Возникает вопрос: какой из трех вариантов реализуется в нашей Вселенной? Ответить на него предстоит наблюдательной астрономии, которая должна оценить современную среднюю плотность вещества во Вселенной и уточнить значение постоянной Хаббла. Почему важно уточнение этих двух постоянных величин?

При создании модели расширяющейся Вселенной было показано, что существует некоторое значение критической плотности $\rho_{кр}$ Вселенной, определяемое по формуле:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где G — гравитационная постоянная, H — постоянная Хаббла. Расчеты по данной формуле дают, что $\rho_{кр} = 10^{-26}$ кг/м³. По современным оценкам, плотность вещества Вселенной близка к критическому значению: она либо немного больше, либо немного меньше (не решен окончательно вопрос об учете межгалактического газа и «скрытой массы»). Если фактическая средняя плотность вещества во Вселенной больше критической, то в будущем расширение Вселенной должно смениться ее сжатием. Если средняя плотность вещества во Вселенной меньше критической, то расширение продолжится.

Постоянная Хаббла позволяет оценить время, в течение которого продолжается процесс расширения Вселенной. Определено, что оно не меньше 10 млрд и не более 19 млрд лет. Если эти данные, рассчитанные для Метагалактики, перенести на Вселенную, то получится, что ее средний возраст составляет около 15 млрд лет. Эта величина не противоречит оценкам возраста наиболее старых звезд.

В последние годы ученые все больше склоняются к мнению, что наблюдаемое «светящееся» вещество Вселенной представляет лишь небольшую часть всей существующей массы. Если это так, то судьбу Вселенной придется коренным образом пересмотреть в будущем.

Космическим рентгеновским телескопом «Чандра» в 2002 г. были получены новые доказательства существования во Вселенной темной материи. На сделанных с помощью телескопа рентгеновских снимках далекой галактики NGC 720 отчетливо видно окружающее ее облако горячего газа (рис. 30.4). Однако ориентация этого облака в пространстве не совпадает с ориентацией самой галактики, которая видна на сним-



Рис. 30.4. Рентгеновский снимок галактики NGC 720, сделанный телескопом «Чандра»



А. А. Фридман
(1888—1925)

ке, выполненном в диапазоне видимого света. Галактика NGC 720 находится в 80 млн световых лет от Земли. Странная конфигурация облака объясняется тем, что оно окружено оболочкой из темной материи. В противном случае газовое облако должно было бы расширяться.

В соответствии с физической теорией гравитации, без темной материи галактики разваливались бы на части, а звезды вращались бы по совершенно другим орбитам. Темная материя состоит из медленно движущихся частиц, которые взаимодействуют как друг с другом, так и с «нормальной» материей посредством гравитационных воздействий.

3. Модель горячей Вселенной. В основе современной астрономической картины мира об эволюции Вселенной лежит **модель горячей Вселенной**. В соответствии с ней, на ранних стадиях расширения Вселенная характеризовалась не только высокой плотностью вещества, но и его высокой температурой. Гипотезу «горячей Вселенной» выдвинули *Ж. Леметр* и *Г. А. Гамов*. Она получила название теории Большого взрыва.

Согласно этой теории предполагается, что Вселенная возникла спонтанно в результате взрыва из состояния с очень высокой плотностью материи, обладающей огромной энергией. Это начальное состояние материи называется **сингулярностью** — точечный объем с бесконечной плотностью. Расширение Вселенной нельзя рассматривать как расширение сверхплотной вначале материи в окружающую пустоту, ибо окружающей пустоты не было. Вселенная — это все существующее. Вещество Вселенной с самого начала однородно заполняло все безграничное пространство. И хотя давление было огромным, оно не создавало расширяющей силы, так как везде было одинаковым. Причины начала расширения Вселенной до конца не известны. По мере ее расширения температура падала от очень высокой до очень низкой, что и обеспечило благоприятные условия для образования звезд и галактик.

Модель горячей Вселенной получила экспериментальное подтверждение после открытия в 1965 г. микроволнового фонового излучения. Было обнаружено, что из космического пространства непрерывно приходит радиоизлучение очень коротких длин волн. Оно исходит не от отдельных источников, а отовсюду, из любой точки неба. Это излучение заполняет пространство между звездами и галактиками и названо **реликтовым**, т. е. древним, остаточным. Согласно современным представлениям, реликтовое излучение возникло на раннем этапе расширения Вселенной, когда еще не существовало звезд и галактик. Важнейшим свойством этого излучения является то, что распределение энергии в его спектре похоже на распределение энергии в спектре абсолютно черного тела

с температурой 2,7 К. Максимум излучения приходится на длину волны 1,1 мм.

На основании моделей Фридмана была разработана поэтапная физическая картина эволюции вещества начиная с момента взрыва (рис. 30.5). Чуть более трех минут спустя формирование ранней Вселенной закончилось и начался процесс соединения протонов и нейтронов в составные ядра. Затем почти 500 тыс. лет шло медленное остывание. Когда температура Вселенной упала примерно до 3 тыс. градусов, ядра водорода и гелия уже могли захватывать свободные электроны и превращаться в нейтральные атомы. Через миллион лет после начала расширения наступила эра вещества, когда из горячей водородно-гелиевой плазмы с малой примесью других ядер стало развиваться многообразие нынешнего мира.

Неоднородности во Вселенной, из которых впоследствии возникли все структурные образования, зародились в виде ничтожных случайных отклонений (флуктуаций), а затем усилились в эпоху, когда ионизированный газ во Вселенной стал превращаться в нейтральный, т. е. когда излучение «оторвалось» от вещества и стало реликтовым.

После того как вещество стало прозрачно для электромагнитного излучения, в действие вступили гравитационные силы. Они стали преобладать над всеми другими взаимодействиями между массами практически нейтрального вещества, составлявшего основную часть материи Вселенной. Гравитационные силы создали галактики, скопления, звезды и планеты.

Какова судьба Вселенной? Существуют две теоретические модели будущего Вселенной — «закрытая» и «открытая».

«**Закрытая**» модель предполагает, что Вселенная может быть представлена как грандиозная закрытая система, испытывающая множество эволюционных циклов. Цикл расширения сменяется циклом последующего сжатия до возвращения в сингулярное состояние, затем новый взрыв и т. д. Полный цикл расширения и сжатия Вселенной

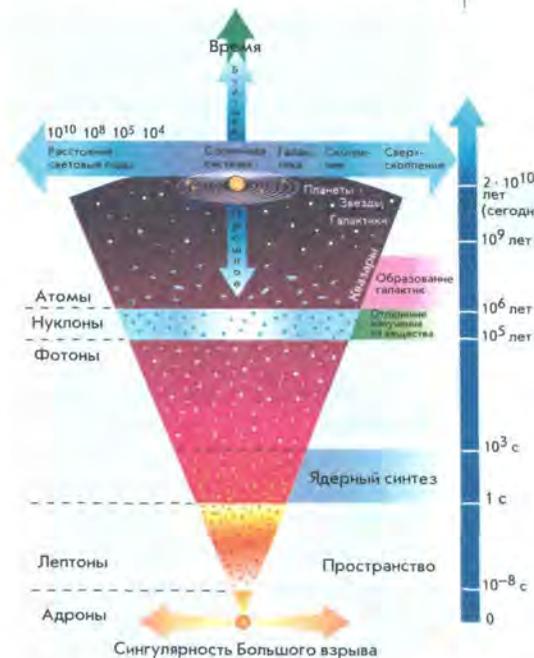


Рис. 30.5. Схема развития Вселенной от Большого взрыва до настоящего времени

составляет примерно 100 млрд лет. Каждый раз, возвращаясь к сингулярности, Вселенная теряет «память» о прошлом состоянии и может снова «родиться» с совершенно новым набором констант.

В «открытых» моделях Вселенной рассматриваются разные варианты ее «тепловой смерти». Предполагается, что уже через 10^{14} лет многие звезды остынут, и это в последующем приведет к отрыву планет от своих звезд, а те, в свою очередь, начнут покидать галактики.

Инфляционная модель, разработанная А. Линде и др., гласит, что Вселенная состоит из множества изолированных миров — доменов. Эти области возникли подобно виноградной грозди из Большого взрыва. Каждая мини-вселенная может иметь свои неповторимые условия, которые будут неизвестны и непостижимы для соседней. Вся видимая нами Метагалактика представляет собой лишь один домен.

Вопросы и упражнения

1. В чем состоит отличие Метагалактики от Вселенной? 2. Опишите пространственное распределение галактик во Вселенной. 3. Как объясняется красное смещение, и о чем оно свидетельствует? 4. В чем состоит сущность теории расширяющейся Вселенной? 5. К каким выводам о стационарности Вселенной пришел А. А. Фридман? 6. Что такое критическая плотность Вселенной? Какая критическая плотность взаимосвязана с расширением или сжатием Вселенной? 7. Опишите модель горячей Вселенной. 8. Что такое реликтовое излучение? Каково его происхождение? 9. Что понимается под «закрытыми» и «открытыми» моделями Вселенной?

§ 31. ЖИЗНЬ И РАЗУМ ВО ВСЕЛЕННОЙ

1. Антропный принцип и проблемы существования разумных цивилизаций. Сущность антропного принципа заключается в том, что появление жизни, разума является неотъемлемой частью Вселенной, естественным следствием ее эволюции. Наша Вселенная удивительно приспособлена к возникновению и развитию в ней жизни. Так, из бесконечного разнообразия начальных условий и значений физических постоянных, которые, вероятно, возникали в ранней Вселенной, реализовались только пригодные для существования разумной жизни.

Приведем несколько примеров.

1. Мы живем в пространстве трех измерений. Но только в таком пространстве возможны устойчивые планетные движения (гра-

витационное взаимодействие) и существование атомов (электромагнитное взаимодействие).

2. Если бы гравитационная постоянная была в несколько раз больше, то время жизни Солнца как устойчивого горячего плазменного шара измерялось бы несколькими десятками миллионов лет.

3. Если бы масса электрона была в 3 раза больше современной, то время жизни протона было бы малым. При взаимодействии протона с электроном протон распадался бы на нейтрон и нейтрино. Тогда звезды и галактики состояли бы из нейтронов, а более сложных форм вещества не существовало бы.

4. Если бы средняя плотность вещества во Вселенной была значительно меньше, то силы инерции (разлета) преобладали бы над силами тяготения. Поэтому не успели бы образоваться звезды и галактики.

И этот иллюстративный ряд можно продолжить. Следовательно, вывод один: наша Вселенная представляет собой связанное единое целое, согласованную систему, удивительно приспособленную к существованию жизни. Другие вселенные с иными физическими параметрами развивались бы, как отметил советский космолог А. Л. Зельманов, без свидетелей.

2. Поиски жизни в Солнечной системе. Интерес к иным формам жизни в Солнечной системе не давал покоя человечеству с давних пор. Когда-то люди думали, что обитаемы все планеты, даже Луна. Но чем больше исследователи узнавали о планетах, тем менее оптимистичными становились их прогнозы. В итоге главными «претендентами» остались только Венера и Марс. Однако изучение поверхности Венеры показало, что ничто живое не может выжить на этой планете. Тогда все надежды стали связывать с самой загадочной планетой — Марсом.

Главная цель полетов автоматических орбитально-посадочных станций «Викинг» к Марсу состояла в поиске жизни на этой планете. Было выполнено несколько сложных биологических экспериментов, и все они дали положительный результат. Однако ученые засомневались: в ходе анализа марсианского грунта не было обнаружено никаких следов органических соединений — продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. Для сравнения: при таких же пробах антарктического грунта удалось найти значительное количество ископаемых органических соединений.

В 1976 г. станция «Викинг» передала на Землю фотографию загадочного объекта (из области Сидония), размером около полутора километров, который назвали «головой сфинкса» (рис. 31.1). Была выдвинута гипотеза, что это архитектурное сооружение древней цивилизации. Но исследователи Марса заявили: это природный



Рис. 31.1. Фотография «головы сфинкса» на Марсе, полученная в 1976 г.



Рис. 31.2. Фотография «головы сфинкса», полученная с лучшим разрешением в 2001 г.



Рис. 31.3. Метеорит ALH 84001

объект. Споры не утихали до 2001 г., до тех пор, пока космический аппарат «Марс Глобал Сурвейор» не передал на Землю более подробный снимок (рис. 31.2). На новом изображении хорошо видно, что «голова сфинкса» — природная структура.

В последующие годы посылаемые к Марсу посадочные аппараты не оснащались приборами, способными зафиксировать признаки жизни.

И тогда по иронии судьбы Марс как бы сам «напомнил о себе» и «заслал» на Землю метеорит, который сохранил что-то похожее на следы примитивной жизни. В 1996 г. весь мир облетело сообщение о том, что группа ученых Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА; США) нашла предположительное свидетельство того, что на Марсе могла существовать примитивная жизнь примерно 3,6 млрд лет назад.

В древнем марсианском камне, который упал на Землю, были обнаружены органические молекулы, некоторые минеральные особенности биологической активности и нечто напоминающее микроскопические бактерии. Однако американские ученые осторожно предполагали, что найденные доказательства могут свидетельствовать о прошлой жизни на Марсе, и призвали ученых всего мира присоединиться к исследованиям.

Возраст этого небольшого метеорита картофелеобразной формы приблизительно 4,5 млрд лет — в то время Марс только сформировался (рис. 31.3). Исследователи считают, что планета 3,6–4 млрд лет назад

была более теплая и «водяная». Примерно 16 млн лет назад какое-то космическое тело (огромная комета или астероид) врезалось в Марс и выбросило камни из поверхностного слоя в космос. Миллионы лет они летали в межпланетном пространстве, пока некоторые из них не упали на Землю.

Метеорит, обозначенный ALH 84001, был найден в 1984 г. в Антарктиде ежегодной экспедицией, занимающейся поисками метеоритов. Сделать это открытие позволило применение новейших технологических достижений. Экспедиционная группа использовала электронный микроскоп с высоким разрешением и лазерный масс-спектрометр. Два года сотни ученых всеми доступными методами и средствами исследовали части марсианского камня. Но абсолютно неопровержимых доказательств того, что он содержит свидетельства каких-либо форм жизни, найдено не было.

В то время как поиски жизни на Марсе зашли в тупик, космический аппарат «Галилео», изучающий Юпитер, передал сообщение, что на одном из больших спутников планеты — Европе — обнаружен океан теплой воды, находящийся под ледяным панцирем.

Поверхность Европы покрыта молодым водяным льдом, испещренным трещинами (рис. 31.4). Анализ полученных в разное время изображений показал, что лед несколько смещается (подобную картину можно наблюдать на земных полярных морях во время весеннего таяния льда). Исходя из размеров и геометрии ледяных трещин, ученые предположили, что на спутнике Европа тонкий ледяной слой закрывает воду или талый лед. При этом отдельные ледяные участки кажутся движущимися и могут быть сопоставлены с земными айсбергами. Правда, загадкой остаются причины, приводящие в движение ледяные блоки.

Необычная поверхностная геология Европы указывает на то, что лед чрезвычайно юный и на нем почти отсутствуют ударные метеоритные кратеры. Кроме того, встречаются особые зоны — хаосы. Они представляют собой беспорядочное нагромождение ледяных глыб, замороженных в более ровную поверхность. Складывается впечатление, будто бы лед

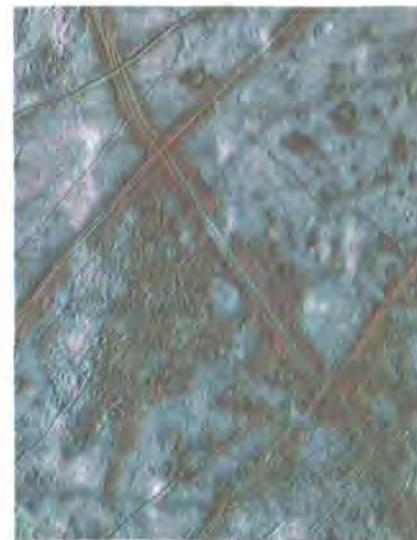


Рис. 31.4. Трещины на льду Европы. Фотография «Галилео»

был частично растоплен, затем снова замерз, и не успевшие растаять глыбы оказались окруженными более ровным молодым льдом. Причиной образования таких структур может служить прорыв гейзера.

Следовательно, если на Европе есть теплая вода и гидротермальные источники, то могут существовать и какие-либо формы жизни. Однако обнаружить их можно только приземлившись на поверхность планеты. Поэтому в НАСА появился проект отправки к Европе станции, которая бы пробурила лед и с помощью специального аппарата для химического и биологического анализов воды взяла пробы.

Поиски жизни в Солнечной системе и Вселенной продолжают-ся. НАСА объявило о «Программе астрономического поиска планетных систем и происхождения жизни». Этот проект предусматривает запуск на геоцентрическую орбиту огромного оптического интерферометра с разрешением в 100 раз выше, чем у Космического телескопа Хаббла. В 2003—2004 гг. намечен запуск первого элемента интерферометра, состоящего из 4—5 космических телескопов. Программу планируется завершить до 2010 г. Ученые считают, что интерферометр будет способен не только обнаруживать планеты на расстояниях до 100 световых лет, но и определять их кислородные атмосферы.

Время от времени научная общественность возвращается к обсуждению проблемы жизни на Луне. В США сотрудники НАСА, специалисты крупных аэрокосмических компаний, геологи и фотоэксперты провели в 1998 г. конференцию, на которой обнародовали данные о следах разумной жизни на Луне. В подтверждение были представлены многочисленные снимки лунной поверхности, сделанные НАСА и советскими зондами за последние 30 лет. На этих фотографиях видны треугольные, прямоугольные, пятиугольные и другие руиноподобные структуры, правильно расположенные светящиеся объекты и другие аномалии на обратной стороне Луны.

Ученые сегодня не могут дать объяснения этим феноменам, но и не спешат признавать, что их создали представители разумной жизни. Может быть, некоторые аномалии вызваны дефектами пленки или ее обработки, а руиноподобные структуры — это сеть валов и разрывов, возникающих от горизонтальных напряжений в лунной коре.

3. Поиски жизни в Галактике. Современная наука определяет **внеземные цивилизации** как гипотетические общества разумных существ, которые могут возникнуть и существовать вне Земли.

Для оценки числа внеземных цивилизаций в Галактике американский радиоастроном *Фрэнсис Дрейк* предложил следующую формулу:

$$N = R \cdot f \cdot n \cdot k \cdot d \cdot q \cdot L,$$

где N — число внеземных цивилизаций в Галактике; R — скорость образования звезд в Галактике, усредненная по всему времени ее существования (около 10 звезд в год); f — доля звезд, обладающих планетными системами; n — среднее число планет, входящих в планетные системы и экологически пригодных для жизни; k — доля планет, на которых действительно возникла жизнь; d — доля планет, на которых после возникновения жизни развились ее разумные формы; q — доля планет, на которых разумная жизнь достигла фазы, обеспечивающей возможность связи с другими мирами, цивилизациями; L — средняя продолжительность существования таких внеземных (космических, технических) цивилизаций.

В формуле Дрейка все величины, кроме первой, имеют очень неконкретный характер и определяются на основе экспертных оценок ученых. Поэтому создается значительная неопределенность в оценке общей величины N . Одни подсчеты показывают, что сейчас всего лишь несколько геоподобных цивилизаций Галактики (в которой 10^{11} звезд) готовы к контакту с нами. Согласно другим, более оптимистическим, — таких цивилизаций может быть значительно больше. Как один из аргументов в пользу того, что внеземные цивилизации — явление весьма редкое, выдвигается отсутствие видимых проявлений их деятельности.

Контакты с внеземными цивилизациями могут быть нескольких типов: непосредственные контакты с взаимным или односторонним посещением; контакты по каналам связи или обмен информацией через посылки сигналов в каком-либо диапазоне электромагнитных волн; контакты смешанного типа — отправка к внеземной цивилизации автоматических зондов, которые передают информацию по каналам связи.

Основная трудность непосредственных контактов связана с длительностью полета к другим цивилизациям. Время полета может быть сравнимо со временем жизни самой цивилизации. Например, чтобы достичь далеких звезд, потребуются тысячелетия, и ценность доставленной информации потеряет смысл.

Контактам с внеземными цивилизациями должно предшествовать установление той или иной формы связи с ними. Сюда относится поиск сигналов этих цивилизаций, следов пребывания на Земле и следов астроинженерной деятельности, т. е. направленной на преобразование окружающего космического пространства (создание искусственных спутников, перехват энергии звезд и др.).

Первые работы по поиску сигналов внеземных цивилизаций провел в 1960 г. Ф. Дрейк (США). Он исследовал радиоизлучение ближай-

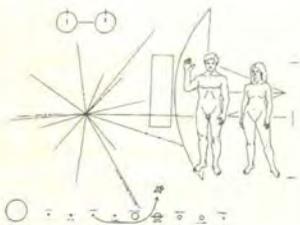


Рис. 31.5. Табличка с посланием, адресованным представителям внеземных цивилизаций. Табличка помещена на борт «Пионера-10»

ших звезд (τ Кита и ε Эридана) на волне 21 см. Искусственные сигналы обнаружить не удалось, но эра поисков сигналов внеземных цивилизаций была открыта. В настоящее время космическое пространство прослушивается одновременно на многих частотах. Принятые радиотелескопом сигналы обрабатывают компьютеры. Например, на антенне в Аресибо работает приемник радиосигналов на 4 млн каналов и строится приемник на 167 млн каналов. Уже замечены сотни необычных сигналов, которые предстоит изучить более детально.

Параллельно ведется работа по сообщению внеземным цивилизациям информации о нашей, земной цивилизации. В 1974 г. с радиоастрономической обсерватории в Аресибо в сторону шарового скопления М31 (созвездие Геркулеса), находящегося от Земли на расстоянии 24 тыс. световых лет, было направлено послание, содержащее закодированный текст о жизни и цивилизации на Земле. Информационные сообщения (пластинки с нанесенными рисунками, видеодиски с записями изображений, звуков и человеческой речи на разных языках) не раз помещались на космические аппараты, траектории которых выходили за пределы Солнечной системы (рис. 31.5).

В последнее время среди ученых и философов все больше утверждается мнение, что человечество одиноко если не во всей Вселенной, то во всяком случае в нашей Галактике. Из этого вытекает важнейший вывод о значении, ценности и уникальности нашей цивилизации. Человечество, таким образом, в огромной степени ответственно не только за нашу планету, но и за Вселенную в целом.

Вопросы и упражнения

1. В чем заключается сущность антропного принципа?
2. На каких планетах Солнечной системы ученые допускают существование жизни?
3. Каким образом можно оценить число внеземных цивилизаций в нашей Галактике?
4. Почему формула Ф. Дрейка дает значительную неопределенность в оценке количества цивилизаций в Галактике, готовых к контакту с нами?
5. Охарактеризуйте типы контактов с внеземными цивилизациями. Какие трудности необходимо преодолеть при реализации каждого типа?
6. Каким образом человечество пытается установить контакты с внеземными цивилизациями?

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ

ЗНАКИ ЗОДИАКА		ПЛАНЕТЫ	
♈	Овен, а также точка весеннего равноденствия	☉	Солнце
♉	Телец	☾	Луна
♊	Близнецы	☿	Меркурий
♋	Рак	♀	Венера
♌	Лев	♁	Земля
♍	Дева	♂	Марс
♎	Весы, а также точка осеннего равноденствия	♃	Юпитер
♏	Скорпион	♄	Сатурн
♐	Стрелец	♅	Уран
♑	Козерог	♆	Нептун
♒	Водолей	♇	Плутон
♓	Рыбы		

ДРУГИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

♊	Восходящий узел лунной орбиты	♋	Нисходящий узел лунной орбиты
---	-------------------------------	---	-------------------------------

ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

НАЧЕРТАНИЕ БУКВЫ	НАЗВАНИЕ БУКВЫ	НАЧЕРТАНИЕ БУКВЫ	НАЗВАНИЕ БУКВЫ	НАЧЕРТАНИЕ БУКВЫ	НАЗВАНИЕ БУКВЫ	НАЧЕРТАНИЕ БУКВЫ	НАЗВАНИЕ БУКВЫ
α	áльфа	η	эта	ν	ни	τ	та́у
β	бéта	θ	тéта	ξ	кси	υ	ипсилóн
γ	гáмма	ι	йóта	ο	омикрón	φ	фи
δ	дéльта	κ	кáппа	π	пи	χ	хи
ε	эпсилóн	λ	лáмбда	ρ	ро	ψ	пси
ζ	дзéта	μ	ми	σ	сiгма	ω	омéга

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ХРОНОЛОГИЯ ВАЖНЕЙШИХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОТКРЫТИЙ И СОБЫТИЙ

ДАТА	ОТКРЫТИЯ (КЕМ И ГДЕ СДЕЛАНЫ) И СОБЫТИЯ
4000 г. до н. э.	Начало астрономической деятельности шумеров (Месопотамия), египтян, майя
1100 г. до н. э.	Измерение наклона эклиптики к экватору (Китай)
240 г. до н. э.	Измерение размеров земного шара (Эратосфен; Александрия)
150—123 гг. до н. э.	Первая теория движения Солнца и Луны, составление звездного каталога с разделением звезд на 6 классов по блеску (Гиппарх; Греция)
46 г. до н. э.	Введение в Римской империи юлианского солнечного календаря с високосными годами (Созиген; Александрия)
140 г. н. э.	Создание геоцентрической системы мира (Птолемей; Александрия)
1543 г.	Опубликовано сочинение Н. Коперника «Об обращениях небесных сфер» с изложением гелиоцентрической системы мира
1609—1610 гг.	Начало телескопической астрономии (Г. Галилей; Италия)
1609—1619 гг.	Открыты законы движения планет (И. Кеплер; Германия)
1668 г.	Изготовлен первый зеркальный телескоп (И. Ньютон; Англия)
1675 г.	Впервые измерена скорость света на основе наблюдений спутников Юпитера (О. Ремер; Франция)
1687 г.	Опубликована книга «Математические начала натуральной философии» с обоснованием законов движения и закона всемирного тяготения (И. Ньютон; Англия)
1705 г.	Открыта периодичность возвращения комет (Э. Галлей; Англия)
1761 г.	Открыта атмосфера на Венере (М. В. Ломоносов; Россия)
1781 г.	Открыта планета Уран (У. Гершель; Англия)
1794 г.	Установлено космическое происхождение метеоритов (Э. Хладни; Германия)
1801 г.	Открыта первая малая планета-астероид Церера (Д. Пицци; Италия)
1814—1817 гг.	Описаны линии поглощения в спектре Солнца и ряда ярких звезд (И. Фраунгофер; Германия)
1837—1839 гг.	Впервые измерено расстояние до звезд (В. Струве, Россия; Ф. Бессель, Германия; Т. Гендерсон, Англия)

Окончание прил. 2

ДАТА	ОТКРЫТИЯ (КЕМ И ГДЕ СДЕЛАНЫ) И СОБЫТИЯ
1842 г.	Открытие эффекта Доплера (К. Доплер; Австрия)
1846 г.	Открыта планета Нептун (У. Леверье, Франция; И. Галле, Германия)
1859—1862 гг.	Открыт спектральный анализ (Р. Бунзен, Р. Кирхгоф; Германия)
1877 г.	Создана теория кометных форм (Ф. А. Бредихин; Россия)
1895 г.	Впервые экспериментально определена температура Солнца (В. К. Цераский; Россия)
1905—1913 гг.	Открыта закономерность в мире звезд: диаграмма «спектр — светимость» (Э. Герцшпрунг, Дания; Г. Рессел, США)
1916 г.	Создана общая теория относительности (А. Эйнштейн; Германия)
1916—1918 гг.	Создана теория внутреннего строения звезд (А. Эддингтон; Англия)
1922—1924 гг.	Теоретически обоснована нестационарность Вселенной (А. А. Фридман; Россия)
1929 г.	Открыто красное смещение в спектрах галактик (Э. Хаббл; США)
1930 г.	Открыта планета Плутон (К. Томбо; США)
1931 г.	Открыто космическое радиоизлучение (К. Янский; США)
1937 г.	Разработана теория термоядерных реакций как источника внутризвездной энергии (Г. Бете; США)
1944 г.	Опубликована космогоническая теория о происхождении Земли и планет (О. Ю. Шмидт; Россия)
1951 г.	Обнаружено радиоизлучение нейтрального водорода в межзвездном пространстве на волне 21 см (США, Нидерланды)
1960—1963 гг.	Открыты квазары (М. Шмидт; США)
1965 г.	Открыто реликтовое радиоизлучение с температурой 2,7 К (А. Пензиас, Р. Вильсон; США)
1967 г.	Открыты пульсары — нейтронные вращающиеся звезды (Д. Белл, А. Хьюиш; Англия), гипотезу о существовании которых выдвинул в 1930-х гг. Л. Д. Ландау (СССР)
1974 г.	Открыты рентгеновские пульсары (США)
1987 г.	Впервые обнаружены нейтрино от сверхновой звезды
1997 г.	Обнаружены коричневые карлики — звезды, имеющие малую массу (около 7% солнечной массы) и температуру атмосферы, не превышающую 2000 К

1. ПОДВИЖНАЯ КАРТА ЗВЕЗДНОГО НЕБА

Описание карты

1. Подвижная карта звездного неба (см. вкладыш к учебнику) позволяет определять вид звездного неба в любой момент суток произвольного дня года, а также решать ряд практических задач на условия видимости небесных светил. Подвижная карта состоит из двух деталей: собственно карты и накладного круга.

2. На карту нанесены главнейшие созвездия и Млечный Путь. В центре карты находится северный полюс мира, рядом с ним — Полярная звезда. От северного полюса мира расходятся линии, обозначающие круги склонения. У основания каждого круга склонения проставлено число, обозначающее прямое восхождение (α), выраженное в часах.

3. Концентрические окружности на карте изображают небесные параллели, а числа у точек их пересечения с нулевым (0°) и 12-часовым кругами склонения показывают угловое расстояние небесных параллелей от небесного экватора, т. е. их склонение (δ), выраженное в градусах.

4. Третья по счету от полюса мира окружность (с обозначением 0°) представляет собой небесный экватор, внутри которого расположена северная небесная полусфера, а вне его — пояс южной небесной полусферы до склонения -45° .

5. Эклиптика на карте изображена эксцентрическим овалом, пересекающимся с небесным экватором в точках весеннего (Υ) и осеннего (Ω) равноденствия.

6. На обрете карты нанесены названия месяцев года и лимб дат.

7. По обресту накладного круга нанесены часы суток по среднему солнечному времени. Овалы, вычерченные внутри круга, относятся к географической широте местности.

Подготовка карты к работе

1. Наклейте карту и накладной круг на тонкий картон или плотную бумагу.
2. Аккуратно обрежьте листы с наклеенными картой и накладным кругом по внешним контурам. Получатся 2 диска.
3. В накладном круге вырежьте отверстие по одной из замкнутых линий с определенной широтой места, в котором предполагается пользоваться картой ($\varphi = 40, 45, 50, \dots 65^\circ$). Например, с небольшой ошибкой для Витебска это будет широта 55° , а для Бреста и Гомеля — 50° .
4. Между точками Ю и С накладного круга натяните тонкую цветную нить, которая будет символизировать меридиан.
5. Накладной круг с проделанным отверстием concentрично наложите на карту. Подвижная карта звездного неба готова к работе.

Работа с картой

1. Поворачивайте накладной круг на карте так, чтобы расположить нужный вам час (часы отмечены по краю накладного круга) напротив соответствующей даты (месяцы и числа отмечены по краю звездной карты).

2. В вырезе накладного круга будут видны те созвездия и звезды, которые в данный момент оказываются над горизонтом, и притом именно в указанных картой направлениях и положениях относительно горизонта.

3. На самом контуре отверстия между его точками Ю, В и С расположатся восходящие звезды, а между точками Ю, З и С — заходящие звезды. Звезды, закрытые накладным кругом, в этот момент не видны, так как находятся под горизонтом.

4. Соответствие показаний карты с наблюдаемой картиной звездного неба будет полным, если карту разместить над собой горизонтально, обратив ее край с надписью «север» к северной точке горизонта. Если же карта лежит на столе, надо помнить, что она отражает расположение звезд, находящихся сверху, и мысленно переносить их изображения на небо соответственно направлениям на стороны горизонта.

5. Следует помнить, что созвездия на карте изображены в несколько искаженном, растянутом виде, потому что небесную сферу, как и земной шар, нельзя перенести на плоскость без искажений.

2. КАРТА ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОЯСА ЗВЕЗДНОГО НЕБА

Эта карта более детально изображает те области звездного неба, которые находятся вблизи небесного экватора (его положение отмечено по краям 0°) и через которые пролегает видимый годичный путь Солнца по небу. На карте он показан синусоидальной линией, пересекающей небесный экватор в точках весеннего и осеннего равноденствия. Условные обозначения даются отдельно под картой.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ ГОРОДОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОРОД	ШИРОТА (с. ш.)	ДОЛГОТА (в. д.)	ЧАСОВОЙ ПОЯС
Минск	53° 54'	27° 33' 1" 50,3 ^м	2
Барановичи	53° 09'	26° 02' 1" 44,1 ^м	2
Бобруйск	53° 08'	29° 15' 1" 57,0 ^м	2
Борисов	54° 14'	28° 31' 1" 54,1 ^м	2
Брест	52° 06'	23° 42' 1" 34,8 ^м	2
Витебск	55° 12'	30° 11' 2" 00,8 ^м	2
Гомель	52° 25'	31° 00' 2" 04,1 ^м	2
Гродно	53° 41'	23° 50' 1" 35,3 ^м	2
Лида	53° 53'	25° 17' 1" 41,1 ^м	2
Могилев	53° 54'	30° 19' 2" 01,3 ^м	2
Мозырь	52° 08'	29° 16' 1" 57,1 ^м	2
Молодечно	54° 18'	26° 50' 1" 47,3 ^м	2
Новополоцк	55° 32'	28° 37' 1" 54,5 ^м	2
Орша	54° 30'	30° 26' 2" 01,7 ^м	2
Пинск	52° 07'	26° 07' 1" 44,5 ^м	2
Полоцк	55° 29'	28° 47' 1" 55,1 ^м	2
Речица	52° 21'	30° 24' 2" 01,6 ^м	2
Светлогорск	52° 39'	29° 43' 1" 58,9 ^м	2
Слуцк	53° 01'	27° 33' 1" 50,2 ^м	2
Солигорск	52° 47'	27° 33' 1" 50,2 ^м	2

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

БЛИЖАЙШИЕ ПОЛНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

1. СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ

ДАТА	ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ	ВИДИМОСТЬ
4 дек. 2002 г.	4 мин 15 с	Южная Африка, Индийский океан, Австралия
23 нояб. 2003 г.	1 мин 57 с	Антарктида
8 апр. 2005 г.	0 мин 46 с	Тихий океан, Южная Америка
29 марта 2006 г.	4 мин 11 с	Атлантический океан, Африка, Северный Кавказ, Казахстан, Юго-Западная Сибирь
1 авг. 2008 г.	2 мин 30 с	Северный Ледовитый океан, Западная Сибирь, Китай
22 июля 2009 г.	6 мин 44 с	Индия, Китай, Тихий океан
11 июля 2010 г.	5 мин 25 с	Тихий океан, юг Южной Америки
13 нояб. 2012 г.	4 мин 06 с	Север Австралии, Тихий океан
3 нояб. 2013 г.	1 мин 44 с	Атлантический океан, Центральная Африка
20 марта 2015 г.	2 мин 50 с	Атлантический океан, Шпицберген, Северный Ледовитый океан
9 марта 2016 г.	4 мин 14 с	Индонезия, Тихий океан
21 авг. 2017 г.	2 мин 24 с	Тихий океан, Северная Америка, Атлантический океан
2 июля 2019 г.	4 мин 37 с	Тихий океан, Южная Америка
14 дек. 2020 г.	2 мин 14 с	Тихий океан, Южная Америка, Атлантический океан
4 дек. 2021 г.	1 мин 54 с	Антарктида
20 апр. 2023 г.	1 мин 20 с	Индийский океан, Индонезия, Тихий океан
8 апр. 2024 г.	4 мин 32 с	Тихий океан, Северная Америка, Атлантический океан
12 авг. 2026 г.	2 мин 21 с	Гренландия, Атлантический океан, Испания
2 авг. 2027 г.	6 мин 27 с	Атлантический океан, Гибралтар, север Африки, Аравия, Индийский океан
22 июля 2028 г.	5 мин 14 с	Индийский океан, Австралия, Новая Зеландия
25 нояб. 2030 г.	3 мин 47 с	Юг Африки, Индийский океан, Австралия

2. ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

ДАТА	ВСЕМИРНОЕ ВРЕМЯ		ВИДИМОСТЬ
	ВСТУПЛЕНИЯ ЛУНЫ В ПОЛУТЕНЬ	ВЫХОДА ЛУНЫ ИЗ ПОЛУТЕНИ	
16 мая 2003 г.	01 ч 05 мин 21 с	06 ч 14 мин 50 с	В западных районах России и Беларуси видны только самые начальные фазы затмения
8–9 нояб. 2003 г.	22 ч 15 мин 08 с	04 ч 21 мин 53 с	Начальные фазы видны на всей территории России, кроме Восточной Сибири. Заключительные фазы можно наблюдать в западных и центральных районах России и Беларуси
4 мая 2004 г.	17 ч 50 мин 47 с	23 ч 09 мин 27 с	Начальные фазы видны на всей территории России и Беларуси, кроме Крайнего Севера и Северо-Восточной Сибири. Заключительные фазы можно наблюдать в европейской части России и в Беларуси
28 окт. 2004 г.	00 ч 05 мин 32 с	06 ч 02 мин 38 с	Начальные фазы видны в европейской части России, в Беларуси и в Западной Сибири. Заключительные фазы можно наблюдать на Чукотском полуострове
3–4 марта 2007 г.	20 ч 16 мин 21 с	02 ч 25 мин 17 с	Начальные фазы видны на всей территории России и Беларуси, кроме северо-востока. Заключительные фазы можно наблюдать в европейской части России и Беларуси
28 авг. 2007 г.	07 ч 52 мин 05 с	13 ч 22 мин 20 с	Начальные фазы видны только на Чукотке. Заключительные фазы можно наблюдать в Восточной Сибири
21 февр. 2008 г.	00 ч 34 мин 51 с	06 ч 17 мин 06 с	Начальные фазы видны в европейской части России, Беларуси и Западной Сибири. Заключительные фазы можно наблюдать на Чукотском полуострове
21 дек. 2010 г.	05 ч 27 мин 37 с	11 ч 05 мин 56 с	Начальные фазы видны на севере России. Заключительные фазы можно наблюдать по всей Сибири и на севере европейской части России
15 июня 2011 г.	17 ч 22 мин 57 с	23 ч 02 мин 05 с	Начальные фазы видны на всей территории России, кроме запада, севера и северо-востока. Заключительные фазы можно наблюдать в европейской части России (кроме севера и северо-востока) и Беларуси
10 дек. 2011 г.	11 ч 31 мин 42 с	17 ч 31 мин 34 с	Начальные фазы видны на севере и востоке европейской части России и по всей Сибири. Заключительные фазы можно наблюдать со всей территории России и Беларуси

ВАЖНЕЙШИЕ ЭТАПЫ В ОСВОЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

ДАТА	СОБЫТИЕ
4 окт. 1957 г.	Запуск первого искусственного спутника Земли (СССР)
13 сент. 1959 г.	Впервые КА ¹ «Луна-2» достиг поверхности Луны (СССР)
7 окт. 1959 г.	Впервые переданы на Землю снимки обратной стороны Луны КА «Луна-3»
1960 г.	Создана первая карта обратной стороны Луны и первый в мире глобус Луны под руководством Ю. Н. Липского (СССР)
12 апр. 1961 г.	Первый полет человека в космическое пространство (Ю. А. Гагарин, КК ² «Восток»; СССР)
18 марта 1965 г.	Первый выход человека в открытый космос (А. А. Леонов, КК «Восход-2»; СССР)
15 июля 1965 г.	Получены первые фотографии Марса с близкого расстояния (АМС ³ «Маринер-4»; США)
3 февр. 1966 г.	Первая мягкая посадка на поверхность Луны («Луна-9»; СССР)
18 окт. 1967 г.	Первое исследование атмосферы Венеры со спускаемого аппарата «Венера-4» (СССР)
21–24 дек. 1968 г.	Первый облет Луны человеком (Ф. Борман, Дж. Ловелл, А. Андерс, КК «Аполлон-8»; США)
21 июля 1969 г.	Первая посадка человека на Луну с выходом на лунную поверхность (Н. Армстронг, Э. Олдрин, КК «Аполлон-11»; США)
15 дек. 1970 г.	Первая мягкая посадка на поверхность Венеры (АМС «Венера-7»; СССР)
2 дек. 1971 г.	Первая мягкая посадка на поверхность Марса (АМС «Марс-3»; СССР)
11 дек. 1973 г.	Получены первые фотографии Юпитера и его спутников с близкого расстояния (АМС «Пионер-10»; США)
16–18 дек. 1973 г.	Первый белорусский космонавт П. И. Климук совершил полет на КК «Союз-13» (всего выполнил 3 полета общей продолжительностью 78 сут 18 ч 18 мин 42 с; СССР)

Окончание прил. 6

ДАТА	СОБЫТИЕ
29–30 марта 1974 г.	Первые исследования Меркурия с пролетной траектории (КА «Маринер-10»; США)
20 июля и 4 сент. 1976 г.	Первые эксперименты по поиску жизни на Марсе (АМС «Викинг-1», «Викинг-2»; США)
9–11 окт. 1977 г.	Белорусский космонавт В. В. Коваленок совершил полет на КК «Союз-25» (всего выполнил 3 полета общей продолжительностью 216 сут 9 ч 9 мин 40 с; СССР)
1 сент. 1979 г.	Получены первые фотографии Сатурна и его спутников с близкого расстояния (АМС «Пионер-11»; США)
6–9 марта 1986 г.	Получены первые фотографии ядра кометы Галлея («Вега-1» и «Вега-2»; СССР)
Янв. 1986 г.	Получены первые фотографии Урана и его спутников с пролетной траектории («Вояджер-2»; США)
Авг. 1989 г.	Получены первые фотографии Нептуна и спутников с близкого расстояния (АМС «Вояджер-2»; США)
24 апр. 1990 г.	Выведен на орбиту искусственный спутник Земли с оптическим Космическим телескопом Хаббла (КТХ; США) диаметром 2,4 м
29 окт. 1991 г.	Получены первые фотографии астероида Гаспра с близкого расстояния (АМС «Галилео»; США)
12 февр. 2000 г.	Первая посадка космического аппарата «NEAR» на астероид Эрос (США)

Примечание: ¹ КА — космический аппарат.

² КК — космический корабль.

³ АМС — автоматическая межпланетная станция.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ

ПАРАМЕТРЫ	ПЛАНЕТЫ								
	МЕРКУРИЙ	ВЕНЕРА	ЗЕМЛЯ	МАРС	ЮПИТЕР	САТУРН	УРАН	НЕПТУН	ПЛУТОН
Среднее расстояние до Солнца, а. е.	0,387	0,723	1,000	1,524	5,203	9,54	19,18	30,1	39,4
Сидерический период обращения, сут	88,0	224,7	365,26	687,0	11,86	29,46	84,0	164,8	247,7
Синодический период обращения, сут	115,9	583,9	—	779,9	398,9	378,1	369,7	367,5	366,7
Эксцентриситет орбиты	0,207	0,0067	0,0167	0,0934	0,0484	0,0557	0,0471	0,0087	0,247
Наклонение орбиты к эклиптике	7°01'	3°24'	—	1°51'	1°18'	2°29'	0°46'	1°46'	17°08'

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ

ПАРАМЕТРЫ	ПЛАНЕТЫ								
	МЕРКУРИЙ	ВЕНЕРА	ЗЕМЛЯ	МАРС	ЮПИТЕР	САТУРН	УРАН	НЕПТУН	ПЛУТОН
Масса (по сравнению с массой Земли)	0,055	0,816	1,000	0,107	318	95,1	14,6	17,2	0,0024
Радиус, км	2439	6051	6378	3393	71 400	60 400	24 300	25 050	1151
Средняя плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,6	1,7	2,0
Период вращения, сут	58,8	243	23 ч 56 мин	24 ч 37 мин	9 ч 50 мин	10 ч 14 мин	17 ч 14 мин	16 ч 7 мин	6,4 сут
Наклон экватора к плоскости	7°	3°24'	23°26'	25°12'	3°07'	26°45'	82°	29°	118°
Число известных спутников	—	—	1	2	28	30	31	8	1

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ, %

НАЗВАНИЕ ГАЗА	ПЛАНЕТА		
	ВЕНЕРА	ЗЕМЛЯ	МАРС
CO ₂	96,5	0,03	95
N ₂	3,5	78	2,5
O ₂	10 ⁻³	25	0,1
Ar	1,5·10 ⁻²	0,9	1,5
Средняя молекулярная масса, г/моль	43,5	28,8	43,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О ЗЕМЛЕ

ПАРАМЕТР	ВЕЛИЧИНА
Экваториальный радиус, км	6378,140
Полярный радиус, км	6356,755
Средний радиус, км	6371,004
Поверхность Земли, км ²	5,0949 · 10 ⁸
Поверхность суши, %	29,2
Водная поверхность, %	70,8
Масса Земли, кг	5,973 · 10 ²⁴
Масса воды во всех ее формах, кг	1,43 · 10 ²¹
Масса атмосферы Земли, кг	5,158 · 10 ¹⁸
Линейная скорость точки экватора, м/с	465,12
Средняя скорость движения Земли по орбите, км/с	29,765
Ускорение силы тяжести на Земле (на широте 45°), м/с ²	9,806

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О ЛУНЕ

ПАРАМЕТР	ВЕЛИЧИНА
Минимальное расстояние от Земли, км	356 410
Максимальное расстояние от Земли, км	406 740
Среднее расстояние от Земли, км	384 400
Эксцентриситет орбиты	0,0549
Наклонение плоскости орбиты к эклиптике	5°08'43"
Период обращения по орбите, сут	27,32
Периодичность смены фаз Луны, сут	29,53
Средний угловой радиус Луны	15'33"
Масса, кг	$7,35 \cdot 10^{22}$
Средняя плотность, кг/м ³	3340
Ускорение силы тяжести, м/с ²	1,62
Вторая космическая скорость, км/с	2,38
Максимальная температура днем, °С	+130
Минимальная температура ночью, °С	-170
Освещенность от полной Луны на земной поверхности, лк	0,25
Освещенность от полной Земли на лунной поверхности, лк	16
Средняя отражательная способность ото всей лунной поверхности, %	12,44
Отражательная способность материковых областей, %	13,44
Отражательная способность морских областей, %	7,30
Общая площадь поверхности Луны, км ²	$3,8 \cdot 10^7$
Площадь морей на всей поверхности, %	16,9
Площадь морей на видимой стороне, %	31,2
Площадь поверхности, которую можно наблюдать вследствие либрации, %	59

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

ОРБИТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСТЕРОИДОВ, НАЗВАНИЯ КОТОРЫХ СВЯЗАНЫ С РЕСПУБЛИКОЙ БЕЛАРУСЬ

НОМЕР АСТЕРОИДА	НАЗВАНИЕ	ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА, m	БОЛЬШАЯ ПОЛУОСЬ ОРБИТЫ, а. е.	ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ ОРБИТЫ	НАКЛОН ОРБИТЫ, градусы	ДИАМЕТР, км	ПРОИСХОЖДЕНИЕ НАЗВАНИЯ
807	Цераския	10,6	3,019	0,060	11,3	27	Назван в честь астронома В. К. Цераского, родившегося в г. Слуцке Минской обл.
1167	Дубяго	9,9	3,404	0,077	6,3	17	Назван в честь астрономов Д. И. Дубяго и А. Д. Дубяго (отец и сын). Дмитрий Иванович родился в с. Соино Мстиславского уезда (ныне Могилевская обл.)
1734	Жонголович	11,4	2,780	0,231	8,34	17	Назван в честь астронома И. Д. Жонголовича, родившегося в г. Гродно
1861	Каменьски	11,8	3,017	0,070	10,5		Назван в честь профессора астрономии Варшавского университета М. Каменьского, родившегося в Могилевской губернии
1959	Карбышев	12,7	2,315	0,134	6,2		Назван в честь генерал-лейтенанта инженерных войск Д. М. Карбышева. Под его руководством была реконструирована Брестская крепость. Начало войны встретил в г. Гродно. Погиб в фашистском плену в 1945 г.
2108	Отто Шмидт	11,5	2,436	0,006	10,8	16	Назван в честь известного ученого О. Ю. Шмидта, родившегося в г. Могилеве
2132	Жуков	11,2	2,780	0,082	2,1		Назван в честь полководца Г. К. Жукова, координировавшего взаимодействие фронтов при освобождении Белоруссии от фашистских захватчиков в 1944 г.
2170	Белоруссия	13,5	2,405	0,181	2,08		Назван в честь Белорусской ССР. Открыт на Крымской астрофизической обсерватории в 1971 г.
2251	Тихов	11,6	2,710	0,149	7,44	16	Назван в честь астронома Г. А. Тихова, родившегося в местечке Смолевичи под Минском
2296	Хатынь	11,4	3,183	0,166	1,25		Увековечивает память жителей д. Хатынь Минской обл. и других белорусских сел, уничтоженных фашистами вместе с населением в 1941–1944 гг.

Окончание прил. 11

НОМЕР АСТЕРОИДА	НАЗВАНИЕ	ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА*, м	БОЛЬШАЯ ПОЛУОСЬ ОРБИТЫ, а, е.	ЭКСЦЕНТРИСИТЕТ ОРБИТЫ	НАКЛОН ОРБИТЫ, градусы	ДИАМЕТР, км	ПРОИСХОЖДЕНИЕ НАЗВАНИЯ
2426	Симонов	11,6	2,910	0,116	8,49	18	Назван в честь писателя и поэта К. М. Симонова. Прах поэта, согласно завещанию, развеян над Буйновичским полем под Могилевом
2445	Блажко	12,9	2,268	0,148	6,07	9	Назван в честь астронома С. Н. Блажко, родившегося в г.п. Хотимске Могилевской обл.
2540	Гастелло	13,2	2,197	0,052	1,27		Назван в честь белоруса, летчика Н. Ф. Гастелло, погибшего в первые дни Великой Отечественной войны под местечком Радошковичи Минской обл.
2981	Шагал	11,8	3,145	0,170	0,84		Назван в честь известного живописца и графика М. Шагала, родившегося в г. Витебске
3012	Минск	11,1	3,226	0,060	18,3		Назван в честь столицы Республики Беларусь
3113	Чижевский	13,2	2,428	0,075	5,0		Назван в честь основоположника космического естествознания А. Л. Чижевского, родившегося в местечке Цехановец Гродненской обл.
3232	Брест	11,8	3,022	0,081	9,8		Назван в честь областного центра Республики Беларусь
3283	Скорина	12,9	2,396	0,101	6,9		Назван в честь первого белорусского книгопечатника, просветителя и философа Франциска Скорины
3482	Лесная	12,3	2,782	0,169	4,7	14	Назван в честь д. Лесная Могилевской обл., вблизи которой русская армия под командованием Петра Первого одержала победу в бою со шведами
3501	Олегия	11,7	2,921	0,090	5,0	17	Назван в честь популяризатора астрономии О. Н. Коротцева, родившегося в г. Славгороде Могилевской обл.

* При условии нахождения астероида на одинаковом расстоянии от Солнца и Земли, равном 1 а. е.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

МЕТЕОРИТЫ, НАЙДЕННЫЕ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

НАЗВАНИЕ МЕТЕОРИТА	МЕСТО НАХОДКИ	ВРЕМЯ НАХОДКИ ИЛИ ПАДЕНИЯ	СОСТАВ И КЛАСС	МАССА, кг
Брагин	Брагинский р-н Гомельской обл. (находка)	1807—1968 гг.	Железо-каменный, палласит	800
Греск	Слуцкий р-н Минской обл. (находка)	1954 г.	Гексаэдрит	300
Жмень (Цмень)	Столинский р-н Брестской обл. (падение)	Авг. 1858 г.	Каменный, говардит	0,246
Забродье	Вилейский р-н Минской обл. (падение)	22 сент. 1893 г.	Каменный, хондрит	3,155
Ружаны	Пружанский р-н Брестской обл. (падение)	7 дек. 1894 г.	—	—
Черный Бор	Быховский р-н Могилевской обл. (находка)	1965 г.	Каменный, хондрит	8

- Примечания:
1. Если метеорит найден сразу после пролета болида, говорят о падении метеорита; если найден метеорит с неизвестной датой падения, говорят о находке.
 2. О составе, форме и массе метеорита Ружаны ничего не известно.
 3. Части метеорита Брагин находили с 1807 по 1968 г.

КРУПНЕЙШИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ МИРА

НАЗВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА	МЕСТО- НАХОЖДЕНИЕ	ГОСУДАРСТВО- ВЛАДЕЛЕЦ	ДИАМЕТР ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА, м	ВЫСОТА НАД УРОВНЕМ МОРЯ, м	ГОД ВВЕДЕНИЯ В СТРОЙ
ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФЛЕКТОРЫ					
VLT	Серро-Параналь, Чили	Страны Зап. Европы	8,2×4	2635	1998– 2001
Телескопы «Кек-1» и «Кек-2»	г. Мауна-Кеа, Гавайские о-ва	США	9,8×2	4150	1991, 1996
Большой Биноку- лярный Телескоп — LBT	Маунт-Грэхем, Аризона, США	США	8,4×2	3170	2004
Телескоп им. В. Хобби и Р. Эберли — HET	Маунт-Фоулкес, Техас, США	США	9,1	2002	1997
Большой Южно- африканский Телескоп — SALT	Сатерленд, ЮАР	США	9,1	1798	2003
«Субару»	г. Мауна-Кеа, Гавайские о-ва	Япония	8,2	4139	1999
«Джемини» (северный)	г. Мауна-Кеа, Гавайские о-ва	США	8,1	4214	1999
«Джемини» (южный)	Серро-Пачон, Чили	США	8,1	2715	2001
«Магеллан-1» и «Магеллан-2»	Лас-Кампанас, Чили	США	6,5×2	2300	1999, 2002
Большой Телескоп Азимутальный — БТА	г. Пастухова, Сев. Кавказ	Россия	6,0	2070	1975
Большой Зенитный Телескоп — LZT	Мэпл-Ридж, Британская Колумбия	Канада	6,0	395	2000
Телескоп им. Джор- джа Хейла	Маунт-Паломар, Калифорния, США	США	5,1	1706	1948
Телескоп им. Уильяма Гершеля — WHT	Ла-Пальма, Канарские о-ва	Англия	4,2	2332	1987

НАЗВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА	МЕСТО- НАХОЖДЕНИЕ	ГОСУДАРСТВО- ВЛАДЕЛЕЦ	ДИАМЕТР ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА, м	ВЫСОТА НАД УРОВНЕМ МОРЯ, м	ГОД ВВЕДЕНИЯ В СТРОЙ
ТЕЛЕСКОПЫ-РЕФРАКТОРЫ					
40-дюймовый Йеркский рефрактор	Вильямс-Бэй, Веллингтон, США	США	1,02	334	1897
36-дюймовый Ликский рефрактор	Маунт-Гамильтон, Калифорния, США	США	0,90	1290	1888
33-дюймовый Ме- донский рефрактор	Медон, Франция	Франция	0,83	162	1889
Потсдамский рефрактор	Потсдам, Германия	Германия	0,80	107	1899
30-дюймовый рефрактор им. Вильяма Тау	Питтсбург, Пенсильвания, США	США	0,76	380	1985
ТЕЛЕСКОПЫ СИСТЕМЫ ШМИДТА					
Таутенбургский 2-метровый телескоп	Таутенбург, Германия	Германия	1,34 (2,00)	331	1960
48-дюймовый «Большой Шмидт»	Маунт-Паломар, Калифорния, США	США	1,24 (1,83)	1706	1948
Британский телескоп Шмидта	Сайдинг-Спринг, Австралия	Англия	1,24 (1,83)	1145	1973
Телескоп Шмидта Кисов- ской обсерватории	Кисо, Япония	Япония	1,05 (1,50)	1130	1975
Телескоп Шмидта Бюраканской обсерватории	г. Арагац, Армения	Армения	1,00 (1,50)	1450	1961
КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ					
Космический телескоп Хаббла — КТХ	Орбита искусственного спутника Земли	США	2,4	—	1990

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О СОЛНЦЕ

ПАРАМЕТР	ВЕЛИЧИНА
Параллакс Солнца при среднем расстоянии Земли от Солнца, "	8,794
Среднее расстояние до Солнца, км	149 600 000
Диаметр Солнца, км	1 392 000
Видимый угловой диаметр (средний)	31'59"
Масса, кг	$1,989 \cdot 10^{30}$
Средняя плотность, кг/м ³	1408
Ускорение силы тяжести на поверхности, м/с ²	273,8
Вторая космическая скорость, км/с	617,7
Сидерический период вращения точки экватора, сут	25,380
Синодический период вращения точки экватора, сут	27,275
Наклон экватора к эклиптике	7°15'
Светимость Солнца, Дж/с	$3,88 \cdot 10^{26}$
Эффективная температура поверхности Солнца, К	5807
Абсолютная фотовизуальная звездная величина	+4,76 ^m
Скорость движения Солнца относительно окружающих звезд, км/с	19,5
Апекс движения Солнца	$\alpha = 270^\circ = 18^\circ 00' \delta = +30^\circ$
Расстояние Солнца от центра Галактики, кпк	10
Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики, км/с	250
Период обращения Солнца вокруг центра Галактики, млн лет	200–250
Средняя продолжительность полного цикла солнечной активности, лет	22,11

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ЯРКИХ ЗВЕЗД

ОБОЗНАЧЕНИЕ В СОЗВЕЗДИИ	НАЗВАНИЕ ЗВЕЗДЫ	ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ		БЛЕСК, m	СПЕКТР	ТЕМПЕРАТУРА, К	ПАРАЛЛАКС	СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ	ЛУЧЕВАЯ СКОРОСТЬ, км/с
		α	δ						
α Андромеды	Альферац**	00 ^h 08 ^m	+29° 05'	2,02	B 8	13 600	0,025"	0,209"	-11,7
α Эридана	Ахернар	01 ^h 36 ^m	-57° 28'	0,47	B 5	15 000	0,034"	0,083"	+19
α Овна	Гамаль	02 ^h 07 ^m	+23° 28'	2,00	K 2	4000	0,043"	0,241"	-14,4
α Малой Медведицы	Полярная*	02 ^h 32 ^m	+89° 16'	1,94	F 7	5800	0,003"	0,046"	-16,4
α Персея	Мирфак	03 ^h 24 ^m	+49° 52'	1,79	F 5	6700	0,028"	0,035"	-2,8
α Тельца	Альдебаран*	04 ^h 36 ^m	+16° 31'	0,75	K 5	3300	0,049"	0,202"	+54,1
β Ориона	Ригель**	05 ^h 15 ^m	-8° 12'	1,12	B 8	11 800	0,009"	0,001"	+20,7
α Возничего	Капелла	05 ^h 17 ^m	+46° 00'	0,08	G 5	5000	0,074"	0,435"	+29,1
γ Ориона	Беллатрикс	05 ^h 25 ^m	+6° 21'	1,64	B 2	17 100	0,023"	0,015"	+18,2
α Ориона	Бетельгейзе*	05 ^h 55 ^m	+7° 24'	0,4–1,3	M 1	2900	0,005"	0,028"	+21,8
α Киля	Канопус	06 ^h 23 ^m	-52° 41'	-0,73	F 0	9100	0,018"	0,022"	+20
α Большого Пса	Сириус**	06 ^h 45 ^m	-16° 43'	-1,46	A 1	11 200	0,376"	1,324"	-7,6
α Близнецов	Кастор**	07 ^h 35 ^m	+31° 53'	1,58	A 2	10 600	0,070"	0,198"	+4,0
α Малого Пса	Процион	07 ^h 39 ^m	+5° 14'	0,38	F 5	6800	0,087"	1,250"	-3,6
β Близнецов	Поллукс**	07 ^h 45 ^m	+28° 02'	1,14	K 0	4400	0,093"	0,625"	+3,5
α Гидры	Альфард	09 ^h 28 ^m	-8° 40'	1,98	K 3	3500	0,020"	0,034"	-4,6
α Льва	Регул**	10 ^h 08 ^m	+11° 58'	1,35	B 7	13 600	0,040"	0,248"	+5,0

Окончание прил. 15

ОБОЗНАЧЕНИЕ В СОЗВЕЗДИИ	НАЗВАНИЕ ЗВЕЗДЫ	ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ		БЛЕСК, <i>m</i>	СПЕКТР	ТЕМПЕРАТУРА, К	ПАРАЛЛАКС	СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ	ЛУЧЕВАЯ СКОРОСТЬ, км/с
		α	δ						
α Большой Медведицы	Дубхе**	11° 04 ^m	+61° 45'	1,79	K 0	4200	0,031"	0,138"	-9,0
β Льва	Денебола	11° 49 ^m	+14° 34'	2,14	A 3	9900	0,076"	0,511"	-0,6
ζ Большой Медведицы	Мицар**	13° 22 ^m	+55° 18'	2,4	A 2	10 000	0,037"	0,127"	-5,6
α Девы	Слика	13° 25 ^m	-11° 10'	0,98	B 1	17 600	0,019"	0,054"	+3,0
α Волопаса	Арктур	14° 16 ^m	+19° 11'	-0,04	K 1	3900	0,091"	2,284"	-5,3
α Центавра	Толиман	14° 38 ^m	-60° 44'	0,33	G 2	5400	0,746"	3,674"	+22,2
α Северной Короны	Гемма*	15° 35 ^m	+26° 43'	2,23	A 0	11 600	0,044"	0,154"	+1,6
α Скорпиона	Антарес**	16° 29 ^m	-26° 26'	0,9-1,8	M 1	2900	0,019"	0,029"	-3,2
α Змееносца	Рас Альхаг	17° 35 ^m	+21° 34'	2,08	A 5	9100	0,056"	0,260"	+12,7
α Лиры	Вега	18° 37 ^m	+38° 47'	0,03	A 0	11 300	0,123"	0,345"	-13,9
α Орла	Альтаир**	19° 51 ^m	+8° 52'	0,77	A 7	8400	0,198"	0,658"	-26,3
α Лебедя	Денеб	20° 41 ^m	+45° 17'	1,25	A 2	9900	0,004"	0,003"	-4,6
α Южной Рыбы	Фомальгаут	22° 58 ^m	-29° 37'	1,16	A 3	9800	0,147"	0,367"	+6,3

* — переменная звезда.

** — двойная звезда.

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

АСТРОНОМЫ — ВЫХОДЦЫ ИЗ БЕЛАРУСИ

Блажко Сергей Николаевич (17.11.1870—11.02.1956). Родился в г. п. Хотимске Могилевской области. После окончания Московского университета работал в университетской обсерватории и преподавал курсы общей и практической астрономии. Профессор, заслуженный деятель науки РСФСР, член-корреспондент АН СССР. Возглавил Комиссию по изучению переменных звезд при Астрономическом совете АН СССР. Основные научные труды посвящены исследованию периодов и формы кривой блеска ряда короткопериодических переменных звезд типа RR Лиры. Эти явления названы «эффектом Блажко». Одним из первых подробно исследовал U Цефея в фазе нормальной яркости и в минимуме блеска. Предложил новый метод обнаружения малых планет. Один из кратеров на Луне назван его именем.

Гаврилов Игорь Владимирович (17.05.1928—19.10.1982). Родился в местечке Рубежовичи Минской области. Окончил физико-математический факультет Вильнюсского университета. Работал в Главной астрономической обсерватории АН УССР. Основные научные труды посвящены селенодезии и фотографической астрометрии. Под его руководством составлены первые в СССР селенодезические каталоги положений точек видимой стороны Луны, имевшие большое значение для программ изучения Луны с помощью космических аппаратов и картографирований лунной поверхности. Выполнил цикл исследований по определению параметров геометрической фигуры Луны. Его именем назван один из кратеров на Луне.

Дубяго Дмитрий Иванович (03.10.1849—22.10.1918). Родился в селе Соино Мстиславского уезда (ныне Смоленская обл., Россия). Окончил Петербургский университет. Работал директором основанной им обсерватории им. В. П. Энгельгардта около г. Казани, ректором Казанского университета. Основные научные труды посвящены теоретической астрономии и гравиметрии. Исследовал орбиту спутника Нептуна — Тритона. Создал теорию движения астероида Диана. Его именем назван кратер на Луне.

Жонголович Иван Данилович (20.02.1892—29.07.1981). Родился в г. Гродно. Окончил Петроградский университет. Заслуженный деятель науки РСФСР. Преподавал в Военно-морской академии им. К. Е. Ворошилова, работал директором Института теоретической астрономии АН СССР. Участвовал в экспедициях по изучению Курской магнитной аномалии, по исследованию Северного Ледовитого океана, в высокоширотных экспедициях в районы Арктики и др. Основные научные труды посвящены теоретической, практической и эфемеридной астрономии, изучению фигуры и гравитационного поля Земли, спутниковой геодезии, геофизике. Разработал способ определения центра массы Земли по наблюдениям искусственных спутников Земли. Его именем названа малая планета.

Зельдович Яков Борисович (08.03.1914—02.12.1987). Родился в г. Минске. Академик АН СССР. Работал в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга. Один из создателей релятивистской астрофизики — новой области науки, в которой общая теория относительности применяется к астрофизическим объектам. Разработал теорию строения сверхмассивных звезд. Детально изучил свойства черных дыр и процессы, протекающие в их окрестностях.

Каменьски Михаил (24.11.1879—18.04.1973). Родился в Могилевской обл. Член-корреспондент Польской АН; создатель польской кометной школы. Окончил Петербургский университет. Работал в Пулковской обсерватории, астрономом военного порта во Владивостоке. В 1922 г. переехал в Польшу. Был профессором астрономии и директором обсерватории Варшавского университета. Основные научные труды посвящены кометной астрономии (кометы Вольфа 1 и Галлея). Разработал новый метод, оценивающий планетные возмущения кометной орбиты, и применил его для

изучения движения кометы Галлея на большом интервале времени. Выполнил ряд исследований по проблемам земного магнетизма, астрометрии и метеорологии.

Липский Юрий Наумович (22.11.1909—24.01.1978). Родился в г. Дубровно Витебской обл. Окончил Московский университет. Работал в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга и преподавал в Московском университете. Основные научные труды посвящены исследованию Луны и планет. Разработал новые методы спектрофотометрических исследований. Принимал активное участие в исследовании Луны с помощью космических летательных аппаратов. Руководил созданием первой карты обратной стороны Луны и первого в мире глобуса Луны. Под его руководством подготовлены «Каталог кратеров Меркурия и Луны», «Каталог кратеров Марса, Меркурия и Луны». Его именем названы кратеры на Марсе и Луне.

Прейпич Николай Христофорович (27.10.1896—23.02.1946). Родился в Режице (ныне Витебской обл.). Окончил Саратовский университет. Был руководителем лаборатории Главной палаты мер и весов (позднее ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева). Профессор. Научные работы посвящены преимущественно астрономическому определению времени. Разработал методику всех основных операций по определению точного времени, приему ритмических радиосигналов, хранению времени.

Тихов Гавриил Адрианович (01.05.1875—25.01.1960). Родился в г. Смоленичи Минской обл. Окончил Московский университет. Академик АН КазССР. Возглавлял астрофизическое отделение в Государственном естественнаучном институте им. П. Ф. Лесгафта в Ленинграде, заведовал сектором астроботаники АН КазССР. Основные научные труды посвящены фотометрии и калориметрии звезд и планет, атмосферной оптике. Предложил 2 метода обнаружения дисперсии света в мировом пространстве — по разности фаз кривых блеска переменных звезд. Во время великого противостояния Марса (1909 г.) получил его первые фотографии в различных участках спектра. Занимался изучением физической природы Марса, оптических свойств земной атмосферы. Его именем названы кратеры на Марсе и Луне.

Хайкин Семен Эммануилович (21.08.1901—30.07.1986). Родился в г. Минске. Окончил Московский университет. Профессор. Работал в Московском университете, был заведующим сектором радиоастрономии лаборатории колебаний Главной астрономической обсерватории АН СССР. Основоположник советской экспериментальной радиоастрономии. Разработал ряд приборов радиоастрономической аппаратуры и методов наблюдений, с помощью которых была обнаружена и изучена сильная круговая поляризация излучения активных областей Солнца, детально исследованы «радиопятна». Руководил разработкой проекта радиотелескопа РАТАН-600.

Цераский Витольд Карлович (09.05.1849—29.05.1925). Родился в г. Слуцке Минской области. Окончил Московский университет. Член-корреспондент Петербургской АН. Один из пионеров применения фотографии в астрономии. Составил фотометрические каталоги ряда звезд. Провел важные эксперименты по определению температуры Солнца. Организовал в Московской обсерватории систематические поиски и изучение переменных звезд фотографическим путем. Предложил аналитический способ определения координат метеорного радианта и метод определения угловой скорости метеоров. Его именем названы кратеры на Марсе и Луне.

Шмидт Отто Юльевич (30.08.1891—07.09.1956). Родился в г. Могилеве. Окончил Киевский университет. Академик АН СССР и АН УССР. Возглавлял многие экспедиции по исследованию Арктики. По его инициативе был основан Институт теоретической геофизики АН СССР, который О. Ю. Шмидт возглавлял с 1937 по 1949 г. Научные труды в области математики, геофизики, астрономии. Основные астрономические исследования посвящены космогонии Солнечной системы. Положил начало многочисленным исследованиям по развитию теории образования Земли и планет из твердых частиц вращающегося газопылевого облака, захваченного Солнцем. Его именем названы кратеры на Марсе и Луне.

Содержание

Предисловие	3
РАЗДЕЛ I. Введение	4
§ 1. Предмет астрономии	4
РАЗДЕЛ II. Основы практической астрономии	13
§ 2. Звездное небо	13
§ 3. Небесные координаты	19
§ 4. Определение географической широты	24
§ 5. Измерение времени. Определение географической долготы	26
РАЗДЕЛ III. Движение небесных тел	35
§ 6. Гелиоцентрическая система Коперника	35
§ 7. Видимое движение Солнца и Луны	42
§ 8. Законы Кеплера	51
§ 9. Закон всемирного тяготения Ньютона	53
§ 10. Определение размеров небесных тел и расстояний до них в Солнечной системе	59
§ 11. Движение космических аппаратов	64
РАЗДЕЛ IV. Сравнительная планетология	71
§ 12. Общие характеристики планет. Происхождение Солнечной системы	71
§ 13. Планеты земной группы	76
§ 14. Планеты-гиганты. Плутон	84
§ 15. Луна. Спутники планет	92
§ 16. Малые тела Солнечной системы	100
РАЗДЕЛ V. Методы исследования небесных тел	109
§ 17. Исследование электромагнитного излучения небесных тел	109
§ 18. Спектральный анализ в астрономии	119
РАЗДЕЛ VI. Солнце — дневная звезда	126
§ 19. Солнце как звезда	126
§ 20. Строение солнечной атмосферы	130
§ 21. Влияние Солнца на жизнь Земли	135
РАЗДЕЛ VII. Звезды	139
§ 22. Основные характеристики звезд. Светимость	139
§ 23. Температура и размеры звезд	143
§ 24. Двойные звезды. Масса звезд	148
§ 25. Эволюция звезд	152
§ 26. Нестационарные звезды	157
РАЗДЕЛ VIII. Строение и эволюция Вселенной	165
§ 27. Наша Галактика	165
§ 28. Межзвездные газ и пыль	171
§ 29. Звездные системы — галактики	176
§ 30. Расширяющаяся Вселенная	186
§ 31. Жизнь и разум во Вселенной	192
Приложения	199

СТРОЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

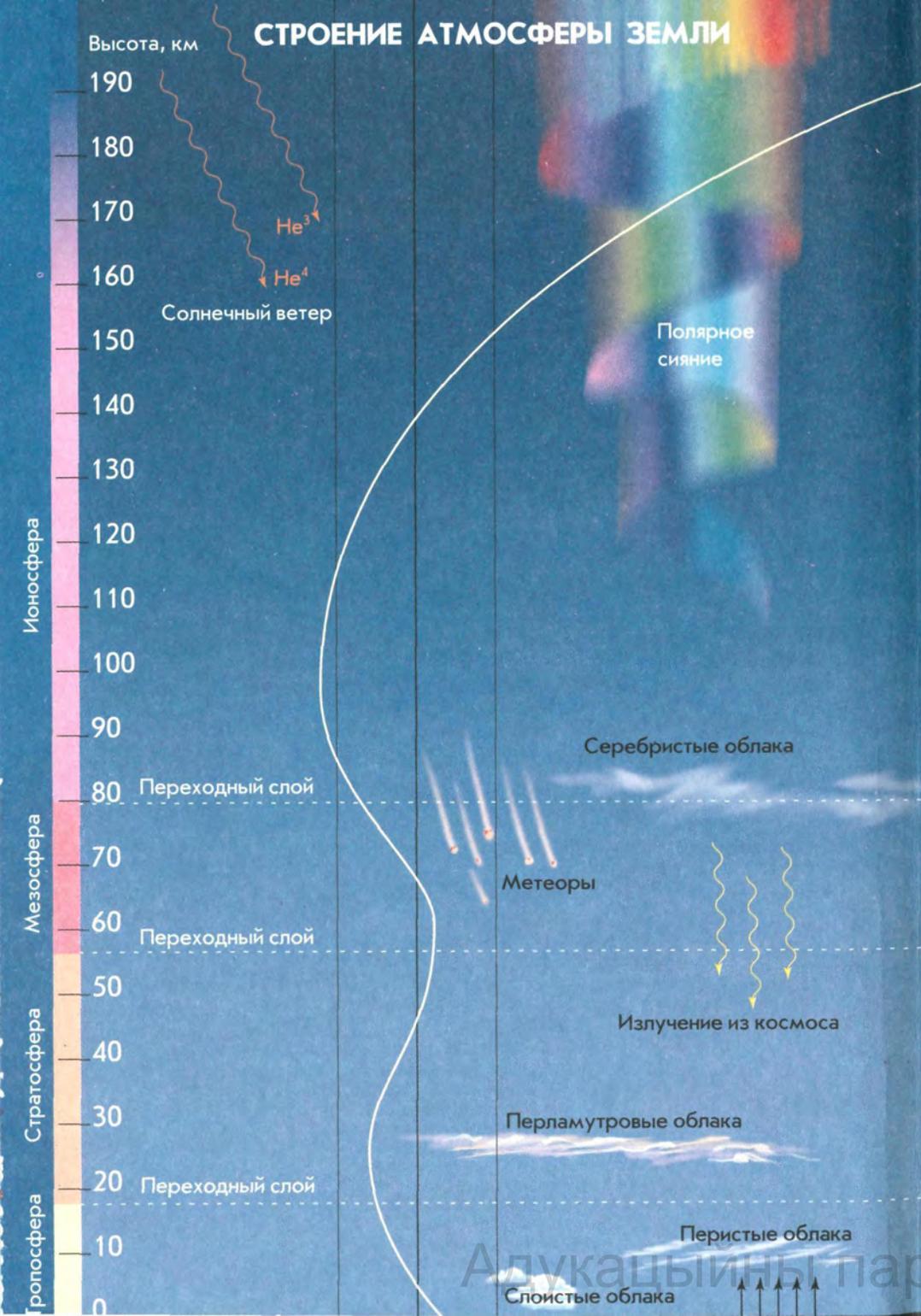


ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА — РЕССЕЛА

