

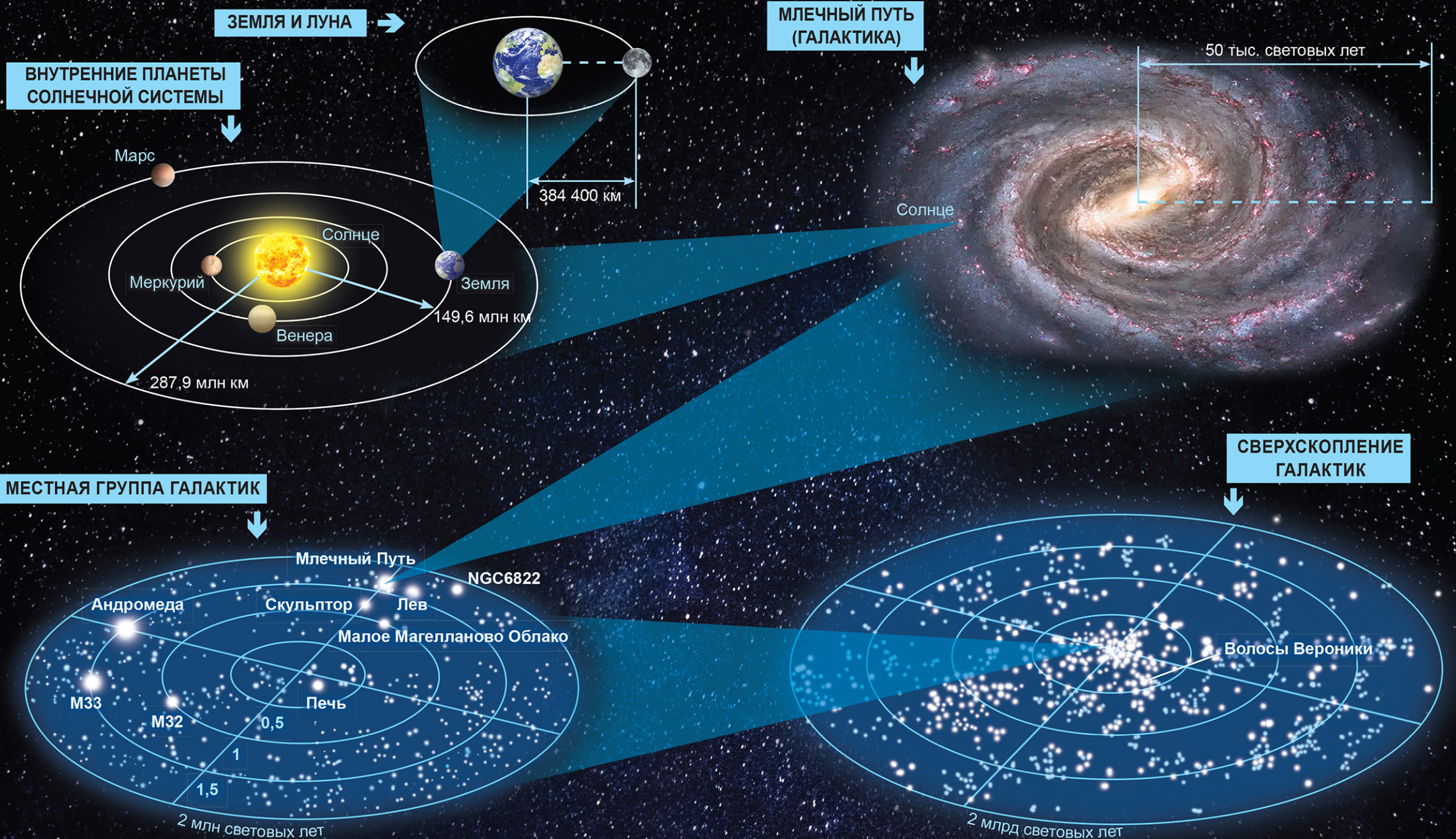
И. В. Галузо В. А. Голубев А. А. Шимбалеv

# Астрономия

# 11

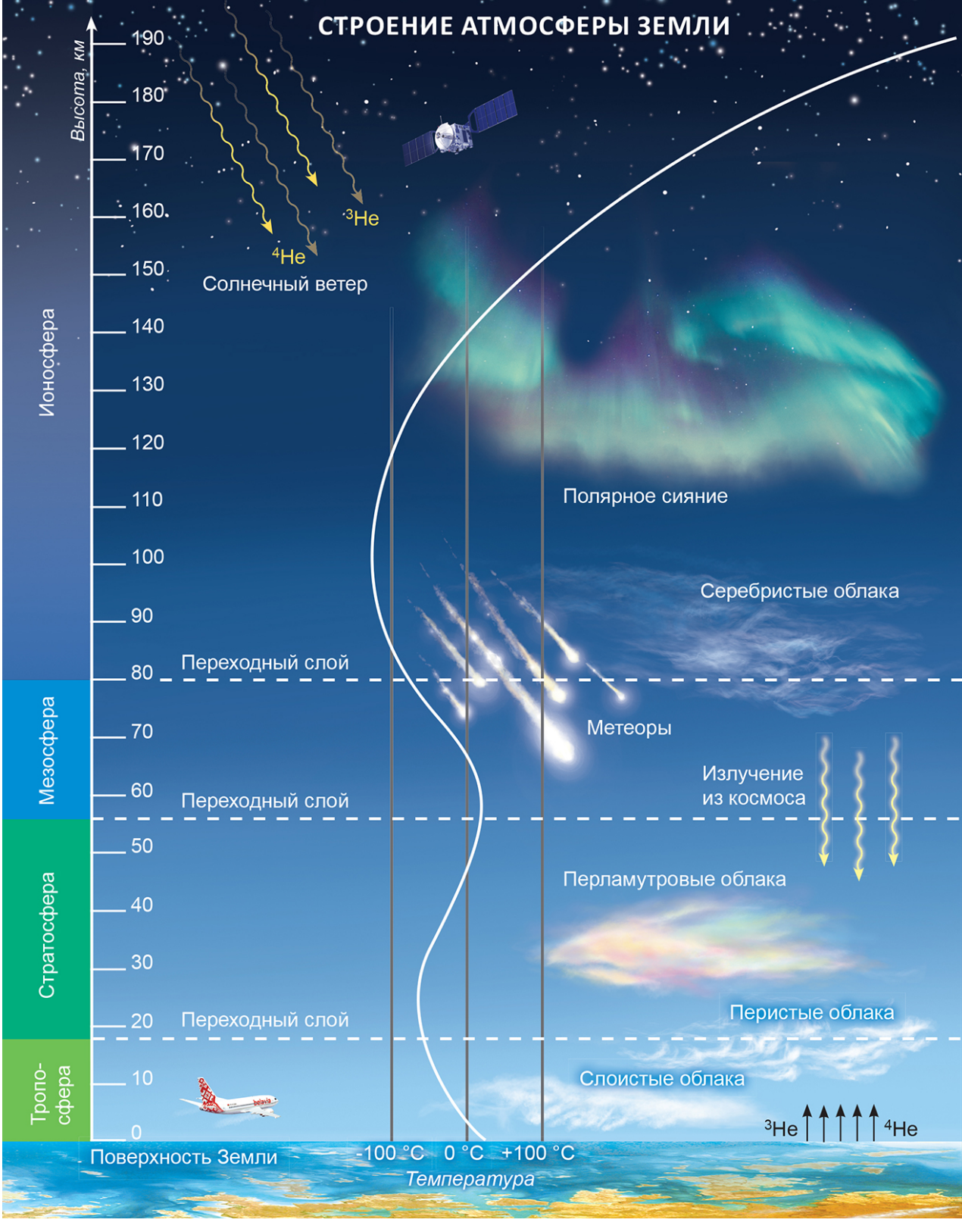


# СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

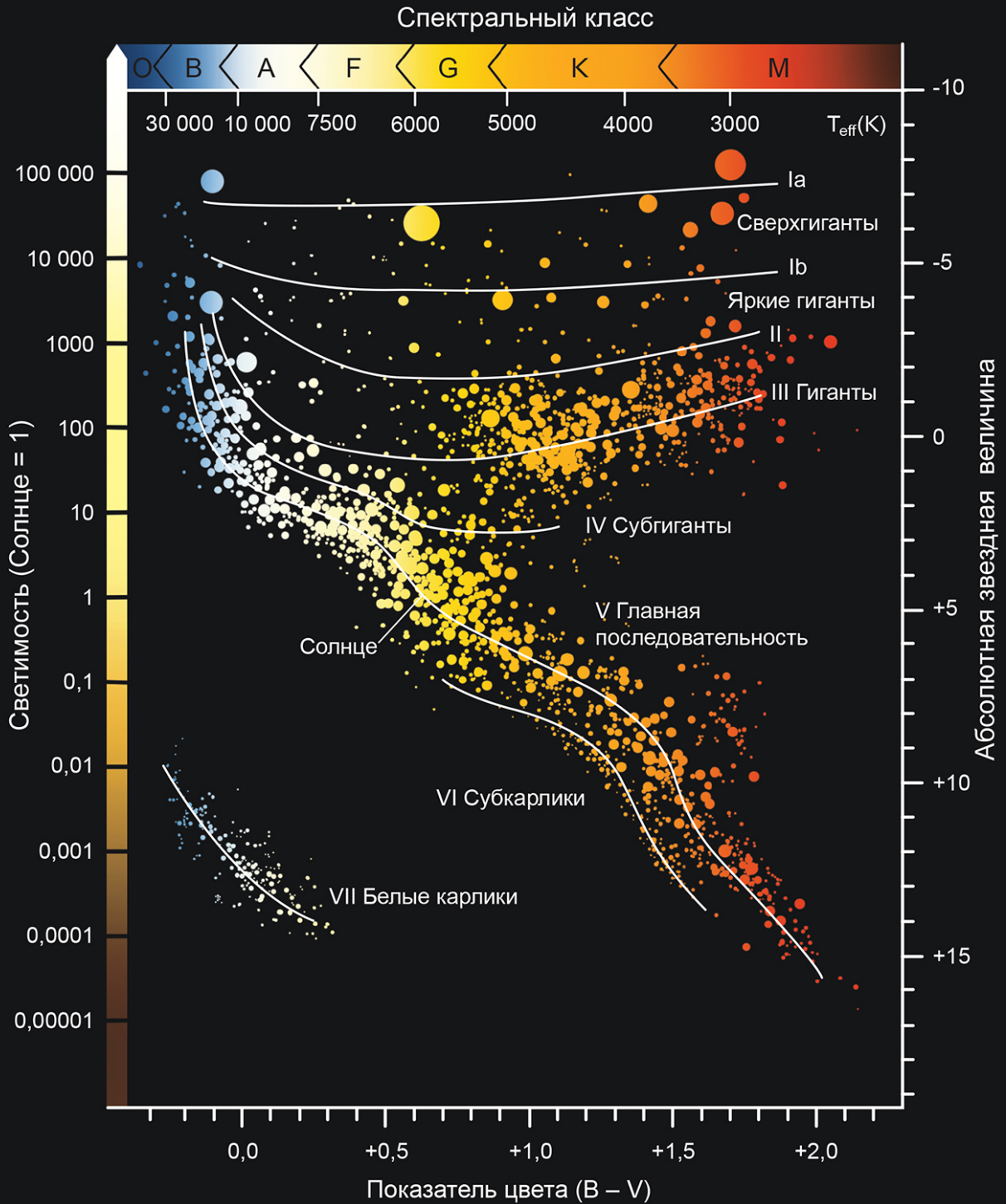


1 световой год — около 9460 млрд км

# СТРОЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ



# ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА — РАССЕЛА



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

# Астрономия

Учебник для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения  
(базовый и повышенный уровни)

*Утверждено  
Министерством образования  
Республики Беларусь*

Минск «Народная асвета» 2021

Правообладатель Народная асвета

УДК 52(075.3=161.1)  
ББК 22.6я721  
Г16

Рецензенты:

кафедра общей физики учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (доцент кафедры, кандидат физико-математических наук *А. В. Лавиш*); учитель физики и астрономии высшей квалификационной категории государственного учреждения образования «Средняя школа № 49 г. Минска» *Н. А. Шешко*

**Галузо, И. В.**

Г16 Астрономия : учебник для 11-го класса учреждений общего среднего образования с русским языком обучения (базовый и повышенный уровни) / И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалеv. — Минск : Народная асвета, 2021. — 207 с. : ил.

ISBN 978-985-03-3642-2.

Настоящее издание уточнено в соответствии с новыми открытиями и достижениями астрономии. К ряду иллюстраций добавлены QR-коды, не требующие обязательного просмотра и изучения, но позволяющие акцентировать внимание на астрономические явления, удовлетворить интеллектуальные и эстетические запросы учащихся, расширить информативные возможности учебника открытыми материалами из Интернета.

УДК 52(075.3 = 161.1)  
ББК 22.6я721

ISBN 978-985-03-3642-2

© Галузо И. В., Голубев В. А., Шимбалеv А. А., 2021  
© Оформление. УП «Народная асвета», 2021

Правообладатель Народная асвета

## Предисловие

Астрономия — это древнейшая наука, которая изучает объекты и явления, наблюдаемые во Вселенной. Тайны неба призывают человеческий разум к размышлению и исследованию физического мира. Этот безграничный и постоянно меняющийся мир мы называем Вселенной. Понятие «Вселенная» включает в себя и Землю с планетами Солнечной системы, и Солнце, и другие звезды, галактики, и среду, в которой они находятся. Наша планета Земля, а значит, и мы вместе с ней являемся частью этой Вселенной.

Люди всегда стремились понять природу наблюдаемых объектов и явлений, поэтому строили картину окружающего их мира в соответствии с теми данными, которыми располагали. Постепенно появлялись новые факты и теории, открывались возможности проверки этих идей через наблюдения и измерения с использованием достижений смежных с астрономией наук (особенно физики), благодаря чему картина взглядов на мир уточнялась и изменялась.

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

Наблюдения ведутся не только в различных диапазонах электромагнитного излучения: радиодиапазоне, инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-лучах, но и путем изучения гравитационных волн. Открыты новые объекты (пульсары, коричневые карлики), 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, ответить на ряд вопросов: есть ли жизнь на других планетах, как космические факторы влияют на существование жизни на Земле и др.

Знакомство с астрономией в школе поможет получить необходимые сведения и представления об этой древней, но вечно юной и развивающейся науке.



# Раздел I

## Введение

### § 1. Предмет астрономии

**1. Что изучает астрономия.** Люди издавна пытались разгадать тайну окружающего мира, определить свое место в мировом порядке Вселенной. Человек пристально наблюдал за восходами и заходами Солнца, за порядком смены фаз Луны, за движением планет среди звезд. Люди пытались понять закономерность небесных явлений и разгадать их смысл. Из этих размышлений через мифологию и философию постепенно рождалось естественнонаучное знание.

**Астрономия** (от греч. *αστρον* — светило и *νομος* — 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. Восемь больших планет (среди них Земля), карликовые планеты, 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 вопросы устойчивости Солнечной системы, вероятности столкновения Земли с астероидами и ядрами комет. Не теряет актуальность открытие новых объектов Солнечной системы и изучение их движения. Важно знание процессов, происходящих на Солнце, и прогнозирование их дальнейшего развития, так как от них зависит существование всего живого на Земле. Изучение эволюции других звезд и сравнение их с Солнцем помогают познать этапы развития нашего Светила. Исследования нашей звездной Галактики



и других галактик позволяют определить их типы, эволюцию, место, занимаемое в них 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 вся наблюдаемая 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 пещер рисовали то, что видели. Наблюдение звездного неба формировало самого человека как мыслящее существо. По мере развития человеческого общества с возникновением земледелия появилась потребность в счете времени, создании календаря. Подмеченные закономерности в движении небесных светил, изменении вида Луны позволили древнему человеку найти и определить единицы счета времени (сутки, месяц, год) и создать календарь, отражающий всю культурную и хозяйственную жизнь общества. Так, в Древнем Египте по появлению на предутреннем небе ярчайшей звезды Сириус жрецы предсказывали периоды весенних разливов Нила, определявших сроки земледельческих работ (рис. 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 мореплавание, в особенности до изобретения компаса, особое внимание уделялось способам ориентирования по звездам.

В самых ранних письменных документах (3—2-е тысячелетия до н. э.) древнейших цивилизаций Египта, Вавилона, Китая, Индии и Америки имеются следы астрономической деятельности. В различных местах Земли находят 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, что позволяет считать их древними астрономическими наблюдательными площадками. Подобные каменные солнечно-лунные указатели найдены в Южной Англии — Стоунхендж (рис. 2), в России на Южном Урале — Аркаим и других местах.



Рис. 1. Наблюдение предутреннего восхода Сириуса в Древнем Египте



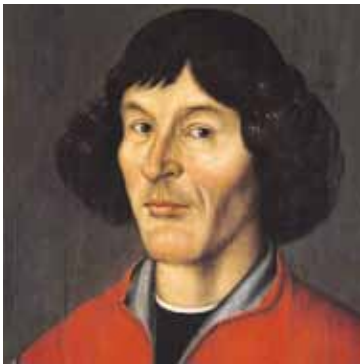
Рис. 2. Стоунхендж — древняя астрономическая наблюдательная площадка

**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 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**.

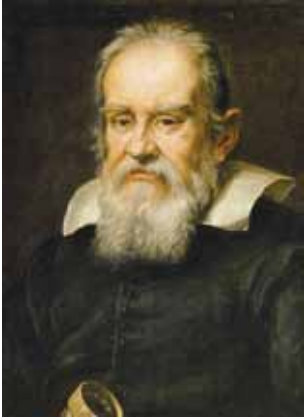
Гелиоцентрическая система мира Николая Коперника, изложенная в труде «Об обращениях небесных сфер» (1543 г.), дала ключ к познанию Вселенной. Однако веками укоренившееся мнение о неподвижной Земле как центре Вселенной долго не уступало место новому учению. Окончательно утвердил теорию Коперника, получив 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 и кратеры, открыл четыре спутника Юпитера. Обнаруженная им смена фаз Венеры свидетельствовала о том, что эта планета обращается вокруг Солнца, а не вокруг Земли.

Иоганн Кеплер имел доступ к высоким по точности результатам наблюдений планет, проводившихся астрономом Тихо Браге. Особое внимание Кеплера привлек Марс, в движении которого обнаружилось значительные отступления от траекторий, соответствовавших прежним теориям. После длительных вычислений ученому удалось найти три закона движения планет, которые 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 предварительно вычислить с очень высокой точностью почти все движения, наблюдаемые как в Солнечной системе, так и в Галактике.



Николай Коперник  
(1473—1543)

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-



Галилео Галилей  
(1564—1642)



Иоганн Кеплер  
(1571—1630)



Исаак Ньютон  
(1643—1727)

рефлектор. С помощью модернизированных оптических приборов были сделаны новые открытия, причем относящиеся не только к телам Солнечной системы, но и к миру слабых и далеких звезд. В 1655 г. Х. Гойгенс разглядел кольца Сатурна и открыл его спутник Титан. 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**. В конце XX в. были обнаружены планеты у соседних звезд, что способствовало развитию **внесолнечной планетологии**.

Огромные и все увеличивающиеся возможности изучения физической природы и химического состава звезд предоставило открытие спектрального анализа (1859—1862). Детальные исследования темных линий в спектре Солнца, выполненные немецким ученым Йозефом Фраунгофером, стали первым шагом в изучении спектральной информации о небесных телах. Быстрое развитие лабораторной спектроскопии и теории спектров атомов и ионов на основе квантовой механики привело к развитию физики звезд и в первую очередь физики звездных атмосфер.

В 60-е гг. XIX в. спектральный анализ становится основным методом в изучении физической природы небесных тел. Раздел астрономии, изучающий физические явления и химические процессы,



Михаил Васильевич  
Ломоносов (1711—1765)

происходящие в небесных телах, их системах и в космическом пространстве, называются **астрофизикой**.

Дальнейшее развитие астрономии связано с усовершенствованием техники наблюдений. Фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи, ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью) повысили точность и чувствительность фотометрических наблюдений и еще более расширили спектральный диапазон регистрируемых излучений. 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. Интенсивно этот раздел астрономии стал развиваться в первой половине XX в., после разработки общей теории относительности Альбертом Эйнштейном.

**Космогония** — раздел астрономии, изучающий происхождение и развитие небесных тел и их систем. При исследовании звезд и галактик используются результаты наблюдений многих сходных объектов, возникающих в разное время и находящихся на разных стадиях развития.

Космогонические гипотезы XVIII—XIX вв. касались главным образом происхождения Солнечной системы. Затем развитие физики и астрофизики позволило приступить к серьезному изучению происхождения и развития звезд. В 60-х гг. XX в. началось исследование происхождения и развития галактик, природа которых была выяснена только в 20-х гг. XX в.

В конце XX — начале XXI вв. развился новый раздел — **гравитационно-волновая астрономия**, — изучающий космические объекты путем исследования их гравитационного излучения при помощи регистрации его прямого воздействия на детекторы гравитационных волн. Методы этого раздела позволяют больше узнать о нейтронных звездах, черных дырах и прочих объектах, о взрывах сверхновых и о других процессах, касающихся ранней и современной Вселенной.

**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.

На протяжении тысячелетий астрономы изучали положение небесных объектов на звездном небе и их взаимное перемещение с течением времени. Точные измере-

ния положений звезд, планет и других небесных тел дают материал для определения расстояний до них и их размеров, а также для изучения законов их движения. Результатами угломерных измерений пользуются в практической астрономии, небесной механике, звездной астрономии.

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

В современных обсерваториях используют наблюдательные инструменты (телескопы), светоприемную и анализирующую аппаратуру, вспомогательные приборы для наблюдений, электронно-вычислительную технику и др. (рис. 3).

**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 бурно развиваться начала радиофизика. Усовершенствованные приемники, антенны и радиолокаторы могли принимать радиоизлучение Солнца и далеких космических объектов. Так возникла **радиоастрономия** — одна из ветвей астрофизики. Внедрение радионаблюдений в астрономию (рис. 4) дало множество выдающихся открытий.

Необычайно расширили объем информации о физической природе небесных тел и их систем астрономические наблюдения в открытом космосе. Научные приборы и телескопы, установленные на космических аппаратах, позволили исследовать ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение Солнца, других звезд и галактик. В начале XX в. стали применяться

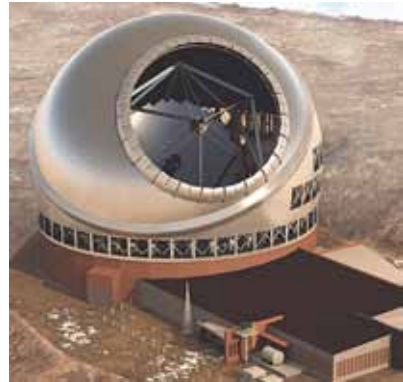


Рис. 3. Один из крупнейших оптических телескопов мира — Большой южноафриканский телескоп с зеркалом размером  $11 \times 9,8$  м (ЮАР)



Рис. 4. 100-метровый радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк (США)

детекторы гравитационных волн, собирающие информацию о Вселенной, которую невозможно получить через электромагнитные волны.

**5. Значение астрономии.** Во все времена астрономия оказывала большое влияние на практическую деятельность человека, но 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  $10^{-18}$  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. Высота полета ИСЗ над земной поверхностью зависит от средней плотности залегающих пород, что указывает на районы возможного поиска нефти, газа или железной руды.

Исследование атмосфер тел Солнечной системы помогает лучше познавать законы динамики атмосферы Земли, точнее строить 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 других звезд подсказало 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. 5).

Наша Земля не изолирована в пространстве, на нее воздействуют частицы и поля, идущие от Солнца и других звезд. Многие звезды в конце своей эво-

люции взрываются (так называемые сверхновые), выделяя огромное количество энергии в течение нескольких секунд. Так, типичная вспышка сверхновой звезды на расстоянии 26 световых лет от Земли способна уменьшить толщину озонового слоя нашей планеты в 2 раза, что в свою очередь приведет к возрастанию потока ультрафиолетового излучения, достигающего Земли.

Звездная астрономия изучает состав, общие закономерности строения, динамику и эволюцию звезд и звездных систем в нашей Галактике.

Земля — это уникальная планета, где развилась человеческая цивилизация, и если природа Земли уникальна, то и огромна ответственность людей за ее сохранение.



Рис. 5. Вспышка на Солнце.  
Фотография NASA



### Главные выводы

1. Астрономия — фундаментальная наука, изучающая физические тела, явления и процессы, происходящие во Вселенной.
2. Астрономия состоит из ряда разделов, например небесная механика, сравнительная планетология, астрофизика, космология, гравитационно-волновая астрономия и др.
3. Основной способ исследования небесных объектов — астрономические наблюдения, выполняемые с помощью современных наземных и космических телескопов.
4. Основное назначение астрономии — формирование научного мировоззрения людей.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что изучает астрономия? Перечислите важнейшие особенности астрономии.
2. Как возникла наука астрономия? Охарактеризуйте основные периоды ее развития.
3. Какие объекты и их системы изучает астрономия? Перечислите их в порядке увеличения размеров.
4. Из каких разделов состоит астрономия? Кратко охарактеризуйте каждый из них.
5. Что такое телескоп и для чего он предназначен?
6. Каково значение астрономии для практической деятельности человечества?



## Раздел II

# Основы практической астрономии

### § 2. Звездное небо

**1. Созвездия и яркие звезды.** На небе 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. Названия некоторых фигур были связаны с мифическими героями. Еще в III в. до н. э. древнегреческие астрономы свели названия созвездий в единую систему. 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, Пегаса, Персея). На старинных звездных картах можно также найти Большую Медведицу и Малую Медведицу, небесного охотника Ориона, голову звездного быка — Тельца и др. (рис. 6). В труде «Альмагест» («Великое математическое построение астрономии в XIII книгах», II в. н. э.) греческий 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 получили 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.





Рис. 6. Фрагмент небесного атласа А. Целлариуса с изображением созвездий

А, к примеру, созвездие Кассиопеи, названное в честь мифической царицы (рис. 7), белорусам представлялось в виде двух косцов (рис. 8).

На современных астрономических картах нет рисунков мифических образов созвездий, но сохранены их древние названия.

Менее яркие созвездия были названы европейскими астрономами в XVI—XVIII вв. Все созвездия Южного полушария (невидимые в Европе) получили



Рис. 7. Созвездие Кассиопеи.  
Гравюра из атласа Яна Гевелия



Рис. 8. Созвездие Кассиопеи  
в представлении белорусов



названия в эпоху Великих географических открытий, когда европейцы начали осваивать Новый Свет.

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 ассамблеях Международного астрономического союза в 1922 и 1928 гг. 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. Эти площадки-созвездия носят названия либо древнегреческих созвездий, которые находились (или находятся) в современных границах, либо названия, присвоенные европейскими астрономами. Для облегчения запоминания и поиска созвездий в учебниках по 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, которые содержат яркие звезды, относятся к главным созвездиям (рис. 9).

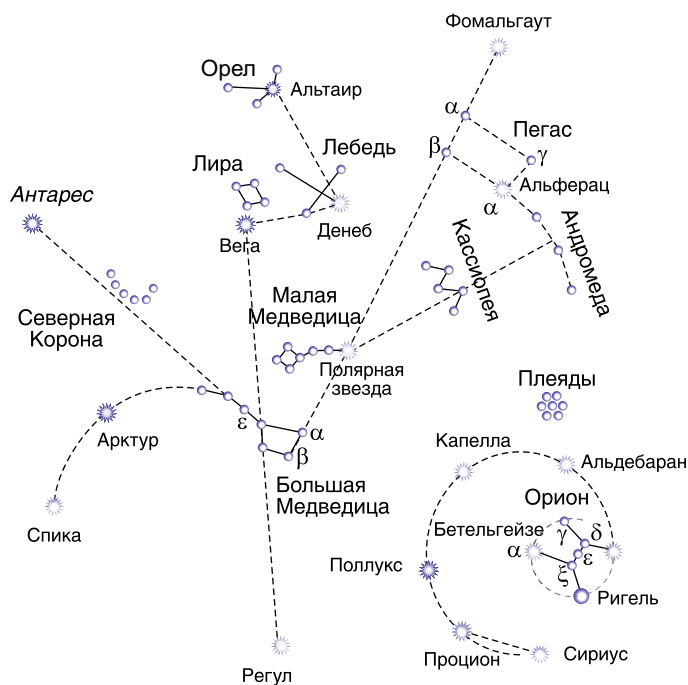


Рис. 9. Схема взаимного расположения главных созвездий и ярких звезд, видимых в средних географических широтах

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

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 обозначения звезд. В системе Байера название звезды состоит из двух частей: из названия созвездия, которому принадлежит звезда, и буквы греческого алфавита. При этом первая буква греческого алфавита  $\alpha$  соответствует самой яркой звезде в созвездии,  $\beta$  — второй по блеску звезде и т. д. Например, Регул —  $\alpha$  Льва — это самая яркая звезда в созвездии Льва, Денебола —  $\beta$  Льва — вторая по блеску звезда в этом созвездии.

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 же закончились и они, звезды стали обозначать цифрами (например, 61 Лебедь).

**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. 10). На самом же деле вокруг своей оси вращается Земля с запада на восток, а весь



Рис. 10. Суточные дуги светил в полярной области неба

небосвод вращается в обратном направлении с востока на запад. Полярная звезда для данной местности остается почти неподвижной и на одной и той же высоте над горизонтом. Очевидно, что **суточное движение звезд** (светил) — наблюдаемое кажущееся явление вращения небесного свода — отражает действительное вращение земного шара вокруг оси.

**3. Основные точки, линии и плоскости небесной сферы.** Нам кажется, что все звезды расположены на некоторой сферической поверхности неба и одинаково удалены от наблюдателя. На самом деле они находятся от нас на различных расстояниях. Поэтому воображаемую поверхность небосвода 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, для 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. Например, некоторые из звезд «ковша» Большой Медведицы находятся далеко одна от другой, но для земного наблюдателя они проецируются на один и тот же участок небесной сферы (рис. 11).

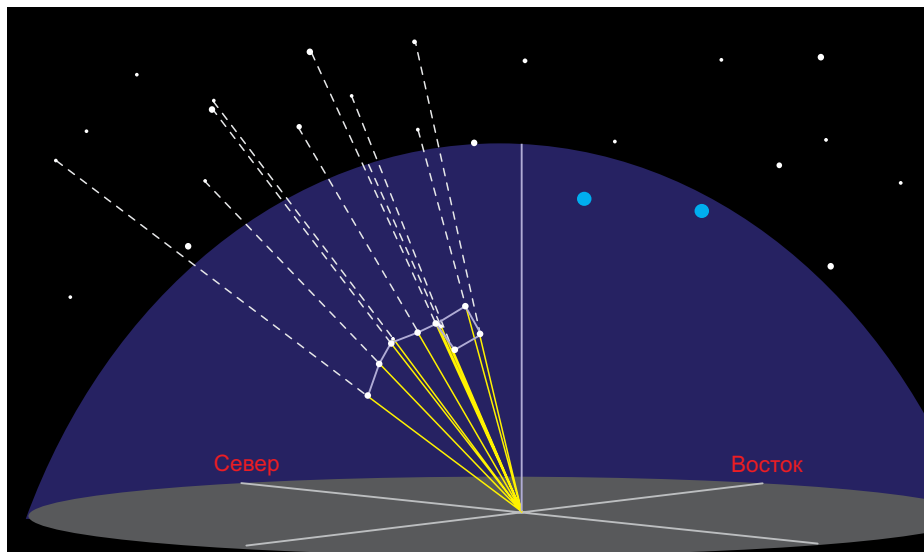


Рис. 11. Схема проецирования звезд в созвездии Большой Медведицы на небесной сфере

Прямая, проходящая через центр небесной сферы (рис. 12) и совпадающая с направлением нити отвеса в месте наблюдения, называется **отвесной** или **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**.

Большой круг небесной сферы, проходящий через зенит, светило и надир, называется **кругом высоты**, **вертикальным кругом** или просто **вертикалом светила**.

**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 менее  $1^\circ$  (точнее  $44'$ ).

Большой круг, проходящий через центр небесной сферы и перпендикулярный 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.

**Круг склонения** светила — большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и светило.

**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

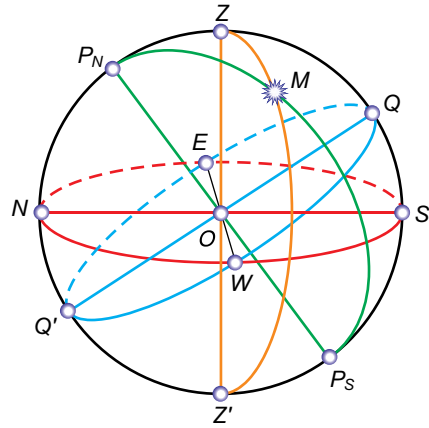


Рис. 12. Небесная сфера:  
 $O$  — центр небесной сферы (местонахождение наблюдателя);  $P_N$  — Северный полюс мира;  $P_S$  — Южный полюс мира;  $P_NP_S$  — ось мира;  $Z$  — зенит;  $Z'$  — надир;  $E$  — восток;  $W$  — запад;  $N$  — север;  $S$  — юг;  $Q$  — верхняя точка небесного экватора;  $Q'$  — нижняя точка небесного экватора;  $ZZ'$  — вертикальная линия;  $ZMZ'$  — круг высоты;  $P_NMP_S$  — круг склонения;  $NS$  — полуденная линия;  $M$  — светило на небесной сфере

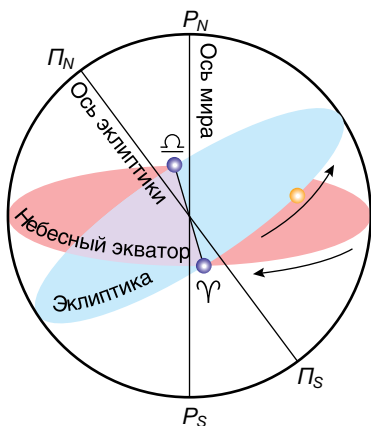


Рис. 13. Эклиптика

пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках. Точка пересечения истинного 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.

Видимый годовой путь Солнца среди звезд называется **эклиптикой**. В плоскости эклиптики лежит путь Земли вокруг Солнца, т. е. ее орбита. Она наклонена к небесному экватору под углом  $23^{\circ} 26'$  и пересекает его в точках весеннего ( $\Upsilon$ , около 21 марта) и осеннего ( $\Omega$ , около 23 сентября) равноденствий (рис. 13).



### Главные выводы

1. Созвездие — участок неба с характерной наблюдаемой группировкой звезд и других постоянно находящихся в нем астрономических объектов, выделенный для удобства ориентировки и наблюдения звезд.
2. Шкала звездных величин, предложенная Гиппархом, позволяет различать звезды по их блеску.
3. Наблюдаемое суточное движение звезд является отражением действительного вращения Земли вокруг своей оси.
4. Небесная сфера — воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в выбранной точке пространства.
5. Видимый годовой путь Солнца среди звезд называется эклиптикой.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под созвездием?
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 светил определяется по отношению к точкам и кругам небесной сферы (см. рис. 12). Для этого введены небесные координаты, подобные географическим координатам на поверхности Земли.

В астрономии применяется несколько систем координат. Отличаются они друг от друга тем, что строятся по отношению к разным кругам небесной сферы. Небесные координаты отсчитываются дугами больших кругов или центральными углами, охватывающими эти дуги.

**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 координатами являются **высота ( $h$ )** и **азимут ( $A$ )**.

**Высота светила** — угловое расстояние светила  $M$  от истинного горизонта, измеренное вдоль вертикального круга (рис. 14). Высота определяется в градусах, минутах и секундах. Она отсчитывается в пределах от 0 до  $+90^\circ$  к зениту, если светило находится в видимой

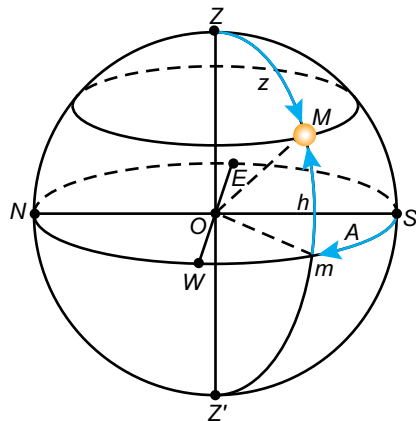


Рис. 14. Горизонтальная система координат:  $h$  — высота светила  $M$  над горизонтом;  $z$  — зенитное расстояние;  $A$  — азимут

части небесной сферы, и от 0 до  $-90^\circ$  к надиру, если светило находится под горизонтом.

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. 14). Азимут отсчитывается к западу от точки юга в пределах от 0 до  $360^\circ$ .

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

Угловое расстояние от зенита до светила, измеренное вдоль вертикального круга, называется **зенитным расстоянием** ( $z$ ) (см. рис. 14). Оно отсчитывается в пределах от 0 до  $+180^\circ$  к надиру. Высота и зенитное расстояние связаны соотношением:  $z + h = 90^\circ$ .

**Экваториальная система координат.** Для построения звездных карт и составления звездных каталогов за основной круг небесной сферы удобно принимать круг небесного экватора (рис. 15). Небесные координаты, в системе которых основным кругом является небесный экватор, называются экваториальной системой координат. В этой системе координатами служат **склонение** ( $\delta$ ) и **прямое восхождение** ( $\alpha$ ).

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

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

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

Для некоторых астрономических задач (связанных с измерением времени) вместо прямого

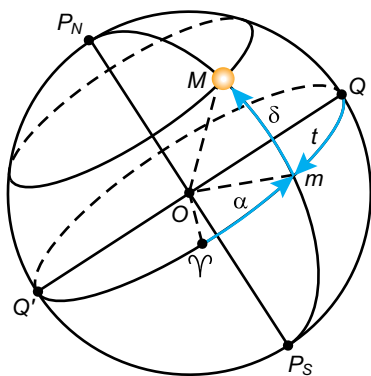


Рис. 15. Экваториальная система небесных координат:  $\delta$  — склонение светила  $M$ ;  $\alpha$  — прямое восхождение;  $t$  — часовой угол



восхождения ( $\alpha$ ) вводится часовой угол ( $t$ ) (см. рис. 15). **Часовой угол** — это 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, в пределах от 0 до 24 ч в часовой мере.

Координаты звезд ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) в экваториальной системе координат не связаны с суточным движением небесной сферы и изменяются очень медленно. Поэтому они применяются для составления звездных карт и каталогов. **Звездные карты** представляют собой проекции небесной сферы на плоскость с нанесенными на нее объектами в определенной системе координат. Набор звездных карт смежных участков неба, покрывающих все небо или некоторую его часть, называется **звездным атласом**. В специальных списках звезд, называемых **звездными каталогами**, указываются координаты их места на небесной сфере, звездная величина и другие параметры. Например, Каталог опорных звезд The Guide Star Catalog (GSC) содержит около 20 млн объектов.

**2. Лунно-солнечная прецессия.** Ось вращения Земли наклонена к плоскости орбиты под углом  $66^{\circ}34'$ . Под воздействием притяжения Луны и Солнца из-за неоднородности распределения плотности массы внутри Земли ось описывает конус. Так как направление оси Земли изменяется, то перпендикулярная ей плоскость экватора также будет смещаться, что приводит к перемещению точки весеннего равноденствия. Это явление называется **лунно-солнечной прецессией**. Точка весеннего равноденствия перемещается навстречу видимому годичному движению Солнца на  $50,3''$  в год или на  $1^{\circ}$  в 71,6 года, совершая полный оборот по эклиптике за 25 765 лет. Полюсы мира также перемещаются среди звезд. В настоящее время Северный полюс мира находится возле Полярной звезды, а через 10 тыс. лет он переместится к Веге ( $\alpha$  Лиры).

**3. 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 рисунке 16 земной шар и небесная сфера изображены в сечении плоскостью небесного меридиана места наблюдения. Наблюдатель из точки  $O$  видит полюс мира на высоте  $\angle NOP = h_p$ . Направление оси мира  $OP$  параллельно земной оси. Угол при центре Земли  $\angle OO'q$  соответствует географической широте места наблюдения  $\varphi$ . Так как радиус Земли в точке наблюдения

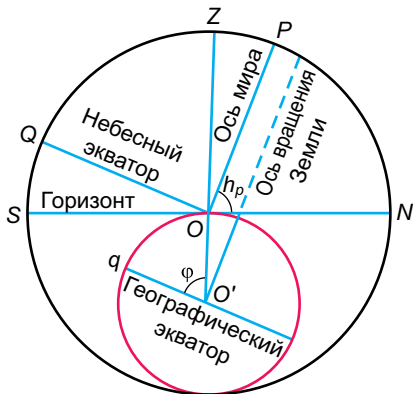


Рис. 16. Высота полюса мира над горизонтом

перпендикулярен плоскости истинного горизонта, а ось мира перпендикулярна плоскости географического экватора, то  $\angle NOP$  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*:

$$h_p = \varphi. \quad (1)$$

С другой стороны, из рисунка 16 следует, что  $\angle QOZ$  определяет собой величину склонения зенита  $\delta_z$ . Поэтому можно записать, что

$$\varphi = \delta_z, \quad \text{или} \quad \varphi = h_p = \delta_z. \quad (2)$$

Равенство (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, точки зенита и надира. Суточные пути всех звезд перпендикулярны горизонту, и каждая из них половину суток находится над горизонтом.



### Главные выводы

1. Для определения положений небесных тел на небесной сфере используется система координат, аналогичная географической. На небесной сфере возможны только угловые измерения.
2. Угловая высота полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения.
3. Восход и заход светила — явления пересечения светилом горизонта.
4. Звездные карты — проекции небесной сферы на плоскость с нанесенными на нее объектами в определенной системе координат. Их наборы — звездные атласы.



### Контрольные вопросы и задания

1. Какие системы небесных координат вам известны? В чем заключается принципиальная разница между различными системами небесных координат?
2. Дайте описание горизонтальной и экваториальной систем координат. Какие координаты используются в этих системах?
3. Почему в астрономии используют различные системы координат?
4. Определите высоту полюса мира над горизонтом в вашем населенном пункте.
5. Какие звезды называют восходящими и заходящими, невосходящими и незаходящими?
6. Определите склонения звезд, доступных наблюдению на широте вашего населенного пункта.

## § 4. Определение географической широты

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

Различают верхнюю и нижнюю кульминации. В **верхней кульминации** светило при суточном движении находится в наивысшей точке над горизонтом, ближайшей к зениту. **Нижняя кульминация** происходит через половину суток после верхней кульминации.

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

Для Солнца и Луны, имеющих заметные видимые размеры, восходом (или заходом) считается момент появления (или исчезновения) на горизонте верхней точки края диска.

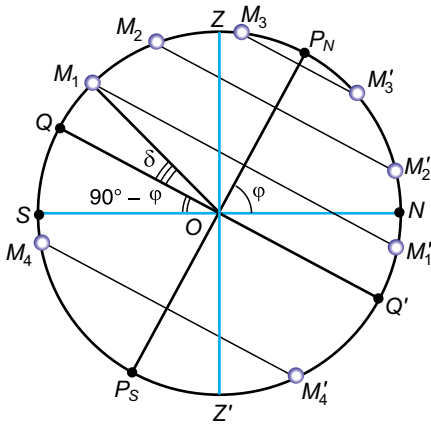


Рис. 17. Кульминация светил

звезда находится в верхней кульминации  $M_1$ . Высота полюса мира равна географической широте  $\varphi$ . Как видно из рисунка,  $\angle SOQ$  равен  $90^\circ - \varphi$  и представляет собой наклон небесного экватора к плоскости горизонта. Дуга  $SM_1$  (или  $\angle SOM_1$ ) — это высота светила над горизонтом. Эта дуга состоит из двух дуг:  $SM_1 = SQ + QM_1$ . Как видно из рисунка, дуга  $SQ$  равна  $90^\circ - \varphi$ , а дуга  $QM_1$  определяется величиной склонения  $\delta$ . Получим формулу для определения высоты звезды в ее верхней кульминации:

$$h_b = (90^\circ - \varphi) + \delta. \tag{1}$$

Для незаходящей звезды нижняя кульминация  $M'_2$  измеряется дугой  $NM'_2$  или соответствующим центральным углом ( $\angle NOM'_2$ ). Указанный угол, как видно из рисунка, равен разности  $\delta$  — склонения светила и величины  $(90^\circ - \varphi)$  — наклона небесного экватора к плоскости горизонта. Значит, высота звезды в нижней кульминации равна:

$$h_n = \delta - (90^\circ - \varphi). \tag{2}$$

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:

$$h_b = 90^\circ + \varphi - \delta. \tag{3}$$

Соотношения (1—3) связывают географическую широту с высотой и склонением звезд во время их кульминации. Отметим, что на рисунке 17 азимуты

Незаходящие звезды (рис. 17) 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 высоты звезд в верхней и нижней кульминациях.

Так как кульминация светил происходит при пересечении небесного меридиана, то плоскость рисунка 17 совпадает с плоскостью небесного меридиана. Суточные пути звезд изображаются отрезками, параллельными небесному экватору  $QQ'$ . Пусть

звезд в верхней кульминации  $M_1$  и  $M_2$  равны  $0^\circ$ , а азимуты звезд в нижней кульминации  $M'_1$  и  $M'_2$  равны  $180^\circ$ . Азимуты звезды  $M_3$  в верхней и нижней кульминациях равны  $180^\circ$ .

**2. Определение географической широты по астрономическим наблюдениям.** При составлении географических и топографических карт, прокладке дорог и магистралей, разведке залежей полезных ископаемых и в ряде других случаев необходимо знать географические координаты местности. Эту задачу можно решить с помощью астрономических наблюдений. Рассмотрим простейшие способы.

*Первый способ.* Определить географическую широту можно исходя из наблюдения Полярной звезды. Если считать, что Полярная звезда указывает Северный полюс мира, то приближенно высота Полярной звезды над горизонтом дает нам географическую широту места наблюдения. Если измерить высоту Полярной звезды в верхней и нижней кульминациях, то получится более точное значение широты места наблюдения:

$$\varphi = \frac{h_{\text{в}} + h_{\text{н}}}{2}. \quad (4)$$

Это равенство получено из равенств (2) и (3). Формула (4) пригодна для всех незаходящих звезд, у которых верхняя и нижняя кульминации находятся по одну сторону от зенита.

*Второй способ.* Определить географическую широту можно исходя из наблюдения верхней кульминации звезд. Из равенств (1) и (3) получим, что

$$\varphi = \delta \pm (90^\circ - h_{\text{в}}). \quad (5)$$

Знак «+» ставится, если звезда кульминирует к югу от зенита, а знак «-» — при кульминации звезды к северу от зенита. Если звезда проходит через зенит, то  $\varphi = \delta$ .



### Главные выводы

1. Кульминация — это явление прохождения светила через небесный меридиан.
2. Географическую широту можно определить по наблюдениям как Полярной звезды, так и верхней кульминации звезд.
3. Склонение звезды, проходящей через зенит, равно широте места наблюдения.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что такое кульминация светила?
2. Какие точки называются точками восхода и захода светила?
3. Как изменятся при суточном движении светила его высота, прямое восхождение, склонение?
4. Как приближенно определить географическую широту места, наблюдая за Полярной звездой?
5. Найдите интервал склонений звезд, которые на данной широте: а) никогда не восходят; б) никогда не заходят; в) могут восходить и заходить.
6. Определите географическую широту места наблюдения, если звезда Вега проходит через точку зенита.
7. Высота Солнца в моменты верхней и нижней кульминаций соответственно равна  $37^\circ$  и  $10^\circ$ . Определите географическую широту места наблюдения, склонение Солнца и дату наблюдения.

## § 5. Измерение времени.

### Определение географической долготы

**1. Измерение времени.** Вся наша жизнь связана со временем и регулируется периодической сменой дня и ночи, лунных фаз, а также времен года. На этих природных повторяющихся явлениях базируются основные единицы измерения времени — сутки, месяц, год. Широко используемая единица для измерения времени — сутки — связана с периодом вращения Земли вокруг своей оси.

Момент верхней кульминации центра Солнца называется **истинным полднем**, момент нижней кульминации — **истинной полночью**. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра Солнца называется **истинными солнечными сутками**. Время, прошедшее от момента нижней кульминации центра солнечного диска 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 рисунке 18 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 Солнца

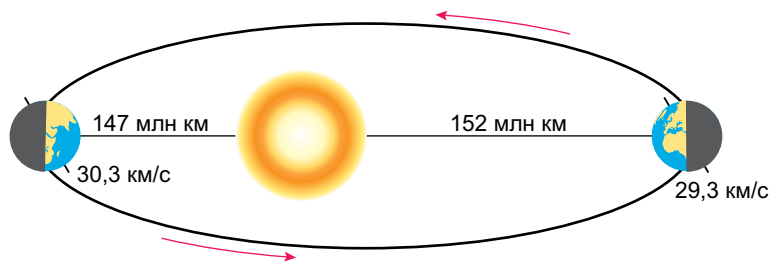


Рис. 18. Причины изменения длительности истинных солнечных суток

по небесной сфере, т. е. в разное время года Солнце перемещается с различной скоростью. Поэтому продолжительность истинных солнечных суток постоянно меняется и пользоваться ими в качестве единицы измерения времени неудобно. По этой причине в повседневной жизни используются не истинные, а средние солнечные сутки, продолжительность которых принята постоянной. Устанавливаются они по движению **среднего экваториального Солнца** — воображаемой точки, которая движется равномерно по небесному экватору и в точках весеннего и осеннего равноденствия совпадает с центром истинного Солнца. Верхнюю кульминацию среднего экваториального 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. За начало средних солнечных суток принимается **средняя полночь**, т. е. момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца. Время, протекшее от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого его положения на одном и том же географическом меридиане, называется **средним солнечным временем** ( $T_{\text{cp}}$ ).

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

$$\eta = T_{\text{cp}} - T_{\text{O.}}$$

Величина уравнения времени  $\eta$  обычно приводится в астрономических календарях. Приблизительно ее можно найти по графику (рис. 19 на с. 28), из которого видно, что четыре раза в год уравнение времени  $\eta$  равно нулю. Это происходит примерно 14 апреля, 14 июня, 2 сентября и 24 декабря. Уравнение времени  $\eta$  принимает наибольшие численные значения около 14 февраля ( $\eta = +14$  мин) и 3 ноября ( $\eta = -16$  мин).

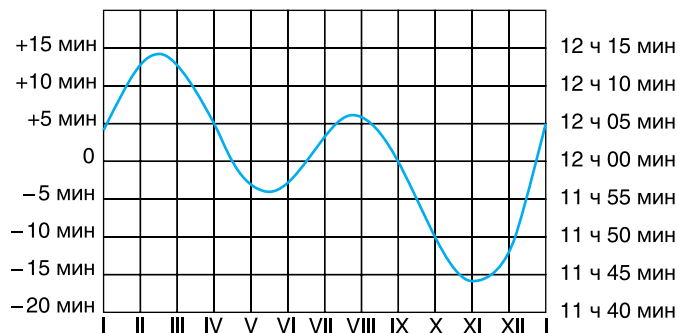


Рис. 19. График уравнения времени

Различают также **звездные сутки** (около 23 ч 56 мин 4 с). Звездные сутки равны промежутку времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия. Моментом верхней кульминации этой точки, принимаемым за начало звездных суток, считается 0 часов звездного времени. Время, протекшее от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до любого другого ее положения на одном и том же географическом меридиане, называется **звездным временем**.

**2. Определение географической долготы.** Измерение времени солнечными сутками связано с географическим меридианом. Время, измеренное на данном меридиане, называется **местным временем данного меридиана**, и оно одинаково для всех пунктов, находящихся на нем. Кульминация любой точки небесной сферы происходит в разное время на разных меридианах земного шара. Причем, чем восточнее земной меридиан, тем раньше в пунктах, лежащих на нем, происходит кульминация или начинаются сутки. Так как Земля за каждый час поворачивается на  $15^\circ$ , то разность времени двух пунктов в один час соответствует и разности долгот в  $15^\circ$  (в часовой мере 1 ч). Отсюда можно сделать вывод: разность местного времени двух пунктов на Земле численно равна разности значений долготы, выраженных в часовой мере. Для пунктов земной поверхности, расположенных на географических долготах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , получим:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (1)$$

За начальный (нулевой) меридиан для отсчета географической долготы принят меридиан, проходящий через Гринвичскую обсерваторию близ Лондона. Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называется **всемир-**



**ным временем.** Все сигналы точного времени соответствуют минутам и секундам всемирного времени. В астрономических календарях и ежегодниках моменты большинства явлений указываются по всемирному времени. Моменты этих явлений по местному времени какого-либо пункта легко определить, зная долготу этого пункта от Гринвича.

Если в данный момент на Гринвичском меридиане всемирное время будет  $T_0$ , то в местности с географической долготой  $\lambda$  будет  $T_\lambda$ . Следовательно, формула (1) при  $\lambda_0 = 0$  примет вид:

$$\lambda = T_\lambda - T_0. \quad (2)$$

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

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

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

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

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

$$T_n = T_0 + n. \quad (3)$$

Исключив из формул (1) и (3)  $T_0$ , получим соотношение, позволяющее определять географическую долготу по поясному времени ( $T_n$ ) и времени для местности с географической долготой  $\lambda$  ( $T_\lambda$ ):

$$\lambda = T_\lambda - T_n + n. \quad (4)$$

В целях экономии и рационального распределения электроэнергии в течение суток на летний период в некоторых странах весной стрелки часов переводят на час вперед — вводят **летнее время**, а осенью — на час назад.

Существует граница, открывающая новую дату и день недели. Международная **линия перемены дат** проходит через Берингов пролив между островами Тихого океана от Северного полюса до Южного полюса (меридиан  $180^\circ$ ).

Наиболее надежным и точным временем считается **атомное время**, которое было введено 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-133. С 1 января 1972 г. все страны земного шара ведут счет времени по атомным часам.

Атомное время очень удобно для исследования Земли, потому что с его помощью можно изучать неравномерности во вращении нашей планеты. Ошибка хода атомных часов невелика — примерно 1 с за 300 млн лет.

**3. Календарь.** **Календарь** — это система счета длительных промежутков времени, в основе которой лежат периодические астрономические явления: вращение Земли вокруг своей оси, изменение лунных фаз, обращение Земли вокруг Солнца. Любая календарная система опирается на три основные единицы измерения времени, а именно: средние солнечные сутки, синодический (или лунный) месяц и тропический (или солнечный) год.

**Синодический месяц** — это промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны. Он равен в среднем 29,5306 суток.

**Тропический год** — промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Он равен 365,2422 суток. Из-за медленного движения точки весеннего равноденствия навстречу Солнцу, вызванного прецессией, Солнце оказывается в той же точке неба относительно звезд через промежуток времени на 20 мин 28 с больший, чем тропический год. Он называется **звездным годом** и содержит 365,2564 средних солнечных суток.

Синодический месяц и тропический год не содержат целого числа средних солнечных суток, поэтому невозможно подобрать такое целое число тропических лет, в которых содержалось бы целое число синодических месяцев и целое чис-



Рис. 20. Антикитерский механизм (фрагмент, найденный археологами, и воссозданная на его основе модель)

ло средних солнечных суток. Стремление согласовать между собой сутки, месяц и год привело к тому, что в разные эпохи у различных народов было создано много видов календарей, которые можно условно разделить на три типа: лунные, лунно-солнечные и солнечные. На рисунке 20 показано механическое приспособление, созданное древнегреческими астрономами во II в. до н. э. для расчета движения Луны, Солнца и планет в календарных целях.

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 странах Ближнего Востока и принят в современном исламском мире. Из-за того что лунный год имеет меньше дней, чем тропический, у мусульман начало года постоянно перемещается по сезонам 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 около 2 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.

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 со 153 г. до н. э. в этот день вступали в должность консулы (рис. 21).

Одним из первых **солнечных календарей** считается египетский, созданный в 4-м тысячелетии 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 его название — **юлианский**), 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.

Вследствие того что юлианский год длиннее тропического на 11 мин 15 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

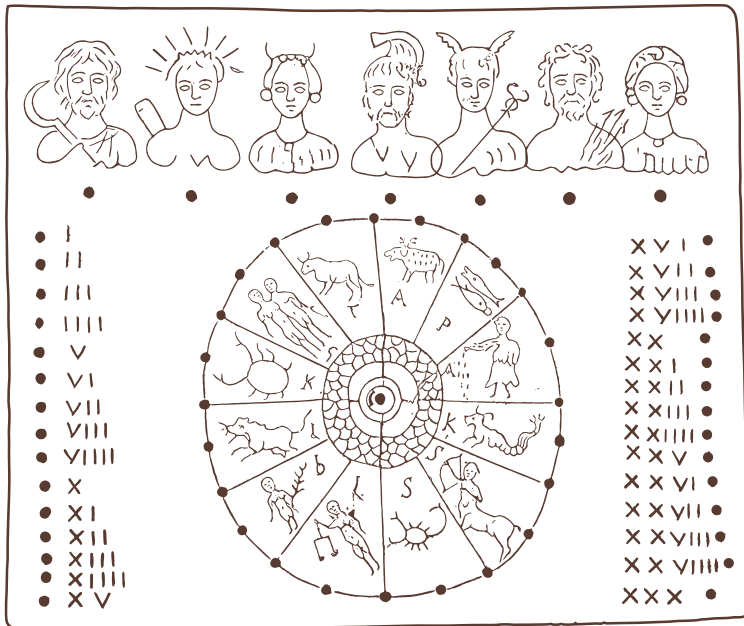


Рис. 21. Древнеримский календарь

10 дней вперед и вернувшую весеннее равноденствие на 21 марта. Исправленный календарь получил название **григорианского календаря** или **календаря нового стиля**. В честь его введения была отчеканена памятная медаль (рис. 22). Систему счета времени по юлианскому календарю сейчас называют **старым стилем**.

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 России этот календарь был введен со среды 31 января 1918 г. Следующий день уже был 14 февраля, так как к тому времени календарная разница между новым и старым стилем достигла 13 дней. Это различие в 13 суток будет сохраняться до 15 февраля 2100 года по старому стилю, или до 28 февраля 2100 года по новому стилю. После этой даты оно увеличится на одни сутки и станет равным 14 суткам.

Григорианский календарный год длиннее солнечного года на 26 с. Лишние сутки накапливаются только в Л. в. н. э., потому что разница в один день набегаает за 3280 лет.

Необходимо отметить, что и григорианский календарь не лишен недостатков: неодинаковая продолжительность месяцев, неравные кварталы, несогласованность чисел месяцев с днями недели.

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



Рис. 22. Медаль, выпущенная в память о введении григорианского календаря

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 или с годами правления царей и императоров.

В Риме использовалась эра от основания Рима (753 г. до н. э.) и счет годов от назначения консулов. В средневековой Европе была распространена эра Диоклетиана, считавшаяся от восшествия на престол императора Диоклетиана (29 августа 284 г. н. э.). Она применялась до XV в.

В Древней Греции применялась эра Олимпиад (начало 776 г. до н. э.). Олимпиады проводились раз в четыре года.

Иудеи отсчитывают начало эры от сотворения мира — от 3761 г. до н. э.

Христиане использовали эру от сотворения мира, принимая начало в 5508 г. до н. э. Эру от Рождества Христова рассчитал папский архивариус Дионисий Малый в 525 г. Он приравнял 248 г. эры Диоклетиана к 532 г. от рождения Христа. Эра от Рождества Христова, 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 пророка Мухаммеда из Мекки в Медину, что произошло в сентябре 622 г. н. э.



### Главные выводы

1. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра солнечного диска на одном и том же географическом меридиане называется истинными солнечными сутками.
2. Из-за разной продолжительности истинных солнечных суток в повседневной жизни используются средние солнечные сутки, продолжительность которых постоянна.
3. Звездные сутки — промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же географическом меридиане.
4. Географическая долгота данной местности определяется разностью между местным и всемирным временем.
5. Календарь — это система счета длительных промежутков времени, в основе которой лежат периодические астрономические явления. Мы живем по григорианскому календарю.

**Контрольные вопросы и задания**

1. Чем отличаются истинные солнечные сутки от средних солнечных суток?
2. Что называют звездными сутками?
3. Что понимают под уравнением времени?
4. Что понимают под всемирным временем?
5. Что понимают под линией перемены дат? Где она проходит?
6. Назовите календарные системы. На каких принципах они строятся?
7. В чем состоит отличие григорианского календаря от юлианского?
8. Почему нельзя создать абсолютно точный календарь?
9. Найдите разницу в местном времени для городов Гродно и Могилев.
10. В местный полдень капитан корабля отметил 14 ч 13 мин 46 с по хронометру, идущему по гринвичскому времени. Определите географическую долготу корабля.
11. 22 июня наблюдатель определил, что средний местный полдень наступил в 8 ч 40 мин всемирного времени, а высота Солнца в этот момент была равна  $62^{\circ}10'$ . Склонение Солнца в этот день  $\delta = +23^{\circ}26'$ . Определите географические координаты наблюдателя.

## Раздел III

# Движение небесных тел

### § 6. Гелиоцентрическая система мира Коперника

**1. Видимое движение планет.** В древности невооруженным глазом наблюдались 5 ярких светил, постоянно перемещающихся относительно неподвижных звезд созвездий. Древние греки назвали эти светила **планетами** (от греч. *πλανης* — странник) и дали им собственные имена: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн.

Планеты всегда располагаются на небе недалеко от эклиптики, но в отличие от Солнца и Луны время от времени меняют направление своего движения. Они перемещаются между звездами в основном с запада на восток (как Солнце и Луна), совершая **прямое движение**. Однако в определенное время движение планеты замедляется, и она начинает двигаться с востока на запад, совершая **попятное движение**. Затем возобновляется прямое движение. Исходя из этого 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. 23).



Рис. 23. Видимое петлеобразное движение Марса. Составная фотография, полученная в течение нескольких месяцев



**2. Система мира Птолемея.** Наиболее ранние из известных попыток построения системы мира принадлежат древним грекам — Анаксимандру, Эмпедоклу, Евдоксу и др.

Во II в. н. э. Клавдий Птолемей, используя наблюдения и идеи своих предшественников, а также собственные, разработал **геоцентрическую систему мира**, позволявшую вычислять положения планет относительно звезд на будущее время и предсказывать наступление солнечных и лунных затмений. Птолемей создал модель, используя общепринятую в античности идею о том, что все светила движутся вокруг неподвижной 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), — рисунок 24.

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 неудобной.

**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 мира** Коперника очень просто объясняла петлеобразное движение планет. На рисунке 25 (см. с. 38) 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.

Геоцентрическая система Птолемея не позволяла измерять расстояние до планет. Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность рассчитать пропорции Солнечной системы, пользуясь радиусом земной орбиты как астрономической единицей длины.

Главный научный труд Коперника «Об обращениях небесных сфер», написание шести книг которого было потрачено более 20 лет, был опубликован

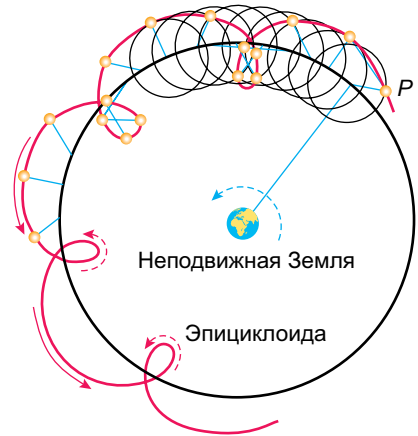


Рис. 24. Траектория планеты согласно теории Птолемея

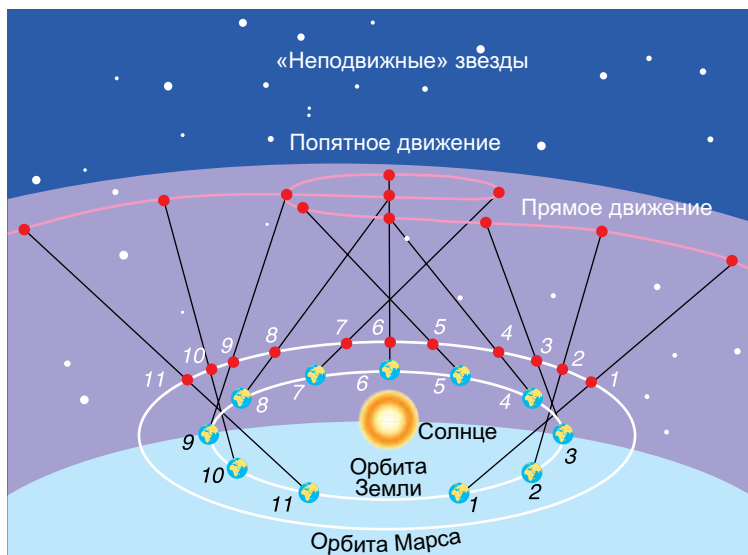


Рис. 25. Объяснение петлеобразного движения планет исходя из учения Коперника

в 1543 г., незадолго до смерти ученого. Революционность труда Коперника состоит в том, что в нем новый взгляд на строение Солнечной системы неразрывно связан с вопросом о положении Земли во Вселенной. Простота и стройность системы строения мира, изложенной Коперником, быстро нашла сторонников. Учение Коперника освободило науку от устаревших и схоластических традиций, тормозивших ее развитие. Однако сам великий астроном оставался в плену некоторых предубеждений. 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.

Иоганн Кеплер развил учение Коперника, открыв законы движения планет, и доказал на основе фактов, что планеты движутся по эллипсам и неравномерно.

Исаак Ньютон в 1687 г. опубликовал 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** (видимое угловое расстояние от планеты до Солнца) (рис. 26).

В нижнем соединении планета ближе всего к Земле, а в верхнем — 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  $45^\circ$  до  $48^\circ$ , а у Меркурия — от  $18^\circ$  до  $28^\circ$ . 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.

Различают восточную и западную элонгации. В восточной элонгации планета наблюдается вечером после захода Солнца, а в западной — утром перед восходом Солнца.

Для верхних планет (рис. 27) 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. В **соединении** планета наиболее удалена от Земли и не наблюдается, так как теряется в лучах Солнца.

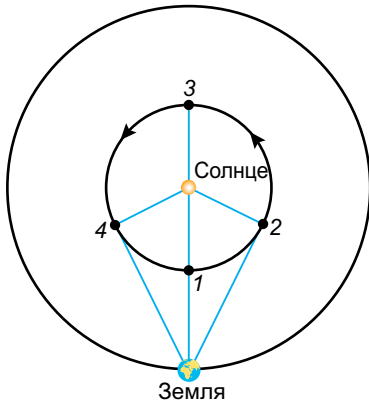


Рис. 26. Схема конфигураций нижних планет: 1 — нижнее соединение; 2 — наибольшая западная элонгация; 3 — верхнее соединение; 4 — наибольшая восточная элонгация

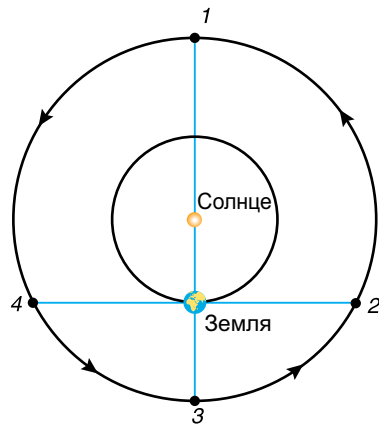


Рис. 27. Схема конфигураций верхних планет: 1 — соединение; 2 — западная квадратура; 3 — противостояние; 4 — восточная квадратура

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

**5. Сидерические и синодические периоды обращения планет.** Промежуток времени, в течение которого планета совершает полный оборот вокруг Солнца по орбите относительно звезд, называется **звездным** или **сидерическим** (от лат. *sidus* — звезда) **периодом обращения планеты**.

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными конфигурациями планет называется **синодическим** (от греч. *συνωδος* — соединение, сближение) **периодом обращения планеты**. Он отличается от звездного периода.

Установим взаимосвязь синодического и сидерического периодов обращения планет.

Пусть  $T$  — сидерический период обращения планеты, а  $T_0$  — сидерический период обращения Земли;  $S$  — синодический период обращения планеты. Среднее значение дуги, которую проходит планета за одни сутки, называется средним движением ( $n$ ) и 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 на рисунке 28) наступают через синодический период обращения  $S$ , за который Земля проходит дугу:

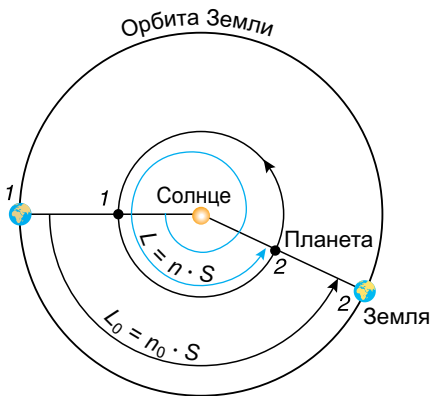


Рис. 28. Синодический период последовательных нижних соединений (1 и 2) нижней планеты

$$L_0 = n_0 \cdot S = \frac{360^\circ}{T_0} \cdot S, \tag{1}$$

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

$$L = n \cdot S = \frac{360^\circ}{T} \cdot S. \tag{2}$$

Подставив в равенство  $360^\circ = L - L_0$  значения  $L$  и  $L_0$ , получим уравнение синодического движения для нижних планет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}. \tag{3}$$

Для верхних планет уравнение синодического движения примет вид

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}, \quad (4)$$

так как  $T > T_0$  и  $n < n_0$ .

Уравнения (3) и (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.

### ! Главные выводы

1. Гелиоцентрическая система мира — модель Солнечной системы, согласно которой Земля, как и другие планеты, обращается вокруг Солнца и, кроме того, вращается вокруг своей оси.
2. Характерные взаимные положения планет относительно Солнца и Земли на небесной сфере называются конфигурациями планет.
3. По отношению к Земле Меркурий и Венера — нижние планеты, остальные — верхние. Наиболее удобно наблюдать нижние планеты вблизи элонгации, а верхние — вблизи противостояния.

### ? Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются прямое и попятное движения планет?
2. Как, исходя из гелиоцентрической системы мира, объясняется петлеобразное движение планет?
3. Что понимают под конфигурациями планет? Опишите их.
4. Дайте определения синодическому и сидерическому периодам обращения планеты. В чем состоит их отличие?
5. Звездный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния?
6. Какой должна быть продолжительность сидерического и синодического периодов обращения планеты в случае их равенства?

## § 7. Видимое движение Солнца и Луны. Затмения

**1. Видимое годовое движение Солнца.** По непрерывно изменяющимся координатам Солнца  $\delta$  и  $\alpha$  на небесной сфере можно отметить большой круг, представляющий видимый путь центра солнечного диска в течение года. Этот круг древние греки назвали эклипкой. Поскольку годовое 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 точек равноденствия, 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 и наименьшим. В **точке летнего солнцестояния** Солнце имеет максимальное склонение  $\delta = +23^{\circ}26'$  (около 22 июня). В **точке зимнего солнцестояния** Солнце имеет минимальное склонение  $\delta = -23^{\circ}26'$  (около 22 декабря).

Созвездия, через которые проходит эклиптика, называются **эклиптическими созвездиями**. В Древнем Междуречье возникло деление эклиптики с окружающими ее созвездиями на 12 частей. Этот пояс был назван **Поясом Зодиака** (от греч. ζῳον — живое существо). Первоначально зодиакальные знаки и эклиптические созвездия совпадали, так как точных границ созвездий не было. Позднее, в эпоху эллинизма, сложилось представление о знаках зодиака как о 12 равных частях эклиптики, занимающих на небе по  $30^{\circ}$  дуги. Начало отсчета знаков установлено от точки весеннего равноденствия  $\Upsilon$ . В настоящее время зодиакальные знаки и эклиптические созвездия не совпадают. Эклиптических созвездий 13. Из них 12 (см. табл. 1) совпадают по названиям с зодиакальными знаками. Созвездие Змееносца, являясь эклиптическим, не входит в число знаков зодиака. Эклиптика, проходя через созвездия, имеет в каждом из них участ-

Таблица 1. Время нахождения Солнца в знаках зодиака

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

ки неравной длины. К тому же точка весеннего равноденствия из-за прецессии постоянно перемещается. Поэтому зодиакальный знак Овна сейчас находится в созвездии Рыб.

**2. Суточное движение Солнца на различных широтах.** В § 2 мы уже вели речь о годичном движении Солнца среди звезд по воображаемой линии, называемой эклиптикой. Всю эклиптику ( $360^\circ$ ) Солнце проходит за один год, однако это движение кажущееся, так как происходит вследствие обращения Земли вокруг Солнца.

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 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 на Земле, где  $\varphi > 66,5^\circ$ , суточный путь Солнца почти параллелен горизонту. На самом полюсе Солнце в течение полугода не заходит, описывая круги над горизонтом. Это полярный день. Затем на полгода Солнце заходит и наступает полярная ночь. На экваторе продолжительность дня всегда равна продолжительности ночи и Солнце, как и другие светила, восходит и заходит перпендикулярно плоскости истинного горизонта.

**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 рисунке 29. 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 равноденствий пути Солнца над горизонтом и под горизонтом равны (без учета рефракции); соответственно, продолжительность дня и ночи одинакова. Самый короткий день выпадает на 22 декабря, а самый длинный — на 22 июня.

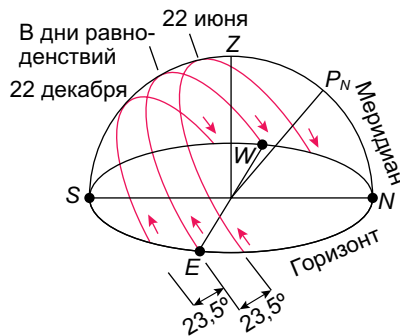


Рис. 29. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях в средних географических широтах

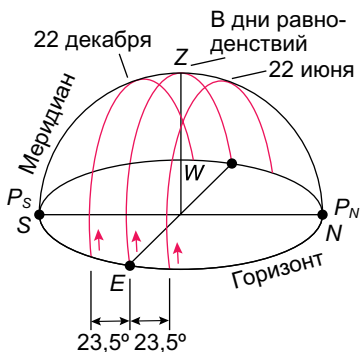


Рис. 30. Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях на экваторе Земли

Для наблюдателей, находящихся на земном экваторе, суточные пути Солнца над горизонтом в течение года показаны на рисунке 30.

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

Полный оборот по орбите вокруг Земли Луна совершает за 27,32 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. Различные формы видимой освещенной части Луны называются ее **фазами**. Смена фаз Луны обусловлена переменами в условиях освещения Солнцем Луны при ее движении по орбите (рис. 31).

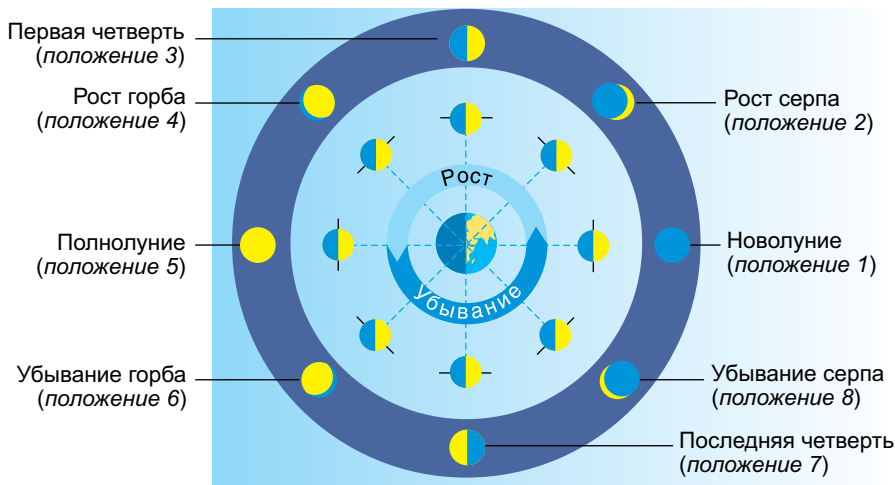


Рис. 31. Смена лунных фаз



Рассмотрим основные фазы Луны, начиная с **новолуния**. Эта фаза наступает, когда Луна проходит между Солнцем и Землей и обращена к нам своей темной стороной (см. рис. 31, *положение 1*). Луна совсем не видна с Земли.

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 называемому **пепельному свету** 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**.

**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 Луна примерно в 400 раз находится ближе к Земле, то 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. 118, с. 132).

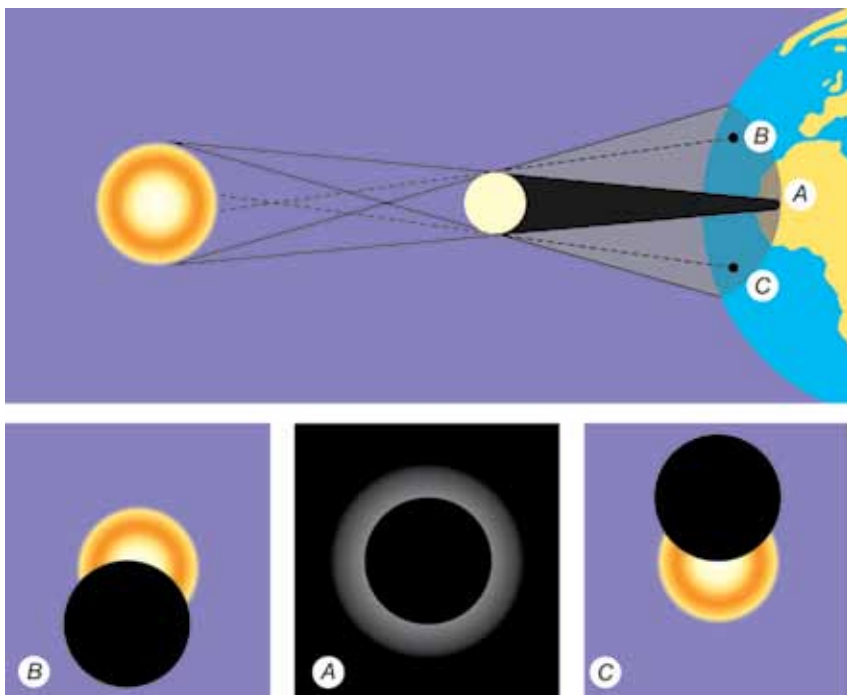


Рис. 32. Схема полного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

Рассмотрим схему полного солнечного затмения (рис. 32). Проходя между Солнцем и Землей, маленькая по размерам 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. 33) 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 пробегают тень

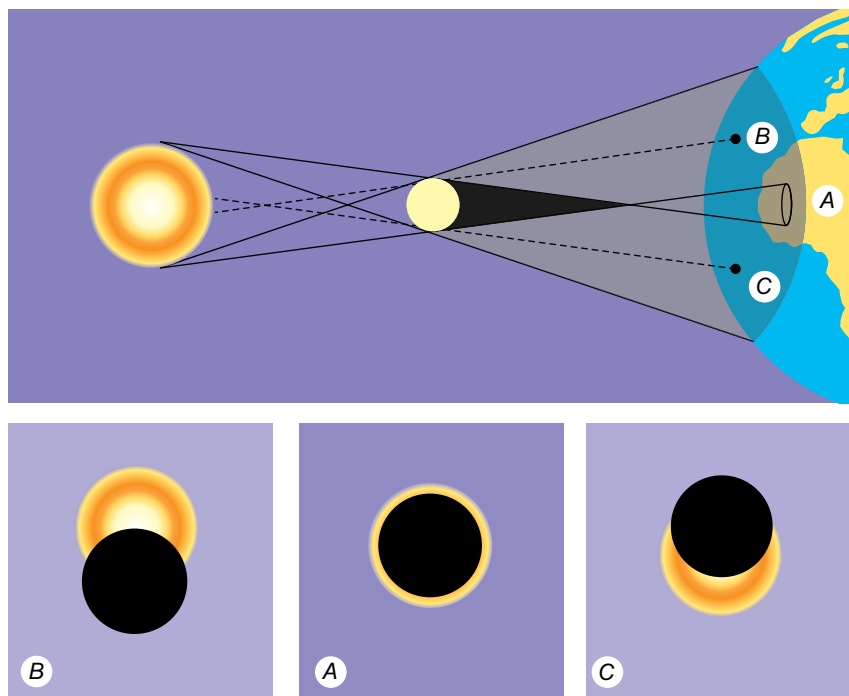


Рис. 33. Схема кольцеобразного солнечного затмения (для наблюдателей A, B, C)

и полутень Луны. Путь лунной тени по земной поверхности называется **полосой полного солнечного затмения**.

**Лунные затмения** происходят тогда, когда Луна попадает в земную тень, которая также имеет форму конуса и окружена полутенью (рис. 34). При частичном погружении Луны в земную тень лунное затмение называется **частным**

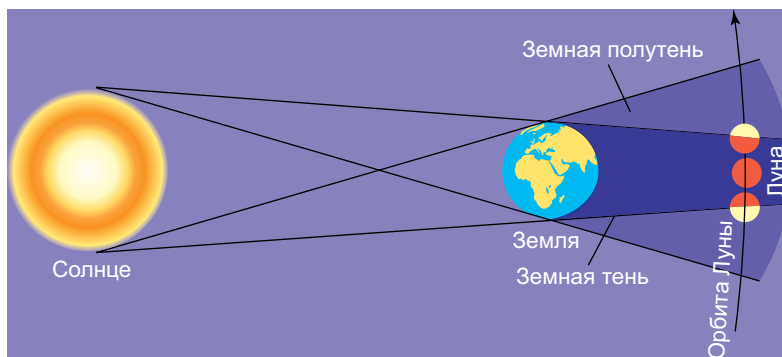


Рис. 34. Схема лунного затмения



Рис. 35. Вид Луны при полном лунном затмении

**теневым**, а при полном погружении — **полным тeneвым 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. 35), поскольку солнечный свет, преломляясь в земной атмосфере, освещает Луну преимущественно красными лучами, которые менее всего рассеиваются и ослабляются земной атмосферой.

Ежегодно происходит от двух до пяти солнечных затмений. В среднем в одном

и том же месте Земли полное солнечное затмение можно наблюдать чрезвычайно редко — лишь раз в 200—300 лет, а продолжительность полного солнечного затмения не превышает 7 мин 31 с. Поэтому астрономы тщательно готовятся к наблюдениям затмения, чтобы в течение очень короткого времени успеть изучить внешние разреженные оболочки Солнца.

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 47 мин.

Еще в VI в. до н. э. было установлено, что примерно через 18 лет и 11,3 суток все затмения будут повторяться в одной и той же последовательности. Этот период между затмениями называли **саросом** (от греч. *σαρος* — период, повторение).

Во время сароса в среднем происходит 70—71 затмение, из которых 42—43 солнечных (14 полных, 13—14 кольцеобразных и 15 частных) и 28 лунных.

Почему солнечные и лунные затмения бывают не каждый месяц? С чем связано явление сароса? Казалось бы (см. рис. 32—34), затмения должны происходить при каждом обороте Луны вокруг Земли. На самом деле такого не случается, так как плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики, а наклонена под углом в среднем  $5^{\circ}09'$ . Поэтому Луна во время новолуния или полнолуния может находиться далеко от плоскости эклиптики, и тогда ее диск

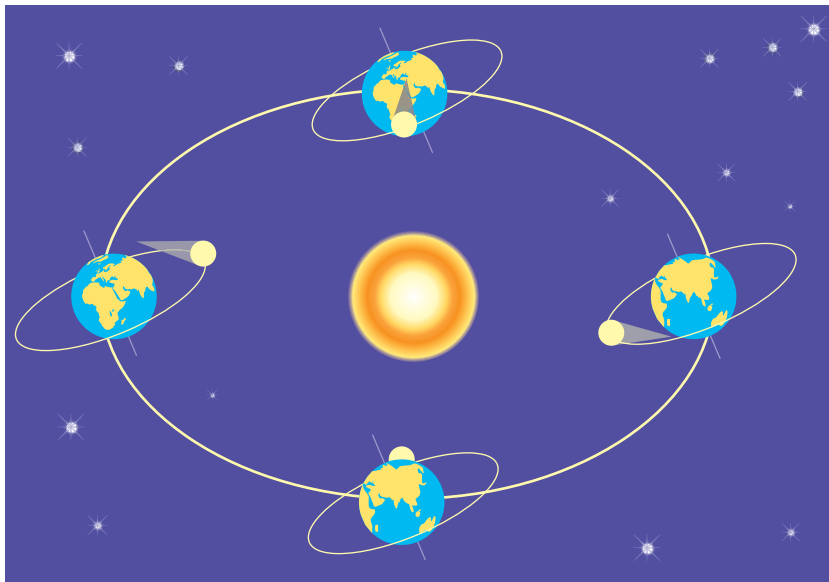


Рис. 36. Плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики

(диаметром  $0,5^\circ$ ) пройдет 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. 36). На рисунке видно, что в новолуние тень Луны не всегда падает на Землю.

### ! Главные выводы

1. На эклиптике выделяют четыре основные точки: весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.
2. Суточные пути Солнца в течение года зависят от географической широты места наблюдения.
3. Освещенная часть лунного диска (лунная фаза) зависит от взаимного расположения Солнца и Луны для наблюдателя с Земли.
4. Явление покрытия Луной Солнца называется солнечным затмением.
5. Явление прохождения Луны через земную тень называется лунным затмением.
6. Промежуток времени (сарос), через который в определенном порядке повторяются солнечные и лунные затмения, равен 18 годам и 11,3 суток.



### Контрольные вопросы и задания

1. Каковы особенности суточного движения Солнца на различных широтах?
2. Может ли Солнце наблюдаться в зените в Беларуси? 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 не удавалось точно рассчитать относительное положение планет на несколько лет вперед с помощью существовавших в то время теорий. 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 пифагорейский предрассудок о «совершенности» орбит планет, показав их эллиптическую.

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

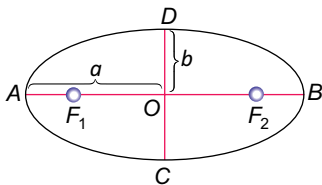


Рис. 37. Элементы эллипса

Отрезок  $AB$  (рис. 37) называется **большой осью**, а отрезок  $CD$  — **малой осью** эллипса. Отрезки  $AO = OB = a$ ,  $CO = OD = b$  называются соответственно **большой** и **малой полуосями** эллипса. Отношение

$$e = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a} \quad (1)$$

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 если Солнце находится в фокусе  $F_1$ , то ближайшую к Солнцу точку ( $A$ ) орбиты планеты называют **перигелием**, а наиболее удаленную ( $B$ ) — **афелием**. Обозначим  $AF_1 = q$  ( $q$  — **перигелийное расстояние**), а  $BF_1 = Q$  ( $Q$  — **афелийное расстояние**). Из рисунка 37 следует, что  $q + OF_1 = a$ . Из формулы (1) выразим  $OF_1 = a \cdot e$ , тогда

$$q = a - a \cdot e = a(1 - e), \quad (2)$$

$$Q = a(1 + e). \quad (3)$$

У земной орбиты эксцентриситет равен 0,017. Земля находится в перигелии в начале января, и перигелийное расстояние равно 147 млн км, а в афелии — в начале июля, и афелийное расстояние равно 152 млн км.

**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 распространена на все планеты, носит название **второго закона Кеплера** и звучит следующим образом: *радиус-вектор планеты* (линия, соединяющая центр Солнца с центром планеты) *за равные промежутки времени описывает равновеликие площади*.

Второй закон Кеплера, или закон площадей, проиллюстрирован на рисунке 38. При движении

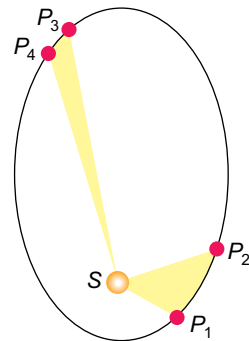


Рис. 38. Иллюстрация второго закона Кеплера

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  $\frac{r^3}{T^2}$  одинаково для всех планет).

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

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (4)$$

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 (а. е.), см. § 10), то формула (4) примет вид:

$$T = \sqrt{a^3}. \quad (5)$$

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



#### ! Главные выводы

1. Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.
2. За равные промежутки времени радиусы-векторы планет описывают равновеликие площади.
3. Квадраты сидерических периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.
4. Законы Кеплера уточняют учение Коперника, в котором орбиты небесных тел считались окружностями.





### Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте законы Кеплера.
2. Меняется ли скорость планеты, движущейся по эллиптической орбите? Круговой орбите?
3. Во сколько раз афелийное расстояние больше перигелийного расстояния, если эксцентриситет орбиты равен 0,5?
4. У Земли эксцентриситет орбиты равен 0,017, а у Марса — 0,093. Орбита какой из планет более вытянута?
5. Считая орбиты Земли и Марса круговыми, рассчитайте продолжительность года на Марсе. При решении задачи учтите, что Марс находится в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля.
6. Найдите перигелийное и афелийное расстояния астероида Белоруссия, если его большая полуось и эксцентриситет орбиты соответственно равны 2,405 а. е. и 0,181. На какое минимальное расстояние он приближается к Земле?

## § 9. Закон всемирного тяготения Ньютона

**1. Небесная механика.** После появления работ Коперника, Галилея, 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 центральным телом мироздания, сила тяжести рассматривалась только как земное явление. 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 притягивает не только Землю, но и другим небесным телам. На материальные тела, находящиеся около других планет, Луны или Солнца, действует сила тяжести, которая направлена к их центру так же, как и на Земле. Таким образом, благодаря распространению свойства тяжести на другие небесные тела был поставлен вопрос о взаимодействии тел.

На основании третьего закона Кеплера и закона динамики материальной точки строго математически Ньютон 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:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

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

Формула (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.

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

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 гиперболе* (рис. 39). *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

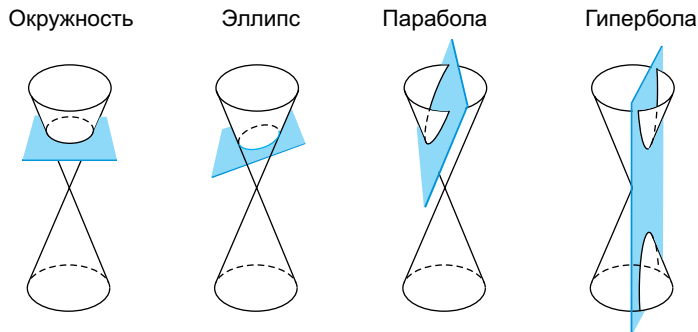


Рис. 39. Получение орбитальных кривых при сечении конуса плоскостью

дует 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 тела Солнечной системы не только притягиваются Солнцем, но и взаимодействуют между собой. Отклонения в движениях тел от законов Кеплера называются **возмущениями**, а реальное движение тел — **возмущенным** движением.

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.

Еще одним примером проявления возмущающей силы являются **приливы** и **отливы**. Водная оболочка и земная кора (в меньшей степени) слегка вытягиваются в обе стороны вдоль линии, соединяющей Землю с Луной. Приливные волны в океанах и морях следуют друг за другом с востока на запад с интервалом около 12 ч 25 мин. Приливное трение замедляет вращение Земли, что приводит к увеличению длительности земных суток на 0,0014 секунды за столетие.

**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 (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  $M = \frac{gR_{\oplus}^2}{G}$  подсчитать массу Земли:  $M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ .

Среднюю плотность Земли можно определить, зная ее массу и объем. Она равна  $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

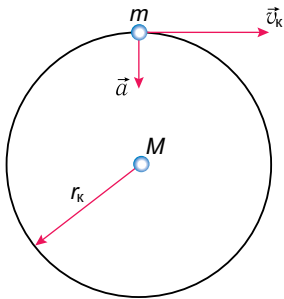


Рис. 40. Круговое движение тел

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

1. Путем измерения силы тяжести на поверхности данного небесного тела (гравиметрический способ).

2. По третьему обобщенному закону Кеплера.

Первый способ применительно к Земле мы рассмотрели выше.

Прежде чем рассматривать второй способ, 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. 40). Это возможно, если движение происходит под действием силы, создающей центростремительное ускорение  $a = \frac{v_k^2}{r_k}$ . Силой, создающей ускорение, является сила тяготения, равная  $\frac{GMm}{r_k^2}$ . Приравнявая  $\frac{v_k^2}{r_k}$  к ускорению  $\frac{GM}{r_k^2}$ , создаваемому тяготением, получаем, что

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

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

$$v_k = \frac{2\pi r_k}{T}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем:  $\left(2\pi \frac{r_k}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r_k}$ ,

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

Для эллиптического движения формула (4) также справедлива, если вместо радиуса окружности  $r_k$  подставить большую полуось  $a$  эллиптической орбиты. В таком случае получим соотношение:

$$\frac{a^3}{T^2 M} = \frac{G}{4\pi^2}, \quad (5)$$

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  $M$  войдет сумма масс  $(M + m)$  и соотношение (5) запишется в виде

$$\frac{a^3}{T^2 (M + m)} = \frac{G}{4\pi^2}. \quad (6)$$

Обобщив формулу (6) для двух небесных тел массами  $M_1$  и  $M_2$ , получим уточненный **третий закон Кеплера**:

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (7)$$

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  $a_2^3$ ) (7).

На основе уточненного Ньютоном (7) третьего закона Кеплера вторым способом можно вычислить как массы планет, имеющих спутники, так и 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, производимым ими друг на друга.



### Главные выводы

1. Закон всемирного тяготения и законы Кеплера — основа небесной механики.
2. Реальное движение небесных тел — возмущенное движение, которое обусловлено притяжением не только Солнца, но и других небесных тел.
3. Уточненный Ньютоном третий закон Кеплера позволяет определять массы планет, имеющих спутники, а также массу Луны и Солнца.



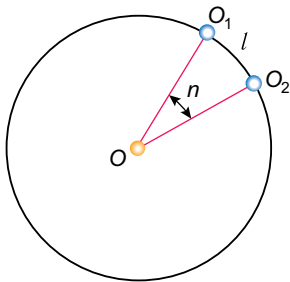
### Контрольные вопросы и задания

1. Какие задачи решает небесная механика?
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Каковы особенности в использовании данного закона для проведения расчетов?
3. Как понимают в астрономии «задачу двух тел»? «Задачу трех тел»?
4. Как Ньютон обобщил законы Кеплера?
5. Определите массу планеты Уран (в массах Земли), если известно, что спутник Урана Титания обращается вокруг него с периодом 8,7 сут на среднем расстоянии 438 тыс. км. Для Луны эти величины равны соответственно 27,3 сут и 384 тыс. км.
6. Определите среднюю плотность Солнца, если период обращения Земли вокруг Солнца принять равным 365 сут. При расчетах принять радиус земной орбиты равным 150 млн км, а радиус Солнца — 700 тыс. км.
7. Определите ускорение силы тяжести на поверхности Марса, если известно, что масса Марса равна  $6,4 \cdot 10^{23}$  кг, а его радиус равен 3396 км.
8. Во сколько раз меньше будет весить человек на Марсе, чем на Земле, если масса Марса равна  $6,4 \cdot 10^{23}$  кг, а его радиус равен 3396 км?

## § 10. Определение размеров небесных тел и расстояний до них в Солнечной системе

**1. Определение размеров Земли.** Первый известный науке метод определения размеров Земли применил греческий ученый Эратосфен. Он выбрал два города, лежащих на одном и том же географическом меридиане земного шара, — Александрию ( $O_1$ ) и Сиену ( $O_2$ ) (рис. 41). Из рисунка видно, что если обозначить длину дуги меридиана  $O_1O_2$  через  $l$ , а ее угловое значение через  $n$  (в градусах), то длина дуги  $1^\circ$  меридиана  $l_0$  будет равна:

$$l_0 = \frac{l}{n},$$



а длина всей окружности меридиана:

$$L = 360^\circ \cdot l_0 = \frac{360^\circ \cdot l}{n} = 2\pi R,$$

где  $R$  — радиус земного шара. Отсюда

$$R = \frac{180^\circ \cdot l}{\pi n}.$$

Рис. 41. Вычисление радиуса Земли

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

Длина дуги  $l$  — расстояние между Александрией и Сиеной — была хорошо известна. Угол  $n$  Эратосфен измерил, используя то обстоятельство, что Сиена лежит на тропике Рака и в день летнего солнцестояния Солнце в полдень здесь наблюдалось в зените. А в Александрии Солнце до зенита не доходило и шест, врытый перпендикулярно в землю, отбрасывал тень. Измерив длину этой тени, Эратосфен получил значение  $n = 7,2^\circ$  и длину окружности  $L$  примерно 45 тыс. км (современное значение 40 тыс. км).

Современная геодезия располагает точными методами для измерения расстояний на земной поверхности. Определение расстояния  $l$  между точками  $O_1$  и  $O_2$  (см. рис. 41) затруднено наличием естественных препятствий (гор, рек, лесов и т. п.). Поэтому длина дуги  $l$  определяется путем вычислений, требующих измерения только сравнительно небольшого расстояния — **базиса** ( $O_1A$ ) — и ряда углов (рис. 42). Этот метод разработан в геодезии и называется **триангуляцией** (от лат. *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 точки были видны по меньшей мере две другие точки.

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.

В России с 1816 по 1855 г. под руководством В. Я. Струве была измерена дуга меридиана длиной 2800 км. В 30-е гг. XX в. высокоточные градусные измерения были проведены в СССР под руководством профессора Ф. Н. Красовского.

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

Истинная форма Земли не может быть представлена ни одним из известных геометрических тел. Поэтому в геодезии и гравиметрии форму Земли считают **геоидом**, т. е. телом с поверхностью, близкой к поверхности спокойного океана и продолженной под материками.

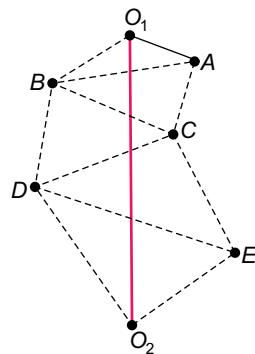


Рис. 42. Метод триангуляции

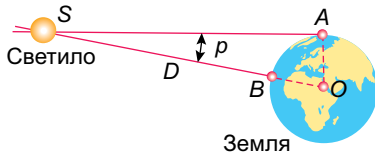


Рис. 43. Горизонтальный параллакс светила

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. Значительный вклад в развитие космической геодезии внес уроженец Беларуси — известный геодезист, гидрограф и астроном И. Д. Жонголович. 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. 43). Чем больше расстояние до светила, тем меньше угол  $p$ .

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  $p_{\odot} = 8,794''$ . Параллаксу Солнца соответствует среднее расстояние от Земли до Солнца, примерно равное 149,6 млн км. Это расстояние принимается за одну **астрономическую единицу** (1 а. е.). В астрономических единицах удобно измерять расстояния 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

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

и

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



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

**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 примерно  $3 \cdot 10^8$  м/с.

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

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

**4. Определение размеров тел Солнечной системы.** При наблюдениях небесных тел Солнечной системы можно измерить угол, под которым они видны наблюдателю с Земли. Зная **угловой радиус светила**  $\rho$  (рис. 44) и расстояние  $D$  до светила, можно вычислить линейный радиус  $R$  этого светила по формуле

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

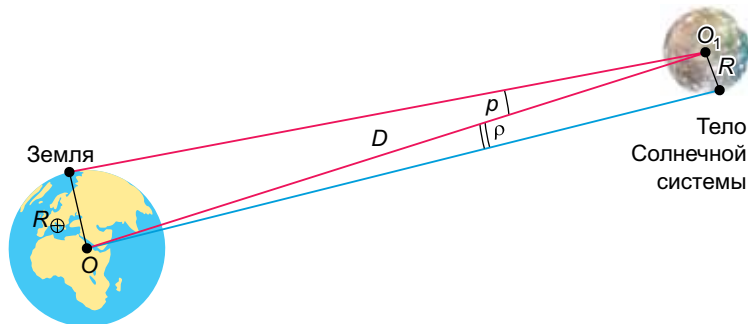


Рис. 44. Определение линейных размеров тел Солнечной системы

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

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

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

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

Определение размеров небесных тел таким способом возможно только тогда, когда видны их диски.



### Главные выводы

1. В основу метода определения размеров Земли положены градусные измерения (триангуляция) длин дуг на ее поверхности.
2. Определение расстояний до тел Солнечной системы основано на измерении малых углов (параллакса). В настоящее время для этого используются методы лазерной локации и радиолокации.
3. Расстояния между телами Солнечной системы измеряются в астрономических единицах (1 а. е. равна примерно 149,6 млн км).
4. Определение размеров тел Солнечной системы основано на измерении угловых радиусов и расстояний до них.



### Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом греческий ученый Эратосфен определил размеры Земли?
2. Как определяют длину дуги меридиана триангуляционным методом?
3. Что понимают под горизонтальным параллаксом?
4. Как определить расстояние до светила, зная его горизонтальный параллакс?
5. Что такое астрономическая единица?
6. В чем состоит радиолокационный метод определения расстояний до небесных тел?
7. На каком расстоянии от Земли находится небесное тело, если его горизонтальный параллакс равен  $1'$ ?
8. Определите линейный радиус Луны, если в ходе наблюдений стало известно, что ее горизонтальный параллакс в это время равен  $57'$ , а угловой радиус —  $15,5'$ . Радиус Земли принять равным 6400 км.
9. Оцените расстояние от Солнца до Меркурия, если его наибольшая элонгация равна  $28^\circ$ .
10. Определите диаметр Меркурия, если при прохождении по диску Солнца его угловой диаметр оказался  $11,0''$ , а горизонтальный параллакс в этот момент равен  $14,3''$ .

## § 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 ее 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 ( $v_{01}$ ,  $v_{02}$ ,  $v_{03}$ ) тело упадет на Землю;

б) при некотором определенном значении скорости  $v_1$  (**первая космическая скорость**) тело станет искусственным спутником и начнет 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 уйдет 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 пространство Галактики.

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

$$G \frac{mM}{R_{\text{орб}}^2} = ma_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{орб}} = R + h$  — средний радиус орбиты тела (рис. 45),  $R$  — радиус Земли,  $h$  — высота тела над поверхностью Земли,  $M$  — масса Земли,  $m$  — масса тела (спутника).

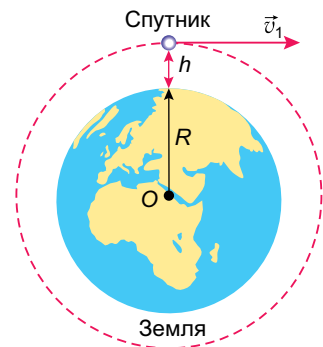


Рис. 45. Движение спутника по круговой орбите

Для центростремительного ускорения  $a_{ц} = \frac{v_1^2}{R_{орб}} = \frac{v_1^2}{R+h}$ . Подставляя это выражение в формулу (1), после сокращений получаем:

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

У поверхности Земли с учетом выражения для ускорения свободного падения  $g = G \frac{M}{R^2}$  можно положить  $h = 0$ . Тогда первая космическая скорость (без учета сопротивления воздуха) равна:

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,8 \cdot 6,37 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с.} \quad (2)$$

Таким образом, тело, скорость которого равна  $7,9 \cdot 10^3$  м/с и направлена по касательной относительно поверхности Земли, становится искусственным спутником Земли, 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):

$$v_2 = \sqrt{2gR}, \quad (3)$$

где  $R$  — радиус Земли.

Используя выражение (2), находим:

$$v_2 = v_1 \sqrt{2}. \quad (4)$$

Подставив в (4) уже известное нам значение первой космической скорости, получим, что у поверхности Земли  $v_2 \approx 11,2 \cdot 10^3$  м/с. Вторая космическая скорость называется также скоростью освобождения (убегания, ускользания) или **параболической скоростью**.

Третья космическая скорость, 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:

$$v_3 = \sqrt{(\sqrt{2} - 1)^2 v^2 + v_2^2}, \quad (5)$$

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

Подставив значение второй космической скорости  $v_2$  в (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.

**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 связаны между собой формулой

$$v_0^2 = GM \left( \frac{2}{r_0} - \frac{1}{a} \right), \quad (6)$$

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. Формула (6) справедлива для любой точки эллиптической орбиты.

Эксцентриситет орбиты  $e$  при горизонтальном запуске спутника равен:

$$e = 1 - \frac{q}{a}, \quad (7)$$

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

В случае эллиптической орбиты (рис. 46):  $q = a(1 - e) = R + h_{\text{П}}$ , где  $h_{\text{П}}$  — линейная высота перигея над поверхностью Земли. Расстояние от центра Земли до наиболее удаленной точки орбиты:  $Q = a(1 + e) = R + h_{\text{А}}$ , где  $h_{\text{А}}$  — высота апогея над земной поверхностью,  $R$  — радиус Земли.

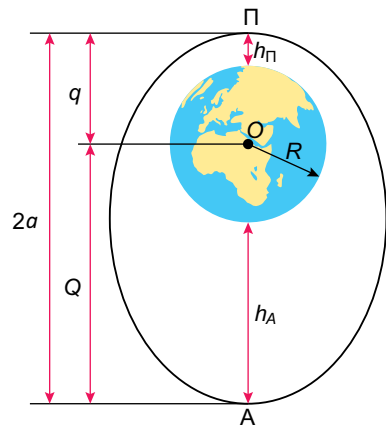


Рис. 46. Эллиптическая орбита искусственного спутника Земли

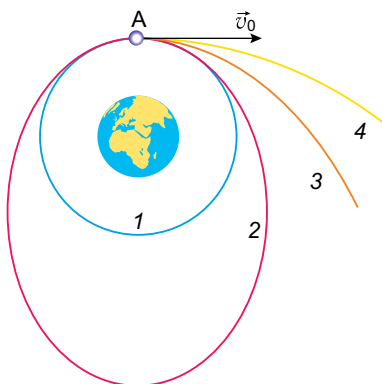


Рис. 47. Формы орбит космических аппаратов: 1 — круговая; 2 — эллиптическая; 3 — параболическая; 4 — гиперболическая

На рисунке 47 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 следующих основных соображений:

- 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 с точки зрения сроков полета, затрат топлива и ряда других требований.

Одним из классов межпланетных траекторий являются энергетически оптимальные орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли. На рисунке 48 указана такая траектория перелета на Марс, построенная на предположении, что орбиты Земли и Марса круговые.

Данная траектория носит название гомановской, 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 по-

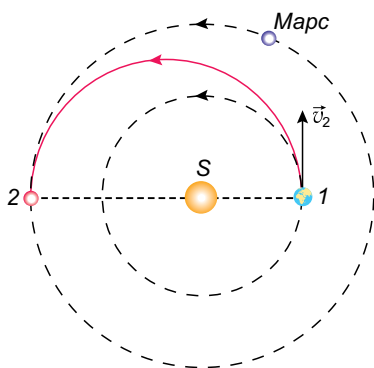


Рис. 48. Гомановская траектория перелета с Земли на Марс

казывают, что время полета от Земли до Марса по указанной траектории составит 258 суток (не считая сравнительно короткого времени полета до границы сферы действия Земли).

**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 задачами 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».

Значительный вклад в исследование космического пространства внесли космонавты-белорусы П. И. Климук, В. В. Коваленок и О. В. Новицкий. Полеты человека в космос для нас стали уже почти обыденным явлением.

Космонавтика способствовала возникновению и развитию новых технологий. В перспективе — глобальный экологический мониторинг Земли, устранение угроз астероидно-кометной опасности.

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



Ю. А. Гагарин



П. И. Климук



В. В. Коваленок



О. В. Новицкий

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

Создание ракетно-космических комплексов — весьма сложная научно-техническая проблема. 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. Для обеспечения полетов космических аппаратов необходима широкая сеть наземных служб управления.

По своей сущности космонавтика — это область общечеловеческой деятельности, и проводимая даже в рамках национальных проектов она затрагивает интересы многих стран.



### Главные выводы

1. Скорость, при которой космический аппарат выводится на круговую орбиту вокруг небесного тела, называется первой космической скоростью.
2. Скорость, необходимая для того, чтобы космический аппарат вышел из сферы гравитационного действия Земли и обращался вокруг Солнца, называется второй космической скоростью.
3. Скорость, при которой космический аппарат, запущенный с Земли, покинет Солнечную систему, называется третьей космической скоростью.
4. Орбиты космических аппаратов представляют собой элементы эллипсов, парабол и гипербол.



### Контрольные вопросы и задания

1. Опишите первую, вторую и третью космические скорости.
2. По каким орбитам могут двигаться космические аппараты? Каким геометрическим линиям соответствуют орбиты космических аппаратов для первой, второй и третьей космических скоростей?
3. Какие орбиты космических аппаратов называют гомановскими?
4. Определите период обращения искусственного спутника Земли, если наивысшая точка его орбиты над поверхностью Земли 36 тыс. км, а наинизшая — 300 км. Землю считать шаром радиусом 6370 км.
5. Рассчитайте первую и вторую космические скорости для Луны. Учтите, что масса Луны —  $7,35 \cdot 10^{22}$  кг, а ее радиус — 1738 км.
6. Искусственный спутник Земли запущен в плоскости земного экватора так, что все время находится в зените одной и той же точки земного шара. Определите высоту ( $h$ ) этого ИСЗ над поверхностью Земли. При решении сравните движение спутника с движением Луны.  $T_L = 27,3$  сут,  $a_L = 384\,000$  км. Радиус Земли  $R_3 = 6400$  км.
7. Определите время полета космического аппарата от Земли до Марса по гомановской орбите. Большую полуось орбиты Марса принять равной 1,52 а. е.



# Раздел IV

## 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; карликовые планеты; малые тела (астероиды, кометы, метеоритные и метеорные тела), а также межпланетную пыль, плазму и физические поля в указанных границах.

В Солнечной системе находится 8 больших планет. По мере удаления от Солнца они расположены в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун.

**Планетой** называют небесное тело, движущееся вокруг звезды в ее гравитационном поле, имеющее форму, близкую к сферической, светящееся отраженным от звезды светом и расчистившее область своей орбиты от других мелких объектов. Выделяют планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Массы планет слишком малы, чтобы внутри них могли протекать характерные для звезд ядерные реакции. Вокруг планет, кроме Меркурия и Венеры, обращаются спутники, которых известно уже более 200.

По гелиоцентрическим орбитам движутся карликовые планеты, астероиды и метеоритные тела. Кроме того, по сильно вытянутым орбитам движутся ледяные тела — кометы.

Планеты и другие тела Солнечной системы при движении по орбитам сталкиваются с метеорными телами, межпланетной пылью; взаимодействуют с электромагнитным излучением Солнца и плазмой, исходящей от Солнца.

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

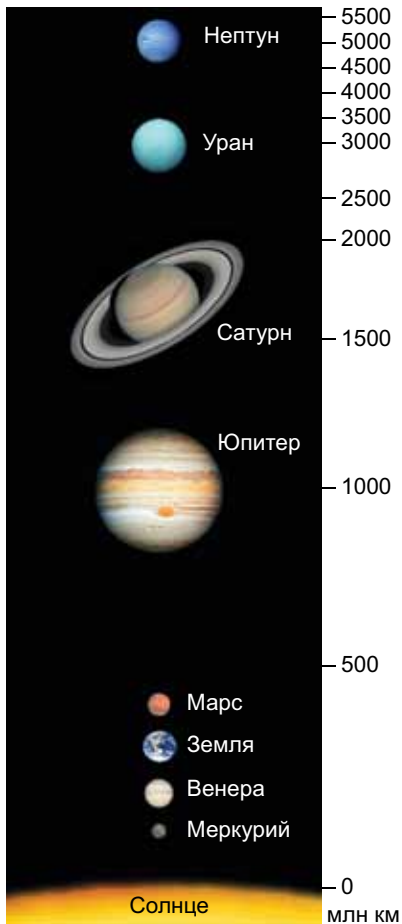


Рис. 49. Сравнительные размеры и расстояния планет от Солнца

1. Основная масса вещества Солнечной системы сосредоточена в Солнце, которое представляет собой рядовую звезду. На массу всех других составляющих системы приходится 1/750 часть массы Солнца (рис. 49). 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.

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 и Уран, которые вращаются в противоположную сторону. Причем ось вращения Урана лежит почти в плоскости орбиты планеты. Наклон оси вращения других планет не превышает  $60^{\circ}$  к плоскостям их орбит.

4. Планеты разделяются на два типа: планеты земной группы и планеты-гиганты. **Планеты земной группы** — твердые тела, сравнительно небольшие, маломассивные, но с большой средней плотностью, с медленным вращением и с малым числом спутников (или без них). Они расположены вблизи Солнца. **Планеты-гиганты** массивнее планет земной группы, больше по размерам и с меньшей средней плотностью, с большой скоростью вращения и многочисленными спутниками. Планеты-гиганты обладают мощными атмосферами, состоящими в основном из водорода и гелия.

5. 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.

6. Орбиты большинства спутников планет близки к круговым. Движение большинства 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.

**3. Происхождение Солнечной системы.** Для построения теории происхождения Солнечной системы необходимо знать возраст небесных тел. Согласно современным представлениям, возраст древнейших пород Земли достигает 4,64 млрд лет. Анализ пород, доставленных с Луны, показал, что их возраст от 2 до 4,5 млрд лет. Возраст железных и каменных метеоритов оценивается от 0,5 до 5 млрд лет. Возраст Солнца и других отдельных звезд определяется на основе 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 Иммануилом Кантом в 1755 г. и доработана Пьером Симоном Лапласом в 1796 г. Согласно этой гипотезе, Солнечная система образовалась из вращающегося горячего газового облака, которое сжималось под воздействием гравитации и распадалось на фрагменты (рис. 50). Однако эта гипотеза оказалась несостоятельной из-за множества противоречий. Джеймс Джинс в 1919 г. выдвинул гипотезу, согласно которой планетное вещество было «вырвано» из Солнца под воздействием близко проходящей звезды. Вырванное солнечное вещество распалось на отдельные части, образуя планеты.

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.

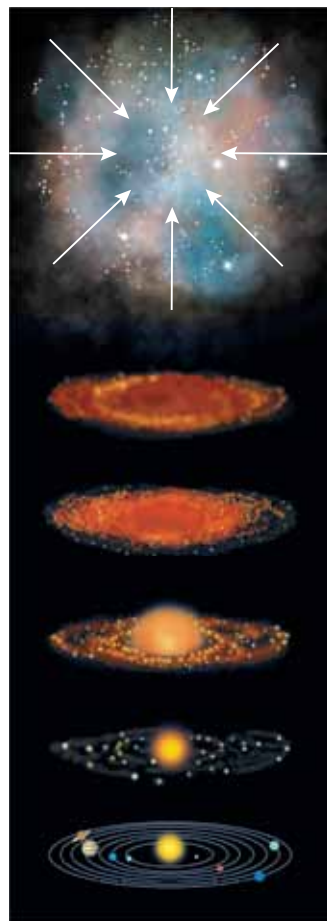


Рис. 50. Образование Солнечной системы по гипотезе О. Ю. Шмидта

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 других разных по составу частичек, содержащих как металлы, так и редкие изотопы тяжелых химических элементов, начало сгущаться. В нем образовались уплотнения, 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 облака образуется молодое Солнце. Образовавшийся вокруг него протопланетный диск поглотит большую часть момента количества движения.

2. Постепенно в диске газопылевого облака мельчайшие пылинки стали объединяться, захватывая газы из окружающего пространства. Из мелких частичек образовывались более крупные комки, а 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 земной группы. Частички в средней холодной зоне покрывались льдом, ядра будущих планет-гигантов быстро росли, захватывая окружающий газ. В самой холодной внешней части диска конденсирующее вещество почти все было ледяным. Множество отдельных ледяных планетезималий и глыб породили ядра комет и ледяные астероиды.

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.

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



### Главные выводы

1. Солнечная система — это материя и все космическое пространство, находящееся в сфере притяжения Солнца.
2. Солнечная система состоит из Солнца, больших и карликовых планет и их спутников, малых тел, межпланетной пыли, плазмы, физических полей.
3. Главные особенности Солнечной системы состоят в том, что ее основная масса сосредоточена в Солнце, орбиты планет и большинства астероидов лежат почти в одной плоскости, обращаются в том же направлении, что и Солнце.
4. Среди планет Солнечной системы различают планеты земной группы и планеты-гиганты.
5. Солнечная система образовалась в процессе эволюции вращающегося газопылевого облака.



### Контрольные вопросы и задания

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. Каков возраст древнейших пород Земли; минералов, доставленных с Луны; метеоритов, упавших на Землю?
5. В чем состоит суть гипотез И. Канта, П. Лапласа, Дж. Джинса, О. Ю. Шмидта о происхождении Солнца и планет?
6. Укажите основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы.

## § 13. Планеты земной группы

**1. Меркурий.** Меркурий — самая близкая к Солнцу планета. Она постоянно «прячется» в солнечных лучах, и поэтому ее очень трудно увидеть земному наблюдателю.

У Меркурия нет атмосферы, и его поверхность не защищена от палящих солнечных лучей днем и космического холода ночью. Днем на поверхности планеты в экваториальных районах 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.



Рис. 51. Меркурий



Рис. 52. Крутые уступы на поверхности Меркурия

Вся каменная поверхность Меркурия покрыта многочисленными кратерами (рис. 51). Большинство из них образовались в результате падения метеоритов. Кратеры на картах Меркурия названы в честь выдающихся представителей мировой культуры: Бетховен, Гомер, Достоевский, Пушкин, Толстой и др.

Ось вращения Меркурия перпендикулярна 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. 52). Вероятно, они появились при формировании 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 земного.

Параметры Меркурия смотрите в таблице 2.

Таблица 2. Параметры Меркурия

Звездная величина (максимальная)	-2,2	Диаметр по экватору	4880 км
Среднее расстояние до Солнца	57,9 млн км	Масса (Земля = 1)	0,055
	0,387 а. е.	Средняя плотность	$5,43 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

Окончание таблицы

Период обращения вокруг Солнца	88 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
Период вращения вокруг оси	58,6 земных суток	Температура поверхности на экваторе	От $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$
			



**2. Венера.** Венера — вторая от Солнца планета Солнечной системы (рис. 53). Она почти такого же размера, как Земля, а ее масса составляет около 80 % земной массы. На небе 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 ее советские космические аппараты «Венера» сфотографировали безжизненную раскаленную пустыню. Температура поверхности достигает  $+464\text{ }^{\circ}\text{C}$  и почти не изменяется в течение суток (см. табл. 3 на с. 77). 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. На Венере обнаружены кратеры диаметром до сотен километров (рис. 54).



Рис. 53. Венера. Фотоснимок выполнен в ультрафиолетовых лучах



Рис. 54. Венера. Район Гор Максвелла: огромный кратер диаметром около 100 км

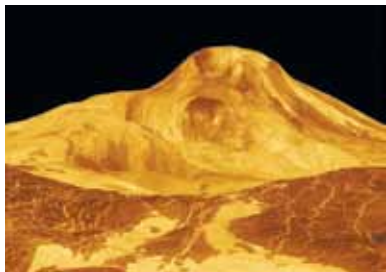


Рис. 55. Гора Маат — потухший вулкан на Венере

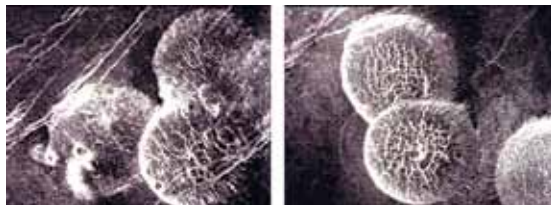


Рис. 56. Застывшие пузыри вулканической лавы на Венере. Радиолокационное изображение, переданное космическим кораблем «Магеллан» в 1991 г.

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. 55) — гора Маат, названная 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. 56).

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 воссозданы детали поверхности в объемном изображении (рис. 57).

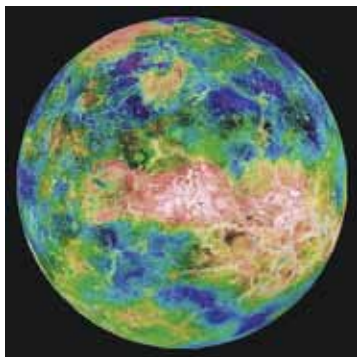


Рис. 57. Рельефная карта поверхности Венеры, составленная по данным радиолокационных исследований космического аппарата «Магеллан»

Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа. Давление у поверхности планеты в 92 раза 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 с востока на запад. Его напряженность в  $10^4$  раз меньше земного. Магнитосфера почти полностью отсутствует, поэтому поток заряженных частиц, идущий от Солнца, сталкивается с атмосферой планеты и увлекает за собой ее вещество, формируя ионный шлейф. Космические обсерватории определили, что этот «хвост» растягивается от 190 до 270 тыс. км.

Параметры Венеры смотрите в таблице 3.

Таблица 3. Параметры Венеры

Звездная величина (максимальная)	-4,6	Диаметр по экватору	12 104 км
Среднее расстояние до Солнца	108,2 млн км	Масса (Земля = 1)	0,815
	0,723 а. е.	Средняя плотность	$5,24 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период обращения вокруг Солнца	224,7 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,9
Период вращения вокруг оси (обратное вращение)	243 земных суток	Температура поверхности	+464 °С



**3. Земля.** Земля — третья по счету планета Солнечной системы. Из космоса наша планета выглядит красивым голубым шаром (рис. 58). Сквозь облачный покров можно рассмотреть материки и океаны. Океаны занимают почти 71 % поверхности Земли.

Детали поверхности Земли и условия жизни вам хорошо известны, поэтому мы остановимся более подробно на строении недр. Модели внутреннего строения Земли и остальных планет земной группы схожи.

По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях — **сейсмограммам** — было установлено, что внутреннее строение планеты



Рис. 58. Фотография Земли из космоса



по вертикали слоистое. По химическому составу и физическим характеристикам выделяют три основные сферические оболочки: твердую кору, мантию 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 из кислорода (49,1 %), кремния (26,0 %), алюминия (7,5 %), железа (4,2 %), кальция (3,3 %) и других химических элементов. 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 в 6000 К. Радиус ядра составляет 55 % 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 7 % от массы всей планеты, а его радиус составляет 28 % радиуса Марса. Ядра планет в основном состоят из железа с примесью никеля, серы. Жидкий внешний слой ядра, вероятно, есть у Меркурия и Венеры.

Источниками нагрева недр планет служат:

- 1) выделение тепла при распаде радиоактивных элементов;
- 2) энергия, выделяющаяся при ударах тел различного размера (астероидов и др.) о поверхность планеты;
- 3) 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. Движение вещества внутри планеты влияет 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 (78 %) и кислорода (21 %).

Параметры Земли смотрите в таблице 4.

Таблица 4. Параметры Земли

Угол наклона экватора к плоскости орбиты	23,4°	Диаметр по экватору	12 756 км
Среднее расстояние до Солнца	149,6 млн км	Масса	$5,97 \cdot 10^{24}$ кг
	1 а. е.	Средняя плотность	$5,52 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>

Окончание таблицы

Период обращения вокруг Солнца	365,26 земных суток	Температура поверхности	От $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+57\text{ }^{\circ}\text{C}$
Период вращения вокруг оси	23,93 ч		
 <p>Мантия      Земная кора Внутреннее ядро      Внешнее ядро</p>			

**4. Марс.** Марс — четвертая по счету планета Солнечной системы. Для наблюдателя она предстает в виде яркого красного светила (рис. 59). С помощью любительских телескопов можно увидеть полярные шапки Марса и некоторые крупные детали его поверхности.

Полученные с помощью космических аппаратов изображения поверхности Марса показали, что планета представляет собой безжизненную пустыню, значительная часть которой покрыта красноватым песком и усеяна камнями. Красный цвет поверхности Марса объясняется высоким содержанием в почве оксидов железа.

На поверхности Марса атмосфера очень разрежена, поэтому существуют большие суточные колебания температуры: если днем на экваторе температура поднимается летом до  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то ночью она опускается до  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зимой на поверхности Марса наблюдаются снег и иней (рис. 60). Вода в жидком



Рис. 59. Марс



Рис. 60. Снег на поверхности Марса. Фотография сделана спускаемым аппаратом «Викинг-2»

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  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и сразу же испаряется.

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

Поверхность Марса характеризуется четко выраженной асимметрией. Южное гористое полушарие в среднем на 2 км выше Северного. На снимках марсианской поверхности хорошо видны многочисленные крупные и мелкие каньоны. Их ширина достигает 600 км, глубина — 5 км. Самый большой каньон — Долина Маринера — тянется почти на 5000 км (глубина 7—10 км, ширина 600 км). На рисунке 59 он виден как темная структура, пересекающая диск планеты.

Поражают своими масштабами потухшие вулканы Марса. Самый высокий — гора Олимп (рис. 61) — поднимается над поверхностью на 27 км. Диаметр его основания достигает 600 км. Возраст данных структур — около 400 млн лет.



Рис. 61. Гора Олимп на Марсе



Рис. 62. Высохшие русла марсианских рек

Знаменитые полярные шапки Марса образованы толстыми, порядка 3 км, слоями льда, смешанного с пылью. Верхний слой полярных шапок состоит из «сухого льда» (замерзшего углекислого газа —  $\text{CO}_2$ ) с небольшой примесью обычного льда ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Температура здесь опускается ниже  $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Когда на одном из полушарий начинается зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает  $57^{\circ}$  широты в Северном полушарии и  $45^{\circ}$  в Южном. С приходом весны шапки начинают таять. На южной полярной шапке наблюдаются гейзеры. Во время формирования полярных шапок в атмосфере планеты можно наблюдать голубовато-белые облака.

Загадочные марсианские долины, похожие на высохшие русла рек (рис. 62), 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 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 (95 %). Скорость ветра у поверхности планеты не превышает 15 м/с, а во время пылевых бурь достигает 100 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 высотой до 8 км. Частички облаков состоят из силикатных и ледяных пылинок. Пыль на Марсе поднимается так высоко в атмосферу, что даже закрывает гору Олимп.

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

Параметры Марса смотрите в таблице 5.

Таблица 5. Параметры Марса

Звездная величина (максимальная)	-2,9	Диаметр по экватору	6792 км
Среднее расстояние до Солнца	227,9 млн км	Масса (Земля = 1)	0,107
	1,524 а. е.	Средняя плотность	$3,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период обращения вокруг Солнца	1,88 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
Период вращения вокруг оси	24,62 ч	Температура поверхности	От $-153 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+35 \text{ }^\circ\text{C}$



### ! Главные выводы

1. Планеты земной группы сравнительно малы (их общая масса не превышает 0,5 % массы всех планет Солнечной системы) и представляют собой твердые тела с высокой средней плотностью.
2. Все планеты земной группы обладают сходным строением и состоят из ядра, мантии, твердой коры.
3. Для поверхностей планет земной группы характерно наличие кратеров, гор, вулканов.
4. Планеты земной группы (кроме Меркурия) имеют внешние оболочки: атмосферу (Венера, Земля, Марс), гидросферу и биосферу (Земля), криосферу (Марс).

### ? Контрольные вопросы и задания

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



Рис. 63. Юпитер. Темное пятно — тень спутника Европа. Фотография получена космическим аппаратом «Кассини»

**1. Юпитер.** Юпитер — самая большая из планет-гигантов (рис. 63). 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, что характерно и для других планет этой группы. 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 эквато-



Рис. 64. Большое Красное пятно на Юпитере

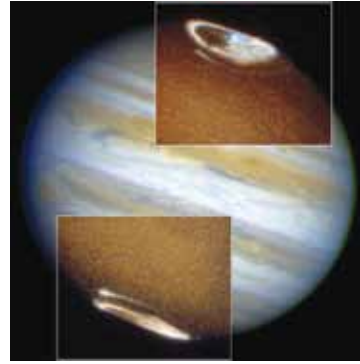


Рис. 65. Полярные сияния на Юпитере. Фотография космического телескопа Хаббла



ру. Окраску облакам придают примеси аммиачных образований, метан и другие сложные соединения.

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 светлых зон и остывают, достигнув верхней границы облаков. Охлаждаясь, они падают в соседние полосы, где давление низкое.

В экваториальной зоне (от  $+9^\circ$  до  $-9^\circ$ ) газовые течения направлены строго с запада на восток. Скорость движения газовых масс достигает 180 м/с (по исследованиям межпланетной космической станции «Галилео»). Вблизи широт от  $+20^\circ$  до  $-20^\circ$  вещество движется в противоположную сторону, с востока на запад, со скоростью около 50 м/с. Между основными течениями существуют вихри и струи.

Для Юпитера, как и для всех планет-гигантов, характерны светлые и темные овальные пятна. Наиболее примечательное из них — Большое Красное пятно (рис. 64), наблюдающееся в течение трех веков. Это огромный и очень устойчивый вихрь, похожий на земной ураган.

В полярных облаках Юпитера наблюдается явление, подобное земному полярному сиянию (рис. 65).

Представления о внутреннем строении планет-гигантов получены на основе наблюдений и теоретических моделей, базирующихся на свойствах водорода.

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

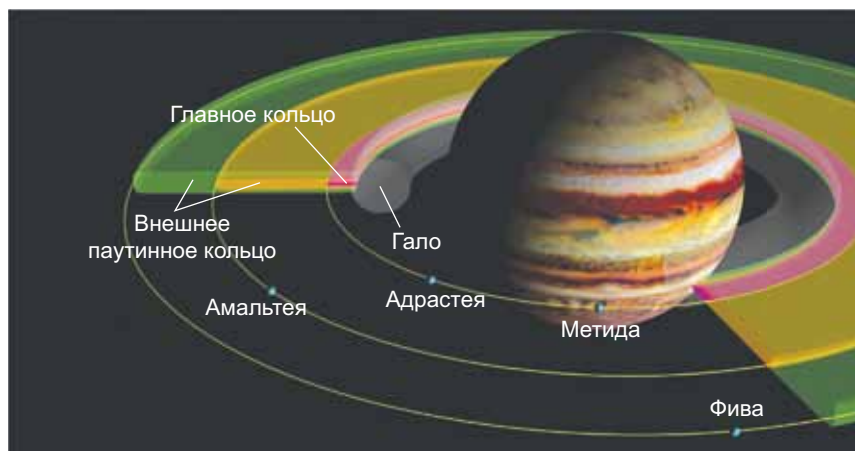


Рис. 66. Схема колец Юпитера

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

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

В 1979 г. космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» обнаружили у Юпитера кольца (рис. 66). Они состоят из очень мелких пылинок (0,2—200 мкм). Эти пылинки постепенно падают в атмосферу Юпитера, а их место занимают другие, которые образуются при столкновении малых спутников, особенно Амальтеи, с метеоритными телами.

Параметры Юпитера смотрите в таблице 6.

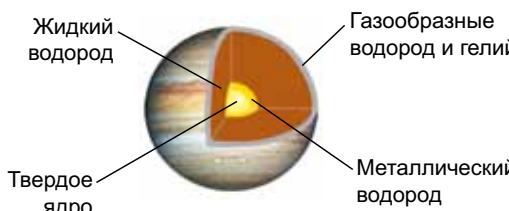
Таблица 6. Параметры Юпитера

Звездная величина (максимальная)	-2,9	Диаметр по экватору	142 980 км
Среднее расстояние до Солнца	778,5 млн км	Масса (Земля = 1)	318
	5,204 а. е.	Средняя плотность	$1,33 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>



Окончание таблицы

Период обращения вокруг Солнца	11,86 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	2,2
Период вращения вокруг оси	9,92 ч	Температура верхнего слоя облаков	-133 °С



**2. Сатурн.** Сатурн — это вторая по величине планета-гигант, окруженная красивыми кольцами (рис. 67). Диск планеты заметно сплюснут у полюсов. Это вызвано тем, что у Сатурна самая низкая плотность из всех планет Солнечной системы.

Кольца Сатурна (рис. 68) заметил еще Галилео Галилей: в 1610 г. он обнаружил по обе стороны диска непонятные придатки. Но только Христиан Гюйгенс в 1656 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



Рис. 67. Сатурн.  
Фотография сделана  
космическим телескопом Хаббла

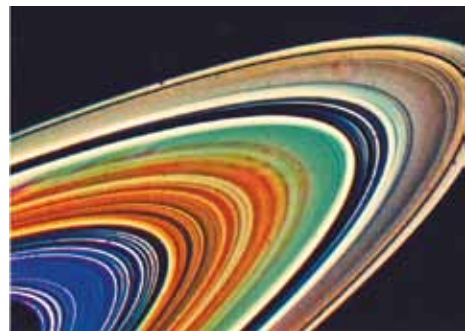


Рис. 68. Структура колец Сатурна (цвета ненатуральные — они подчеркивают различие минералогического состава колец)

тел. Снимки, полученные космическим аппаратом «Вояджер-2», показали, что систему колец образуют тысячи тонких колец. Каждое из них состоит из бесчисленного множества обломков льда размером от мельчайших пылинок до нескольких метров. Толщина колец не превышает 2 км.

Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна, которая имеет наклон  $26^{\circ}45'$  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.

Параметры Сатурна смотрите в таблице 7.

Таблица 7. Параметры Сатурна

Звездная величина (максимальная)	-0,2	Диаметр по экватору	120 536 км
Среднее расстояние до Солнца	1433 млн км	Масса (Земля = 1)	95,2
	9,59 а. е.	Средняя плотность	$0,69 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Период обращения вокруг Солнца	29,46 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	1,1
Период вращения вокруг оси	10,57 ч	Температура верхнего слоя облаков	-140 °С
 <p>Ячейки с циркулирующими водородом и гелием</p> <p>Металлический водород с капельками гелия</p> <p>Каменное ядро</p>			

**3. Уран.** Уран — третья по величине планета-гигант. Планета очень красивого зеленовато-голубоватого цвета (рис. 69). Причина этого кроется в составе атмосферы планеты и ее температуре. При температуре  $-217$  °С 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.

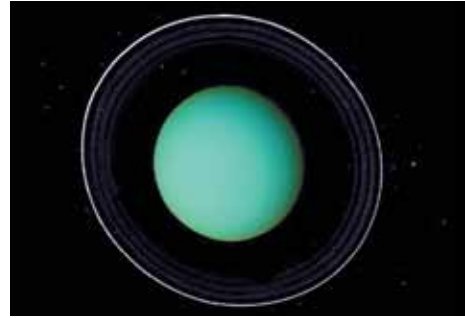


Рис. 69. Уран. Фотография получена космическим телескопом Хаббла

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

Параметры Урана смотрите в таблице 8.

Таблица 8. Параметры Урана

Звездная величина (максимальная)	5,4	Диаметр по экватору	51 120 км
Среднее расстояние до Солнца	2877 млн км	Масса (Земля = 1)	14,5
	19,23 а. е.	Средняя плотность	$1,27 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период обращения вокруг Солнца	84,0 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,9
Период вращения вокруг оси (обратное вращение)	17,24 ч	Температура верхнего слоя облаков	-197 °С
<p>Атмосфера из водорода, гелия и метана</p> <p>Мантия из замерзших воды, метана и аммиака</p> <p>Каменное ядро</p>			

**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



Рис. 70. Нептун. Большое Темное пятно. Фотография сделана космическим аппаратом «Вояджер-1»

облака, появляющиеся и исчезающие в атмосфере планеты. Примечательной деталью Нептуна является и Большое Темное пятно (рис. 70), 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 — от 15 до 5000 км. Они состоят из мелких силикатных пылинок, отражающих 6 % солнечного света.

Напряженность магнитного поля у Нептуна в 3 раза меньше, чем у Земли. Параметры Нептуна смотрите в таблице 9.

Таблица 9. Параметры Нептуна

Звездная величина (максимальная)	7,8	Диаметр по экватору	49 528 км
Среднее расстояние до Солнца	4503 млн км	Масса (Земля = 1)	17,1
	30,1 а. е.	Средняя плотность	$1,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период обращения вокруг Солнца	164,8 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	1,1
Период вращения вокруг оси	15,97 ч	Температура верхнего слоя облаков	-200 °C





### Главные выводы

1. В отличие от планет земной группы планеты-гиганты представляют собой крупные массивные газообразные тела с малой плотностью, удаленные от Солнца на значительное расстояние (от 5 до 30 а. е.).
2. Планеты-гиганты очень быстро вращаются вокруг своих осей.
3. Все планеты-гиганты имеют кольца.
4. Основными компонентами атмосфер этих планет являются водород и гелий.



### Контрольные вопросы и задания

1. Укажите на отличие основных физических характеристик планет-гигантов от планет земной группы.
2. Какова особенность вращения планет-гигантов вокруг оси?
3. Расскажите об особенностях строения планет-гигантов.
4. Что представляют собой кольца планет?
5. Почему иногда даже в крупные телескопы не видны кольца Сатурна?

## § 15. Луна. Спутники планет

**1. Физические условия на Луне.** Луна — единственный естественный спутник Земли. Это тело шарообразной формы диаметром 3476 км. Масса Луны 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 виде и практически нет атмосферы. За лунный день, который длится около 15 земных суток, поверхность успевает нагреться до  $+127\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а ночью охладиться до  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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 метеорных тел разного размера.

Невооруженным глазом на лунной поверхности различимы светлые и темные участки. На темные, относительно ровные области поверхности, названные



Рис. 71. Вид Луны в телескоп

«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. 71). 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 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. 72).



Рис. 72. Карта-схема крупнейших деталей видимого в телескоп с Земли полушария Луны



Рис. 73. Часть поверхности Луны. Фотография получена станцией «Зонд»



Рис. 74. Земля, видимая с поверхности Луны



Самыми многочисленными образованиями на лунной поверхности являются кратеры (рис. 73). 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.

В полнолуние у «молодых» кратеров, имеющих метеоритное происхождение, 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 Луны. Из струй измельченного вещества формируются лучевые системы. Для наблюдателя лучи кажутся более светлыми потому, что они отражают свет лучше, чем плотное вещество того же состава.

Крупные и средние кратеры названы в честь выдающихся ученых: Птолемей, Архимед, Платон, Коперник, Тихов, Шмидт и др.

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.

Американские астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин стали первыми людьми, ступившими на поверхность Луны 20 июля 1969 г. Астронавты, находясь на Луне, могли видеть на небе Землю (рис. 74). Американские космические корабли серии «Аполлон» в течение последующих трех лет шесть раз доставляли в разные места Луны экспедиции (12 астронавтов занимались исследованиями



Рис. 75. Основные типы частичек лунного реголита

в местах посадок, им удалось собрать более 360 кг лунных образцов; лунные породы доставляли и советские автоматические станции «Луна»).

Поверхностный слой естественного спутника Земли состоит из мелкообломочного материала — **реголита** (рис. 75) и имеет толщину около 10 м. В состав лунного реголита входят также стеклянные сферические микрочастицы. Дробление лунных пород происходит в основном из-за микрометеоритной

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

По химическому составу лунные породы очень близки к базальтовым породам Земли. Породы лунных морей отличаются высоким содержанием оксидов железа и титана, материковые — высоким содержанием оксидов алюминия.

В последнее время космические станции обнаружили запасы водяного льда в полярных областях Луны. Поскольку угол наклона лунного экватора к эклиптике всего  $1,5^\circ$ , то дно даже неглубоких кратеров в полярных областях никогда не освещается солнечными лучами. При постоянной температуре  $-173^\circ \text{C}$  дно полярных кратеров покрывает смесь реголита со льдом. Источником возникновения и накопления лунных полярных льдов могут быть упавшие в эти области кометы, которые представляют собой ледяные тела.

Внутреннее строение Луны изучено по 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, толщина которой 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 находится металлическое ядро радиусом около 300 км, масса которого составляет около 3 % от общей массы Луны.

Существует несколько гипотез образования Луны. По одной из самых популярных Луна образовалась вместе с Землей из одной планетезимали. Было предположение, что Земля могла разделиться на две части и что впадина



Тихого океана — это «яма», оставшаяся после того, как Луна «вырвалась» из Земли.

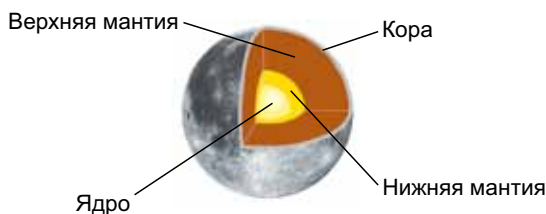
Некоторые ученые полагают, что Луна образовалась путем объединения крошечных камешков, обращавшихся вокруг Земли 4,5 млрд лет назад. Накопление частиц под действием сил гравитации, действующих вблизи Земли, стало «уменьшенным» вариантом процесса, который происходил в первичной солнечной туманности и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

Параметры Луны смотрите в таблице 10.

Таблица 10. Параметры Луны

Звездная величина (максимальная)	-12,7	Диаметр по экватору	3476 км
Среднее расстояние до Земли	384,4 тыс. км	Масса (Земля = 1)	0,0123
	60,3 радиуса Земли	Средняя плотность	$3,346 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Период обращения вокруг Земли	27,32 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,17
Период вращения вокруг оси	27,32 земных суток	Температура поверхности	От $-173 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+127 \text{ }^\circ\text{C}$



**2. Спутники планет.** В Солнечной системе на начало 2021 г. было известно 205 естественных спутников планет. Семь спутников, включая Луну, имеют диаметр больше 2500 км, а Ганимед и Титан (см. табл. 11 на с. 94) даже превосходят по размеру Меркурий.

Таблица 11. Крупные спутники планет

Характеристики	Спутники						
	Ганимед	Титан	Каллисто	Ио	Луна	Европа	Тритон
Планета	Юпитер	Сатурн	Юпитер	Юпитер	Земля	Юпитер	Нептун
Диаметр, км	5268	5152	4820	3642	3476	3130	2700
Масса, $\times 10^{23}$ кг	1,48	1,35	1,08	0,893	0,735	0,485	0,215
Плотность, $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	1,9	1,9	1,8	3,5	3,3	3,0	2,1
Температура поверхности, °С	-163	-179	-140	-163	От -173 до +127	-140	-235

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 еще в 1610 г. Галилеем. Однако основные сведения о природе крупных спутников планет-гигантов получены в результате исследований с помощью космических аппаратов.

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. 76), Европа (рис. 77) и Ганимед. У Тритона и Каллисто (рис. 78) каменные ядра такого же или даже большего размеров.



Рис. 76. Ио — спутник Юпитера. Извержение вулкана. Фотография сделана межпланетным аппаратом «Галилео»

Силикатная (каменистая) кора Ио имеет толщину 30 км. Под ней на глубине 100 км находится жидкая магма, температура которой достигает 1600 К. Магма питает многочисленные вулканы Ио. Остальные спутники покрыты ледяной оболочкой разной толщины, под которой расположена каменная мантия.



Рис. 77. Европа — спутник Юпитера

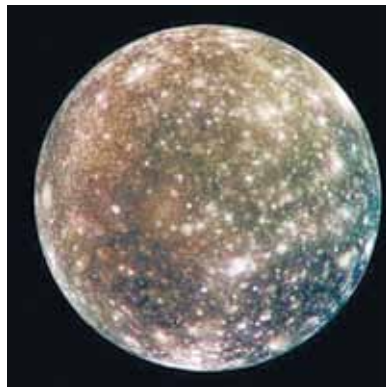


Рис. 78. Каллисто — спутник Юпитера

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 смещаются относительно друг друга. Это значит, что подо льдом находится вода. В некоторых местах ледяного панциря Европы космический аппарат «Галилео» сфотографировал странные хаотические нагромождения старых льдин, вмороженных в свежий лед. Эти структуры называются «хаосами» (рис. 79). Они свидетельствуют о том, что время от времени лед подтаивает, но потом снова застывает. Не успевшие растаять льдины оказываются вмороженными 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 вулканы. Выброшенные вулканами и оседающие на поверхности соединения серы придают спутнику окраску от белой до ярко-красной и черной (см. рис. 76). При этом цвет зависит от температуры вещества. Из жерла вулканов газы выбрасываются на высоту около 500 км со скоростью примерно 1 км/с. Газовые гейзеры замечены над полярной



Рис. 79. Хаосы на спутнике Юпитера Европа





Рис. 80. Титан — спутник Сатурна — имеет очень плотную атмосферу



Рис. 81. Фобос — спутник Марса. Справа внизу кратер Стикни



шапкой Тритона. Струи темного вещества вырываются вверх с его поверхности и достигают высоты 8 км.

Наиболее мощную атмосферу имеет Титан (рис. 80). Она на 60 % более плотная, чем земная, и примерно на 95 % состоит из азота. Давление у поверхности в 1,5 раза превышает земное. Космический аппарат «Гюйгенс» в 2005 г. обнаружил на Титане горные хребты, русла рек, озера жидкого метана и этана.

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 оксидов серы и вулканических газов обладает Ио ( $10^{-9}$  земной).



Рис. 82. Миранда — спутник Урана

У нескольких крупных спутников обнаружены собственные магнитные поля.

Из планет земной группы, кроме Земли, только Марс имеет два спутника, открытых в 1877 г. американским астрономом Асафом Холлом. Это небольшие каменные тела неправильной формы размером  $27 \times 22 \times 19$  км — Фобос (рис. 81) и  $16 \times 12 \times 10$  км — Деймос.

Изображения некоторых других спутников планет Солнечной системы представлены на рисунках 82—84.



Рис. 83. Мимас — спутник Сатурна. Большой кратер имеет диаметр свыше 100 км



Рис. 84. Энцелад — спутник Сатурна



### ! Главные выводы

1. Луна — спутник Земли и ближайшее к Земле небесное тело.
2. По своей природе Луна, как и другие крупные спутники планет, близка к планетам земной группы.
3. Небольшие спутники планет (размером в десятки километров) представляют собой каменные или ледяные тела неправильной формы.

### ? Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте физические условия на Луне. Чем они отличаются от условий на Земле?
2. Какие детали на Луне видны невооруженным глазом, а какие — в телескоп?
3. Приведите примеры названий некоторых лунных кратеров, морей и горных хребтов.
4. Почему обратную сторону Луны удалось сфотографировать только при ее облете на космическом аппарате?
5. Что представляет собой лунный грунт? Отличается ли он от земного?
6. Опишите внутреннее строение Луны. Каким образом оно было изучено?
7. Какие гипотезы образования Луны вы знаете и можете предложить?
8. Назовите крупнейшие спутники планет Солнечной системы. Расскажите о некоторых характерных особенностях каждого из них.

## § 16. Карликовые планеты и малые тела Солнечной системы

**1. Карликовые планеты.** В августе 2006 г. на Ассамблее Международного астрономического союза было принято новое определение планеты и впервые введено понятие «карликовая планета». **Карликовыми планетами** считаются объекты, вращающиеся вокруг звезды, имеющие гидростатически равновесную форму (шарообразную), но не расчистившие близлежащее пространство и не являющиеся спутниками больших планет.

До августа 2006 г. Плутон, открытый Клайдом Томбо в 1930 г., считался девятой планетой Солнечной системы. Однако по динамическим и физическим характеристикам он существенно отличался от других планет. В 1978 г. у Плутона был открыт спутник — Харон. Его диаметр составляет 1212 км, чуть больше половины диаметра Плутона, а соотношение масс — 1 : 8. Одни астрономы причисляли Харон к спутникам, другие считали систему Плутон — Харон двойной планетой. Согласно решению Международного астрономического союза, отличие двойной планеты от системы планета — спутник (например, Земля — Луна) кроется в расположении барицентра — общего центра масс. В первом случае этот центр находится в открытом космосе, во втором — внутри основной планеты, имеющей спутники.

Стало очевидным, что Плутон — лишь один из наиболее крупных известных до настоящего времени объектов **пояса Койпера**, причем по крайней мере один из объектов пояса (Эрида) является более крупным телом, чем Плутон (рис. 85).



Рис. 85. Сравнительные размеры Земли и карликовых планет



Планеты и карликовые планеты — это два разных класса объектов Солнечной системы. Кроме Плутона, карликовыми планетами считаются Церера, находящаяся между орбитами Марса и Юпитера, и объекты пояса Койпера — Эрида, Хаумеа и Макемаке (их фотографии см. в Атласе). По мнению астрономов, в области пояса Койпера находятся десятки карликовых планет, подобных Плутону.

**2. Астероиды.** Все другие объекты, кроме карликовых планет, обращающиеся вокруг Солнца и не являющиеся спутниками, называются **малыми телами** Солнечной системы. К данному типу относится большинство астероидов между Марсом и Юпитером, а также транснептуновые объекты пояса Койпера, кометы и все остальные тела, обращающиеся вокруг Солнца.

После 1801 г. между орбитами Марса и Юпитера были обнаружены карликовая планета Церера и множество астероидов. **Астероид** (малая планета) — малое тело Солнечной системы, имеющее неправильную форму и находящееся на гелиоцентрической орбите. К началу XX в. было обнаружено около 500 астероидов с диаметрами от нескольких десятков километров и больше. В апреле 2019 г. каталог пронумерованных астероидов содержал более 524 тыс. наименований. Всего открыто около 900 тыс. объектов, около 4 % из них имеют собственные 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 движутся в ту же сторону, что и большие планеты. Область пространства между орбитами Марса и Юпитера, где находится подавляющее большинство астероидов, называется Главным поясом астероидов.

По одной из гипотез 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. По другой версии предполагается, что астероиды возникли в результате разрушения гипотетической планеты, находившейся между Марсом и Юпитером.

В 1951 г. 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.



Рис. 86. Астероид Ида со спутником Дактиль

с размерами  $33 \times 13 \times 13$  км и плотностью  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, близкой к плотности пород земной коры. Поверхность астероида покрыта пылью и усеяна кратерами и валунами (диаметром до 100 м).

Предполагается, что в Солнечной системе на расстоянии, не превышающем 100 а. е., находится около 1 млн малых тел размерами до 1 км. Орбиты астероидов увеличивают свой эксцентриситет до 0,8 из-за гравитационных сил со стороны планет-гигантов. Благодаря этому некоторые астероиды 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.

29 января 2008 г. на опасно близком расстоянии от Земли (600 тыс. км) пролетел астероид размером 0,25 км. В ряде стран созданы Службы по слежению за опасными астероидами, чтобы в случае угрозы Земле провести работу по изменению их орбиты или уничтожению.

Первоначально астероидам давали имена мифологических богинь, потом просто женские имена. Когда иссякли и они, астероиды стали называть в честь известных ученых, различных стран и городов. Среди астероидов есть такие, названия которых связаны с Республикой Беларусь, — Минск, Белоруссия, Брест, Хатынь, Шагал, Витебск, Алферов, Голубев и др.

**3. Метеориты.** В межпланетном пространстве движется огромное количество каменных и железных тел, самых разнообразных по размерам, форме и составу. Эти тела получили название **метеоритных тел**. При вторжении такого тела в атмосферу Земли с космической скоростью в результате трения о воздух оно нагревается, начинает плавиться и светиться — на небе появляется яркий

Впервые сфотографировал поверхность астероидов межпланетный космический аппарат «Галилео». Следуя к Юпитеру, он запечатлел астероиды Гаспра и Ида со спутником Дактиль (рис. 86).

Первую мягкую посадку на поверхность астероида совершил космический аппарат NEAR 12 февраля 2001 г. Астероид Эрос оказался каменистым телом неправильной формы



огненный шар. Это явление получило название **болид** (от греч. βολιδος — 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 срыгается 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 небесных тел Солнечной системы. 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, который 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. 87). Возможно, он появился 30 тыс. лет назад. Кратеры большого размера (хорошо сохраняющиеся на поверхности Луны) на Земле обнаружить сложно. Они быстро разрушаются под воздействием воздуха, воды, ветра, растительности, заносятся слоем песка и грунта. Ученые с помощью космических снимков научились находить древние метеоритные кратеры на Земле. Сегодня обнаружено более 150 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 три основных класса: каменные, железо-каменные и железные.



Рис. 87. 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**.

На территории Республики Беларусь найдено шесть крупных метеоритов. Например, в 1954 г. железный метеорит массой 300 кг найден у деревни Греск Слуцкого района Минской области.

Массы большинства метеоритов колеблются от сотен граммов до нескольких килограммов. Некоторые крупные тела разрушаются в атмосфере и выпадают множеством мелких осколков, как в 2013 г. в Челябинске. Падение сопровождалось распространением серии ударных волн, приведших к незначительным разрушениям зданий и ранениям людей.

**4. Кометы.** О кометах — «хвостатых звездах» — было известно 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, 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. 88).

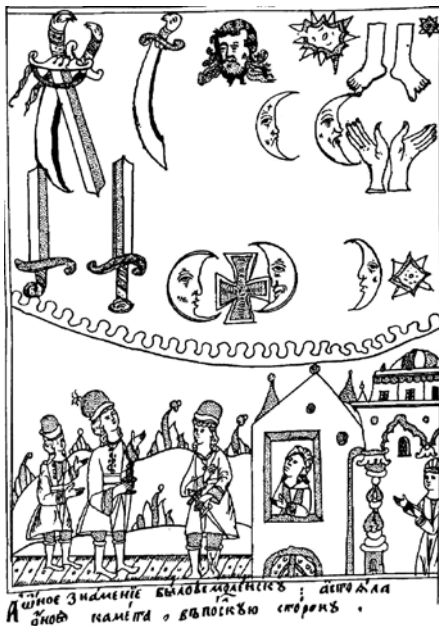


Рис. 88. Древняя гравюра, рассказывающая о появлении кометы в Смоленске

За историю человечества наблюдалось около 6500 комет. Зарегистрировано в каталогах около 1000 таких объектов, определены элементы их орбит. Почти все кометы движутся по вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом, близким к единице. Кометы подразделяются на **короткопериодические** (с периодом обращения меньше 200 лет) и **долгопериодические**. Первую периодическую комету обнаружил Эдмунд Галлей. Он вычислил орбиты 24 ярких комет, заметил сходство элементов орбит комет 1531, 1607 и 1682 гг. и предположил, что это последовательное 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 обнаружили в 1758 г. За этой кометой закрепилось название «комета Галлея» (рис. 89). Она движется по орбите с большой полуосью  $a = 17,94$  а. е. в направлении, противоположном движению Земли.

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

Ядро кометы — это небольшое твердое ледяное тело, включающее тугоплавкие частички и органические соединения. До 80 % ядра кометы составляет водяной лед, а также замерзший углекислый газ, угарный газ, метан, аммиак и вкрапленные в лед металлические частицы. По результатам исследований, выполненных космическими аппаратами, ядро кометы Галлея представляет собой монолитное тело неправильной формы размерами  $16 \times 8$  км, массой  $3 \cdot 10^{14}$  кг и малой плотностью порядка  $600 \text{ кг/м}^3$ .

Для установления характеристик ядер комет в 2004 г. к комете Чурюмова—Герасименко был запущен космический аппарат «Розетта». В 2014 г. отделившийся от «Розетты» спускаемый зонд «Филы» совершил посадку на поверхность кометы (рис. 90).

При приближении к Солнцу на расстоянии нескольких астрономических единиц 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.

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 микрон.

3. Хвост, состоящий из более крупной пыли, сильно изогнут под воздействием магнитного поля.



Рис. 89. Комета Галлея.  
8 марта 1986 г.



Рис. 90. Космический аппарат «Розетта» и спускаемый зонд «Филы» проводят исследование кометы Чурюмова—Герасименко



Рис. 91. Разрушение кометы Шумейкеров—Леви-9 в окрестности Юпитера и падение ее фрагментов на планету



вошли в атмосферу планеты со скоростью 60 км/с (рис. 91). В результате возникли гигантские вихревые темные образования, сравнимые по размерам с размерами Земли. Существует вероятность столкновения ядер комет и с Землей.

**5. Метеоры и метеорные потоки.** При движении вокруг Солнца кометы распадаются. Вдоль их орбит вытягиваются шлейфы пыли, которые могут пересекать земную орбиту. Частичка, входя с космической скоростью в атмосферу Земли, сгорает и образует светящийся след. Это явление называется **метеором** (рис. 92). Сама частичка в этом случае называется **метеорным телом**.



Рис. 92. Яркий метеор

4. «Антихвост» — выброс из головы кометы направлен прямо к Солнцу.

Каждое возвращение кометы к Солнцу не проходит бесследно. Ядро кометы теряет около  $\frac{1}{1000}$  своей массы. Поэтому, например, время существования кометы Галлея оценивается в 20 тыс. лет. Но кометы могут существовать и меньше, так как они подвергаются разрушениям вследствие внутренних напряжений, возникающих из-за нагрева их Солнцем или приливного воздействия Солнца и планет-гигантов. Погибают кометы также при падении на Солнце, столкновении с планетами и метеоритными телами. Документально зарегистрировано более 30 комет, распавшихся на отдельные компоненты на глазах наблюдателей. Так, в 1992 г. комета Шумейкеров—Леви-9 сблизилась с Юпитером и раздробилась на 22 осколка. Спустя два года, обогнув по орбите Юпитер, осколки

Размеры метеорных тел, вызывающих явление метеора, находятся в пределах от нескольких микрон 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. Метеорные тела вторгаются в земную атмосферу со скоростью от 11 до 72 км/с, встречая на своем пути сильное и быстро на-

растающее сопротивление воздуха. Поверхность метеорного тела разогревается до нескольких тысяч градусов и превращается в раскаленный газ, который ионизирует окружающие молекулы воздуха. В результате чего наблюдатель на Земле видит светящийся огненный след.

Свечение метеора начинается на высоте 120 км и исчезает на высоте 60—80 км от поверхности Земли, когда тело полностью испаряется 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 **метеорным потокам**, или «звездным дождям». Метеорные потоки наблюдаются, когда Земля пересекает орбиту метеорного роя. Видимые пути метеоров одного потока, спроецированные на небесную сферу и продолженные в обратном направлении, пересекаются в одной области на небе, называемой **радиантом** (рис. 93).

Метеорный поток носит имя того созвездия, в котором находится радиант, например Дракониды, Ориониды и др. Среди метеорных потоков встречаются



Рис. 93. Радиант метеорного потока





Рис. 94. «Звездный дождь» Леониды. Гравюра. 1833 г.

такие, интенсивность которых из года в год не меняется. Это значит, что метеорные частички распределены почти равномерно вдоль орбиты роя. Наиболее известным таким потоком является «поток Персеидов», наблюдающийся ежегодно в августе. Орбита этого роя совпадает с орбитой кометы 1862 III.

Один раз в 33 года наблюдаются метеорные потоки с радиантом в созвездии Льва, когда Земля встречается с самой плотной частью роя. Этот рой вызывает метеорный поток Леониды (рис. 94), наблюдающийся в середине ноября. Орбита данного метеорного роя практически совпадает с орбитой кометы 1866 I. Таким образом, точно установлено родство метеорных роев с кометами. Комета, разрушаясь, порождает метеорный рой.



### Главные выводы

1. Карликовая планета — объект шарообразной формы, движущийся по гелиоцентрической орбите, но не расчистивший близлежащее пространство.
2. Тела Солнечной системы, обращающиеся вокруг Солнца и не являющиеся планетами, карликовыми планетами и их спутниками, называются малыми телами.
3. К малым телам Солнечной системы относятся: астероиды (малые планеты), метеорные и метеоритные тела, кометы.
4. Астероидно-кометная опасность — вероятность столкновения Земли с кометным ядром или астероидом, которое может привести к катастрофическим последствиям.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под карликовой планетой? Какие карликовые планеты вы знаете?
2. Расскажите, какие небесные объекты называют малыми телами.
3. Почему у астероидов нет атмосфер?
4. Какова связь комет с метеорами?
5. Существует ли опасность столкновения Земли с астероидом?
6. Охарактеризуйте смысл понятий «метеор», «метеорит», «болид».
7. Какова природа происхождения «звездных дождей»?
8. Что такое радиант метеорного потока?

## Раздел V

# 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 для всех видов излучения скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Важным свойством электромагнитного излучения является то, что скорость его распространения не зависит ни от длины волны, ни от скорости движения источника. Волны характеризуются частотой ( $\nu$ ) и длиной ( $\lambda$ ), между которыми существует зависимость:

$$c = \nu\lambda.$$

Электромагнитные волны, имеющие разную длину волны, взаимодействуют с веществом по-разному. Соответственно методы исследования электромагнитного излучения отличаются. В связи с этим электромагнитное излучение условно делится на несколько диапазонов (табл. 12).

Таблица 12. Диапазоны электромагнитного излучения

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

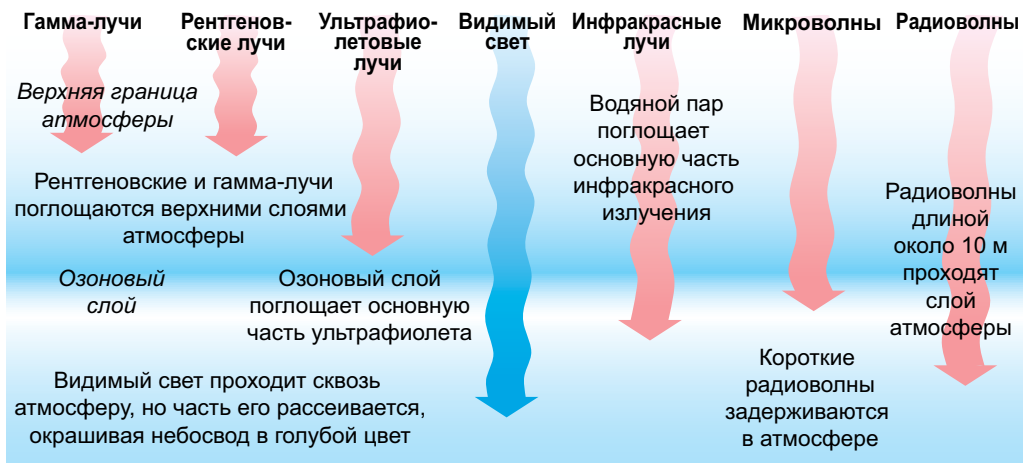


Рис. 95. Распространение излучения небесных тел в атмосфере Земли

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.

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 таких разделов, как гамма-астрономия, рентгеновская астрономия, инфракрасная астрономия, радиоастрономия и др.



Рис. 96. Международная космическая станция (МКС)

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. 95). Излучение, доходящее до поверхности Земли, исследуют с помощью оптических телескопов (видимый свет) и радиотелескопов.

Сильнее всего атмосфера поглощает коротковолновую область диапазона элек-





ромагнитного 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. 96), искусственных спутниках Земли и ракетах.

**2. Телескопы и их характеристики.** Изучать далекие недоступимые 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; смешанные зеркально-линзовые системы, к которым относятся телескопы Б. Шмидта, Д. Д. Максудова и др.

**Телескоп-рефрактор** в основном используется для визуальных наблюдений (рис. 97). Он имеет объектив и окуляр. 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 оптических искажений используют многолинзовые объективы с просветленной оптикой. Телескоп, совмещенный с фотокамерой, называют **астрографом**. Астрограф по сути представляет собой большой фотоаппарат: в фокальной плоскости его устанавливается кассета с фотопластинкой или ПЗС-матрица.

**Телескоп-рефлектор** имеет зеркальный объектив. В простейшем рефлекторе объектив — это одиночное, обычно параболическое зеркало; изображение получается в его главном фокусе.

По сравнению с рефракторами современные телескопы-рефлекторы имеют намного большие объективы. В рефлекторах с диаметром зеркала свыше

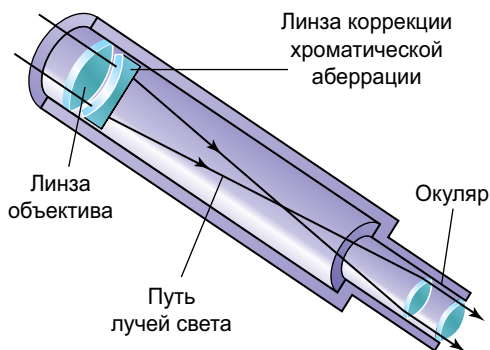


Рис. 97. Ход лучей в телескопе-рефракторе

2,5 м в главном фокусе иногда устанавливают кабину для наблюдателя. С увеличением размеров зеркала в таких телескопах приходится применять специальные системы разгрузки зеркал, исключая их деформации из-за собственной массы, а также принимать меры для предотвращения их температурных деформаций. Сооружение крупных рефлекторов (с диаметром цельного 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.

В небольших и средних по размерам рефлекторах для удобства наблюдения свет отражается дополнительным плоским (вторичным) зеркалом к стенке трубы, где находится окуляр (рис. 98). 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 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 перед ним. В телескопах системы Д. Д. Максудова искажения главного сферического или эллиптического зеркал исправляются мениском, установленным перед зеркалом (рис. 99). Мениск — это линза с мало отличающимися радиусами кривизны поверхности; такая линза почти не влияет на общий ход лучей, но заметно исправляет искажения оптического изображения.

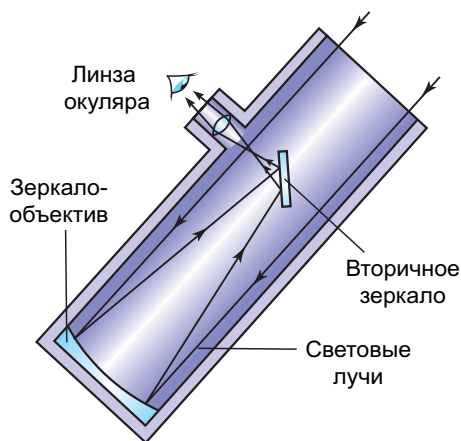


Рис. 98. Ход лучей в телескопе-рефлекторе

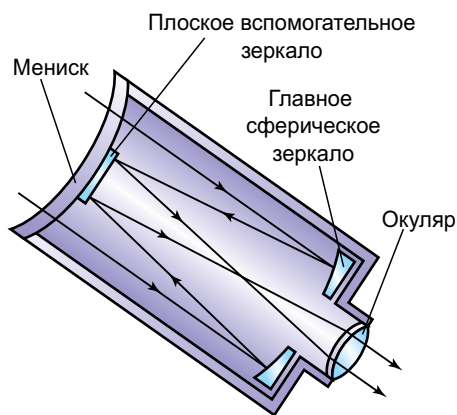


Рис. 99. Ход лучей в зеркально-линзовом менисковом телескопе

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

**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 (от нескольких сантиметров до 6 мм). Неспokoйная атмосфера Земли вызывает дрожание и искажение изображения, размывает его детали. Поэтому даже на крупных телескопах редко устанавливают увеличение более чем в 500 раз.

Под **разрешающей способностью ( $\psi$ )** оптического телескопа понимают наименьшее угловое расстояние между двумя звездами, которые могут быть видны в телескоп раздельно. Теоретически разрешающая способность (в секундах дуги) 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.

Также важной характеристикой телескопа является **проникающая сила ( $m$ )**, которая выражается предельной звездной величиной светила, доступного наблюдения с помощью данного телескопа при идеальных атмосферных условиях.

Для телескопов с диаметром объектива  $D$  (мм) проникающая сила  $m$ , выраженная в звездных величинах при визуальных наблюдениях, оценивается формулой

$$m = 2,0 + 5 \lg D.$$



Рис. 100. Космический телескоп Хаббла (США)

С 1995 г. в обсерватории Мауна-Кеа (США) работают два одинаковых 10-метровых телескопа «Кек-1» и «Кек-2». Каждое зеркало телескопа состоит из 36 сегментов. Качество изображения телескопов регулирует компьютер, управляющий каждым сегментом зеркала. По разрешающей способности такой телескоп приближается к космическому. Обсерватория расположена на высоте 4145 м над Тихим океаном на Гавайских островах.

Оптика космического телескопа Хаббла (рис. 100) 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, каждый из которых имеет диаметр 8,2 м. Крайние телескопы разнесены один от другого на расстояние 200 м, что позволяет всему комплексу 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 больше 6 м приближается к двадцати.

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

Самые крупные современные 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.

Компьютерная обработка изображения позволяет избавиться от фона и помех, 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 центра 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, 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.

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. 101. Радиотелескоп  
RATAN-600

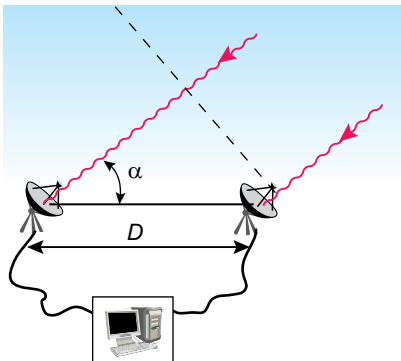


Рис. 102. Гигантский радиотелескоп  
FAST (Китай)

(рис. 101). Антенна этого телескопа представляет собой замкнутое кольцо диаметром 576 м, состоящее из 895 плоских зеркал размером  $2,1 \times 7,4$  м, образующих сегменты параболоида.

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. В 2016 г. в горах китайской провинции Гуйчжоу был построен самый большой в мире радиотелескоп FAST (рис. 102). Его гигантская чаша имеет диаметр 500 м, а это на 200 м больше размеров радиотелескопа в Пуэрто-Рико, который до появления своего китайского конкурента являлся самым большим в мире.

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



Регистрирующая аппаратура

Рис. 103. Схема работы  
радиоинтерферометра

интерференции радиосигналов разрешающая способность телескопов значительно возрастает. Такой инструмент называется **радиоинтерферометром**. На рисунке 103 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 друг от друга. 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.

В большей или меньшей степени радиоизлучательной способностью обладают все галактики. Но некоторые из них отличаются повышенной активностью. На рисунке 104 показано совмещение оптической фотографии и линий интенсивности радиоизлучения галактики Центавр А.

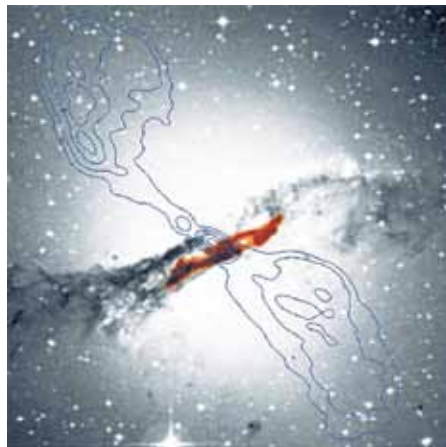


Рис. 104. Оптическое и радиоизлучение галактики Центавр А

Все известные радиоисточники в 80-х гг. XX в. 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 радиолокационные методы позволили проникнуть через плотную атмосферу Венеры и исследовать рельеф ее поверхности. С помощью радара были точно определены периоды вращения Венеры и Меркурия.

**4. Внеатмосферная астрономия.** Особый 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 всеволновой.

Применение **инфракрасного излучения** в астрономии началось с того, что с его помощью провели точные измерения температуры поверхности и атмосферы планет Солнечной системы. Таким же способом в атмосферах Марса, Венеры и Юпитера был обнаружен 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.



Рис. 105. Крабовидная туманность в рентгеновских лучах

кварзары. При помощи рентгеновских космических обсерваторий исследуются сверхновые звезды, туманности (рис. 105), нейтронные звезды, солнечная корона и вспышки на Солнце.

Современные орбитальные обсерватории оснащены приемниками разного типа излучения. Например, орбитальная обсерватория Свифт, запущенная в 2004 г. и изучающая космические гамма-всплески, ведет наблюдения одновременно в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом и оптическом диапазонах.

Для изучения гравитационных волн, открытых в 2015 г., используются гравитационно-волновые интерферометры.

Так как земная атмосфера сильно экранирует **ультрафиолетовое излучение**, его приемники приходится размещать на искусственных спутниках Земли. 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.

Источниками **гамма-излучения** являются вспышки на Солнце, ядра активных галактик,

### ! Главные выводы

1. Атмосфера Земли пропускает электромагнитное излучение лишь в определенных диапазонах волн, поэтому излучение от космических объектов на поверхности Земли исследуют с помощью оптических телескопов и радиотелескопов.
2. Внеатмосферная астрономия позволяет исследовать небесные объекты во всем диапазоне электромагнитного излучения.
3. В зависимости от конструкции различают оптические телескопы следующих типов: линзовые (рефракторы), зеркальные (рефлекторы) и зеркально-линзовые.
4. Основные оптические параметры телескопов — видимое увеличение, разрешающая способность, проникающая сила.
5. Увеличение разрешающей способности оптических и радиотелескопов достигается за счет объединения их комплексов в интерферометры.





### Контрольные вопросы и задания

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. Что понимают под разрешающей способностью телескопа? Проницающей способностью?
6. Что понимают под внеатмосферной астрономией?
7. Определите разрешающую способность зрительной трубы с диаметром объектива 5 см.
8. Увеличение телескопа равно 75. Фокусное расстояние объектива 5 м. Определите фокусное расстояние окуляра.
9. Из телескопа с фокусным расстоянием объектива 3 м вынули окуляр и глазом рассматривают очень далекий предмет, полученный в главном фокусе объектива. Какое увеличение дает телескоп?

## § 18. Спектральный анализ в астрономии

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

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

Спектры сравнительно ярких светил фотографируют с помощью щелевых спектрографов, состоящих из коллиматора, призмы и фотокамеры (рис. 106).

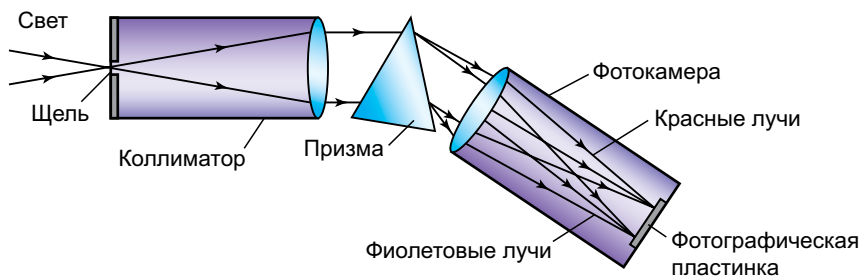


Рис. 106. Схема щелевого спектрографа

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. 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 используются 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. 107). 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 существуют спектры поглощения.

Сплошной спектр, пересеченный темными линиями или полосами в результате прохождения белого света через раскаленные газы или пары, называется

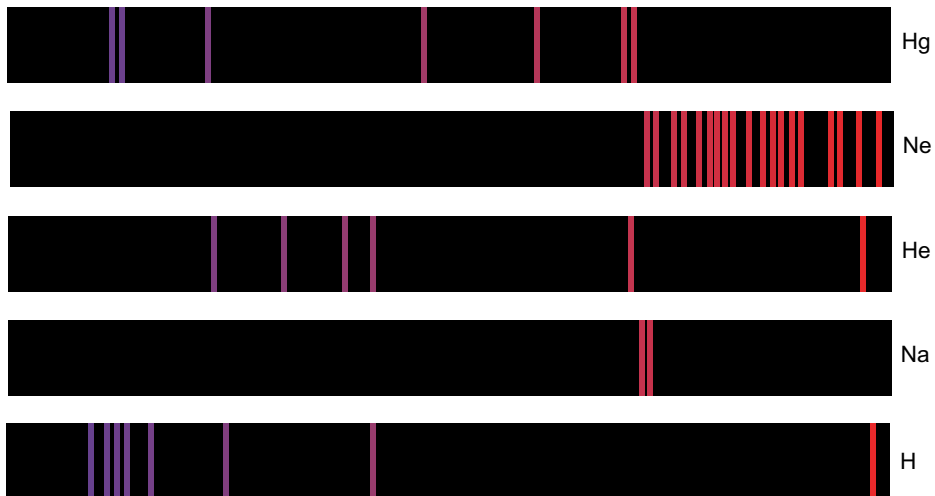


Рис. 107. Линейчатые спектры некоторых веществ (Hg, Ne, He, Na, H)

**спектром поглощения.** Исследование явления возникновения спектров поглощения показало, что *вещество поглощает лучи тех длин волн, которые оно может испускать в данных условиях.*

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 температуры, 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 изготовленного 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 испускает электромагнитные волны (тепловое излучение). При температурах, не превышающих  $10^3$  К, испускаются 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 электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода электромагнитной энергии во внутреннюю энергию тела.

Распределение энергии в непрерывном спектре тел разной температуры можно представить в виде графика (рис. 108). С увеличением температуры максимум излучения абсолютно черного тела смещается в коротковолновую область спектра. Длина волны  $\lambda_{\text{max}}$ , которой соответствует максимум в распределении энергии, связана с абсолютной температурой  $T$  соотношением, которое называют **законом смещения Вина**:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b,$$

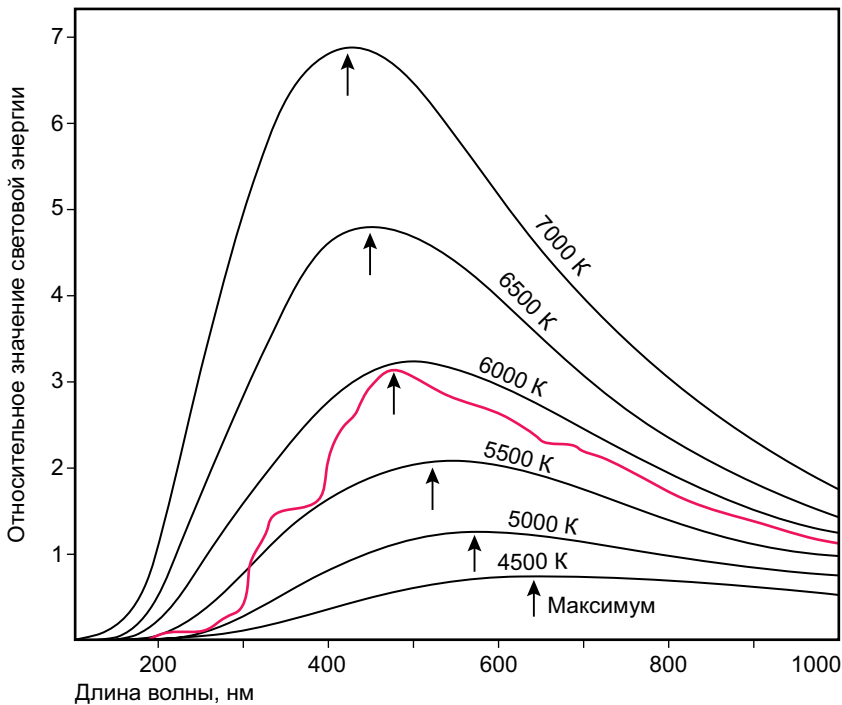


Рис. 108. Распределение энергии в непрерывных спектрах тел, нагретых до разных температур. Красная кривая линия — спектр Солнца

где  $b$  — постоянная Вина ( $b \approx 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ). 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  $6000 \text{ К}$ .

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  $\varepsilon$  — мощность излучения единицы поверхности нагретого тела,  $T$  — абсолютная температура,  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана, которая 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  $\lambda_0$ , которую излучает источник, наблюдатель фиксирует волну длиной  $\lambda$ , 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.

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  $v_r$ .

Данная 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. Истинность его выводов подтвердил в 1899 г. лабораторными опытами и наблюдениями спектров звезд русский астрофизик А. А. Белопольский.



### Главные выводы

1. Все светящиеся тела создают спектры испускания, которые могут быть сплошными (непрерывными), линейчатыми и полосатыми.
2. Каждый химический элемент имеет свой, только ему свойственный, линейчатый спектр. Линейчатый спектр строго постоянен и не зависит от того, входит этот элемент в состав сложного вещества или взят в чистом виде.
3. При относительном перемещении источника излучения и наблюдателя происходит смещение спектральных линий в его спектре.
4. В соответствии с законом смещения Вина любое тело, нагретое выше температуры абсолютного нуля, излучает энергию. Данный закон объясняет сдвиг в сторону коротких волн максимума (видимого или невидимого) излучения тел по мере их нагрева.
5. Закон Стефана—Больцмана описывает зависимость энергии теплового излучения от температуры.



### Контрольные вопросы и задания

---

1. Что такое спектр? Какие явления доказывают сложный состав света?
  2. Назовите и дайте определения трем основным видам спектров.
  3. Что такое спектральный анализ?
  4. Сформулируйте и запишите закон смещения Вина и закон Стефана—Больцмана. Какое значение эти законы имеют в астрономии?
  5. В каком случае смещение линий спектрограммы может не происходить, несмотря на движение объекта?
  6. Определите температуру звезды, если в ее спектре максимум интенсивности излучения приходится на длину волны 340 нм.
  7. Измерение спектрограммы звезды показало, что линия железа ( $\lambda = 530,2$  нм) в ее спектре смещена по сравнению с линиями лабораторного источника в сторону наиболее коротких волн на 0,02 нм. Какова скорость звезды по лучу зрения?
  8. Эффект Доплера используется для оценки скорости извержения водорода в солнечных протуберанцах. Определите эту скорость, если измерения показали для  $\alpha$ -линии водорода ( $\lambda_\alpha = 656,3$  нм) доплеровский сдвиг  $\Delta\lambda = 0,3$  нм.
-



## Раздел VI

# Солнце — дневная звезда

### § 19. Солнце как звезда

**1. Общие сведения.** Солнце имеет исключительное значение в жизни человека. Оно обеспечивает нас светом, теплом, 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.

**Солнце** — центральное тело Солнечной системы, типичная звезда, представляющая собой раскаленный плазменный шар. Солнце — одна из 400 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 Земли за 8 мин 20 с.

Диаметр Солнца равен 1 млн 392 тыс. км (109 диаметров Земли). Объем Солнца, таким образом, более чем в миллион раз превосходит объем Земли, а его масса составляет  $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг, что примерно равно 330 000 земных масс.

Измерения за пределами земной атмосферы показали, что на площадку  $1 \text{ м}^2$ , расположенную перпендикулярно солнечным лучам, каждую секунду поступает энергия, практически не меняющаяся в течение длительного промежутка времени. Она получила название **солнечной постоянной**. Солнечная постоянная равна  $1,37 \text{ кВт/м}^2$ .

**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 ( $1 \text{ а. е.} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ м}$ ). Она получится равной:

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



На Землю попадает ничтожная часть солнечной энергии, составляющая около половины миллиардной доли указанного выше значения.

**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 отмечали, Й. Фраунгофер впервые изучил и зарисовал 576 темных линий солнечного спектра. Ученый правильно указал, что источник темных спектральных линий — солнечная атмосфера. По положению в спектре (т. е. длинам волн) и интенсивностям этих фраунгоферовых линий можно установить, какие химические элементы присутствуют в солнечной атмосфере (рис. 109).

В видимой области спектра уже отождествлено свыше 30 тыс. линий для 70 химических элементов, присутствующих в атмосфере Солнца. Фраунгоферовы линии по интенсивности и ширине чрезвычайно разнообразны. Анализ спектральных линий показал, что преобладающим элементом на Солнце является

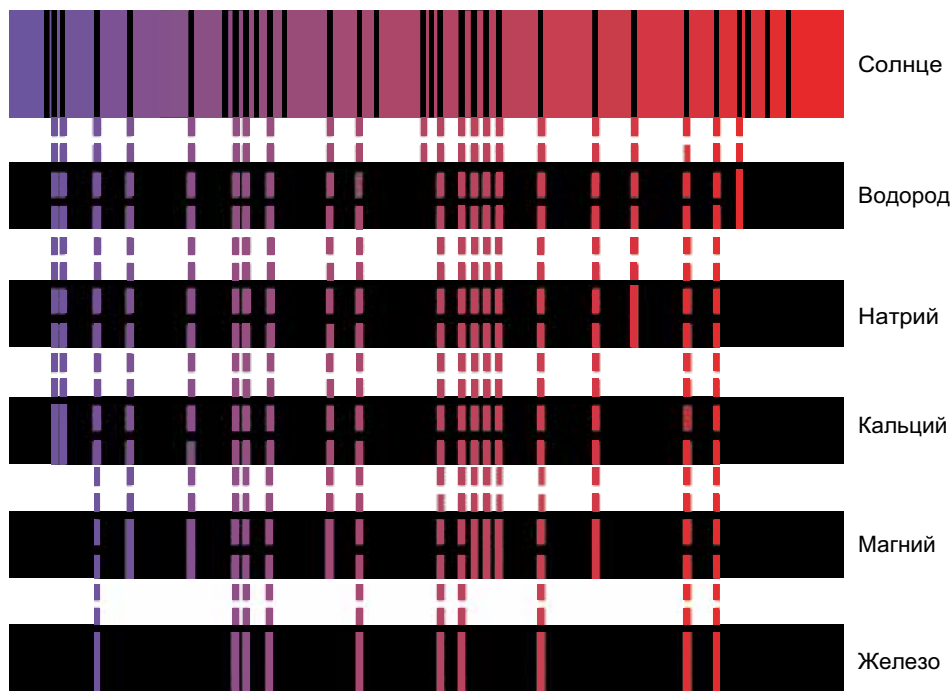


Рис. 109. Соответствие между положением фраунгоферовых линий солнечного спектра и линий химических элементов

водород — на его долю приходится примерно 74 % массы Солнца, около 24 % приходится на гелий и около 2 % на другие элементы.

**3. Внутреннее строение.** Основываясь на данных о радиусе, массе, светимости Солнца, на физических законах (которые в силу своей универсальности применимы и в условиях 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, давление и плотность. Химический состав Солнца 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 стороны, уравнивают 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 таблице 13 приведена так называемая модель внутреннего строения Солнца, т. е. зависимость его физических свойств от глубины.

Таблица 13. Модель внутреннего строения Солнца

Расстояние от центра $R/R_{\odot}$	Температура $T, \text{ К}$	Давление $p, \text{ Па}$	Плотность $\rho, \times 10^3 \text{ кг/м}^3$
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

Как видно из таблицы, температура в центре Солнца ( $R/R_{\odot} = 0$ ) достигает 15 млн градусов. Именно в этой области — **зоне ядерных реакций** — генерируется энергия Солнца.

Мы уже знаем, что 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) создаются условия, благоприятные для протекания термоядерных реакций превращения атомов легких химических элементов

в более тяжелые атомы (рис. 110). Из ядер водорода образуется гелий. Для образования одного ядра гелия требуется 4 ядра водорода. На промежуточных стадиях образуются ядра тяжелого водорода  ${}^2\text{H}$  (дейтерия) и ядра изотопа  ${}^3\text{He}$ . Эта реакция называется **протон-протонной** (рис. 111). При реакции небольшое количество массы реагирующих ядер водорода теряется, преобразуясь в огромное количество энергии. Выделившаяся 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 переноса энергии**, где энергия распространяется через поглощение и излучение гамма-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. Количество квантов во время этого процесса возрастает. Мощные гамма-кванты постепенно дробятся на обладающие меньшей энергией: возникают рентгеновские, ультрафиолетовые и, наконец, видимые и инфракрасные лучи.



Рис. 110. Строение Солнца

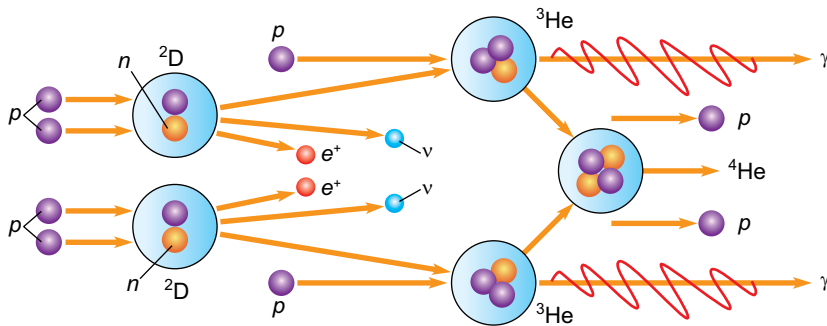


Рис. 111. Схема протон-протонной реакции:  $p$  — протон;  $n$  — нейтрон;  ${}^2\text{D}$  — ядро дейтерия;  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  — ядра изотопов гелия;  $e^+$  — позитрон;  $\nu$  — нейтрино;  $\gamma$  — гамма-квант

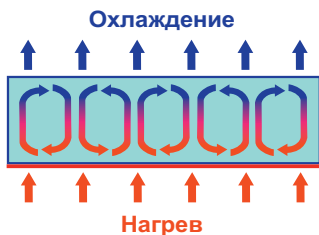


Рис. 112. Энергия передается излучением от ядра Солнца. Главным переносчиком энергии у поверхности становится конвекция

В области последней трети радиуса Солнца находится **конвективная зона**. Здесь энергия передается не излучением, а посредством конвекции (перемешивания) (рис. 112). Причина возникновения конвекции в наружных слоях Солнца та же, что и в сосуде с кипящей водой: количество энергии, поступающее от нагревателя, гораздо больше того, которое отводится теплопроводностью. Поэтому вещество 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 образовалась около 4,7 млрд лет назад. Солнце, по современным данным, существует около 5 млрд лет. За последние 3 млрд лет его светимость почти не изменилась. Полная энергия Солнца, выделенная за это время, равна  $E_{\odot} \approx L_{\odot} t = 3,5 \cdot 10^{43}$  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 первые 2 млрд лет. Ни одно химическое горючее не может обеспечить такую величину внутренней энергии, которую может выделить 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.



### Главные выводы

1. Солнце — единственная звезда в Солнечной системе, представляющая собой горячий плазменный шар, диаметр которой больше диаметра Земли в 109 раз и масса которой в 330 тыс. раз больше массы Земли.
2. Количество лучистой энергии, ежесекундно поступающей от Солнца на единицу площади земной поверхности, — солнечная постоянная — практически не меняется на протяжении миллиардов лет.
3. Преобладающие химические элементы на Солнце — водород и гелий.
4. Источником энергии Солнца являются реакции термоядерного синтеза, протекающие в его недрах.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что такое солнечная постоянная? Как ее определили?
2. Что понимают под светимостью Солнца? Чему она равна?
3. Какие химические элементы являются преобладающими для Солнца?
4. Опишите внутреннее строение Солнца.
5. На какие зоны условно подразделяются недра Солнца? Какие процессы происходят в каждой из этих зон?
6. Что является источником солнечной энергии?
7. Зная солнечную постоянную для Земли, вычислите величину солнечной постоянной для Марса, если расстояние от Солнца до Марса до Марса 1,524 а. е.
8. В спектре Солнца бóльшая интенсивность излучения приходится на длину волны  $\lambda = 550$  нм. Определите соответствующую температуру поверхности Солнца.

## § 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**. Слабое излучение более высоких слоев Солнца можно наблюдать во время полного солнечного затмения, когда диск Луны полностью закрывает фотосферу и становятся видны хромосфера и корона. Таким образом, атмосферой Солнца называются три внешних слоя Солнца, расположенные выше конвективной зоны: фотосфера, хромосфера и корона (рис. 113).

Толщина фотосферы не превышает 300 км. В телескоп видно, что вся поверхность Солнца покрыта гранулами, каждая диаметром около 700 км. Это огромные пузыри плазмы. Рисунок, который образуют гранулы, постоянно изменяется (буквально за 5—10 мин они успевают появиться и исчезнуть). Плазма в гранулах поднимается вверх и, остывая, в межгранульных пространствах опускается вниз. Поэтому разность температур гранул и темных промежутков достигает 600 К. Процесс постоянного возникновения и исчезновения гранул в фотосфере называется **грануляцией**. Самые приметные объекты на Солнце — это

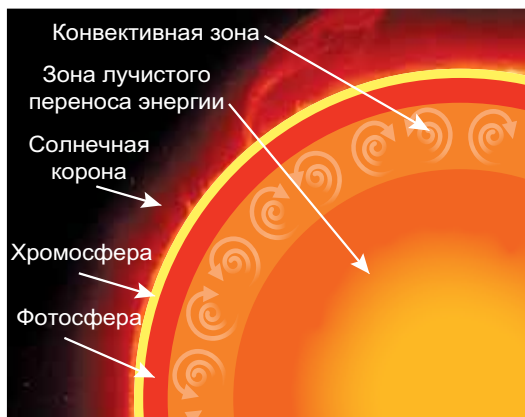


Рис. 113. Строение солнечной атмосферы

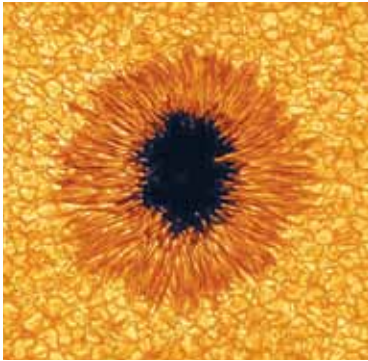


Рис. 114. Солнечное пятно и фотосферная грануляция

темные пятна (рис. 114, 115). Диаметры пятен иногда достигают 200 тыс. км. Совсем маленькие пятна называют порами.

Картина солнечных пятен, хотя и несколько медленнее, также постоянно меняется: пятна появляются, растут и распадаются (см. рис. 115). Время жизни групп пятен составляет два или три оборота Солнца вокруг своей оси. Пятна холоднее окружающей фотосферы на 2—2,5 тыс. градусов, поэтому на общем фоне солнечного диска они выглядят темнее. Солнечные пятна обычно появляются группами в пределах небольшой области, вытянутой параллельно экватору. По раз-

мерам 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 области, в зоне которых часто и развиваются темные пятна. Факелы имеют сложную волокнистую структуру, их температура на несколько сотен градусов превышает температуру фотосферы.

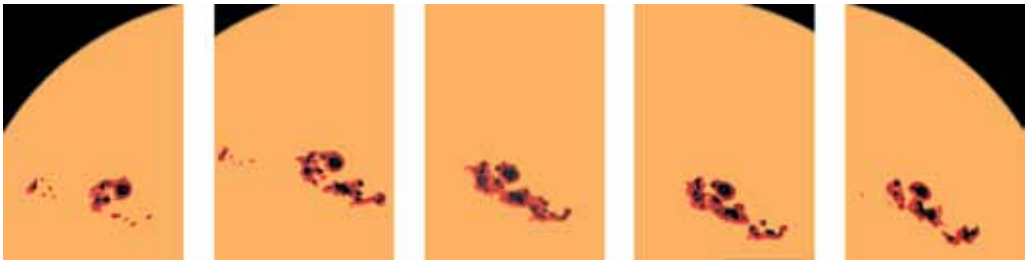


Рис. 115. Динамика изменения размеров и формы группы солнечных пятен. Вследствие вращения Солнца группы пятен кажутся перемещающимися по диску

Образование пятен и факелов связано с магнитным полем Солнца. Индукция магнитного поля Солнца в среднем в два раза выше, чем на поверхности Земли, однако в местах появления солнечных факелов она увеличивается в сотни раз, а в местах появления пятен — в тысячи раз, достигая 0,5 Тл. Это приводит первоначально к облегчению конвекции и появлению факела, а потом — к ослаблению и появлению темного пятна.

**2. Температура фотосферы.** В непрерывном спектре Солнца максимальная энергия излучения приходится на длину волны  $\lambda_{\max} = 480$  нм. Тогда по закону смещения Вина получаем:

$$T = \frac{0,0029}{\lambda_{\max}}, \quad \text{откуда } T = 6000 \text{ К.}$$

**3. Внешние слои атмосферы: хромосфера и корона.** Над фотосферой находится **хромосфера** Солнца. Общая ее протяженность 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 постоянно вьющихся продолговатых язычков — **спикул** — длиной порядка 10 тыс. км. Спикулы выбрасываются из нижней хромосферы со скоростями до 30 км/с; время их жизни составляет несколько минут.

На краю солнечного диска хорошо видны **протуберанцы** (см. рис. 110) — плотные конденсации вещества, поднятые над поверхностью линиями магнитного поля в виде арок или выступов (рис. 116). Протуберанцы бывают спокойные, активные и эруптивные. Они выделяются на фоне короны, так как имеют более высокую плотность. Скорость движения вещества активных протуберанцев достигает 200 км/с, а высота подъема — 40 радиусов Земли.

На Солнце наблюдаются взрывные выбросы энергии и вещества (со скоростью до 100 тыс. км/с), охватывающие значительные области поверхностного

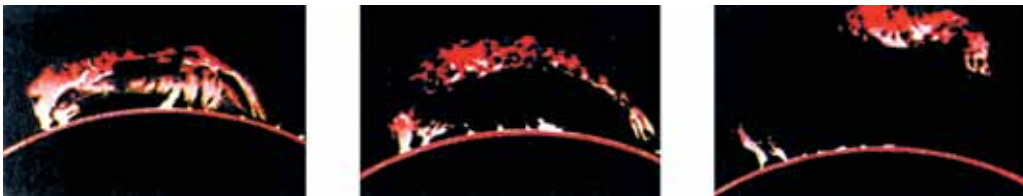


Рис. 116. Изменения протуберанца, наблюдавшегося в течение нескольких часов



Рис. 117. Вспышка на Солнце



Рис. 118. Солнечная корона во время затмения Солнца



слоя, — **вспышки** (рис. 117). Эти яркие образования существуют от нескольких минут до 3 ч. Обычно солнечные вспышки (с выбросами энергии до  $10^{25}$  Дж) проходят вблизи быстро развивающихся групп солнечных пятен.

**Солнечная корона** — самая разреженная и горячая оболочка Солнца, распространяющаяся от него на несколько солнечных радиусов и имеющая температуру плазмы от 1 до 2 млн градусов (рис. 118). Яркость солнечной короны в миллион раз меньше, чем фотосферы. Поэтому наблюдать солнечную корону можно во время полных солнечных затмений или с помощью специальных телескопов-коронографов. Высокая температура и разреженность короны подтверждена спектральным анализом, а также результатами измерения ее радио- и рентгеновского излучения.

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.

**4. 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 хромосфере и короне. Места, где они возникают, называются **активными областями**



(рис. 119). Все активные образования связаны между собой 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).



Рис. 119. Солнце в рентгеновских лучах. Наиболее яркие места — области проявления солнечной активности

### ! Главные выводы

1. Внешняя газовая оболочка Солнца — атмосфера — состоит из фотосферы, хромосферы и короны.
2. Локальные, периодически возникающие изменения магнитных полей порождают активные процессы в атмосфере Солнца.
3. Активные процессы на Солнце являются причиной возникновения в слоях атмосферы пятен, факелов, протуберанцев, вспышек и др.
4. Солнечные вспышки — наиболее мощные взрывные процессы в атмосфере Солнца.
5. Солнечная активность имеет 11-летнюю цикличность.

### ? Контрольные вопросы и задания

1. Из каких оболочек состоит атмосфера Солнца?
2. Что такое фотосфера Солнца?
3. Какие объекты характерны для фотосферы Солнца?
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 (см. § 17).

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 от короны Солнца.

Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение Солнца поглощается в верхних слоях атмосферы Земли. Оно ионизирует газы земной атмосферы. Ионизированный слой верхней атмосферы Земли называется **ионосферой**. Отражение коротких радиоволн от ионосферы Земли используется в радиосвязи. При сильных всплесках солнечного рентгеновского излучения из-за солнечных вспышек нарушается связь на коротких радиоволнах.

Длинноволновое (мягкое) ультрафиолетовое излучение Солнца способно проникать до высоты 30—35 км в атмосферу Земли. Там оно разделяет молекулы кислорода  $O_2$  на два составляющих ее 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 ожоги кожи (в малых дозах — загар). Когда толщина озонового слоя уменьшается, солнечное ультрафиолетовое излучение может возрасти в 1,5—2 раза. Тогда это излучение становится очень активным и может вызывать заболевания раком кожи.

**2. Солнечный ветер.** Непрерывный расширяющийся поток разреженной плазмы со связанным с ним магнитным полем, распространяющийся приблизительно радиально от Солнца и заполняющий собой Солнечную систему, называется **солнечным ветром**. В его состав входят протоны, электроны, а также  $\alpha$ -частицы и в незначительных количествах ряд высокоионизированных атомов (кислород, кремний, сера, железо). Скорость частиц солнечного ветра увеличивается по мере их удаления от Солнца. Вблизи Земли средняя скорость

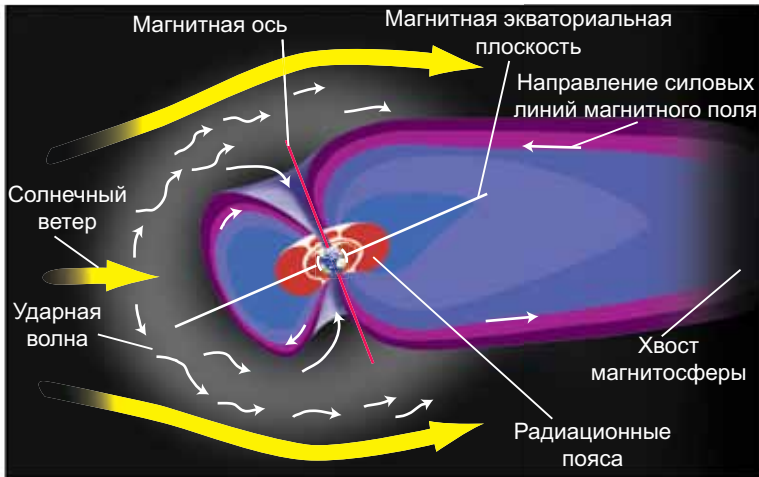


Рис. 120. Схема образования магнитосферы Земли



солнечного ветра достигает 450 км/с, а плотность составляет несколько частиц в кубическом сантиметре.

Поток солнечной плазмы не может преодолеть противодействие магнитного поля Земли и обтекает его. При этом образуется полость каплеобразной формы — **магнитосфера** (рис. 120). Со стороны Солнца она сжата давлением солнечного ветра. Граница магнитосферы, обращенная к Солнцу, находится на расстоянии, равном в среднем 10—12 радиусам Земли. С противоположной (ночной) стороны магнитосфера вытянута подобно хвосту кометы и растягивается на 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 разогнаться до 100 000 км/с, т. е. возникают космические лучи солнечного происхождения. Под воздействием солнечных космических лучей образуется оксид азота NO, который, взаимодействуя с озоном, активно его разрушает за счет реакции  $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ . После мощных вспышек на Солнце наблюдается понижение содержания озона в стратосфере над полярными шапками Земли.

С помощью 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**. В каждом корональном выбросе может содержаться до  $10^9$  тонн вещества, которое летит в космосе со скоростью от 500 до 2000 км/с.



Рис. 121. Полярное сияние

В результате этого на Земле, преимущественно в околополярных широтах, наблюдаются **полярные сияния** (рис. 121). При высокой геомагнитной активности полярные сияния появляются на высоте 300—400 км, и их можно наблюдать даже на широтах Республики Беларусь.

Во время магнитной бури изменяются электрические поля над поверхностью Земли. Это приводит, во-первых, к возникновению перегрузок в линиях электропередачи (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 сказываются на бортовых электронных системах космических аппаратов.

Магнитные бури приводят к изменению давления в тропосфере (нижнем слое атмосферы Земли), в результате чего 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 Александр Леонидович Чижевский. Проанализировав исторические документы, ученый пришел к выводу, что в прошлом массовые стихийные бедствия, социальные «взрывы» и вспышки эпидемий приходились преимущественно на годы максимумов солнечной активности. На основании выведенной связи А. Л. Чижевский попытался предсказать некоторые эпидемии на 35 лет вперед. Его прогнозы сбылись в семи случаях из восьми.

А. Л. Чижевский является одним из основателей гелиобиологии. Эта наука, возникшая на стыке физики Солнца и биологии, изучает влияние циклической активности Солнца на биологические объекты и здоровье человека.

К колебаниям солнечной активности особенно чувствительна нервная система человека. 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 явления, происходящие на Солнце, ученые проводят непрерывные наблюдения Солнца, которые называют **Службой Солнца**.



### Главные выводы

1. Мощность радио-, коротковолнового и корпускулярного излучений Солнца значительно возрастает при активных процессах в солнечной атмосфере.
2. Озоновый слой атмосферы Земли является защитной оболочкой от вредного для человека и живых организмов ультрафиолетового излучения Солнца.
3. Солнечный ветер — непрерывный поток разреженной плазмы, радиально исходящий от Солнца.
4. Неоднородность солнечного ветра вызывает на Земле магнитные бури, полярные сияния, радиовсплески.
5. Гелиобиология — наука, изучающая влияние активности Солнца на биологические объекты и человечество.

### Контрольные вопросы и задания

1. Как земная атмосфера влияет на прохождение различных видов солнечного излучения к поверхности Земли?
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. Каковы причины и последствия магнитных бурь на Земле?
7. Каковы причины возникновения полярных сияний?



## Раздел VII

# 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 (отношение светового потока к площади, им освещаемой), 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 одну **видимую звездную величину** (обозначается  $1^m$ ) принято отношение освещенностей ( $E$ ) в 2,512 раза. В виде формулы эти соотношения выразил Н. Погсон:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}. \quad (1)$$

Измеряя при помощи фотометра отношение блеска звезд, можно определить разность звездных величин по формуле Погсона. Нуль-пункт же выбирают условно, по соглашениям. При этом договорено, чтобы стандартная звезда 1-й звездной величины (средняя из 20 самых ярких звезд) давала бы в 100 раз больше света, чем звезда 6-й звездной величины, находящаяся на пределе зрения.

Видимая звездная величина Луны в полнолуние равна  $-12^m,7$ , а в фазе первой четверти составляет  $-9^m,0$ . По формуле (1) можем найти, что освещенность Луны в полнолуние ( $E_n$ ) больше освещенности Луны в фазе первой четверти ( $E_1$ ) в 30 раз:

$$\frac{E_n}{E_1} = 2,512^{m_1 - m_2} = 2,512^{-9+12,7} = 2,512^{3,7} \cong 30.$$

Видимую звездную величину Солнца определил Витольд Карлович Цераский. Она оказалась равной  $-26^m,8$ . 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 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 методом является метод параллактического смещения 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  $M$  на фоне очень далеких звезд происходит по эллипсу с периодом в 1 год и отражает движение наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца (рис. 122). Положение Земли на орбите и видимые с Земли положения звезды на небе прослеживаются на рисунке 122. 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** ( $\pi$ ). Параллактические смещения звезд служат неопровержимым доказательством обращения Земли вокруг Солнца.

Расстояния до звезд определяют по их годовому параллактическому смещению.

Из рисунка 122 видно, что если  $CT = a$  — средний радиус земной орбиты,  $CM = r$  — расстояние до звезды  $M$  от Солнца  $C$ , а угол  $\pi$  — годичный параллакс звезды, то

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

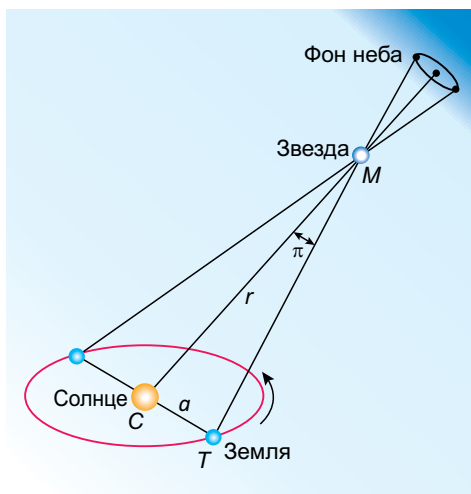


Рис. 122. Параллактическое смещение звезды на протяжении года:  $C$  — Солнце;  $M$  — звезда;  $a$  — полуось земной орбиты;  $\pi$  — годичный параллакс

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

$$r = \frac{206\,265''}{\pi''} \text{ а. е.} \quad (2)$$

Для измерения расстояний до звезд астрономическая единица слишком мала. Поэтому для удобства определения расстояний до звезд в астрономии применяется специальная единица длины — парсек (пк), название которой происходит от слов «параллакс» и «секунда». **Парсек** — это расстояние, с которого радиус земной орбиты был бы виден под углом в  $1''$  (рис. 123).

Согласно формуле (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

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{ ПК.} \quad (3)$$

В астрономических единицах обычно выражаются расстояния до 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 параллаксов не превышает  $0,005''$ , что позволяет определять расстояния не свыше 200 ПК. Расстояния до еще более далеких объектов определяются менее точно и 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**.

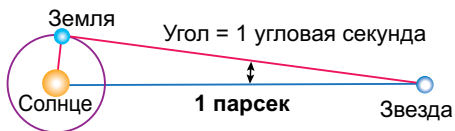


Рис. 123. Что такое парсек?

Пусть видимая звездная величина звезды на расстоянии  $r$  равна  $m$ , а освещенность (световой поток, падающий на еди-



ницу площади освещаемой поверхности), создаваемая этой звездой, —  $E$ . По определению, видимая звездная величина с расстояния  $r_0 = 10$  пк будет равна абсолютной звездной величине  $M$ , а  $E_0$  — освещенность (или излучение) звезды с расстояния 10 пк. Тогда, используя формулу (1), можем записать:

$$\frac{E}{E_0} = 2,512^{M-m}. \quad (4)$$

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

$$\frac{E}{E_0} = \frac{r_0^2}{r^2}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим, что  $2,512^{M-m} = \frac{100}{r^2}$ . Прологарифмировав данное равенство и упростив его, получим:

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (6)$$

Учитывая, что  $r = \frac{1}{\pi''}$ , формулу (6) можно записать в виде:

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi''. \quad (7)$$

По формуле (6) вычислим абсолютную звездную величину Солнца. Расстояние до Солнца  $r = 1$  а. е. =  $\frac{1}{206\,265}$  пк; видимая звездная величина Солнца равна  $-26^m,8$ . После подстановки этих значений в формулу получим, что  $M_{\odot} = -26^m,8 + 5^m + 26^m,6 = 4^m,8$ . 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  $3,85 \cdot 10^{26}$  Вт (см. § 19).

Используя формулу (1), можно записать соотношение между светимостями и абсолютными звездными величинами какой-либо звезды и Солнца:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{M_{\odot}-M}, \quad (8)$$

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  $M_{\odot} = 4^m,8$ , формула (8) примет вид:

$$L = 2,512^{M_{\odot}-M} \quad \text{или} \quad L = 2,512^{4,8-M}.$$

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



### Главные выводы

1. Звезды движутся в пространстве и находятся от нас на различных расстояниях.
2. Видимая звездная величина — мера наблюдаемого блеска (освещенности, создаваемой светилом на приемнике лучистой энергии) небесного объекта, видимого с Земли. Интервал в одну звездную величину соответствует разности освещенностей в 2,512 раза.
3. Расстояние до недалеких звезд определяется методом годичного параллакса, основанным на измерении угла, под которым виден радиус земной орбиты с исследуемой звездой.
4. Единицами измерения расстояний до звезд являются парсек и световой год.
5. Абсолютная звездная величина — видимая звездная величина, которую имела бы звезда, находясь на стандартном расстоянии 10 пк.
6. Полная энергия, излучаемая звездой по всем направлениям за единицу времени, называется ее светимостью. Обычно светимость звезды выражается в единицах светимости Солнца.



### Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под годичным параллаксом звезды?
2. Что такое парсек и световой год?
3. Чем отличается абсолютная звездная величина от видимой звездной величины?
4. Что понимают под светимостью звезды? Какова светимость Солнца?
5. Какая зависимость существует между светимостью звезды и ее абсолютной звездной величиной?
6. Расстояние до звезды Бетельгейзе 652 св. г. Чему равен ее параллакс?
7. Вычислите расстояние до звезды Веги в парсеках и световых годах, если известно, что ее видимая и абсолютная звездные величины соответственно равны  $0^m,0$  и  $0^m,5$ .

8. Абсолютная звездная величина Солнца равна  $M = 5^m$ . Определите расстояние, на котором оно будет наблюдаться как звезда 15-й звездной величины.

9. Звездное скопление содержит 100 звезд одинакового блеска  $m = 8^m$ . Найдите суммарную звездную величину скопления.

## § 23. Температура и размеры звезд

**1. Температура звезд.** В первом приближении можно считать, что звезды излучают как абсолютно черные тела. Температуру  $T$  поверхности (фотосферы) звезд можно определить из закона смещения Вина, а также воспользовавшись законом Стефана—Больцмана, как мы это уже делали при определении температуры Солнца (см. § 18):

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}. \quad (1)$$

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.

Температуры звезд сильно различаются. Холодные красные звезды имеют температуру около 3000 К. Солнце с температурой фотосферы 6000 К относится к желтым карликам. Температура самых горячих звезд достигает 100 000 К. Основная часть излучения горячих звезд приходится на ультрафиолетовую область спектра, и мы их воспринимаем как звезды голубого цвета.

**2. Спектральная классификация звезд.** Звезды отличаются большим разнообразием, однако среди них можно выделить отдельные группы, обладающие общими свойствами. При первом знакомстве со звездным небом на себя обращает внимание тот факт, что звезды разнятся 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**.

В Гарвардской обсерватории (США) в 20-е гг. XX в. была разработана классификация спектров звезд, в которой последовательность спектральных классов обозначается заглавными буквами латинского алфавита. Основные характеристики спектральных классов помещены на форзаце 4. Тонкие различия внутри каждого класса дополнительно подразделяют на 10 подклассов — от 0 до 9. Например, 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: звезды класса *O* имеют голубоватый цвет, класса *B* — голубовато-белый, класса *A* — белый и т. д. Для запоминания этой последовательности 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, аналогично Солнцу другие звезды содержат в своих атмосферах 73 % водорода, 25 % гелия и 2 % всех остальных элементов.

Различия в спектрах звезд определяются главным образом различиями температуры. В фотосферах холодных звезд могут существовать простейшие молекулы. Поэтому характерными деталями спектров звезд классов *M* и *L* являются широкие полосы поглощения молекул, например  $C_2H$ . При более высоких температурах молекулярные 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.

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

**3. Размеры звезд.** Линейный радиус  $R$  звезды можно определить, если известны ее угловой радиус  $\rho''$  и расстояние до звезды  $r$  или годичный параллакс  $\pi''$ , по формуле  $R = r \cdot \sin \rho''$ .

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

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

$$R = 215 \frac{\rho''}{\pi''}.$$

Звезды настолько далеки от нас, что их угловые размеры меньше предела разрешения крупнейших телескопов. Для ярких близких звезд угловой радиус находят

при помощи двух широко расставленных телескопов по интерференционной картине, которая получается в результате перекрытия изображений звезды. 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  $\varepsilon$  Ориона. Он оказался равным  $0,00072''$ , а так как годичный параллакс звезды равен  $\pi'' = 0,0024''$ , то  $R = 215 \cdot \frac{0,00036''}{0,0024''} = 32R_{\odot}$ .

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

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

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4,$$

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:

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

Диаметры звезд сильно отличаются: от размеров, сравнимых с большой полуосью орбиты Юпитера (красные сверхгиганты), до размеров Земли (белые карлики) или даже до нескольких километров у нейтронных звезд (рис. 124).



Рис. 124. Размеры некоторых звезд в сравнении с размерами Земли (слева) и Солнца (справа)

### ! Главные выводы

1. Спектральная классификация звезд основана на оценках относительной интенсивности и вида спектральных линий.
2. Размеры звезд пропорциональны расстояниям до них и видимым угловым размерам.
3. Зная мощность излучения звезды (светимость), температуру звезды и температуру Солнца, можно определить ее размер (в радиусах Солнца).
4. Температура звезд определяется на основании законов Стефана—Больцмана и Вина.

### ? Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом можно определить температуру звезды, используя законы Стефана—Больцмана и Вина?
2. По каким принципам производится спектральная классификация звезд?
3. Из каких химических элементов в основном состоят звезды?
4. Во сколько раз отличаются светимости двух звезд одинакового цвета, если радиус одной из них в 25 раз больше?
5. Определите размеры звезды Спика ( $\alpha$  Девы), если температура ее фотосферы равна 22 400 К, а светимость в 13 400 раз больше светимости Солнца.
6. Определите светимость звезды  $\alpha$  Лир, если ее годичный параллакс равен  $0,129''$ , а видимая звездная величина составляет  $0^m,03$ .
7. Определите расстояние, светимость и размеры звезды Регул ( $\alpha$  Льва), если из наблюдений известно, что у нее годичный параллакс равен  $0,040''$ , видимая звездная величина  $1^m,35$  и температура фотосферы 13 600 К.

## § 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 пары близко расположенных звезд. Различают оптические и физические двойные звезды. **Оптические двойные звезды** (пары) состояются из весьма отдаленных друг от друга в пространстве звезд, которые случайным образом проецируются 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 различные цвета. Так, у Антареса — очень яркой красной звезды в созвездии Скорпиона — имеется слабый голубоватый 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  $2^m,2$ . На угловом расстоянии  $12'$  от нее расположена слабая звезда Алькор со звездной величиной  $4^m,0$ . 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  $2^m,4$  и  $4^m,0$  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, поэтому звезда меняет блеск), **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).

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**.

Первый список двойных звезд составил в 1803 г. английский астроном Уильям Гершель. Этот перечень содержал несколько сотен объектов. К настоящему времени известно, что примерно половина звезд нашей Галактики — двойные. 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 суток 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, если по лучу зрения плоскости орбит звезд практически совпадают. В этом случае наблюдаются затмения, когда один из компонентов проходит



Рис. 125. Изменение блеска затменно-двойной звезды

вперед или сзади другого. Рассмотренную ситуацию поясняет рисунок 125, на котором приводится кривая изменения блеска  $m$  затменно-двойной звезды, связанного с периодическими затмениями одного компонента другим. На графике показаны разные положения 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-двойной звезды — звезда  $\beta$  Персея (Алголь), которая регулярно затмевается на 9,6 ч с периодом 2,867 суток. Падение блеска в минимуме у этой звезды составляет  $2^m,3$ .

Всего известно около 5000 затменно-двойных звезд.

**3. Спектрально-двойные звезды.** 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. 126). Каждый из компонентов —  $A$  и  $B$ , обращаясь вокруг центра масс системы, то приближается к наблюдателю, то удаляется от него. Вслед-

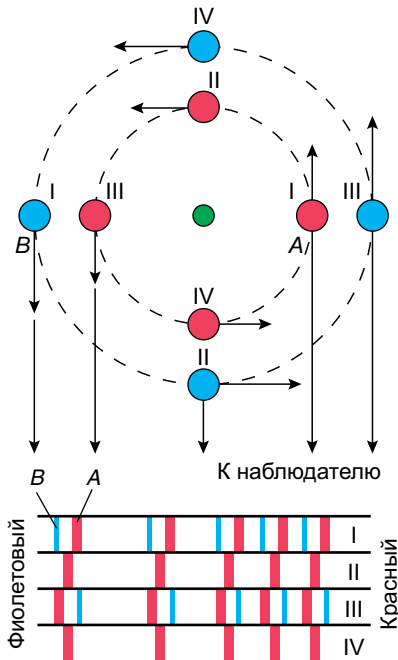


Рис. 126. Смещение линий в спектре двойной звезды



ствие 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.

В настоящий момент разными методами в других звездных системах достоверно обнаружено более 4500 планет. Они получили общее название — **экзопланеты**. Их количество постоянно растет, но особый интерес представляют землеподобные объекты.

**4. Астрометрически-двойные звезды.** Встречаются такие тесные звездные пары, в которых одна из звезд или очень мала по размерам, или имеет низкую светимость. Таковую 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. 127), как будто по прямой движется центр масс системы. Такие возмущения пропорциональны массе спутника.

Исследования одной из ближайших к нам звезд, известной под названием Росс 614 (ее блеск  $11^m,4$  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 относительное видимое движение компонентов 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.

По данным наблюдений двойных звезд получены оценки масс для 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

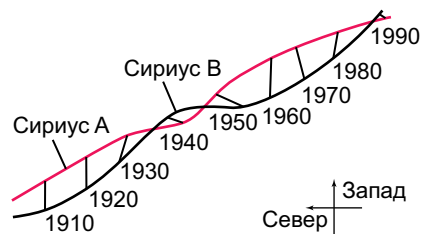


Рис. 127. Отклонение в движении Сириуса, вызванное гравитационным возмущением спутника

по их светимостям. В интервале масс  $0,5M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$  светимость звезды пропорциональна четвертой степени ее массы  $L \approx M^4$ . При  $M > 10M_{\odot}$  показатель степени равен 2, т. е.  $L \approx M^2$ .

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

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



### Главные выводы

1. Две звезды, выделяющиеся на фоне других близостью своих видимых положений, называются двойной звездой. Двойные звезды являются частным случаем кратных звезд.
2. Физические двойные звезды — система двух звезд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс.
3. В зависимости от метода наблюдения двойные звезды подразделяются на визуально-двойные, затменно-двойные, спектрально-двойные, астрометрически-двойные.
4. Компоненты физических двойных звезд совершают видимое относительное движение по эллипсу в соответствии с законами Кеплера и подчиняются закону всемирного тяготения.
5. Изучение двойных звезд позволяет определять массы звезд.



### Контрольные вопросы и задания

1. Какие звезды называются двойными? Приведите их классификацию.
2. Что такое амплитуда и период переменности затменно-двойных звезд?
3. Дайте объяснение: почему происходит смещение линий в спектрах спектрально-двойных 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 Эйна́р Герцшпру́нг и американский астрофизик Генри Рассел установили связь между этими характеристиками. Эту зависимость можно представить в виде диаграммы (рис. 128): по горизонтальной оси откладывается спектральный класс (или температура) звезд, а по вертикальной — их светимость (в абсолютных величинах). Каждой звезде соответствует точка на диаграмме. Такая диаграмма называется **диаграммой Герцшпрунга—Рассела** или **диаграммой «спектр—светимость»** (см. форзац 4).

Звезды на диаграмме не распределяются случайным образом по всей ее площади, а образуют несколько групп, называемых **последовательностями**.

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

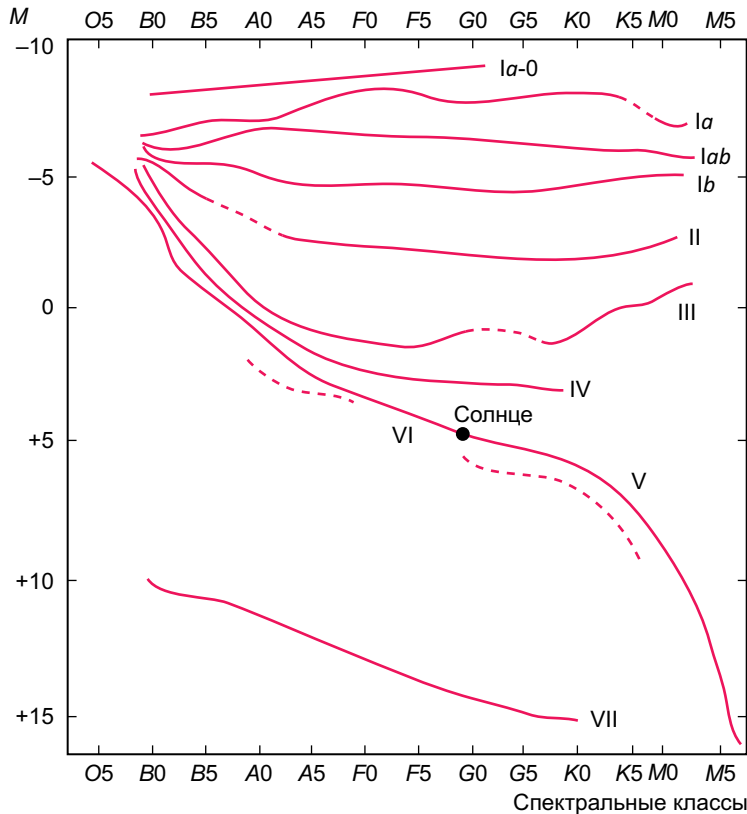


Рис. 128. Диаграмма «спектр—светимость» с указанием классов светимости

В левой верхней части главной последовательности находятся массивные горячие звезды спектрального класса *O*, которые в десятки тысяч раз превосходят по светимости Солнце. Такие звезды называют горячими 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 *M* и *L* с малой массой и относительно низкой температурой. Эти звезды называют красными и коричневыми карликами.

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

В верхней части диаграммы «спектр—светимость» располагается **последовательность сверхгигантов** (см. рис. 128). Это звезды с очень высокой светимостью, низкой плотностью, в десятки и сотни раз большими диаметрами, чем у Солнца. К сверхгигантам причисляют звезду Бетельгейзе ( $\alpha$  Ориона).

В левой нижней части диаграммы расположены горячие звезды слабой светимости — **последовательность белых карликов**. Их размеры сравнимы с размерами Земли, а массы близки к массе Солнца. Поэтому средняя плотность белых карликов превышает плотность земных пород в сто 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 гигантов и сверхгигантов. Значит, по виду спектральных линий определяется, к какой последовательности принадлежит звезда (главная, карлики, гиганты).

По последовательности оценивается абсолютная звездная величина (см. формулу 6, § 22), а затем и расстояние. 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.

В Йеркской обсерватории разработана двумерная спектральная классификация, в которой каждый спектр звезды учитывает особенности спектральных линий и светимость звезд (см. рис. 128). Эта классификация разделяет все звезды на ряд **классов светимости** (от I до VII):

- Ia-0 — самые яркие сверхгиганты;
- Ia — яркие сверхгиганты;
- Iab — средние сверхгиганты;
- Ib — слабые сверхгиганты;
- II — яркие гиганты;
- III — слабые гиганты;
- IV — субгиганты;
- V — главная последовательность;
- VI — субкарлики;
- VII — белые карлики.

**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 *O* и *B*, 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, законов тяготения) рассчитывают изменения этих параметров с течением времени.

По современным представлениям, звезды образуются в результате сжатия (гравитационной конденсации) вещества межзвездной среды (рис. 129, 1). Звезды

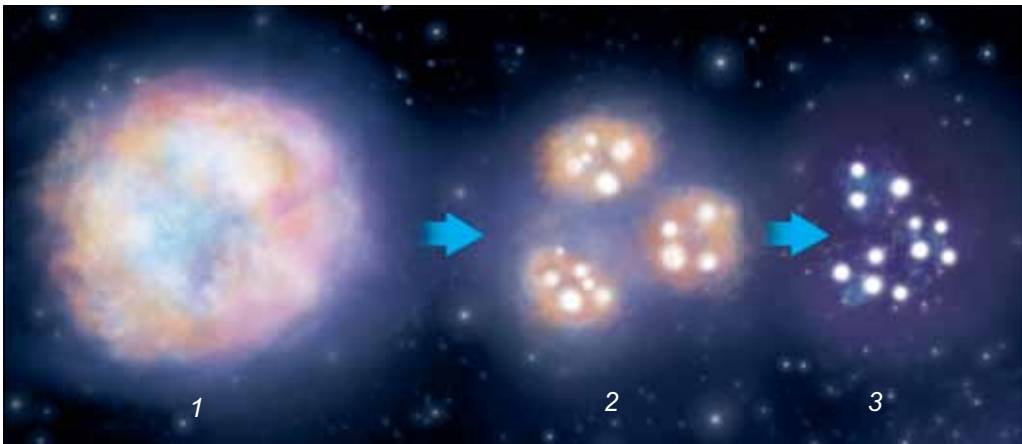


Рис. 129. Образование звезд из газопылевого комплекса

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. 129, 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. 129, 3).

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

Вращение протозвезд играет важную роль в их дальнейшей эволюции. Часто у вращающейся протозвезды вокруг центрального сгущения образуется протяженный газопылевой диск, из которого потом образуется планетная система. Формирующаяся звезда в конце стадии сжатия имеет значительные размеры при еще относительно низкой температуре поверхности. Сжатие протозвезды прекращается, когда температура в центре ядра достигает 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.

Самые массивные звезды (размером в 30—50 масс Солнца) являются наиболее горячими звездами класса *O*. 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, по оценкам ученых, составляет около 5 млрд лет, «прожило» на главной последовательности лишь половину своей жизни). Звезды с массами, равными 10 массам Солнца, исчерпают свой запас водородного топлива всего за 10 млн лет, слабо излучающие красные карлики массой около 0,5 массы Солнца — за 80 млрд лет. Горячих молодых звезд-гигантов наблюдается меньше из-за малого времени существования. Поэтому наиболее заполнена правая нижняя 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 1,4 массы Солнца, то 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. 130) или сверхгигантом.

Разрастающаяся атмосфера звезды постепенно удаляется от ядра, образуя **планетарную туманность**. Конечной стадией эволюции этих звезд являются белые карлики. **Белый карлик** — компактная



Рис. 130. Эволюция звезд различной массы

звезда с массой до 1,4 массы Солнца, радиусом примерно в 100 раз меньше Солнца. Плотность таких звезд более чем в 100 тыс. раз превосходит плотность воды.

Как и все звезды, Солнце проходит стадии эволюции. Через 5—8 млрд лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым карликом. Звезды, которые намного массивнее Солнца, превращаются в ходе эволюции в нейтронные звезды (при массе от 1,4 до 2,7 массы Солнца) или черные дыры (при массе более 2,7 массы Солнца), проходя стадию сверхновой.



### Главные выводы

1. Между различными физическими характеристиками звезд существует связь. Диаграмма зависимости спектральных классов звезд (или температур) от их светимости называется диаграммой «спектр—светимость».
2. Эволюция звезд — постепенное изменение с течением времени физических характеристик, внутреннего строения и химического состава звезд.
3. Звезды образуются в результате гравитационного сжатия вещества из газопылевых комплексов.
4. Звезды в процессе эволюции проходят стадии от протозвезд до конечных стадий (в зависимости от массы) — белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр.
5. Переход звезд с различной массой на диаграмме «спектр—светимость» с одной последовательности на другую в ходе изменения их параметров со временем называется эволюционным перемещением.
6. Классы светимости — звездные группы, учитывающие особенности спектральных линий и светимость звезд.



### Контрольные вопросы и задания

1. По какому принципу строится диаграмма «спектр—светимость» (диаграмма Герцшпрунга—Рассела)?
2. Как на диаграмме «спектр—светимость» располагаются звезды различного размера?
3. Дайте краткую характеристику звездам: сверхгигантам, красным гигантам, белым карликам, красным карликам.
4. Что понимают под эволюцией звезд?
5. Опишите в общих чертах процесс образования звезд.
6. Что понимают под классами светимости?
7. Какой должна быть скорость вещества, чтобы оно могло покинуть белый карлик, масса которого  $10^{30}$  кг, а радиус  $4 \cdot 10^4$  км?



## § 26. Нестационарные звезды

**1. Общая характеристика переменных звезд.** Многие звезды изменяют свои физические характеристики в течение относительно короткого периода времени. Такие звезды называются **нестационарными**. В отличие от затменно-двойных звезд (см. § 24) они меняют свою светимость в результате физических процессов, происходящих в самих звездах. По этой причине их называют **физическими переменными звездами**.

В зависимости от характера протекающих внутри звезды процессов физические переменные звезды бывают пульсирующими и эруптивными.

**Пульсирующие переменные звезды** — физические переменные звезды, у которых происходят периодические колебания блеска (например, цефеиды, звезды типа *RR* Лиры, мириды).

**Эруптивные звезды** — физические переменные звезды, проявляющие свою переменность в виде вспышек, которые объясняются выбросами вещества (например, новые и сверхновые звезды).

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

**2. Пульсирующие переменные звезды.** 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.

Долгопериодические переменные звезды (с периодами от нескольких недель до года и более; звезды типа Миры Кита) называются **миридами**. Практически все звезды этого типа — красные гиганты огромных размеров и большой светимости. Амплитуды изменения блеска таких звезд могут достигать десяти звездных величин.

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. Пульсация звезды происходит благодаря клапанному механизму, когда непрозрачность наружных слоев звезды задерживает часть излучения внутренних слоев. При нагревании наружный

слой становится прозрачным, поток выходящего излучения увеличивается. Но это приводит к охлаждению и сжатию, из-за чего слой вновь становится непрозрачным и весь процесс повторяется снова.

Обширный класс очень ярких переменных звезд-сверхгигантов и гигантов классов *F* и *G* называется **цефеидами**. Это пульсирующие переменные звезды, блеск которых плавно и периодически меняется от 0,5 до 2 звездных величин. Период изменения блеска составляет от 1,5 до 70 суток. Название происходит от звезды  $\delta$  Цефея — одной из наиболее типичных для данного класса переменных звезд.

Одновременно с видимой звездной величиной у цефеид меняется спектр и температура (в среднем на 1500 градусов) (рис. 131).

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 (в сутках),  $\rho$  — средняя плотность (в единицах средней плотности Солнца). Средняя плотность вещества цефеид составляет  $10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>.

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. 132). Эта зависимость описывается выражением:  $M = -1,43 - 2,81 \cdot \lg P$ , где  $P$  — период изменения блеска в сутках, а  $M$  — средняя абсолютная звездная величина. Таким

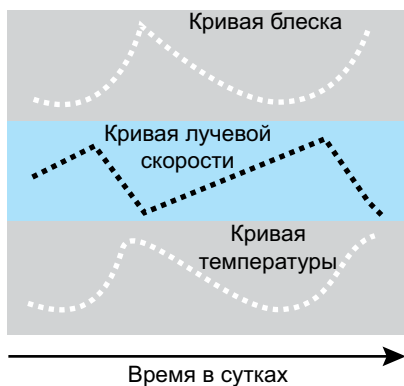


Рис. 131. Графики изменения блеска, лучевой скорости и температуры цефеид

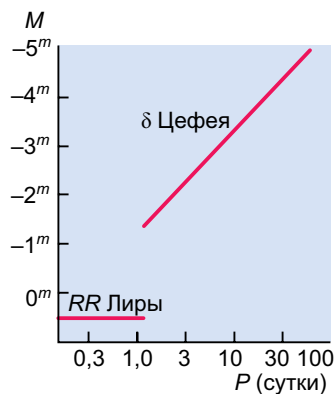


Рис. 132. Зависимость «период — светимость» у цефеид и звезд типа RR Лиры

образом, по известному из наблюдений периоду можно определить абсолютную звездную величину или светимость 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 800 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 А. Они очень быстро меняют блеск. Амплитуда изменения блеска достигает 1-й звездной величины. У этих звезд, как и у цефеид, существует зависимость между периодом и светимостью (см. рис. 132).

**3. Новые звезды.** Звезды, блеск которых внезапно увеличивается в тысячи и миллионы раз за несколько суток, после чего ослабевает до первоначального в течение года и более, называются **новыми звездами**.

Термин «новая звезда» не подразумевает, что звезда родилась. Так называют звезды, у которых внезапно увеличился блеск. 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 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. 133). За время вспышки новая

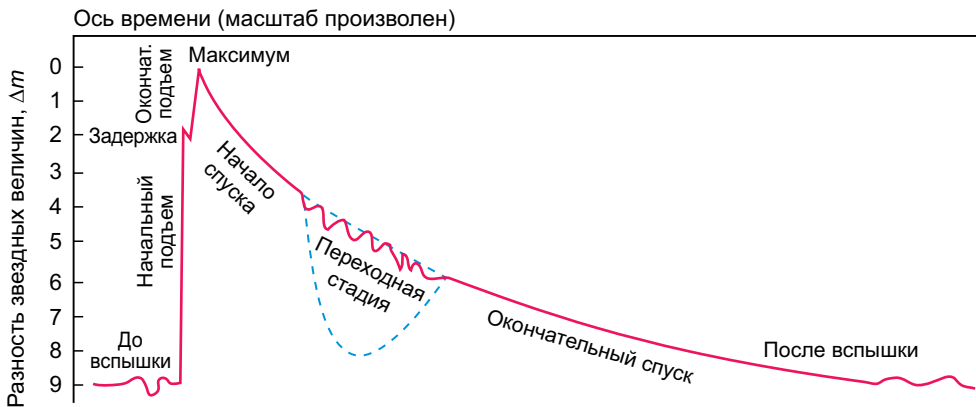


Рис. 133. График изменения блеска новой звезды



Рис. 134. Крабовидная туманность — остаток от взрыва сверхновой звезды

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  $M = -21^m$ .

В китайских летописях упоминается о внезапном появлении в 1054 г. в созвездии Тельца и наблюдавшейся китайскими и японскими астрономами «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. 134). Наблюдения показали, что она расширяется. С учетом скорости расширения можно заключить, что Крабовидная туманность — это остаток взрыва сверхновой 1054 г.



Рис. 135. Сверхновая SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке (указана стрелкой)

звезда излучает энергию около  $10^{38}$  Дж (такая энергия излучается Солнцем примерно за 100 тыс. лет!).

Причиной взрыва новых звезд является обмен вещества между компонентами тесных двойных пар, к которым принадлежат все достаточно детально исследованные бывшие новые звезды. 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  $M = -21^m$ .

В нашей Галактике за последнее тысячелетие зарегистрировано несколько случаев вспышек сверхновых звезд. Наиболее яркая сверхновая звезда, наблюдавшаяся с помощью современной техники, появилась в 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом Облаке (рис. 135).

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 т. д. до образования ядер элементов группы железа (Fe, Ni, Co). Постепенно звезда все больше и больше «расслаивается» (рис. 136).

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, происходит термоядерный взрыв, возникает ударная волна, движущаяся обратно от центра. В итоге наружные слои звезды выбрасываются с огромной скоростью и наблюдается 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 черная дыра).

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, тесно прижатых друг другу, и огромная звездная масса будет сосредоточена в очень небольшом шаре размером порядка десяти километров (рис. 137). Плотность этого шара — **нейтронной звезды** — может составлять  $10^{17}$ — $10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>.

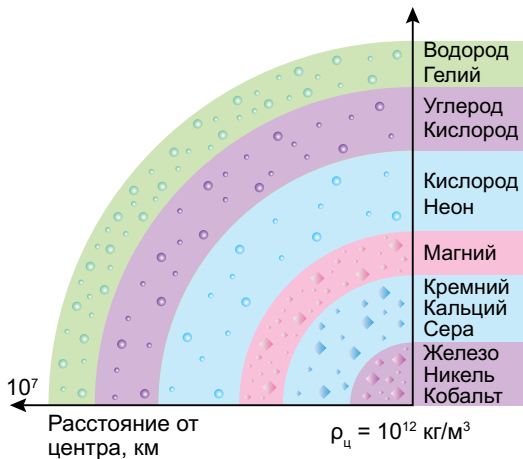


Рис. 136. Расслоение массивных звезд



Рис. 137. Относительные размеры белого карлика и нейтронной звезды



Рис. 138. Относительные размеры нейтронной звезды и черной дыры

Если такая звезда обладает мощным магнитным полем и находится в двойной системе, вещество соседки может захватываться и падать вдоль линий магнитного поля, создавая в районе магнитного полюса горячее пятно, излучающее в радиодиапазоне. В таком случае будет наблюдаться **пульсар** — быстро вращающаяся нейтронная звезда, испускающая радиопульсы. У известных сегодня пульсаров период испускания радиопульсов лежит в диапазоне от 0,0014 до 11,8 с.

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 (наименьшая известная масса составляет 5 масс Солнца) на заключительном этапе своей эволюции превращается в неустойчиво сжимающийся объект — **черную дыру** (рис. 138). Поле тяготения на границе черной дыры настолько велико, что сигналы от этого объекта не выходят наружу (отсюда происходит ее название), 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:

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

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**.



Рис. 139. Схема черной дыры в двойной системе

Чаще всего черную дыру удастся обнаружить двумя способами. Во-первых, если дыра образовалась в двойной системе звезд, то ее положение можно определить по обращению второго компонента вокруг «пустого места» (рис. 139). 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 «кандидатами» в черные дыры, которые также могут существовать и наблюдаться как постоянно взаимодействующие с веществом в ядрах галактик.

В 2019 г. было получено изображение тени, предсказанной теорией, сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87.

### ! Главные выводы

1. Звезды, которые изменяют свои физические характеристики в течение относительно короткого периода времени, называются нестационарными. Они бывают пульсирующими и эруптивными.
2. Физические переменные звезды — это пульсирующие звезды, которые меняют свою светимость за короткие промежутки времени в результате физических процессов, происходящих в самой звезде.
3. Эруптивные звезды — физические переменные звезды, проявляющие свою переменность в виде вспышек. К ним относятся новые и сверхновые звезды.
4. Нейтронные звезды образуются при взрывах сверхновых звезд. Некоторые из них наблюдаются как пульсары, для которых характерно мощное узконаправленное пульсирующее радиоизлучение.
5. Черная дыра — область замкнутого пространства, созданная гравитационным полем массивного тела, которую не могут покинуть ни частицы, ни излучение.
6. В ходе эволюции звезд (в результате термоядерных реакций и взрывов) происходит образование химических элементов.

### ? Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются физические переменные звезды от затменно-двойных звезд?
2. Какова причина пульсаций цефеид?
3. В чем состоит отличие новой звезды от сверхновой?
4. Как образовалась Крабовидная туманность?
5. Каковы причины взрыва новых и сверхновых звезд?
6. Объясните механизм радиоизлучения пульсара.
7. Какой объект называют черной дырой? Какими свойствами обладает черная дыра?
8. Определите среднюю плотность цефеиды, если ее период пульсаций составляет 20 сут.
9. Определите радиус Шварцшильда для звезды с массой, равной 3 массам Солнца.
10. Светимость сверхновой превышает светимость Солнца в  $10^{11}$  раз. Если бы эта звезда появилась на нашем небе с яркостью, равной солнечной, то на каком расстоянии от Солнца она должна была бы находиться?  $M_c = 4^m,8$ ;  $m_c = -26^m,8$ .
11. Цефеида  $\zeta$  Близнецов имеет период изменения блеска  $P = 10^d,15$  и среднюю видимую звездную величину  $m = 3^m,93$ . На каком расстоянии от Солнца она находится?

## Раздел VIII

# 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 называли **Галактикой** (от греч. γαλα — молоко). Еще Галилео Галилей в 1609 г. в телескоп обнаружил, что Млечный Путь состоит из множества слабых звезд.

Млечный Путь проходит через оба полушария по большому кругу небесной сферы (рис. 140). Линия, идущая вдоль середины Млечного Пути, названа **галактическим экватором**, а образующая его плоскость — **галактической плоскостью**. Галактическая плоскость наклонена к плоскости небесного экватора под углом  $63^\circ$ .

Итак, Галактика — это гравитационно-связанная система, состоящая из сотен миллиардов звезд и межзвездной среды, а Млечный Путь — ее светящаяся проекция на небесную сферу.

Количественные подсчеты звезд в разных направлениях от галактического экватора предпринял еще Уильям Гершель в 70-х гг. XVIII в. Выборочные под-

счеты показали, что число звезд резко убывает по обе стороны от галактической плоскости. Дальнейшими исследованиями было установлено, что все звезды неба образуют единую звездную систему. В Млечном Пути сосредоточено подавляющее число звезд Галактики — огромной звездной системы, имеющей форму плоского линзообразного диска (рис. 141) поперечником около 30 и толщиной около 1 кпк (или



Рис. 140. Млечный Путь



соответственно около 100 и 3 тыс. световых лет). Звездный диск Галактики имеет структуру в виде спиральных ветвей (рукавов). Шарообразное утолщение в середине диска получило название **балдж** (от англ. *bulge* — вздутие). Наиболее плотная и компактная центральная часть Галактики, расположенная в созвездии Стрельца, называется **ядром**.

Ядро Галактики скрыто от нас газопылевыми облаками и звездами. Оно обладает очень высокой активностью и излучает в радио-, инфракрасном и рентгеновском диапазонах длин волн. Исследование процессов, происходящих в центральной области Галактики, позволяет предположить, что

в ядре расположена сверхмассивная черная дыра массой 2—5 млн солнечных масс.

Часть звезд нашей Галактики не входит в состав диска, а образует 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 около 8 кпк — и лежит почти в галактической плоскости.

**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.

**Рассеянное звездное скопление** — это не имеющая правильной формы сравнительно неплотная группа звезд, содержащая от нескольких десятков до нескольких тысяч звезд. Размеры таких скоплений — 6—14 пк. Ближайшие к нам рассеянные звездные скопления — Плеяды (рис. 142) и Гиады — находятся в созвездии

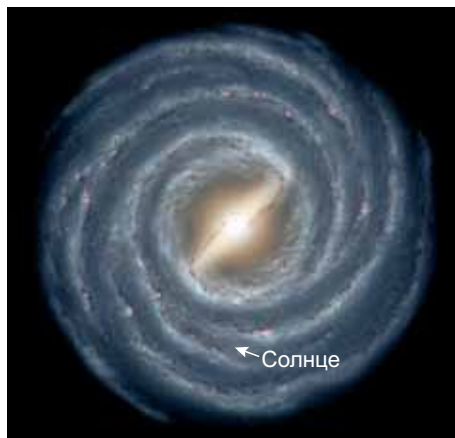


Рис. 141. Строение нашей Галактики. Стрелка указывает положение Солнечной системы



Рис. 142. Рассеянное звездное скопление Плеяды в созвездии Тельца



Рис. 143. Шаровое звездное скопление M5 (NGC 5904) в созвездии Змеи

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, сильно концентрируясь к нему. Всего в Галактике открыто около 150 шаровых скоплений, а их общее число примерно составляет около 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—15 млрд лет.

**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  $0,7^\circ$ , Арктур — более чем на  $1^\circ$ . На основании этого факта был сделан вывод о пространственном движении звезд относительно Солнца. Так впервые было обнаружено, что звезды движутся.

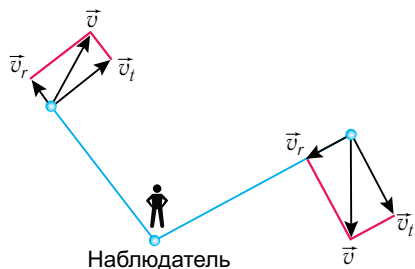


Рис. 144. Пространственная ( $v$ ), лучевая ( $v_r$ ) и тангенциальная ( $v_t$ ) скорости

Тельца. Невооруженным глазом можно различить в Плеядах 5—7 слабых звездочек, располагающихся в виде маленького ковша (см. рис. 142). В настоящее время известно около 1200 рассеянных звездных скоплений. Общее же их число в Галактике оценивается в 20 тыс. объектов. Все они концентрируются у галактической плоскости и состоят из молодых бело-голубых звезд главной последовательности.

**Шаровые звездные скопления** имеют сферическую или эллипсоидальную форму (рис. 143), 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, сильно концентрируясь к нему. Всего в Галактике открыто около 150 шаровых скоплений, а их общее число примерно составляет около 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—15 млрд лет.

Скорость движения звезды в пространстве относительно Солнца называется **пространственной скоростью**. В общем случае пространственная скорость  $v$  (рис. 144) 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 друг с другом соотношением:

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

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:

$$v_t = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \text{ км/с},$$

где  $\mu$  — **собственное движение** (видимое угловое смещение звезды на небесной сфере за один год). Оно выражается секундами дуги в год (рис. 145).

Анализ собственных движений звезд привел также к обнаружению движения Солнца среди звезд. Та точка небесной сферы ( $\alpha = 270^\circ$ ,  $\delta = +30^\circ$ , 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

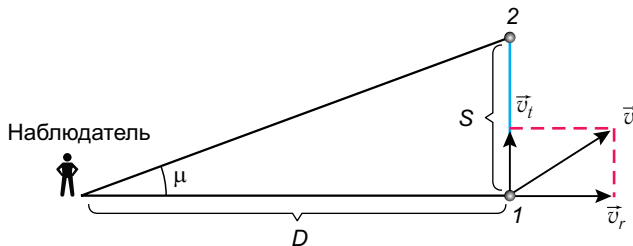


Рис. 145. Определение тангенциальной скорости звезды

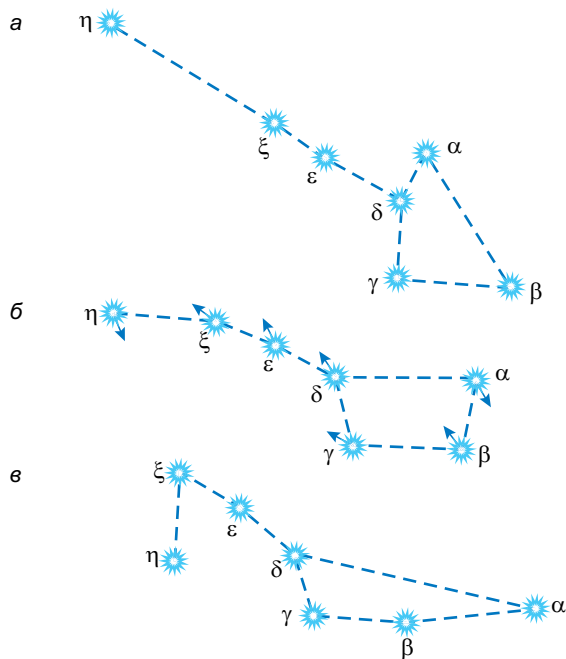


Рис. 146. Изменение относительного расположения звезд в «ковше» Большой Медведицы за 100 тыс. лет: *а* — 50 тыс. лет назад; *б* — настоящее время (стрелками указаны направления тангенциальных скоростей звезд); *в* — через 50 тыс. лет

называется солнечным **антиапексом**. Вследствие собственных движений звезд по истечении десятков тысяч лет вид созвездий меняется (рис. 146).

**4. Вращение Галактики.** Способ для доказательства вращения Галактики был разработан в 1859 г. профессором Казанского университета М. А. Ковальским. 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 220 км/с) на расстоянии Солнца, после чего очень медленно убывает.*

4. Полный период обращения Солнца вокруг ядра Галактики составляет примерно 225—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. 147). Такие звезды имеют относительно Солнца очень большие скорости (до 200—300 км/с).

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

Зная скорость обращения и радиус круговой орбиты, можно вычислить 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 · м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>, получим, что  $M = 1,8 \cdot 10^{41}$  кг, или около 100 млрд масс Солнца. Масса Галактики в пределах объема радиусом 15 кпк оценивается примерно в 200 млрд масс Солнца. С учетом остальной части Галактики ее масса оценивается примерно в  $10^{12}$  масс Солнца.

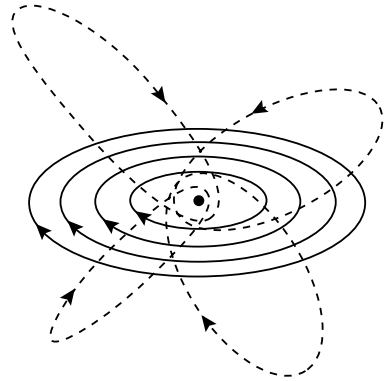


Рис. 147. Траектории звезд в Галактике (диск Галактики — сплошные линии, сферическая составляющая — пунктирные линии)

### ! Главные выводы

1. Наша Галактика — гравитационно-связанная система, состоящая из сотен миллиардов звезд и межзвездной среды.
2. Млечный Путь — протянувшаяся через все звездное небо слабо светящаяся полоса, которая является проекцией огромного количества звезд Галактики.
3. Структурными составляющими Галактики являются гравитационно-связанные группы звезд (шаровые скопления, рассеянные скопления), имеющие общее происхождение и движущиеся в поле тяготения Галактики как единое целое.
4. Солнечная система относительно ближайших звезд Галактики движется со скоростью около 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса.
5. Наша звездная система обладает дифференциальным вращением, т. е. угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра.



### Контрольные вопросы и задания

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. Каковы особенности вращения нашей Галактики?
8. Сколько раз за время существования Солнце успело обернуться вокруг центра Галактики?
9. Звезда 83 Геркулеса находится от Солнца на расстоянии  $D = 100$  пк, ее собственное движение составляет  $\mu = 0,12''$ . Какова тангенциальная скорость этой звезды?
10. Лучевая скорость звезды Бетельгейзе  $v_r = 21$  км/с, собственное движение  $\mu = 0,032''$  в год, а параллакс  $p = 0,012''$ . Определите полную пространственную скорость этой звезды относительно Солнца.

## § 28. Межзвездная среда

**1. Межзвездный газ.** Звездное небо содержит много туманных объектов. Они бывают светящимися и темными, поглощающими свет.

Широкое применение фотографии в астрономии позволило тщательно исследовать, описать и составить каталоги темных туманностей.

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

**Межзвездная среда** — это вещество и поля, заполняющие межзвездное пространство внутри Галактики. Большая часть массы межзвездного вещества приходится на разреженный газ и пыль. Вся межзвездная среда пронизывается магнитными полями, космическими лучами, электромагнитным излучением. Основной компонент межзвездной среды — **межзвездный газ**, который состоит из водорода (70 % массы) и гелия (28 %). Остальная часть массы межзвездного вещества приходится на более 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 темпера-

турных условий и плотности межзвездный газ может находиться в трех различных состояниях: *ионизированном, атомарном и молекулярном*.

Основные данные о межзвездном газе получены радиоастрономическими методами, после того как в 1951 г. было обнаружено 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 килопарсеков на расстоянии 15—20 кпк от ее центра.

Основная часть межзвездного газа сосредоточена в спиральных ветвях Галактики, где он распределен также неравномерно: собран в клочковатые образования размерами в десятки и сотни парсеков со средней концентрацией частиц несколько атомов в  $1 \text{ см}^3$ . 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  $1 \text{ см}^3$ ) 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 близко расположенных горячих звезд (спектральных классов *B* и *O*).

Светлая туманность излучает свет, если ее освещает близлежащая звезда (рис. 148). Звезды класса *O* и *B* способны вызвать ионизацию атомов водорода на расстоянии примерно 500 световых лет.

Светлые диффузные туманности, имеющие неправильную, клочковатую форму, достигают размеров до 10 пк, а их плотность колеблется от  $10^{-17}$  до  $10^{-20} \text{ кг/м}^3$ . Распределяются области такого ионизированного водорода в плоской подсистеме Галактики, являясь также указателями мест протекающего в настоящее время

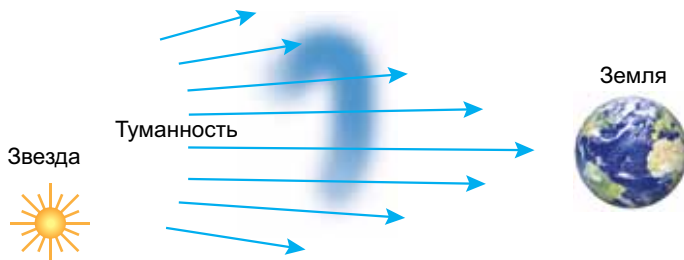


Рис. 148. Туманность излучает свет, если ее освещает близлежащая звезда



Рис. 149. Большая туманность Ориона

известная Крабовидная туманность в созвездии Тельца (см. рис. 134), являющаяся остатком взорвавшейся сверхновой звезды.

Если близлежащие звезды не столь горячи и не могут ионизировать водород, то туманность светится за счет отражения звездного света (рис. 150). Данные туманности содержат много пыли. Примером такой светлой туманности является туманность в скоплении Плеяды в созвездии Тельца (см. рис. 142).

Особым типом туманностей являются **планетарные туманности**, которые выглядят как слабо светящиеся диски или кольца, напоминающие диски планет. Их насчитывается более 1200. Планетарные 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. Планетарная туманность Песочные Часы (рис. 151) показывает, ка-

звездообразования. Так, в Большой туманности Ориона (рис. 149) с помощью космического телескопа Хаббла обнаружены протозвезды, окруженные протопланетными дисками.

Большая туманность Ориона — самая яркая газовая туманность на ночном небе. Расстояние до этой туманности — около 1340 световых лет.

При наблюдении через фильтр можно увидеть, что некоторые из туманностей состоят из отдельных волокон. Например,

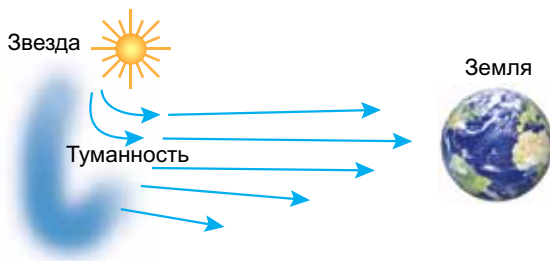


Рис. 150. Туманность светит отраженным светом близлежащей звезды



кие 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 облаках мелкие пылинки быстро обрастают оболочками из наиболее распространенных элементов (H, C, N, O). За миллионы лет даже при низкой температуре в оболочках 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 лишённые звезд (рис. 152). Такие газопылевые образования называются **темными диффузными туманностями** (рис. 153).



Рис. 151. Планетарная туманность Песочные Часы



Рис. 152. Облака межзвездной пыли в направлении на центр Галактики

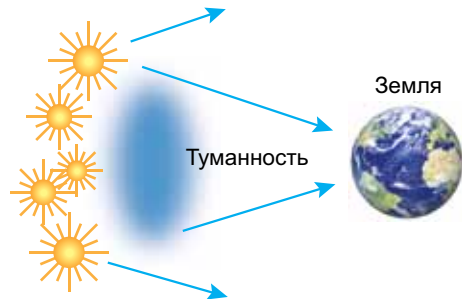


Рис. 153. Темная туманность заслоняет свет звезд, находящихся на большом расстоянии от Земли



Рис. 154. Туманность Конская Голова в созвездии Ориона. Слева — изображение в инфракрасных лучах, справа — в оптических. Фотографии космического телескопа Хаббла

Благодаря развитию внеатмосферной астрономии появилась возможность наблюдать межзвездную пыль в инфракрасном диапазоне, что позволяет рассмотреть новые детали (рис. 154).

**3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле.** Кроме разреженного газа и пыли, в межзвездном пространстве с огромными скоростями, близкими к скорости света, движется большое количество элементарных частиц и ядер различных атомов. Потоки этих частиц называют **космическими лучами**. Они пронизывают все межпланетное и межзвездное пространство. На площадку в  $1 \text{ м}^2$  каждую секунду 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.

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.



### ! Главные выводы

1. Межзвездная среда — это вещество и поля, заполняющие межзвездное пространство внутри Галактики.
2. Большая часть массы межзвездной среды приходится на разреженный газ и пыль, общая масса которых оценивается в 2 % от общей массы Галактики.

### ? Контрольные вопросы и задания

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. Исходя из каких астрономических 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?

## § 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 огромным числом звезд, сливающихся в сплошное туманное пятно при наблюдении в менее мощный телескоп. 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 классифицировать галактики по их форме. Согласно современной классификации, различают галактики следующих основных типов: эллиптические (E), спиральные (S), неправильные (Ir) и линзовидные (SO) — рисунок 155 на с. 176.

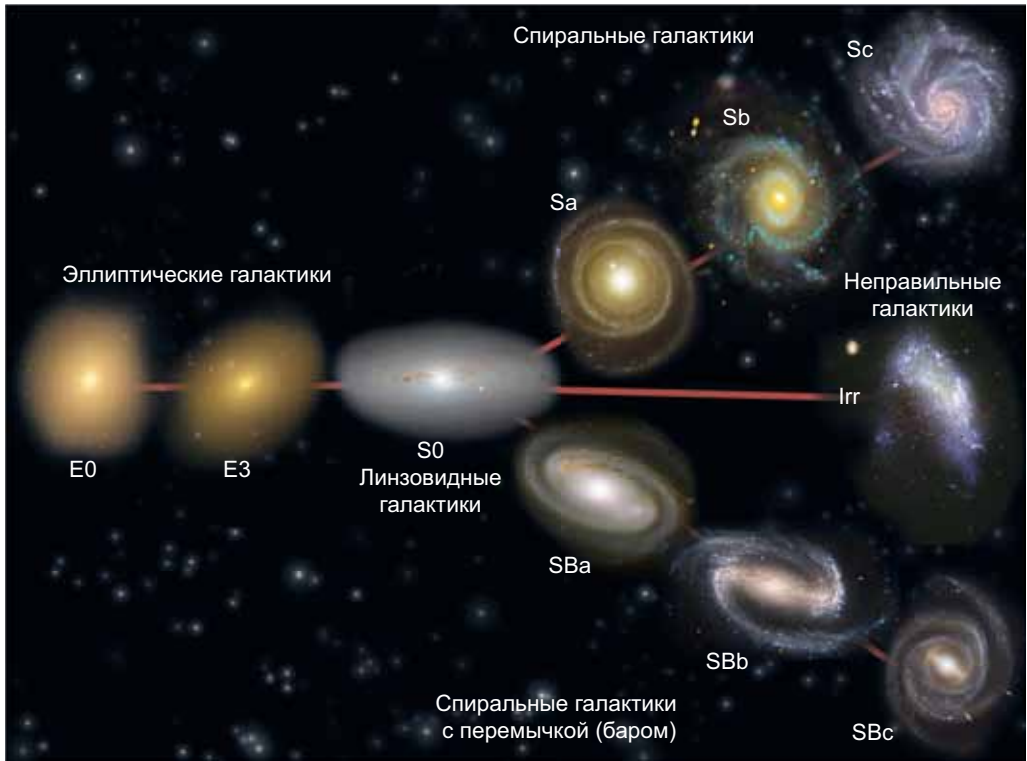


Рис. 155. Классификация галактик Э. Хаббла

**Эллиптические галактики** в проекции на небесную сферу выглядят как круги или эллипсы (рис. 156). 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 — 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 галактикам эллиптического типа.



Рис. 156. Эллиптическая галактика М 87 в созвездии Девы

Около половины изученных галактик относятся к спиральному типу. **Спиральные галактики** — это сильно сплюснутые системы с центральным уплот-

нением. Они содержат много молодых звезд высокой светимости, газ, пыль и межзвездное магнитное поле. Спиральные галактики вращаются быстро. Число звезд в них плавно убывает от центра к краю. Звезды вращаются в такой системе в разных плоскостях. Сами спиральные галактики вращаются очень быстро. Они содержат много молодых звезд высокой светимости, газ, пыль и межзвездное магнитное поле.



Рис. 157. Спиральные галактики: *а* — М 81; *б* — М 51; *в* — М 101

нением (в котором находится ядро галактики) и с заметной спиральной структурой. Размеры этих галактик достигают 40 кпк, а светимости —  $10^{11}$  светимостей Солнца. В окружающем уплотнение диске имеются две или более клочковатые спиральные ветви (рис. 157). Так, к хаббловским типам спиральных галактик относится галактика М 81, типа Sa, представляющая собой систему с туго закрученными спиральными ветвями, яркой и протяженной шарообразной частью (рис. 157, *а*). Галактика М 51 относится к типу Sb, имеет более мощные и четкие спирали, центральная часть менее выделяется (рис. 157, *б*). Галактика М 101 принадлежит к типу Sc и представляет собой систему с развитой клочковатой спиральной структурой, шарообразная часть которой слабо просматривается на общем фоне (рис. 157, *в*). Примерно у половины спиральных галактик в центральной части имеется почти прямая звездная перемишка — **бар**, от которой начинают закручиваться спиральные рукава (рис. 158). Такие галактики называются **спиральными с перемишкой**.

В спиральных ветвях галактик сосредоточены самые яркие и молодые звезды, яркие газопылевые туманности, молодые звездные скопления и звездные комплексы. Поэтому спиральный узор отчетливо виден даже у далеких галактик, 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. 159). Свет от этой галактики доходит до нас примерно за 2,54 млн лет.



Рис. 158. Спиральная галактика с перемишкой (баром) NGC 1365



Рис. 159. Туманность Андромеды



Рис. 160. Большое  
Магелланово Облако

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. Эти галактики расположены в Южном полушарии и поэтому невидимы с территории Беларуси. Большое Магелланово Облако (рис. 160), имеющее в диаметре 8,6 кпк, расположено на расстоянии 50 кпк от Солнца. По мнению некоторых астрономов, в Магеллановых Облаках 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.

**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:

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

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 определяют также по формуле (1). Видимую звездную величину оценивают из наблюдений, а абсолютную — считают известной (средней) для данного класса объектов. Например, шаровые скопления, как это следует из наблюдений, имеют примерно одинаковую абсолютную величину.

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

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

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 скоростью она удаляется (графически данная зависимость представлена на рисунке 161). Закон, по которому скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию

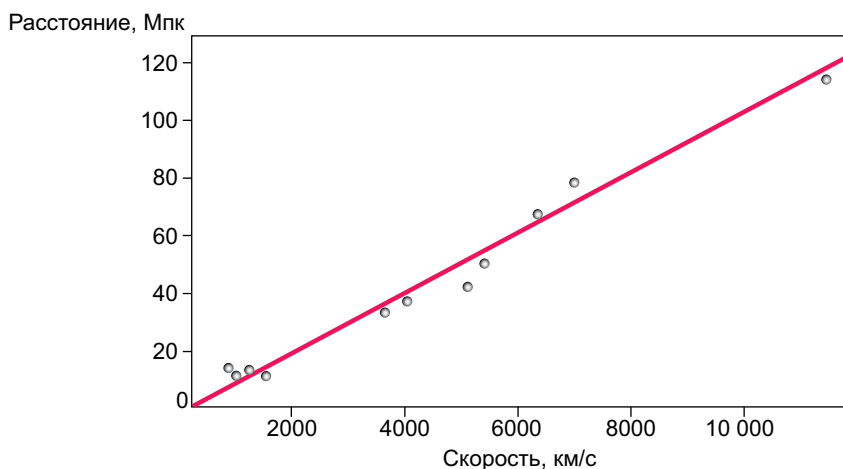


Рис. 161. Зависимость скорости удаления галактик от расстояний до них

до нее, получил название **закона Хаббла**. Закон Хаббла можно сформулировать 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:

$$v_r = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0}. \quad (2)$$

С учетом закона Хаббла зависимость (2) можно записать в виде:

$$v_r = Hr, \quad (3)$$

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 67,4 до 74 км/(с · Мпк). При расчетах чаще всего принимают  $H = 70$  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 тел 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 выражение для нахождения массы галактики будет иметь следующий вид:

$$M = \frac{Rv^2}{G}. \quad (4)$$

Для галактик, как и для звезд, имеется определенная зависимость между массой и светимостью, которая используется 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 достаточно уверенно заключают: Вселенная в основном заполнена невидимым веществом. Оно образует протяженные гало галактик и заполняет межгалактическое пространство, концентрируясь в скоплениях галактик.

Спектральные наблюдения, выполненные 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.

**4. Галактики с активными ядрами.** У большинства галактик можно выделить яркую центральную часть — ядро (рис. 162). Эта область отличается



Рис. 162. Ядра галактик содержат массивные черные дыры. Фотография получена космическим телескопом Хаббла



Рис. 163. Ядро галактики выбрасывает газовые струи — джеты

большой звездной плотностью, достигающей  $10^6$ — $10^8$  пк<sup>-3</sup>. 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 около 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 пк<sup>3</sup>, 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**.

Формы проявления активности ядер галактик различны. Это может быть большая мощность излучения в инфракрасной, оптической или рентгеновской области спектра, причем меняющаяся за сравнительно небольшое время (за несколько лет, месяцев или даже дней). В некоторых случаях наблюдается быстрое движение газа в ядре (со скоростями порядка 1000 км/с). Иногда газ образует длинные прямолинейные газовые струи — **джеты** (рис. 163).

Наиболее вероятная гипотеза, объясняющая активность ядер, предполагает наличие сверхмассивной черной дыры ( $10^6$ — $10^9$  масс Солнца) в центре галактики.

**5. Взаимодействующие галактики.** Близко расположенные галактики иногда бывают связаны между собой полосой светящейся материи. Часто эти голубоватые полосы являются продолжением спиральных ветвей. Полосы состоят из газа горячих молодых звезд. Нередко галактики 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 4,5 млрд лет столкнется с туманностью Андромеды (M 31) — рисунок 164. 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.



Рис. 164. Так, возможно, будет выглядеть на небе туманность Андромеды через несколько миллиардов лет



Ближе всего к нам находится пара сталкивающихся крупных галактик NGC 4038 и NGC 4039 в созвездии Ворона (рис. 165). 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.

**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. подобные 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.



Рис. 165. 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

Природа активности радиоизлучения квазаров точно пока не установлена, однако 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 поверхностной яркостью излучения.

Изучение большого количества квазаров с помощью космического телескопа Хаббла в 1995 г. привело ученых к выводу, что недалекие квазары (с красным смещением  $z = 0,5$ ) связаны с взаимодействующими эллиптическими галактиками. Многие квазары располагаются в центрах подобных звездных систем. Это подтверждает предположение, что квазары являются массивными черными дырами в центрах галактик, на которые происходит падение вещества.



### Главные выводы

1. Галактики — гигантские гравитационно-связанные системы звезд и межзвездного вещества, расположенные вне нашей Галактики.
2. Мир галактик чрезвычайно разнообразен. По внешнему виду и структуре галактики классифицируются на основные типы: эллиптические, спиральные, неправильные и линзовидные.
3. Спектральные линии в спектрах далеких галактик заметно смещены в сторону красного конца спектра.
4. Относительное увеличение длин волн линий в спектрах галактик пропорционально расстоянию до них (закон Хаббла).
5. Постоянная Хаббла — коэффициент пропорциональности между скоростью удаления внегалактических объектов и расстоянием до них, принимаемый в расчетах равным  $70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ .
6. Квазары — квазизвездные объекты — самые мощные по электромагнитному излучению объекты во Вселенной, считающиеся активными ядрами далеких галактик.



### Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте типы галактик по классификации Э. Хаббла. Чем эллиптические и неправильные галактики отличаются от спиральных? К какому типу относится наша Галактика?
2. Сформулируйте и объясните закон Хаббла.

3. Как оценивают массы галактик?
4. На каком расстоянии находится галактика, если скорость ее удаления равна 20 000 км/с?
5. Сколько времени придется ждать ответа на радиотелеграмму, отправленную к галактике Андромеды, расстояние до которой 0,69 Мпк?
6. Каково расстояние до галактики, если в ней обнаружена новая звезда, видимая звездная величина которой  $18^m$ , а абсолютная звездная величина  $-7^m$ ?
7. Определите линейный диаметр галактики типа E0, если ее угловой диаметр равен  $\rho = 1'40''$ , а линия H $\alpha$  ( $\lambda_0 = 656,3$  нм) в ее спектре имеет длину волны  $\lambda = 667,8$  нм.

## § 30. Расширяющаяся Вселенная

**1. Пространственное распределение галактик.** Галактики, как и звезды, образуют группы и скопления. Известно около 7000 скоплений галактик. Около 50 ближайших галактик, из которых наиболее массивные — наша Галактика и туманность Андромеды, образуют систему галактик размерами в несколько сотен килопарсеков, которая получила название **Местной группы галактик**.

Более крупные системы галактик группируются в **скопления галактик**. Они содержат до тысячи галактик, и их размер составляет несколько мегапарсеков. Ближайшее скопление галактик размером примерно 5 Мпк находится в направлении созвездия Девы на расстоянии около 20 Мпк (рис. 166). В его состав входят гигантские эллиптические и спиральные галактики, например радиогалактика Дева А, спиральная галактика «Сомбреро» (рис. 167) 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.

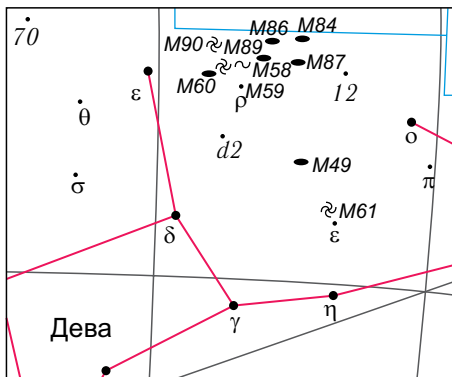


Рис. 166. Скопление галактик в созвездии Девы



Рис. 167. Галактика «Сомбреро»

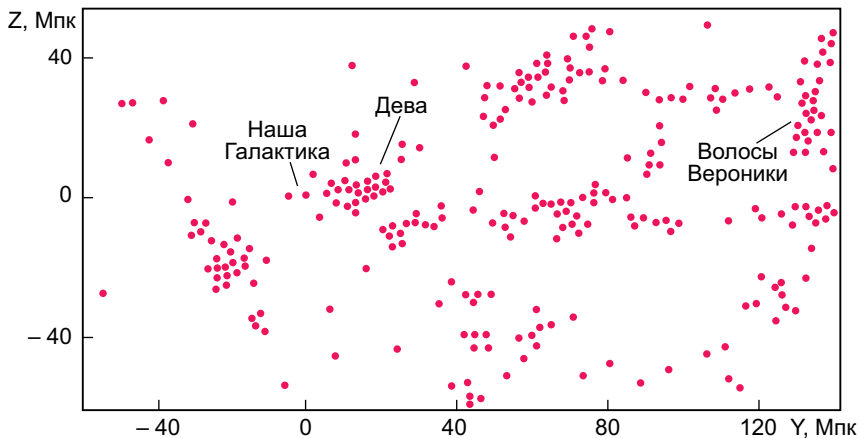


Рис. 168. Ячеистое распределение галактик в пространстве (в разрезе, проходящем через скопление в созвездии Волосы Вероники)

Комплексы скоплений галактик размерами 30—60 Мпк, содержащих 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. 168). В «волокон» 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 «волокон» — порядка  $10^{-24}$  кг/м<sup>3</sup>. Крупномасштабная структура Вселенной имеет ячеисто-сотый вид. Средняя плотность светящегося вещества в масштабах больше 300 Мпк равна  $3 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>. 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, межгалактической среды образует Вселенную.

Одно из важнейших свойств Вселенной — ее постоянное расширение, «разлет» скоплений галактик, о чем свидетельствует красное смещение в спектрах галактик. Вселенная находится в состоянии приблизительно однородного и изотропного расширения. Однородность означает одинаковость всех свойств мате-

рии всюду в пространстве, а изотропия — одинаковость этих свойств в любом направлении. Однородность свидетельствует об отсутствии выделенных областей пространства, а изотропия — об отсутствии выделенного направления. Предположение 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 А. А. 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 вытекают три возможных следствия: Вселенная и ее пространство расширяются с течением времени; Вселенная через определенное время начнет сжиматься; 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  $\rho_{\text{кр}}$  Вселенной, определяемое по формуле

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $H$  — постоянная Хаббла. Расчеты по данной формуле показывают, что  $\rho_{\text{кр}} = 10^{-26}$  кг/м<sup>3</sup>. По современным оценкам, плотность вещества Вселенной близка к критическому значению: она либо немного больше, либо немного меньше (не решен окончательно вопрос об учете «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. В конце XX в. в ходе изучения сверхновых звезд типа Ia (об этих звездах см. Атлас) было установлено ускоренное расширение Вселенной.

Постоянная Хаббла позволяет оценить время, в течение которого продолжается процесс расширения Вселенной. Определено, что оно не меньше 10 млрд и не больше 19 млрд лет. Наиболее вероятное значение среднего возраста

Вселенной — около 15 млрд лет. Эта величина не противоречит оценкам возраста наиболее старых звезд.

**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 Жорж Леметр и Г. А. Гамов. Она получила название Большого взрыва.

Согласно этой теории, предполагается, что Вселенная возникла 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 разлет материи в окружающую пустоту, ибо окружающей пустоты не было. Вселенная — это все существующее. Ее вещество 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.

На основании моделей Фридмана была разработана поэтапная физическая картина эволюции вещества начиная с момента взрыва (рис. 169). Чуть более 3 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.

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, звезды и планеты.

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



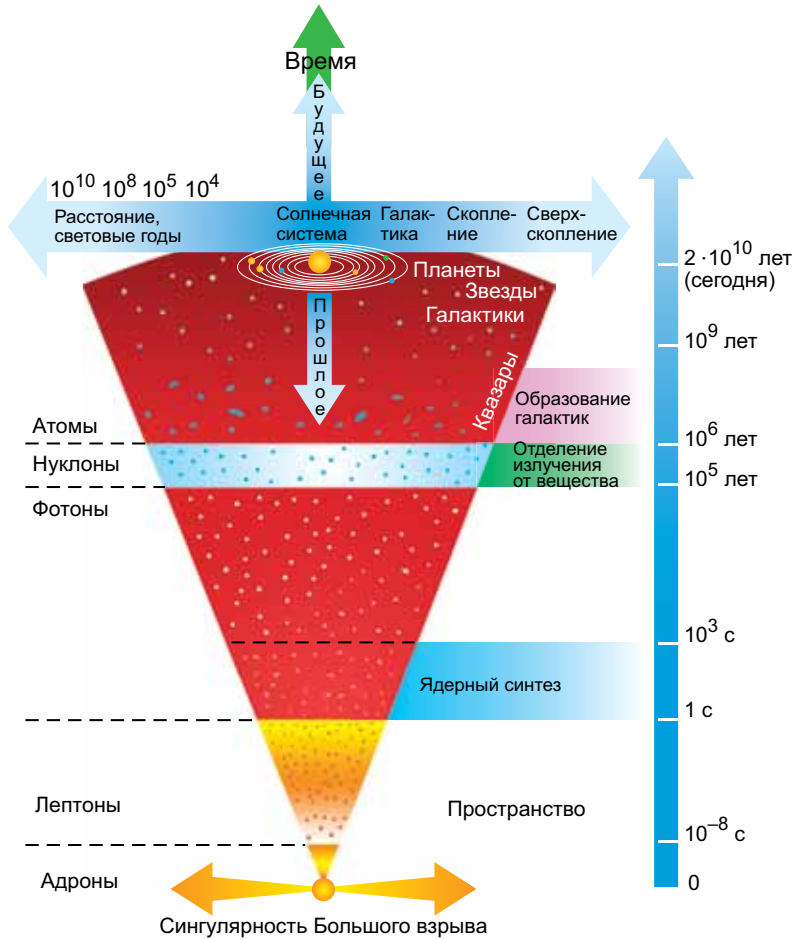


Рис. 169. Схема развития Вселенной от Большого взрыва до настоящего времени



**Закрытая** модель предполагает, что Вселенная может быть представлена как грандиозная закрытая система, испытывающая множество эволюционных циклов. Цикл расширения сменяется циклом сжатия до возвращения в сингулярное состояние, затем новый взрыв и т. д. Полный цикл расширения и сжатия Вселенной составляет примерно 100 млрд лет. Каждый раз, возвращаясь к сингулярности, Вселенная теряет «память» о прошлом состоянии и может снова «родиться» с совершенно новым набором физических 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. Затем центральные части галактик коллапсируют, образуя черные дыры, и тем самым прекратят свое существование.



### Главные выводы

1. В охваченной астрономическими наблюдениями части Вселенной существуют миллиарды галактик. В пространстве галактики распределены неравномерно, образуя группы, скопления и сверхскопления галактик.
2. Основное свойство Вселенной — ее расширение.
3. На современном этапе развития науки рассматривается модель эволюционной Вселенной, которая со временем изменяет свою структуру и свойства.



### Контрольные вопросы и задания

1. Опишите пространственное распределение галактик во Вселенной.
2. Как объясняется красное смещение и о чем оно свидетельствует?
3. В чем состоит сущность теории расширяющейся Вселенной?
4. К каким выводам о стационарности Вселенной пришел А. А. Фридман?
5. Что такое критическая плотность Вселенной? В какой взаимосвязи критическая плотность находится с расширением или сжатием Вселенной?
6. Опишите модель горячей Вселенной.
7. Что понимается под закрытой и открытой 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 (гравитационное 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 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 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 преследует человечество с давних пор. Когда-то люди думали, что обитаемы все планеты и 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. В ходе анализа марсианского грунта не было обнаружено никаких следов органических соединений — продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. Для сравнения: такой же прибор при пробах антарктического грунта нашел 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. 170). Была выдвинута гипотеза, что это архитектурное сооружение древней

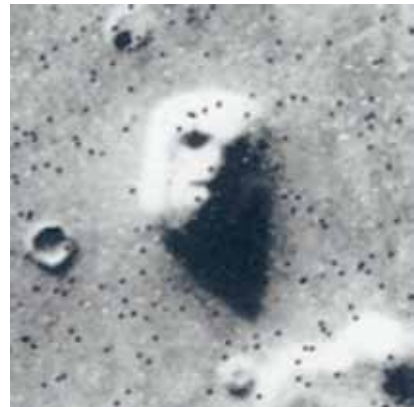


Рис. 170. Фотография «головы сфинкса» на Марсе, полученная в 1976 г.

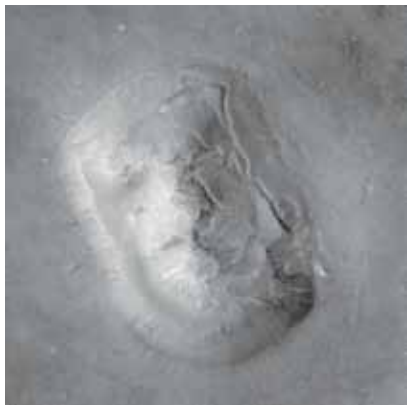


Рис. 171. Фотография «головы сфинкса», полученная с лучшим разрешением в 2001 г.

цивилизации. Но исследователи Марса заявили: это природный объект. Споры не утихали до 2001 г., пока космический аппарат «Марс Глобал Сурвейор» не передал на Землю более подробный снимок этого объекта (рис. 171). На новом изображении хорошо видно, что «голова сфинкса» — природная структура.

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

Поверхность Европы покрыта молодым водяным льдом, который испещрен трещинами и «хаосами» (см. рис. 79). 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. Вероятной причиной появления таких структур может быть действие гидротермальных источников (гейзеров). Следовательно, если на Европе есть теплая вода, то есть условия для существования каких-либо форм жизни.

Межпланетная станция «Кассини» провела анализ активных извержений из подповерхностного жидкого океана спутника Сатурна Энцелад и обнаружила сложные органические молекулы.

**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 радионауковед 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 неопределенный характер и даются 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.

Первые работы по поиску сигналов внеземных цивилизаций провел в 1960 г. Фрэнсис Дрейк. Он исследовал радиоизлучение ближайших звезд ( $\tau$  Кита и  $\epsilon$  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 обрабатываются компьютерами.

Параллельно ведется работа по сообщению внеземным цивилизациям информации о земной цивилизации. В 1974 г. с радиоастрономической обсерватории в Аресибо в сторону шарового скопления М31 (со звездие Геркулеса), находящегося на расстоянии 24 тыс. световых лет от Земли, 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. 172).



Рис. 172. Табличка с посланием, адресованным представителям внеземных цивилизаций; справа внизу изображение АМС «Пионер-10»

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.

### Главные выводы

1. Разумная жизнь во Вселенной является следствием ее фундаментальных свойств — в этом заключается сущность антропного принципа. Данный принцип поставил на научную основу вопрос: почему наш мир устроен таким, каким мы его наблюдаем?
2. В Солнечной системе на небесных телах, кроме Земли, пока не обнаружено жизни.
3. Поиск внеземных цивилизаций пока не привел к положительным результатам.
4. На человечестве лежит огромная ответственность за сохранение жизни и разума на Земле и во Вселенной в целом.

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается сущность антропного принципа?
2. На каких планетах Солнечной системы ученые предполагают возможность существования 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. Каким образом человечество пытается установить контакты с внеземными цивилизациями?

## Приложения

### 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	Карликовая планета ♇ 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	э́та	ν	ню	τ	та́у
β	бéта	θ	тéта	ξ	кси	υ	ипсилóн
γ	га́мма	ι	йóта	ο	омикрóн	φ	фи
δ	дéльта	κ	ка́ппа	π	пи	χ	хи
ε	эпсилóн	λ	ла́мбда	ρ	ро	ψ	пси
ζ	дзéта	μ	мю	σ	сигма	ω	oméга

Динамические характеристики планет

Параметры	Планеты							
	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Среднее расстояние до Солнца, а. е.	0,387	0,723	1,000	1,524	5,204	9,59	19,23	30,1
Сидерический период обращения	88,0 сут	224,7 сут	365,26 сут	687,0 сут	11,86 года	29,46 года	84,0 года	164,8 года
Синодический период обращения, сут	115,9	583,9	—	779,9	398,9	378,1	369,1	367,5
Эксцентриситет орбиты	0,206	0,0067	0,0167	0,0934	0,0488	0,0557	0,0441	0,0112
Наклонение орбиты к эклиптике	7°00′	3°24′	—	1°51′	1°18′	2°29′	0°46′	1°46′

Физические характеристики планет

Параметры	Планеты							
	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Масса (по сравнению с массой Земли)	0,055	0,815	1,000	0,107	318	95,2	14,5	17,1
Радиус, км	2440	6052	6378	3396	71 490	60 268	25 560	24 764
Средняя плотность, $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,27	1,6
Период вращения	58,6 сут	243 сут	23 ч 56 мин	24 ч 37 мин	9 ч 56 мин	10 ч 33 мин	17 ч 14 мин	15 ч 58 мин
Наклон экватора к плоскости	7°	3°24′	23°4′	25°12′	3°07′	26°45′	82°	28°
Число известных спутников	—	—	1	2	79	82	27	14



## Справочные данные о Земле

Параметр	Величина
Экваториальный радиус, км	6378,140
Полярный радиус, км	6356,755
Средний радиус, км	6371,004
Поверхность Земли, км <sup>2</sup>	$5,10072 \cdot 10^8$
Поверхность суши, %	29,2
Водная поверхность, %	70,8
Масса Земли, кг	$5,973 \cdot 10^{24}$
Масса воды во всех ее формах, кг	$1,43 \cdot 10^{21}$
Масса атмосферы Земли, кг	$5,158 \cdot 10^{18}$
Линейная скорость точки экватора, м/с	465,12
Средняя скорость движения Земли по орбите, км/с	29,783
Ускорение силы тяжести на Земле (на широте 45°), м/с <sup>2</sup>	9,806

## Справочные данные о Луне

Параметр	Величина
Диаметр, км	3476
Минимальное расстояние от Земли, км	356 410
Максимальное расстояние от Земли, км	406 740
Среднее расстояние от Земли, км	384 400
Средний эксцентриситет орбиты	0,0549
Среднее наклонение плоскости орбиты к эклиптике	5°08'43"
Период обращения по орбите, сут	27,32
Средняя периодичность смены фаз Луны, сут	29,53
Средний угловой радиус Луны	15'33"
Масса, кг	$7,35 \cdot 10^{22}$
Средняя плотность, $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	3,346

Окончание таблицы

Параметр	Величина
Ускорение силы тяжести, м/с <sup>2</sup>	1,62
Вторая космическая скорость, км/с	2,38
Максимальная температура днем, °С	+127
Минимальная температура ночью, °С	-173
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 <sup>2</sup>	$3,8 \cdot 10^7$
Площадь морей на всей поверхности, %	16,9
Площадь морей на видимой стороне, %	31,2
Площадь поверхности, которую можно наблюдать вследствие либрации, %	59

## 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 <sup>3</sup>	1409
Ускорение силы тяжести на поверхности, м/с <sup>2</sup>	274,0
Вторая космическая скорость, км/с	617,7
Сидерический период вращения точки экватора, сут	25,380

Окончание таблицы

Параметр	Величина
Синодический период вращения точки экватора, сут	27,275
Наклон экватора к эклиптике	7°15′
Светимость Солнца, Дж/с	$3,83 \cdot 10^{26}$
Эффективная температура фотосферы Солнца, К	5772
Абсолютная фотовизуальная звездная величина	+4,96 <sup>m</sup>
Скорость движения Солнца относительно окружающих звезд, км/с	19,4
Апекс движения Солнца	$\alpha = 270^\circ = 18 \text{ ч } 00 \text{ мин}$ $\delta = +30^\circ$
Расстояние Солнца от центра Галактики, кпк	8
Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики, км/с	220
Период обращения Солнца вокруг центра Галактики, млн лет	Около 225—250
Средняя продолжительность полного цикла солнечной активности, лет	22,11

## Физические характеристики некоторых ярких звезд

Обозначение в созвездии	Название звезды	Экваториальные координаты		Блеск, <i>m</i>	Спектр	Температура, К	Параллакс	Собственное движение	Лучевая скорость, км/с
		$\alpha$	$\delta$						
$\alpha$ Андромеды	Альферац**	00 ч 08 мин	+29°05'	2,06	B8	12 940	0,034"	0,213"	-10,1
$\alpha$ Эридана	Ахернар	01 ч 38 мин	-57°14'	0,44	B3	15 000	0,023"	0,095"	+16,0
$\alpha$ Овна	Гамаль	02 ч 07 мин	+23°28'	2,01	K2	4590	0,049"	0,239"	-14,2
$\alpha$ Малой Медведицы	Полярная*	02 ч 32 мин	+89°16'	1,97	F7	5820	0,007"	0,045"	-16,4
$\alpha$ Персея	Мирфак	03 ч 24 мин	+49°52'	1,79	F5	6600	0,006"	0,035"	-2,0
$\alpha$ Тельца	Альдебаран*	04 ч 36 мин	+16°31'	0,85	K5	3875	0,050"	0,199"	+53,8
$\beta$ Ориона	Ригель**	05 ч 15 мин	-8°12'	0,12	B8	12 130	0,004"	0,001"	+20,7
$\alpha$ Возничего	Капелла	05 ч 17 мин	+46°00'	0,08	G1	5700	0,077"	0,434"	+30,2
$\gamma$ Ориона	Беллатрикс	05 ч 25 мин	+6°21'	1,64	B2	22 000	0,013"	0,017"	+18,0
$\alpha$ Ориона	Бетельгейзе*	05 ч 55 мин	+7°24'	0,2—1,2	M1	3600	0,006"	0,029"	+22,0
$\alpha$ Киля	Канопус	06 ч 24 мин	-52°42'	-0,72	F0	7350	0,010"	0,031"	+21,0
$\alpha$ Большого Пса	Сириус**	06 ч 45 мин	-16°43'	-1,46	A1	9940	0,379"	1,339"	-5,5
$\alpha$ Близнецов	Кастор**	07 ч 35 мин	+31°53'	1,96	A1	10 300	0,066"	0,254"	-1,0
$\alpha$ Малого Пса	Процион	07 ч 39 мин	+5°13'	0,37	F5	6600	0,286"	1,258"	-4,1
$\beta$ Близнецов	Поллукс**	07 ч 45 мин	+28°02'	1,14	K0	4865	0,097"	0,627"	+3,3
$\alpha$ Гидры	Альфард	09 ч 28 мин	-8°40'	1,97	K3	4400	0,018"	0,036"	-4,0

Окончание таблицы

Обозначение в созвездии	Название звезды	Экваториальные координаты		Блеск, <i>m</i>	Спектр	Температура, К	Параллакс	Собственное движение	Лучевая скорость, км/с
		$\alpha$	$\delta$						
$\alpha$ Лва	Регул**	10 ч 08 мин	+11°58'	1,35	B7	10 300	0,042"	0,249"	+5,9
$\alpha$ Большой Медведицы	Дубхе**	11 ч 04 мин	+61°45'	1,79	K0	4685	0,026"	0,140"	-8,7
$\beta$ Лва	Денебола	11 ч 49 мин	+14°34'	2,14	A3	8500	0,090"	0,512"	-0,2
$\xi$ Большой Медведицы	Мицар**	13 ч 24 мин	+54°56'	2,23	A2	9330	0,042"	0,123"	-9,0
$\alpha$ Девы	Слика	13 ч 25 мин	-11°10'	1,04	B1	22 400	0,012"	0,052"	+1,0
$\alpha$ Волопаса	Арктур	14 ч 16 мин	+19°11'	-0,05	K1	4300	0,089"	2,278"	-5,3
$\alpha$ Центавра	Толиман	14 ч 39 мин	-60°50'	-0,01	G2	5750	0,747"	3,710"	-21,6
$\alpha$ Северной Короны	Гемма*	15 ч 34 мин	+26°43'	2,21	A0	9750	0,044"	0,150"	+1,7
$\alpha$ Скорпиона	Антарес**	16 ч 29 мин	-26°26'	0,96	M1	3400	0,005"	0,025"	-3,4
$\alpha$ Змееносца	Рас Альхаг	17 ч 35 мин	+12°34'	2,07	A5	7906	0,067"	0,246"	+12,6
$\alpha$ Лиры	Вега	18 ч 37 мин	+38°47'	0,03	A0	9550	0,128"	0,350"	-20,6
$\alpha$ Орла	Альтаир**	19 ч 51 мин	+8°52'	0,77	A7	8000	0,195"	0,660"	-26,1
$\alpha$ Лебедя	Денеб	20 ч 41 мин	+45°17'	1,25	A2	8500	0,002"	0,003"	-4,5
$\alpha$ Южной Рыбы	Фомальгаут	22 ч 58 мин	-29°37'	1,16	A3	8500	0,131"	0,368"	+6,5

\* — переменная звезда; \*\* — двойная звезда.

## Географические координаты городов Республики Беларусь

Город	Широта (с. ш.)	Долгота (в. д.)		Часовой пояс
Минск	53°54′	27°33′	1 ч 50 мин 18 с	2
Барановичи	53°09′	26°02′	1 ч 44 мин 6 с	2
Бобруйск	53°08′	29°15′	1 ч 57 мин	2
Борисов	54°14′	28°31′	1 ч 54 мин 6 с	2
Брест	52°06′	23°42′	1 ч 34 мин 48 с	2
Витебск	55°12′	30°11′	2 ч 0 мин 48 с	2
Гомель	52°25′	31°00′	2 ч 4 мин 6 с	2
Гродно	53°41′	23°50′	1 ч 35 мин 18 с	2
Лида	53°53′	25°17′	1 ч 41 мин 6 с	2
Могилев	53°54′	30°19′	2 ч 1 мин 18 с	2
Мозырь	52°08′	29°16′	1 ч 57 мин 6 с	2
Молодечно	54°18′	26°50′	1 ч 47 мин 18 с	2
Новополоцк	55°32′	28°37′	1 ч 54 мин 30 с	2
Орша	54°30′	30°26′	2 ч 1 мин 42 с	2
Пинск	52°07′	26°07′	1 ч 44 мин 30 с	2
Полоцк	55°29′	28°47′	1 ч 55 мин 6 с	2
Речица	52°21′	30°24′	2 ч 0 мин 10 с	2
Светлогорск	52°39′	29°43′	1 ч 58 мин 54 с	2
Слуцк	53°01′	27°33′	1 ч 50 мин 12 с	2
Солигорск	52°47′	27°33′	1 ч 50 мин 12 с	2

## Ответы и решения

- § 4. **Задача 6.** Ответ:  $\varphi = \delta_z$ ;  $\varphi = 38^\circ 47'$ .  
**Задача 7.** Решение:  $h_b = (90^\circ - \varphi) + \delta$ ;  $h_n = \delta - (90^\circ - \varphi)$ . Откуда получим, что  $\delta = \frac{h_b + h_n}{2}$ ;  $\varphi = 90^\circ - \frac{h_b - h_n}{2}$ .  
 Ответ: для Северного полушария —  $\delta = +23,5^\circ$ ,  $\varphi = 76,5^\circ$  с. ш., 22 июня; для Южного полушария —  $\delta = -23,5^\circ$ ,  $\varphi = 76,5^\circ$  ю. ш., 22 декабря.
- § 5. **Задача 9.** Ответ:  $\Delta\lambda = 0$  ч 25 мин 56 с, примерно 26 мин.  
**Задача 10.** Решение:  $\lambda = T_m - T_0$ ;  $\lambda = 12$  ч 00 мин 00 с — 14 ч 13 мин 46 с = —2 ч 13 мин 46 с = 2 ч 13 мин 46 с з. д.  
 Ответ:  $\lambda = 2$  ч 13 м 46 с.  
**Задача 11.** Решение:  $\varphi = 90^\circ - h + \delta$ ; 22 июня  $\delta$  Солнца равно  $\varepsilon = 23^\circ 26'$ .  
 $\lambda = T_m - T_0$ .  
 Ответ:  $\varphi = 51^\circ 16'$  с. ш.,  $\lambda = 3$  ч 20 мин в. д.
- § 6. **Задача 5.** Ответ:  $S = 1,09$  года, или 399 суток.  
**Задача 6.** Ответ: продолжительность должна быть равна двум сидерическим периодам обращения Земли.
- § 8. **Задача 3.** Ответ: в 3 раза.  
**Задача 5.** Ответ: год на Марсе равен 1,8 земного года.  
**Задача 6.** Решение:  $q = a(1 - e)$ ;  $Q = a(1 + e)$ ;  $d_{\min} = q - Q_3$ . Для Земли:  $Q_3 = a_3(1 + e_3)$ ;  $a_3 = 1$  а. е.;  $e_3 = 0,0167$ .  
 Ответ:  $q = 1,97$  а. е.;  $Q = 2,84$  а. е.;  $d_{\min} = 0,953$  а. е.
- § 9. **Задача 5.** Ответ: 14,6 массы Земли.  
**Задача 6.** Ответ: 1410 кг/м<sup>3</sup>.  
**Задача 7.** Решение:  $g_M = \frac{GM}{R^2}$ .  
 Ответ:  $g_M = 3,70$  м/с<sup>2</sup>.  
**Задача 8.** Решение:  $g_M = \frac{GM}{R^2}$ ;  $g_M = 3,70$  м/с<sup>2</sup>;  $\frac{g_3}{g_M} = 2,65$  раза.  
 Вес:  $P_3 = mg_3$ ;  $P_M = mg_M$ . Тогда  $\frac{P_3}{P_M} = \frac{g_3}{g_M}$ .  
 Ответ:  $\frac{P_3}{P_M} = 2,64$  раза.
- § 10. **Задача 7.** Ответ: 22 млн км.  
**Задача 8.** Ответ: 1740 км.  
**Задача 9.** Решение:  $\sin\varphi = \frac{a_M}{a_3}$ .  
 Ответ:  $a_M = 0,47$  а. е.

**Задача 10.** Решение:  $\rho = \frac{d}{2}$ ;  $D = \frac{d}{\rho} \cdot R_3$ .

Ответ:  $D = 4900$  км.

§ 11. **Задача 4.** Ответ: 10 ч 34 мин.

**Задача 5.** Ответ: 1,68 км/с и 2,37 км/с.

**Задача 6.** Решение: сравним движение спутника с движением Луны

$$\frac{T^2}{T_{\text{Л}}^2} = \frac{(R_3 + h)^3}{a_{\text{Л}}^3}; \quad h = \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_{\text{Л}}}\right)^2} a_{\text{Л}} - R_3. \quad T = 1 \text{ сут (период обращения ИСЗ).}$$

Ответ:  $h = 36\,000$  км.

**Задача 7.** Решение:  $t_{\text{М}} = \frac{T}{2}$ ;  $\frac{T^2}{T_3^2} = \frac{a^3}{a_3^3}$ ;  $a = \frac{a_3 + a_{\text{М}}}{2}$ ;  $t_{\text{М}} = \frac{a\sqrt{a}}{2}$ ;

$$t_{\text{М}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a_3 + a_{\text{М}}}{2}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

Ответ:  $t_{\text{М}} = 0,71$  года, или 258 суток.

§ 17. **Задача 7.** Ответ: 2,8".

**Задача 8.** Ответ: 6,7 см.

**Задача 9.** Решение: видимое увеличение телескопа определяют по формуле  $G = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$ . Изображение, даваемое объективом, будет рассматриваться непосредственно глазом. Окуляром будет служить глаз наблюдателя с расстоянием наилучшего зрения  $a = 25$  см.

Ответ:  $G = 12$  раз.

§ 18. **Задача 6.** Ответ: 8530 К.

**Задача 7.** Ответ: +11,3 км/с.

**Задача 8.** Решение:  $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ .

Ответ:  $v \approx 137$  км/с.

§ 19. **Задача 7.** Решение: солнечное излучение убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Солнечная постоянная для Марса будет в  $1,524^2$  раза меньше.

Ответ: солнечная постоянная для Марса = 590 Вт/м<sup>2</sup>.

**Задача 8.** Решение:  $T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}$ .

Ответ:  $T \approx 5273$  К.

§ 22. **Задача 6.** Ответ: 0,005".

**Задача 7.** Ответ: 7,9 пк, или 25,9 св. г.

**Задача 8.** Решение:  $M = m + 5 - 5 \lg r$ .

Ответ:  $r = 1000$  пк.



**Задача 9.** Решение: суммарная освещенность, создаваемая всеми звездами скопления  $E_{100} = 100E_1$ . Суммарная звездная величина скопления:

$$m_{100} = m_1 - 2,5 \lg \frac{E_{100}}{E_1} = m_1 - 2,5 \lg \frac{100E_1}{E_1}.$$

Ответ:  $m_{100} = 3^m$ .

§ 23. **Задача 4.** Ответ: в 625 раз.

**Задача 5.** Ответ: 7,7 радиуса Солнца.

**Задача 6.** Решение:  $M = m + 5 + 5 \lg \pi$ ;  $\frac{L}{L_\odot} = 2,512^{M_\odot - M}$ ;  $L_\odot = 1$ ;  
 $M_\odot = 4,8^m$ .

Ответ:  $L \approx 50L_\odot$ .

**Задача 7.** Решение:  $r = \frac{1}{\pi}$ ;  $M = m + 5 + 5 \lg \pi$ ;  $L = 2,512^{4,8 - M}$ .

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

Ответ:  $r = 25$  пк;  $L = 150L_\odot$ ;  $R = 2,2R_\odot$ .

§ 25. **Задача 7.** Решение:  $v = \sqrt{2gR}$ ,  $g = G \frac{M}{R^2}$ ,  $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ .

Ответ:  $v = 1,8 \cdot 10^6$  м/с.

§ 26. **Задача 8.** Ответ: средняя плотность  $5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>.

**Задача 9.** Ответ: радиус Шварцшильда равен 8,9 км.

**Задача 10.** Решение:  $\lg \frac{L}{L_\odot} = 0,4(M_\odot - M)$ ,  $M = m_\odot + 5 - 5 \lg r$ .

Ответ:  $r = 1,5$  пк.

**Задача 11.** Решение:  $M = -1,43 - 2,81 \lg P$ ;  $M = m + 5 - 5 \lg r$ ;  
 $\lg r = 1 + 0,2(m - M)$ .

Ответ:  $r = 434$  пк.

§ 27. **Задача 8.** Ответ: 23 раза.

**Задача 9.** Ответ: 57 км/с.

**Задача 10.** Решение:  $v_l = 4,74 \frac{\mu}{\pi}$ ;  $v = \sqrt{v_l^2 + v_r^2}$ .

Ответ:  $v = 24,6$  км/с.

§ 29. **Задача 4.** Ответ: 286 Мпк.

**Задача 5.** Ответ: 4,5 млн лет.

**Задача 6.** Ответ: 1 Мпк.

**Задача 7.** Решение:  $v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} c$ ,  $v = H \cdot r$ ,  $D = r \cdot \sin p$ .

Ответ:  $D = 36,4$  кпк.

## Содержание

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Раздел I. Введение</b>	
§ 1. Предмет астрономии .....	4
<b>Раздел II. Основы практической астрономии</b>	
§ 2. Звездное небо .....	12
§ 3. Небесные координаты .....	19
§ 4. Определение географической широты .....	23
§ 5. Измерение времени. Определение географической долготы .....	26
<b>Раздел III. Движение небесных тел</b>	
§ 6. Гелиоцентрическая система мира Коперника .....	36
§ 7. Видимое движение Солнца и Луны. Затмения .....	42
§ 8. Законы Кеплера .....	50
§ 9. Закон всемирного тяготения Ньютона .....	53
§ 10. Определение размеров небесных тел и расстояний до них в Солнечной системе .....	58
§ 11. Движение космических аппаратов .....	63
<b>Раздел IV. Сравнительная планетология</b>	
§ 12. Общие характеристики планет. Происхождение Солнечной системы .....	69
§ 13. Планеты земной группы .....	73
§ 14. Планеты-гиганты .....	82
§ 15. Луна. Спутники планет .....	89
§ 16. Карликовые планеты и малые тела Солнечной системы .....	98
<b>Раздел V. Методы исследования небесных тел</b>	
§ 17. Исследование электромагнитного излучения небесных тел .....	107
§ 18. Спектральный анализ в астрономии .....	117
<b>Раздел VI. Солнце — дневная звезда</b>	
§ 19. Солнце как звезда .....	124
§ 20. Строение солнечной атмосферы .....	129
§ 21. Влияние Солнца на жизнь Земли .....	134

**Раздел VII. Звезды**

§ 22. Основные характеристики звезд. Светимость .....	138
§ 23. Температура и размеры звезд .....	143
§ 24. Двойные звезды. Масса звезд .....	146
§ 25. Эволюция звезд .....	150
§ 26. Нестационарные звезды .....	157

**Раздел VIII. Строение и эволюция Вселенной**

§ 27. Наша Галактика .....	164
§ 28. Межзвездная среда .....	170
§ 29. Звездные системы — галактики .....	175
§ 30. Расширяющаяся Вселенная .....	185
§ 31. Жизнь и разум во Вселенной .....	190

<b>Приложения</b> .....	195
-------------------------	-----

<b>Ответы и решения</b> .....	203
-------------------------------	-----

(Название учреждения образования)

Учебный год	Имя и фамилия учащегося	Состояние учебника при получении	Оценка учащегося за пользование учебником
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Учебное издание

**Галузо** Илларион Викторович  
**Голубев** Владимир Александрович  
**Шимбалеv** Александр Альбертович

## Астрономия

Учебник для 11 класса  
учреждений общего среднего образования  
с русским языком обучения (базовый и повышенный уровни)

Зав. редакцией *Г. А. Бабаева*. Редактор *Н. М. Алганова*.  
Художественный редактор *О. Н. Карпович*. Техническое редактирование и компьютерная верстка *О. И. Власнюк*. Корректоры *О. С. Козицкая, Е. П. Тхир, А. В. Алешко*.

Подписано в печать 10.06.2021. Формат 70×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,21 + 0,29 форз.

Уч.-изд. л. 12,1 + 0,4 форз. Тираж 118 000 экз. Заказ .

Издательское республиканское унитарное предприятие «Народная асвета»  
Министерства информации Республики Беларусь.

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/2 от 08.07.2013.  
Пр. Победителей, 11, 220004, Минск, Республика Беларусь.

Открытое акционерное общество «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/3 от 10.09.2018.  
Ул. Корженевского, 20, 220024, Минск, Республика Беларусь.

Правообладатель Народная асвета