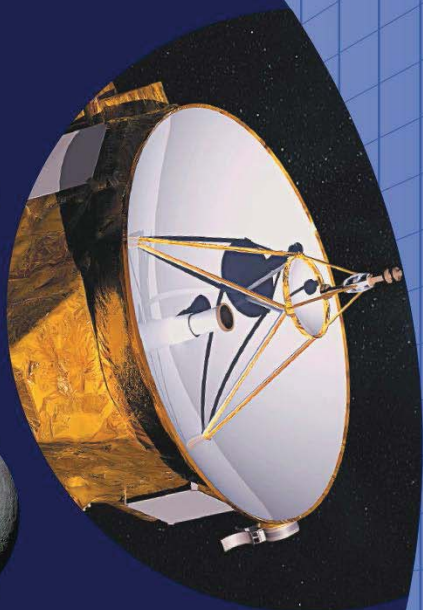




А. В. Засов
В. Г. Сурдин

УМК
ПО АСТРОНОМИИ



АСТРОНОМИЯ

10–11

КЛАССЫ

А. В. Засов
В. Г. Сурдин



10–11
К Л А С С Ы

Учебник

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
2022

УДК 373.167.1:52+52(075.3)
ББК 22.6я721
З-36

Авторы: доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова *Анатолий Владимирович Засов*;

кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ *Владимир Георгиевич Сурдин*.

Издание выходит в pdf-формате.

Засов, Анатолий Владимирович.

З-36 Астрономия : 10–11-й классы : учебник : издание в pdf-формате / А. В. Засов, В. Г. Сурдин. — 4-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 303, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-09-101649-9 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-091926-5 (печ. изд.).

Учебник разработан в соответствии с авторской программой курса астрономии и программой, утверждённой Министерством образования и науки РФ. В учебнике освещаются исторический путь развития астрономии, её современные возможности и решаемые задачи, а также быстро развивающаяся космическая деятельность человека. Особое внимание уделяется описанию природы астрономических объектов и созданию физической картины мира.

Учебник включает вопросы для самопроверки, а также разноуровневые задачи и задания, выполняя которые учащиеся могут привлекать информационные интернет-технологии. Приложение содержит таблицы данных о планетах, их спутниках, о созвездиях и звёздах.

Условные обозначения, рубрики

УДК 373.167.1:52+52(075.3)
ББК 22.6я721



Определения и важные данные



Задания повышенной сложности



Работаем с дополнительным источником информации

ISBN 978-5-09-101649-9 (электр. изд.)
ISBN 978-5-09-091926-5 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2020
© Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2020
Все права защищены

1

глава

Астрономия: её задачи и возможности



1

Чем занимается
астрономия

2

Этапы развития
астрономии

3

Космическая деятельность
человечества

4

Пространственные
масштабы изучаемой
Вселенной

Астрономия (от греч. «астро» — звезда и «номос» — закон) — это наука об окружающем Землю мире и о происходящих в нём явлениях. Зародившись в глубокой древности, она постепенно изменила восприятие мира, находящегося вне Земли, и доказала познаваемость мира и единство законов природы, действующих как на нашей планете, так и далеко за её пределами.

Как зарождалась астрономия

Астрономия зародилась в глубокой древности. И это не удивительно: люди во все века видели над собой небо, по которому перемещались Солнце, Луна и звёзды. Было несложно заметить, что от ночи к ночи звёздный узор не меняется, звёзды сохраняют своё положение на небесной сфере, которая как будто вращается вокруг Земли как единое целое, то поднимая светила над горизонтом, то опуская их под горизонт. Однако есть пять светил, заметных человеческому глазу, которые медленно перемещаются среди остальных, их называли **планетами** (в переводе с древнегреческого — «странники»). Они получили имена богов: *Меркурий*, *Венера*, *Марс*, *Юпитер* и *Сатурн*.

Время от времени на небе мелькают метеоры, а также изредка появляются и медленно перемещаются на фоне звёздного неба, исчезая через несколько недель, хвостатые кометы.

Астрономических объектов, которые регулярно можно наблюдать на небе невооружённым глазом, не так много. К ним относятся *Солнце*, *Луна*, *пять ближайших планет*, несколько тысяч наиболее *ярких звёзд* и несколько *звёздных скоплений*. В ясные безлунные ночи можно также заметить светлую полосу *Млечного Пути* (рис. 1), пересекающую небо. Её образуют многие миллиарды неразличимых по отдельности звёзд нашей звёздной системы — **Галактики**. На пределе возможностей глаза люди с острым зрением в Северном полушарии могут видеть как едва заметное размытое пятнышко ещё один астрономический объект — *Туман*



Рис. 1. Млечный Путь

ность *Андромеды*, одну из ближайших к нам галактик. В Южном полушарии на тёмном небе хорошо заметны две соседние галактики — *Большое* и *Малое Магеллановы Облака*.

Какие законы управляют движением наблюдаемых небесных объектов и о чём их расположение на небе может нам говорить, интересовало людей всегда, и не только по причине присущей человеку любознательности, хотя и она играла свою роль. Уже многие века тому назад закономерности в движениях Солнца, Луны и планет тщательно изучались и сопоставлялись с земными событиями в попытках установить связь между ними. Из глубокой древности к нам пришли астрологические учения, связывающие события земного мира с положениями небесных тел в определённые моменты времени и претендующие на предвидение событий в жизни людей и государств. Научного обоснования астрология так и не получила, и в наше время её можно рассматривать лишь как разновидность гадания, а не как науку о природе. Но на заре развития астрономии это было далеко не очевидно, и астрономия с астрологией представляли единое целое. Желание понять и расшифровать «знаки небес» стимулировало пристальное изучение движения небесных тел.

Сохранились остатки древних обсерваторий, возраст которых насчитывает тысячелетия, например обсерватория *Стоунхендж* в Великобритании, состоящая из гигантских каменных блоков, расположенных по кругу и ориентированных определённым образом по странам света (рис. 2).



Рис. 2. Стоунхендж, графство Уилтшир, Великобритания

В России самым известным местом, где сохранились элементы древней обсерватории, является *Аркаим* в Челябинской области.



Сайт заповедника «Аркаим» — <http://www.arkaim-center.ru>.



Влияние астрономии на развитие цивилизации

Ответы на вопрос о том, что представляют собой небо и наблюдаемые на нём светила, долгое время предлагались лишь на уровне мифов и религиозных верований. Небо рассматривалось как некий купол или сфера, окружающая Землю, как царство богов (или Бога), недоступное для человеческого понимания. Отсутствие базовых научных знаний не позволяло серьёзно ставить вопросы о природе небесных тел и явлений, хотя такие попытки всё же делались.

Так, ещё в V в. до н. э. древнегреческий философ и математик *Анаксагор* (рис. 3) был судим за богохульство и едва избежал смертной казни, заменённой на изгнание, только за то, что отважился утверждать, что Солнце —

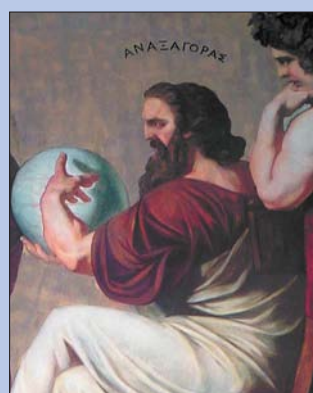


Рис. 3. Анаксагор
(ок. 500 до н. э. —
428 до н. э.)

это не бог, а раскалённый камень гигантского размера, крутящийся над Землёй. Он же первым пытался из наблюдений оценить расстояние до Солнца и нашёл, что оно очень велико, в 20 раз больше, чем расстояние до Луны, хотя недооценил его примерно в 20 раз.

А в III в. до н. э. древнегреческий астроном и математик *Эратосфен* (рис. 4), работавший в Александрии (Египет), довольно точно определил радиус земного шара, используя остроумный метод измерения максимальной высоты Солнца над горизонтом по наблюдениям в двух пунктах, находящихся на разной географической широте.

Удивительно, что, не обладая никакими измерительными инструментами, только путём рассуждений, древнегреческие мыслители дошли до понимания того, что Земля — это шар, висящий в пустоте без точек опоры. Более того, в античную эпоху древнегреческий астроном *Аристарх Самосский* (рис. 5) пришёл к выводу, что Земля не стоит неподвижно, а обращается вокруг Солнца.

Однако это утверждение оставалось бездоказательным и было забыто почти на две тысячи лет, пока его не возродил в XVI в. польский астроном *Николай Коперник* (рис. 6) в качестве гипотезы (см. гл. 3).

Сторонников этой точки зрения долгое время было очень немного, а окончательно движение Земли вокруг Солнца удалось доказать лишь в XIX в.

Практическое использование наблюдений за небом сыграло колоссальную роль в развитии цивилизации. По положению звёзд над горизонтом люди научились ориентироваться в дальних морских походах, а позднее — определять точные **географические координаты** места. Астрономические наблюдения позволили измерять различные интервалы времени:

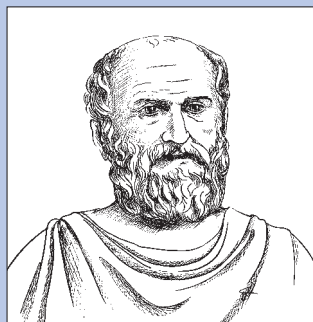


Рис. 4. Эратосфен
Киренский
(276 до н. э. —
194 до н. э.)

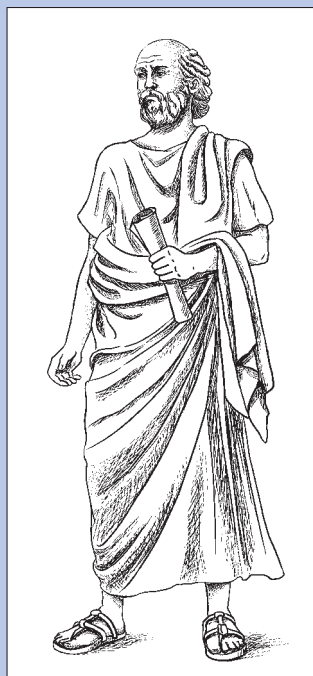


Рис. 5. Аристарх
Самосский
(III в. до н. э.)

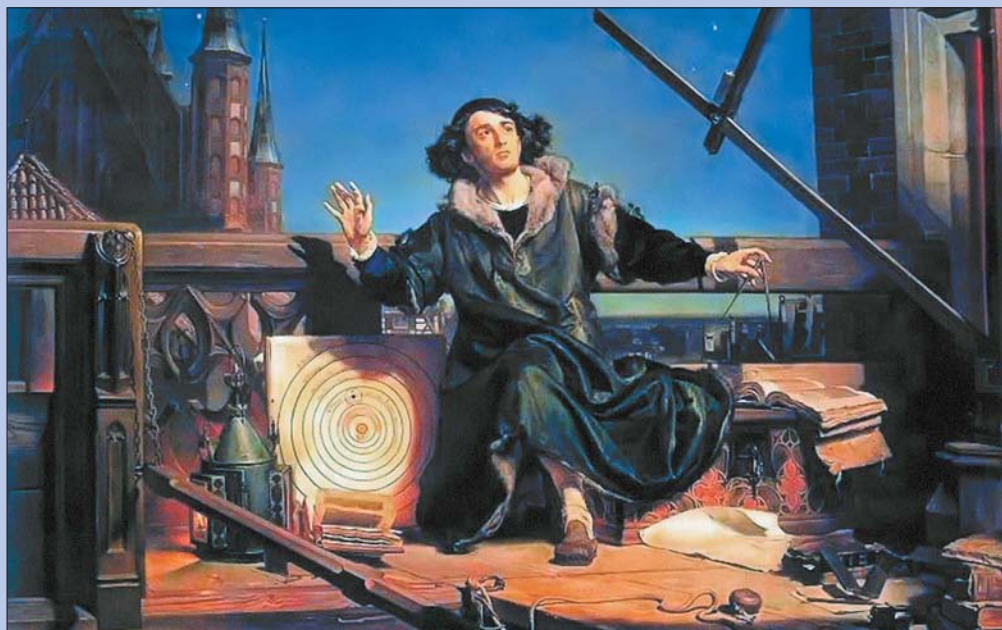


Рис. 6. Ян Матейко. Коперник. Беседа с Богом. 1873 г.

по смене дня и ночи — интервалы, выраженные в сутках, а по фазам Луны — интервалы в месяцах.

Изменение вида звёздного неба в различное время года научило отсчитывать годы, то есть вести **летосчисление**, а также определять время наступления того или иного сезона, независимо от капризов погоды, что было очень важно для сельскохозяйственных работ. По астрономическим наблюдениям была определена точная продолжительность года и разработаны системы непрерывного счёта больших промежутков времени.

Появились календарные системы, необходимые для экономической жизни любого государства. В I в. до н. э. был создан юлианский календарь, по которому год содержит 365 или 366 сут. А в XVI в. был предложен ещё более точный григорианский календарь, немного отличающийся от юлианского правилом чередования простых и високосных лет. Сегодня по нему живёт большинство стран мира.

Астрономия меняла восприятие мира, находящегося вне Земли, и в этом проявилось её **мировоззренческое значение**. Вместо представлений о небе как об окружающей Землю твёрдой вращающейся сфере с прикреплёнными к ней звёздами постепенно появилась картина без-

граничной Вселенной с различными объектами, находящимися на разных расстояниях от планеты Земля.

Астрономия разрушила примитивные представления о том, что Земля — это центр мира. Новые взгляды долгое время встречали активное неприятие. Философ *Джордано Бруно* (рис. 7), неутомимый пропагандист коперниканской системы, в которую в то время мало кто верил (конец XVI в.), по-видимому, первым начал распространять убеждение в том, что звёзды на небе — это далёкие солнца в безграничной Вселенной, где существует бесконечное количество миров, подобных Земле. Но эти идеи в то время не могли иметь доказательства и шли вразрез с принятыми религиозными догмами.

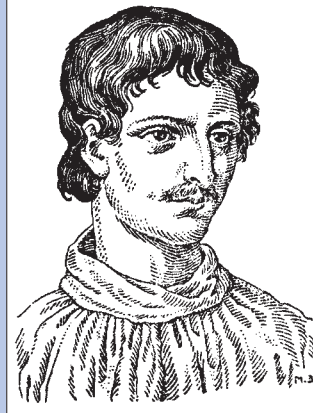


Рис. 7. Джордано Бруно (1548—1600)

Джордано Бруно — итальянский философ и поэт, в 1592 г. арестован по обвинению в ереси и свободомыслии. В 1600 г. был осуждён инквизицией на смертную казнь и сожжён на костре в Риме за попытку создать собственное религиозно-философское учение в противовес христианству.

Цели и задачи современной астрономии

С развитием физики и математики изменились и цели астрономии. Сейчас **астрономия** — это прежде всего **фундаментальная наука**, то есть наука, ориентированная на получение новых, более глубоких знаний о мире, окружающем Землю. Её **основные цели** — построить научную картину мира, понять физическую природу астрономических объектов, их происхождение и эволюцию, а также эволюцию Вселенной как целого.

Астрономическими методами решается и задача поиска жизни во Вселенной, имеющая фундаментальную важность для понимания происхождения человека и для будущего развития цивилизации. Но пока с большой уверенностью можно лишь заключить, что возникновение разумной, цивилизованной жизни является очень редким природным явлением во Вселенной.

Изменились и **прикладные задачи** астрономии. Совершенствование календарной системы, определение географических координат по звёздам или точного времени уже не входят в задачи современной астрономии.

Знания, полученные астрономическими методами, используются для других целей, например для развития космонавтики. Благодаря астрономическим знаниям открылась возможность космической деятельности человека, освоения околоземного пространства и полётов к другим планетам.

Мы не изолированы от мира, окружающего нашу планету. Земля возникла вместе с Солнцем и другими телами Солнечной системы миллиарды лет назад, но продолжает испытывать внешние воздействия из космоса. Прежде всего это влияние Солнца, от которого Земля получает тепло и свет. Потоки горячего газа, быстрых элементарных частиц и рентгеновских лучей, приходящих от Солнца, влияют на магнитное поле Земли и внешние слои атмосферы, усиление этих потоков ощутимо сказывается на многих процессах в атмосфере и на поверхности Земли, и его необходимо уметь прогнозировать.

Другое воздействие на Землю заключается в том, что в атмосферу и на поверхность Земли каждые сутки выпадают десятки тонн мелкого межпланетного метеоритного вещества. Изредка падают более крупные тела. В истории Земли неоднократно происходили катастрофические события глобального масштаба, связанные с падением на Землю твёрдых ядер комет и астероидов. Такая опасность с некоторой вероятностью существует и в настоящее время, и люди обращают на неё всё более серьёзное внимание. Даже глобальные изменения климата, животного и растительного мира, неоднократно происходившие за долгую историю нашей планеты, могли иметь, как предполагают, космические причины, связанные с падением больших космических глыб. Следовательно, астрономия даёт возможность лучше понять не только далёкие объекты, но и нашу Землю.

Но самое главное — **астрономия демонстрирует принципиальную возможность познания окружающего мира**. Она доказывает *единство законов природы*, действующих как на Земле, так и вдали от неё. Оказалось, что атомы на Земле и на далёких звёздах устроены одинаково, а гравитационные, электрические и магнитные поля обладают теми же свойствами, где бы их проявление ни обнаруживалось. Современная астрономия вместе с физикой изучает законы поведения вещества, находящегося в различных условиях (даже таких, которые невозможно создать в земных лабораториях), и открывает возможности использования полученных знаний.

В процессе астрономических и космических исследований обнаруживаются новые, ранее неизвестные факты и явления, требующие объяснения, а то и вовсе не укладывающиеся в рамки существующих представлений. Это нормальная ситуация для любой области знаний. Поэтому астрономия, подобно другим наукам, находится в постоянном развитии.

Астрономия — наука, базирующаяся на наблюдениях, и её развитие связано с совершенствованием техники наблюдений и возможностей их интерпретации. По используемой технике наблюдений и их результативности в истории астрономии выделяют **четыре этапа**.

Первый этап: глазомерные наблюдения

Самый продолжительный этап в истории астрономии длился с древности до XVII в. В этот период наблюдения проводились с помощью довольно простых *угломерных инструментов*. Они использовались для измерения положения небесных тел и для изучения видимых движений звёзд и планет на фоне звёздного неба. Это непростая задача, особенно если учесть, что эти движения медленны, имеют сложный характер и происходят с переменной скоростью.

Астрономические наблюдения в древности преследовали в основном практические цели. Разобраться в характере движения небесных тел было важно и для выработки системы счёта времени, и для того, чтобы попытаться выяснить, о чём сообщает положение Солнца, Луны и планет человеку и что человек может узнать о тайнах неба.

Самым выдающимся учёным античного мира считается древнегреческий астроном и математик *Гиппарх Никейский* (рис. 8). На основе астрономических наблюдений он определил продолжительность года с ошибкой всего в 6 мин, а также создал первые дошедшие до нас математические теории движения Солнца и Луны, позволявшие довольно точно описывать их неравномерное движение по небу. Большую часть жизни он провёл на острове Родос (Греция).

Он же первым правильно определил расстояние до Луны, выраженное в единицах радиуса Земли. Предполагается также, что для удобства астрономических вычислений Гиппарх впервые составил *таблицу хорд* — ана-

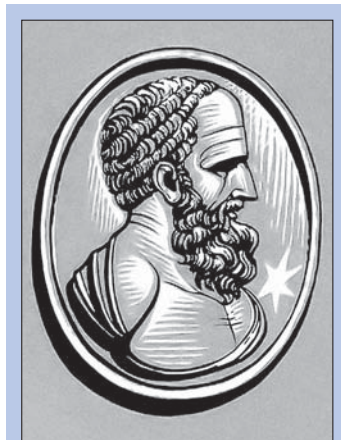


Рис. 8. Гиппарх Никейский (рубеж I и II вв. до н. э.)

лог современной *таблицы синусов*. Особую ценность представляет созданный Гиппархом **звёздный каталог**, содержащий описание положений на небе (**координат**) около 800 звёзд. Он же визуально оценил их видимые яркости, приписав каждой звезде определённую **звёздную величину** — от первой величины для ярких звёзд до шестой для самых тусклых.

Какие цели преследовал Гиппарх при создании звёздного каталога? Они были далеки от повседневных нужд. Он усомнился в том, что, как было принято считать, мир звёзд не подвержен никаким изменениям, а звёзды жёстко закреплены на вращающейся небесной сфере. Как писал о Гиппархе римский историк Плиний Старший, «он определил места и яркость многих звёзд, чтобы можно было разобрать, не исчезают ли они, не появляются ли вновь, не движутся ли они, меняются ли в яркости. Он оставил потомкам небо в наследство, если найдётся тот, кто примет это наследство». И действительно, сравнение положений звёзд при Гиппархе и более восемнадцати столетий спустя, в XVIII в., позволило убедиться в существовании относительных перемещений звёзд, связанных с движением звёзд и Солнца в пространстве.

На основании работ Гиппарха и других астрономов была разработана математическая модель движения планет, которые, как считалось, обращаются вокруг неподвижной шарообразной Земли. Она создавалась на протяжении многих веков: Пифагор (VI в. до н. э.) впервые предположил, что Земля имеет форму шара, Аристотель (IV в. до н. э.) представлял мир как систему концентрических сфер вокруг неподвижной Земли, *Клавдий Птолемей* (рис. 9) во II в. н. э. завершил создание геоцентрической системы мира. Эти представления о Земле как о центре мира господствовали полтора тысячелетия.

Клавдий Птолемей — античный математик, астроном, географ, жил и работал в Александрии Египетской.



Рис. 9. Клавдий Птолемей (II в. н. э.)

Только в эпоху позднего Средневековья было показано, что наблюдения за движением планет и Солнца также хорошо согласуются и с другой, более логичной **гелиоцентрической моделью** Николая Коперника, в которой Земля и планеты обращаются вокруг Солнца. Позже результаты астрономических наблюдений были использованы Исааком Ньютоном для формулировки и количественной проверки *закона всемирного тяготения* — фундаментального закона физики, который определяет характер движения астрономических тел в космическом пространстве. На основе этого закона получили физическое объяснение как обращение Земли и других планет вокруг Солнца, так и видимые перемещения планет по небу. *Это важнейшее достижение астрономии, базирующееся на до-телескопических наблюдениях.*

Второй этап: начало телескопических наблюдений

Этот этап развития астрономии начался с появлением **телескопических методов исследований**.

Галилео Галилей (рис. 10) — итальянский физик, математик, астроном, изготовил зрительную трубу (ему иногда ошибочно приписывают авторство этого изобретения) и применил её для астрономических наблюдений, на основе которых сделал вывод о существовании гор на Луне, пятен на Солнце, спутников Юпитера и фаз Венеры. Считается, что Галилей первым использовал оптический инструмент для наблюдений небесных объектов, но весьма вероятно, что примерно в то же время были и другие наблюдатели. Однако именно Галилей оставил дневники телескопических наблюдений с подробными описаниями и зарисовками.

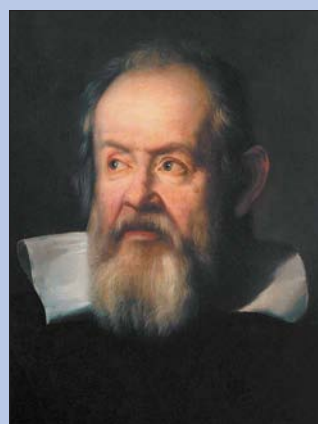


Рис. 10. Галилео Галилей
(1564—1642)

Изобретение **телескопа** сделало доступным для наблюдений гигантское количество далёких звёзд, которые невозможно увидеть невооружённым глазом, а также многократно повысило точность угломерных измерений. Последнее обстоятельство позволило впервые определить расстояния до Солнца, измерить размеры орбит планет и, наконец, уже в XIX в. оценить расстояния до ближайших звёзд, которые оказались невообразимо большими. Стал очевидным гигантский размер наблюдаемой с Земли Вселенной.

Теоретической основой астрономии стала **механика Ньютона**, позволившая объяснить видимое движение Солнца, Луны и звёзд.

Исаак Ньютон (рис. 11) — английский физик, механик, математик и астроном, один из создателей классической физики. Ньютон сконструировал телескоп-рефлектор, используя для построения изображения наблюдаемых объектов вместо линзы вогнутое сферическое зеркало. Этот инструмент давал существенно более качественное изображение, чем линзовый телескоп-рефрактор. За это изобретение в 1672 г. он был избран членом Королевского общества (выступает в качестве национальной академии наук Великобритании).



Рис. 11. Исаак Ньютон (1642—1727)

Третий этап: спектральный анализ, фотография и фотометрия

Качественный скачок в развитии астрономии произошёл в конце XIX в.: появилась астрономическая **фотография**, позволившая точно и объективно измерять видимые яркости звёзд; эти измерения называют фотометрическими. А с помощью **спектрографа**, присоединённого к телескопу, начались **спектральные наблюдения** космических источников света — звёзд и облаков межзвёздного газа, позволившие дистанционно исследовать физические свойства излучающих сред: измерять их температуру, химический состав и скорость движения. В астрономии возникло новое направление — **астрофизика**.

В XX в. визуальные телескопические наблюдения (то есть измерения при разглядывании объекта глазом через телескоп) уступили место наблюдениям с использованием различных **приёмников (детекторов)** излучения, объективно регистрирующих приходящие потоки света. Сначала это были **фотопластинки**, то есть стеклянные пластинки, покрытые слоем эмульсии, чернеющей при попадании на неё света. На них возникает негативное изображение, которое долго хранится и которое можно детально измерять. Затем были созданы основанные на фотоэффекте вакуумные **фотоэлектрические** и **полупроводниковые приёмники** света высокой чувствительности, используемые и в настоящее время. С их помощью были измерены скорости звёзд и галактик, открыто ускорение расширения Вселенной, а использование новых физических теорий позволило понять, из чего состоят и как устроены Солнце и звёзды, как они сформировались и какие изменения происходят с ними со временем.

Четвёртый этап: астрономия становится космической и всеволновой

Современный этап развития астрономии, начавшийся в середине XX в., связан с появившимися новыми техническими возможностями наблюдений, с компьютеризацией наблюдений и их анализа, с началом космических исследований Солнечной системы, а также с открывшимися возможностями **регистрации** недоступных ранее видов **электромагнитного излучения**, которые не воспринимаются глазом или оптически-ми детекторами. Сначала были созданы **радиотелескопы**, которые улавливают космическое радиоизлучение, приходящее к нам от различных астрономических объектов. Следующим прорывом в неизвестное стали наблюдения в тех диапазонах электромагнитных волн, которые не пропускает атмосфера Земли: это *длинноволновое инфракрасное, коротковолновое ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение*. Наблюдать эти типы излучения оказалось возможным только тогда, когда в распоряжении учёных появилась космическая техника, позволяющая выносить астрономические приборы за пределы плотных слоёв атмосферы. Астрономия, таким образом, стала **всеволновой** наукой.

Видимый свет и радиоволны, инфракрасный и ультрафиолетовый свет, рентгеновское и гамма-излучение — все они имеют одну природу: это электромагнитные колебания с различными длинами волн, которые распространяются в космической пустоте с одинаковой скоростью. Каждое из них характеризуется своим **диапазоном длин волн**, поэтому принято говорить о различных диапазонах электромагнитного спектра. Самое коротковолновое излучение называется *гамма-излучением*. Затем идут диапазоны *рентгеновского, ультрафиолетового, оптического, ближнего инфракрасного, далёкого инфракрасного излучения и диапазон радиоволн*. Оптическое излучение, к которому чувствителен глаз человека или обычные приёмники видимого света, имеет длину волны от 0,4 до 0,8 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), а рентгеновское излучение — менее сотой доли микрометра. Сквозь атмосферу Земли с небольшим поглощением проходит только оптический свет и радиоволны (за исключением очень длинных волн).

Перспективы развития астрономии

На современном этапе развития астрономии начались полёты в космос и исследование Солнечной системы *космическими зондами*. Изме-

нилась и наземная астрономия: были созданы крупные зеркальные телескопы нового поколения, представляющие собой сложнейшие оптико-механические системы, управляемые с помощью *информационных технологий*, появилась возможность использовать компьютеры для обработки результатов наблюдений и извлечения из них новой информации о космических объектах. Границы наблюдаемой Вселенной раздвинулись до расстояний более 10 млрд световых лет, и стало очевидным, что эволюционируют не только отдельные объекты Вселенной, но и весь окружающий мир медленно меняется со временем. Космическое пространство предстало перед исследователями как гигантская природная лаборатория, где происходят сложные физические процессы и где наблюдаемое вещество подчас обладает свойствами, которые нельзя получить в земных условиях. Всё это привело к бурному росту объема научной информации о различных объектах Вселенной, который мы наблюдаем в настоящее время.

В обозримом будущем можно ожидать быстрого развития наблюдений очень трудно уловимых носителей информации неэлектромагнитной природы, а именно **потоков нейтрино и гравитационных волн**.

Развитие космических исследований в будущем приведёт к тому, что сфера непосредственной деятельности человека расширится до размеров Солнечной системы.

Современная астрономия тесно связана со многими науками: математикой, химией, историей, геологией, но прежде всего — с физикой. Астрономические наблюдения интерпретируются на основе известных физических законов. В свою очередь, все фундаментальные физические теории проходят проверку астрономическими методами.

3

Космическая деятельность человечества

Тысячи лет астрономы изучали Вселенную с поверхности Земли, со дна её воздушного океана, который не только защищает нас от губительного воздействия космоса, но и сильно ограничивает возможности астрономических исследований. Преодолеть эти препятствия удалось лишь в середине XX столетия, когда человек вышел в околоземное космическое пространство и началось развитие космонавтики.

Вверх, к границам атмосферы

Не только далёкие планеты и звёзды, но и сама воздушная оболочка Земли долгое время оставалась во многом загадочной. В конце XVIII в. был изобретён *аэростат* — воздушный шар, наполняемый лёгкими газами (водородом, а позже гелием) или просто горячим воздухом. С его помощью уже в XIX в. учёные с научными приборами поднимались на километры, а в первой половине XX в. — на десятки километров от поверхности Земли, в *стратосферу* (рис. 12). Это позволило многое узнать не только о воздушной оболочке Земли, но и о некоторых видах **космического излучения** (*инфракрасном, ультрафиолетовом*), не способных пройти к поверхности планеты сквозь плотные нижние слои её атмосферы. Были обнаружены и *быстрые частицы* — *протоны, электроны, ядра гелия* — так называемые **космические лучи**, летящие от Солнца и из глубин Галактики. И хотя 99 % воздуха лежит ниже высоты 40 км, до которой обычно поднимаются аэростаты с приборами и «подпрыгивают» на короткое время некоторые самолёты, даже оставшийся 1 % ат-



Рис. 12. Слева: многоразовый высотный стратостат, то есть аэростат, предназначенный для подъёма научной аппаратуры в стратосферу, на высоту более 11 км. Справа: стратостат в полёте

мосферы не пропускает из космоса некоторые виды электромагнитного излучения — жёсткое ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. И по-прежнему бесконечно далёкими остаются другие небесные тела.

На ракете — в космос

Окончательно покинуть пределы земной атмосферы и устремиться к иным небесным телам люди смогли только с помощью **ракет**. Для полёта самолётов и аэростатов нужна атмосфера, а для ракеты атмосфера — помеха. Реактивный снаряд движется под давлением горячего газа в ракетном двигателе, выбрасывая назад мощную струю этого газа. По закону сохранения импульса, сообщив газу импульс в одном направлении, сама ракета приобретает такой же по модулю импульс, но в противоположном направлении. Можно сказать, что ракета отталкивается от выброшенных ею горячих газов. Таким образом, всё необходимое для полёта находится внутри ракеты. Она способна передвигаться в любой среде, но лучше всего — в пустоте. Поэтому именно ракеты первыми покинули земную атмосферу, преодолели земное притяжение и позволили отправить в космос исследователей и научные приборы.



Рис. 13. «Фау-2»

«Фау-2» (рис. 13) — первая ракета, преодолевшая в 1944 г. границу атмосферы. Была создана в Германии под руководством инженера Вернера фон Брауна и использовалась во Второй мировой войне.

■ **Формальной границей** между атмосферой и космическим пространством обычно считается высота **около 100 км**, хотя газовая оболочка Земли простирается на тысячи километров от поверхности планеты.

Выше этой границы впервые поднимали приборы на ракетах в конце 1940-х гг. Это были маломощные *беспилотные ракеты вертикального полёта*, способные лишь «подпрыгнуть» на несколько сотен километров и через 5—10 мин упасть обратно. С их помощью были изучены свойства верхней атмосферы, реакция животных на условия невесомости и космической радиации, а также проведены первые астрономические наблюдения в рентгеновских и ультрафиолетовых лучах.

На высоте 20 км плотность воздуха примерно в 10 раз ниже, чем у поверхности Земли, а на высоте 100 км она ниже уже почти в миллион раз. На высоте 100 км проходит так называемая **линия Кáрманa**, выше которой не может подняться аэростат и не может лететь самолёт, опираясь на крыло. Крылья у летательных аппаратов там бесполезны. А космические аппараты не могут опуститься ниже 120 км без риска быстро затормозиться и упасть на землю. Небо на такой высоте выглядит угольно-чёрным, и на нём одновременно можно видеть Солнце, Луну и звёзды.

Для длительного пребывания в космосе необходимо либо улететь от Земли очень далеко, либо двигаться по орбите, облетая вокруг Земли. Для движения по низкой околоземной орбите требуется **первая космическая скорость** (7,9 км/с), а для того, чтобы существенно удалиться от Земли, — **вторая космическая скорость** (11,2 км/с). Поэтому первые космические полёты были **орбитальными**.

Ракету, способную подняться выше границы атмосферы и разогнаться до первой космической скорости, впервые создали в СССР инженеры под руководством *Сергея Павловича Королёва* (рис. 14).



Рис. 14. Р-7 («Спутник») — ракета конструкции С. П. Королёва, 1957 г.

■ Ракета конструкции С. П. Королёва **4 октября 1957 г.** вывела на орбиту первый в истории **искусственный спутник Земли** (рис. 15). Началась **космическая эра**.

➔ Познакомьтесь с биографией основоположника практической космонавтики С. П. Королёва на сайте https://ru.wikipedia.org/wiki/Королёв,_Сергей_Павлович или в электронной энциклопедии «Кругосвет» (<http://www.krugosvet.ru>).

Сегодня трудно представить нашу жизнь без **спутников**. Они обеспечивают в любой точке Земли телевизионное и радиовещание, компьютерную и телефонную связь,



работу навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС и др.); постоянно измеряют параметры атмосферы, позволяя делать надёжный прогноз погоды; передают детальные снимки земной поверхности, которые требуются многим гражданским и военным организациям. Приборы на спутниках позволяют контролировать и даже прогнозировать «космическую погоду», то есть уровень радиации в околоземном пространстве, возмуще-

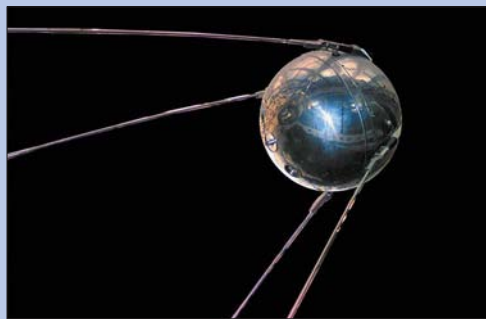


Рис. 15. Первый искусственный спутник Земли



Рис. 16. Орбитальная станция «Мир» (СССР/Россия) над Землёй. Фото получено с борта космического корабля Space Shuttle (NASA) в 1998 г.

ния магнитного поля Земли, вспышки в атмосфере Солнца, потоки плазмы, летящие от Солнца в сторону нашей планеты. Эти данные важны как для нас, живущих на поверхности Земли, так и для людей, работающих в космосе (рис. 16).

Собственные средства запуска космических аппаратов и космические проекты есть уже у многих стран. Каждый год производится несколько десятков запусков беспилотных аппаратов, а также космических кораблей с космонавтами. Наибольшее количество запусков приходится на США, Россию, страны Западной Европы и Китай.

Человек в космическом пространстве

■ Полёт **первого человека в космос** — советского лётчика *Юрия Алексеевича Гагарина* (рис. 17) — состоялся **12 апреля 1961 г.**

Гагарин первым увидел нашу планету со стороны, совершил один виток вокруг Земли и благополучно приземлился. Полёт Гагарина продемонстрировал возможность жить и управлять сложной техникой в условиях невесомости.

За прошедшие более чем полвека в космосе побывали сотни исследователей из разных стран, что позволило изучить влияние космических условий на организм человека. Наиболее враждебные из них — **невесомость** и **радиация**; они не позволяют человеку находиться более года даже на околоземной орбите. Отрицательное влияние невесомости, ослабляющее организм, космонавты научились частично преодолевать с помощью интенсивных физических тренировок на космическом корабле. Но надёжную защиту от радиации космический корабль не обеспечивает. Поэтому космонавты вынуждены работать на очень **низких орбитах** (350—450 км), где магнитное поле Земли и разреженные слои атмосферы ослабляют потоки быстрых космических частиц (рис. 18, 19).

Полёты в **дальний космос** ещё опаснее, поскольку там человек вообще не защищён от радиации. До сих пор люди не удалялись от Земли более чем на 400 тыс. км и находились на таком расстоянии всего лишь несколько суток. Это было в период экспедиций американских астронавтов к Луне — с 1968 по 1972 г. (рис. 20).



Рис. 17. Ю. А. Гагарин (1934—1968)

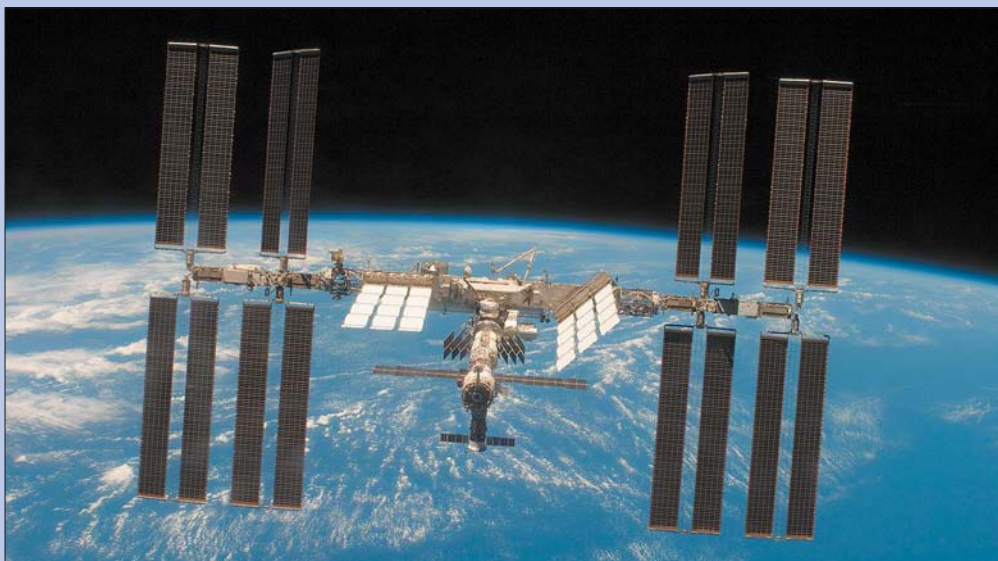


Рис. 18. Международная космическая станция над Землёй. Фото получено с космического корабля Space Shuttle Discovery STS-119 (NASA) 25 марта 2009 г.

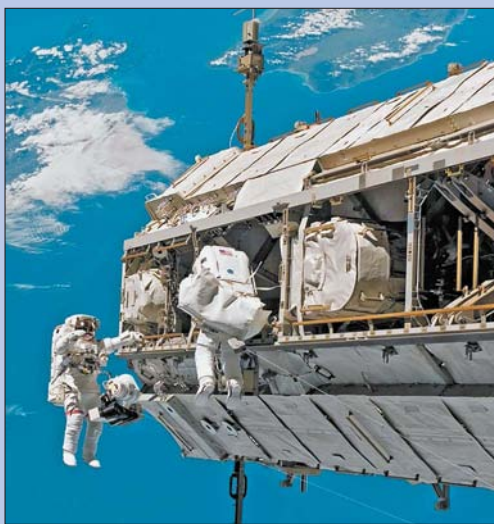


Рис. 19. Работа космонавтов на внешней поверхности Международной космической станции

Экипаж экспедиции «Аполлон-17» (NASA, 1972 г.) использовал электромобиль для передвижения по Луне.

Для более далёких экспедиций требуется создать либо средства защиты от радиации, либо более быстрые космические корабли, позволяющие преодолевать межпланетные расстояния за короткое время. А лучше — и то и другое. В планах **пилотируемой космонавтики** — создание лабо-

ратории на окололунной орбите и на поверхности Луны, полёты к астероидам и к Марсу. Но необходимая для этого техника ещё не создана.

Суровые условия космоса опасны не только для человека, но и для искусственных спутников Земли и межпланетных зондов. Требуются особые материалы и электронные приборы, устойчивые к радиации и большим перепадам температуры. Их разработка и изготовление стоят дорого, поэтому космонавтика требует больших финансовых вложений. Но эти затраты стократ окупаются удобствами спутниковой связи и навигации, а также новыми знаниями о Вселенной, добыть которые без полётов в космос было бы невозможно.

Роль космических исследований в астрономии

Ко всем важнейшим телам Солнечной системы — планетам и их спутникам, астероидам и кометам — отправлялись **автоматические зонды**. Некоторые из них уже работали на поверхности *Луны, Венеры, Марса, Титана* (спутник *Сатурна*), небольшого *астероида Эрос*, а также на поверхности твёрдого ядра *кометы Чурюмова — Герасименко*.



Найдите информацию об исследовании кометы Чурюмова — Герасименко на сайте https://ru.wikipedia.org/wiki/67P/Чурюмова_Герасименко.



Космические зонды проникли в атмосферу Юпитера и Сатурна, доставили на Землю образцы вещества с поверхности Луны, одного из астероидов и одной кометы.



Рис. 20. Астронавт на Луне

Таким образом, благодаря космонавтике наши знания о Солнечной системе за последние полвека колоссально возросли. То, что раньше представлялось астрономам с Земли как диски с нечёткими деталями при наблюдении планет, как туманные пятнышки комет и тусклые звёзочки астероидов, сейчас изучается на месте прямыми физико-химическими методами. Карты Луны и Марса стали такими же детальными, как карты Земли. А обратную сторону Луны мы бы вообще никогда не увидели, не будь космических зондов. Без преувеличения можно сказать, что с рождением космонавтики началась вторая эпоха Великих географических открытий, на этот раз — в масштабах всей Солнечной системы.

Вторая важная заслуга освоения космоса с точки зрения науки состоит в том, что у астрономов появилась возможность размещать за пределами атмосферы **космические телескопы**. Это позволило изучать Вселенную в тех диапазонах электромагнитного спектра, для которых наша атмосфера непрозрачна, то есть в *инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазоне*, а также в *диапазоне очень длинных радиоволн*.



Найдите информацию о космическом телескопе «Хаббл» (Hubble Space Telescope NASA) — самом эффективном оптическом телескопе на орбите — на сайте <https://www.nasa.gov>.



Большинство космических телескопов работают на околоземных орбитах, но некоторые — в далёком космосе. Например, специализированные **космические аппараты** могут изучать невидимое в данный момент с Земли полушарие Солнца и заранее предупреждать нас о бурных процессах, которые там происходят.

Помимо данных о нашей планетной системе, с помощью этих космических обсерваторий астрономы получают огромный объём информации о далёких звёздах нашей Галактики и внегалактических объектах.

Будущее космических исследований

В ближайшие десятилетия развитие космонавтики будет продолжаться в двух направлениях: *использование околоземного пространства* для обеспечения наших потребностей на Земле (связь, изучение Земли, околоземного космоса и Солнца), а также *исследование Солнечной системы и удалённого космоса* в интересах науки (рис. 21). В более далёкой перспективе начнётся *использование космических ресурсов*: вещества Луны, астероидов и комет, а также солнечной энергии для их пе-

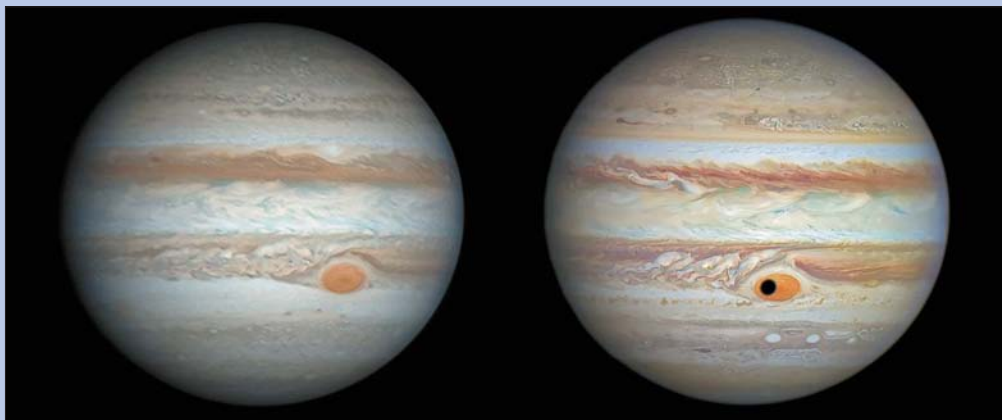


Рис. 21. Планета Юпитер. *Слева:* один из лучших снимков, которые за всю историю астрономии удалось получить с поверхности Земли (Горная обсерватория Пик-дю-Миди, Франция, 2016). *Справа:* фото, полученное космическим телескопом «Хаббл» в 2014 г. На Большое Красное Пятно легла тень Ганимеда, спутника Юпитера

реработки. А в ещё более далёком будущем, возможно, мы примемся за освоение и заселение наиболее благоприятных для жизни небесных тел, в первую очередь Марса.

Для астрономии космос стал важной рабочей площадкой и останется ею навсегда. Он предоставляет уникальные возможности для изучения Вселенной, хотя реализация этих возможностей требует больших финансовых затрат. Вообще, космонавтика — дело дорогое. Поэтому инженеры постоянно ищут возможности удешевить космические полёты, и это постепенно удаётся. На смену одноразовым ракетам приходят **многоразовые**. На смену химическим ракетным двигателям — **электрические** и **ядерные**. В перспективе — использование **солнечного** и **лазерного парусов**, а также, возможно, **космического лифта**, поднимающего грузы в космос за счёт энергии вращения Земли.

В ближайшие столетия Солнечная система будет изучена и освоена, в этом нет сомнения. Но удастся ли нам когда-нибудь отправиться к другим звёздам? Это было бы чрезвычайно интересно, ведь рядом со многими звёздами тоже есть планеты и среди них — похожие на Землю. Вполне возможно, что там тоже есть жизнь, внеземная жизнь! Но межзвёздные полёты невероятно сложны. Даже к ближайшим звёздам на современных ракетах лететь сотни тысяч лет. Возможно, в будущем удастся реализовать идею создания нового космического транспорта, способного разго-

няться до скорости, близкой к скорости света. Если это получится, то путь к звёздам будет открыт.



→ Найдите информацию о космическом лифте в энциклопедии «Википедия» (<https://ru.wikipedia.org/wiki/>).

Полёт к Луне занимает всего три дня, поэтому изучение и использование Луны — важная перспектива для космонавтики. С Луны уже доставлены для исследования сотни килограммов грунта. В нём есть ценное вещество — лёгкий изотоп гелия (^3He), который может использоваться как топливо для будущих термоядерных электростанций. На Луне уже работали астрономические телескопы; пока небольшие, но в перспективе там можно построить гигантские научные приборы, учитывая малую силу тяжести (на Луне она в шесть раз меньше, чем на Земле). Луна может стать важным хранилищем генетической и электронной информации на случай глобальных катастроф на Земле.

4

Пространственные масштабы изучаемой Вселенной

Измерение расстояний в астрономии всегда было сложной, но очень важной задачей. Существуют *прямые* и *косвенные методы её решения*. К *прямым* относятся метод **локации** (для тел Солнечной системы) и метод **параллакса** (для планет и звёзд). *Косвенные* методы, в отличие от прямых, требуют использования дополнительных предположений о свойствах объекта, например о его размере или о мощности излучения.

Локация — метод отражённого сигнала

Астрономические объекты удалены друг от друга на очень большие расстояния. Самое близкое к Земле космическое тело — это спутник Земли *Луна*. Если послать в сторону Луны короткий импульс радио- или оптического излучения (на поверхности Луны есть несколько доставленных туда отражателей света), то слабый отражённый сигнал будет получен обратно через 2,6 с, и этот промежуток может быть очень точно измерен.

Скорость света и радиоволн хорошо известна — она составляет около 300 тыс. км/с. Поскольку принятый после отражения импульс успел два-

жды пройти между Землёй и Луной, несложно вычислить, что расстояние до неё составляет немногим менее 400 тыс. км. *Метод отражённого сигнала* (он называется **методом локации**) даёт самые точные расстояния в Солнечной системе. Однако исторически он не был первым.

Метод параллакса

■ Расстояния до Луны и планет были найдены по измерениям их кажущегося смещения на фоне далёких звёзд при наблюдении этих объектов одновременно из двух точек на Земле, разделённых достаточно большим расстоянием. Это смещение называют **параллактическим**, а его величину — **параллаксом**.

Параллактическое смещение легче всего продемонстрировать, если взглянуть на карандаш в вытянутой руке сначала одним, а затем другим глазом. Его смещение на фоне далёких предметов будет тем больше, чем меньше расстояние от глаз до карандаша. То же самое справедливо и при наблюдении планеты из двух пунктов на Земле: *чем планета дальше, тем меньше её параллакс*. Зная расстояние d между пунктами наблюдений, несложно, решая треугольник (рис. 22), по измеренному параллаксу p найти расстояние до наблюдаемого объекта:

$$D = \frac{d}{\sin p}.$$

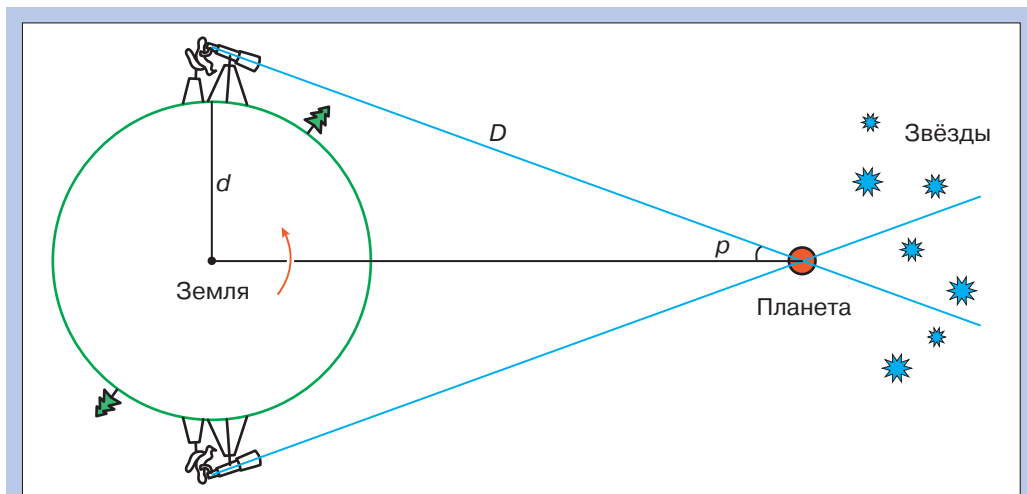


Рис. 22. Схема параллакса

Одновременно измеряя направление на Луну или планету из разных точек Земли, можно определить расстояние до неё. Параллаксы для Луны, и особенно для планет, очень малы, их измерения оказались довольно сложной задачей. Даже если расстояние d между двумя пунктами наблюдений будет сравнимо с радиусом Земли (6400 км), параллактическое смещение для Луны составит около одного градуса, а для Марса, находящегося на ближайшем расстоянии к Земле, — не более 25 угловых секунд. Параллактическое смещение Луны было замечено ещё древнегреческими астрономами, а первые оценки параллакса планеты (Марса) и, следовательно, расстояния до него были получены в XVII в. Так был открыт путь к измерению масштабов Солнечной системы.

Расстояния в Солнечной системе

Знание расстояния до любой планеты и параметров её орбиты в сравнении с орбитой Земли дало возможность рассчитать расстояние между Землёй и Солнцем. Оно меняется в небольших пределах, поскольку **орбита Земли** немного отличается от окружности, представляя собой чуть сплюснутый эллипс с большой полуосью около **150 млн км**. Это значение принимается за единицу расстояний и называется **астрономической единицей (а. е.)**.

Расстояния планет от Солнца в астрономических единицах приведены в Приложении (табл. 2). Ближе всего к Земле подходит *Венера*: разность радиусов орбит Земли и Венеры составляет 0,3 а. е., то есть около 45 млн км. Самая далёкая планета — *Нептун* — расположена от Солнца в 30 раз дальше Земли. Открыты более мелкие тела и карликовые планеты, находящиеся ещё в несколько раз дальше, чем Нептун.

■ Современное точное значение **астрономической единицы**:
1 а. е. = 149 597 870 700 м.

Грандиозность масштабов планетной системы можно проиллюстрировать на простом примере. Если построить объёмную карту с масштабом, при котором земной шар будет маленьким шариком размером 1 см, то Луна будет вчетверо меньшим шариком на расстоянии около 30 см от неё, а Солнце предстанет большим шаром размером около 1 м, находящимся на расстоянии чуть более 100 м от шарика-Земли. Примерно в 600 м будет находиться самая большая планета — Юпитер. Расстояние же до Нептуна составит в этом масштабе около 3,5 км.

Но если мы захотим в таком же масштабе на нашей объёмной карте разместить ближайшую к Солнцу звезду, то она не уместится на Земле: расстояние до звезды от шарика-Земли окажется равным около 40 тыс. км!

Измерение расстояний за пределами Солнечной системы

Расстояние до звёзд, наиболее близких к нам, также определяется методом параллакса, только для этого звезду наблюдают не из двух точек Земли, а с различных мест земной орбиты, пользуясь тем, что Земля сама перемещается в пространстве, обращаясь вокруг Солнца. Для этого в течение нескольких месяцев отслеживают видимое смещение звезды на небе, которое вызвано годичным движением Земли, и по этим измерениям оценивают угол, под которым со звезды был бы виден радиус земной орбиты, перпендикулярный лучу зрения. Этот угол называется **годовым параллаксом светила** (рис. 23). Обычно его обозначают латинской буквой p .

Такой метод определения расстояний является **прямым**, поскольку не требует никаких сведений о природе и свойствах наблюдаемого объекта. Проблема, однако, в том, что из-за большого расстояния параллаксы звёзд невероятно малы. Измерить их для нескольких ярких звёзд удалось лишь в XIX в., когда методика угломерных астрономических измерений достигла очень высокой точности: даже у наиболее близких звёзд

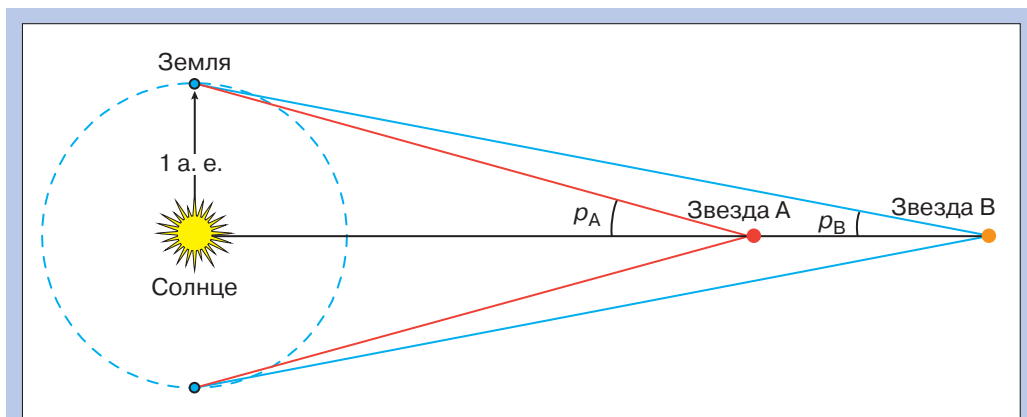


Рис. 23. Параллактическое смещение звезды. Наблюдение звезды из разных точек земной орбиты позволяет измерить её параллакс, тем самым определив расстояние до неё. Здесь звезда В находится дальше, чем звезда А, поэтому $p_B < p_A$

параллактические смещения оказались меньше одной угловой секунды. Тем не менее в настоящее время с помощью специализированных космических телескопов измерены параллаксы сотен миллионов звёзд.

Расстояния до далёких звёзд

Для очень далёких звёзд, наблюдаемых в телескопы, оценка параллаксов недоступна даже для современной космической техники, и астрономы используют уже не прямой метод, а различные **косвенные методы** определения расстояний, например **по измерениям видимой яркости звёзд**. Чем звезда дальше, тем более тусклой она выглядит на небе. Но для оценки расстояния в этом случае требуется изначально задать мощность излучения (светимость) звезды по аналогии с другими звёздами такого же типа.

Ближе всего к Солнцу располагается тройная звёздная система, состоящая из яркой двойной звезды α (альфа) в созвездии Кентавр (иногда говорят Центавр) и очень тусклой звезды Проксима в том же созвездии. Расстояние до этой тройной системы составляет примерно 270 тыс. а. е., или около $4 \cdot 10^{16}$ м.

■ Расстояния до астрономических объектов измеряют как в физических, так и в **астрономических единицах**. Но наиболее наглядно **расстояние** выражается через время, которое требуется свету, чтобы его пройти.

Поскольку скорость света постоянна, пересчитать это время в физические единицы расстояния не составляет труда.

Одна **световая секунда** равна 300 тыс. км.

Одна **световая минута** равна 18 млн км.

Одни **световые сутки** примерно равны 26 млрд км.

Один **световой год** примерно равен 10 тыс. млрд км (10 трлн км), или 10^{16} м.

Одна **астрономическая единица** примерно равна 500 световым секундам, т. е. немногим более 8 световых минут. За это время свет доходит к нам от Солнца. А до Нептуна свет от Солнца идёт более 4 ч.

Таким образом, световые единицы расстояний показывают, какое время тому назад был испущен дошедший до нас свет.

До Луны свет доходит за $1\frac{1}{3}$ с.

От ближайших звёзд (Проксима и α Кентавра) свет идёт к нам около четырёх с половиной лет.

Самые далёкие звёзды, которые ещё можно увидеть на небе невооружённым глазом, отстоят от нас на тысячи световых лет.

Более 100 тыс. св. лет составляет расстояние до самых далёких звёзд нашей звёздной системы — Галактики, состоящей из сотен миллиардов звёзд.

Соседняя галактика *Туманность Андромеды* — самый далёкий объект, который можно увидеть без телескопа, — расположена на расстоянии около 2 млн св. лет.

Самое близкое к нам массивное скопление галактик, где насчитываются тысячи отдельных звёздных систем, расположено в созвездии Дева на расстоянии около 50 млн св. лет.

От самых далёких галактик, которые ещё удаётся наблюдать с помощью современных больших телескопов, свету потребовалось на дорогу к нам 12—13 млрд лет.

Таковы масштабы наблюдаемой Вселенной.

В астрономии часто используется ещё одна единица расстояний. Она называется **парсек** (от слов «параллакс» и «секунда»), сокращённо — **пк**.

■ **Парсек** — это расстояние, с которого радиус земной орбиты будет виден под углом 1 угловая секунда ($1''$).

1 ПК = 206 265 а. е. = 3,26 св. года.

Если звезда находится на расстоянии r [ПК], то параллактическое смещение, вызванное движением Земли по орбите вокруг Солнца, будет в течение года менять направление на звезду на величину годового параллакса $p = \frac{1''}{r[\text{ПК}]}$ по отношению к её среднему положению.

Чем дальше звезда, тем меньше её годичный параллакс. На расстоянии 10 ПК параллакс равен $0,1''$, на расстоянии 100 ПК — $0,01''$ и т. д. Расстояние в парсеках и годичный параллакс связаны простым соотношением: $r[\text{ПК}] = \frac{1''}{p}$.

Для очень больших расстояний используют более крупные единицы, кратные парсеку: **килопарсек** (1000 ПК) и **мегапарсек** (1 000 000 ПК).

Основные выводы

- **Астрономия** — это наука об окружающем Землю мире и о происходящих в нём явлениях. Её основные цели носят фундаментальный характер — построить научную картину мира, понять физическую природу астрономических объектов, их происхождение и эволюцию, а также эволюцию Вселенной как целого.

Знания, полученные астрономическими методами, используются также для решения прикладных задач, например для развития космических исследований и космической деятельности человека, для слежения за Солнцем или для отслеживания астероидов, столкновение с которыми опасно для Земли.

- **К астрономическим объектам (телам)** относят все объекты естественного происхождения, находящиеся за пределами земной атмосферы.
- **Под Вселенной** понимают весь безгранично простирающийся материальный мир, рассматриваемый с физико-астрономической точки зрения и включающий в себя ту ограниченную часть, которая доступна для прямых наблюдений.

Астрономия, как и другие науки, находится в постоянном развитии.

- В развитии астрономии как науки, базирующейся на наблюдениях, условно выделяются *четыре основных этапа*.
- Самый длительный первый этап был периодом **глазомерных** наблюдений с помощью простых угломерных инструментов.
- На втором этапе с изобретением телескопа началось применение **телескопических** методов наблюдений, человек увидел, что границы его мира существенно шире, чем представлялось ранее.
- На третьем этапе благодаря открытию спектрального анализа, изобретению фотографии и развитию фотометрии стали разрабатываться **астрофизические** методы исследований космических объектов.
- На четвёртом этапе с появлением радиотелескопов и космических телескопов, работающих за пределами земной атмосферы, началась регистрация излучения **во всех диапазонах электромагнитного спектра**, астрономия стала **всеволновой**. Начались космические исследования тел Солнечной системы.

В наше время активно развиваются поиски и наблюдения космических источников **нейтрино** и **гравитационных волн**.

- **Формальной границей** между атмосферой и космическим пространством считается высота в 100 км. Выше этой границы впервые подняли приборы на ракетах в конце 1940-х гг.

- **Первый искусственный спутник** Земли был выведен на орбиту с помощью ракеты конструкции С. П. Королёва 4 октября 1957 г.
- **Первым космонавтом**, совершившим орбитальный космический полёт 12 апреля 1961 г., стал советский космонавт Ю. А. Гагарин.
- В 1968—1972 гг. американские астронавты совершили девять **пилотируемых полётов к Луне**. Из них шесть с посадкой на поверхность.
- В последние несколько десятилетий к большим и малым телам Солнечной системы отправляются автоматические зонды, появились космические телескопы, которые принимают излучение, не проходящее сквозь атмосферу. Они работают не только на околоземных орбитах, но и в далёком космосе.
- В планах **пилотируемой космонавтики** — создание лаборатории на окололунной орбите и на поверхности Луны, полёты к астероидам и к Марсу.
- **Астрономической единицей** называют расстояние, равное большой полуоси орбиты Земли или среднему расстоянию между центрами Земли и Солнца, что составляет около 150 млн км.
- Одна **астрономическая единица** примерно равна 500 св. с. За время 500 с свет доходит к нам от Солнца.
- Кажущееся смещение космических объектов на небе при наблюдении их одновременно из двух точек, разделённых большим расстоянием, называют **параллактическим**, а его величину — **параллаксом**.
- Угол, под которым с далёкого объекта был бы виден радиус земной орбиты, перпендикулярный лучу зрения, называют **годовым параллаксом**. Чем расстояние до объекта больше, тем меньше его параллакс.
- Параллакс даже ближайших звёзд меньше одной угловой секунды. Расстояние до звёзд удобно измерять в световых годах.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Какие астрономические объекты можно наблюдать невооружённым глазом?
- 2) Чем отличается астрономия от астрологии?
- 3) Какие задачи решает астрономия как фундаментальная наука?
- 4) Приведите примеры практических задач, которые в древние времена решали с помощью астрономических наблюдений.
- 5) В чём различие между прямыми и косвенными методами определения расстояний до небесных тел?
- 6) Как впервые было определено расстояние до ближайших звёзд?

- 7) Какой этап развития астрономии был самым длительным? Почему?
- 8) В чём заключается различие между геоцентрической и гелиоцентрической моделями мира?
- 9) На каком этапе развития астрономии оказалось возможным оценить реальные размеры наблюдаемой области Вселенной?
- 10) С чем было связано возникновение астрофизики как нового научного направления?
- 11) Почему современную астрономию называют всеволновой?
- 12) Как развитие астрономии связано с развитием физики и техническим прогрессом? Обоснуйте роль астрономии в формировании научной картины мира.
- 13) В каких диапазонах электромагнитного спектра работают наземные телескопы и телескопы на космических обсерваториях?
- 14) Какие, по вашему мнению, можно ожидать открытия и достижения в астрономии в ближайшем будущем?
- 15) Какие возможности для развития астрономии открыли полёты за пределы плотных слоёв атмосферы?
- 16) Расскажите о перспективах развития космонавтики.
- 17) Перечислите этапы освоения человеком космического пространства. Обоснуйте дату, которую можно считать началом космической эры.
- 18) Как задачи астрономии менялись с течением времени?
- 19) Какие практические задачи выполняет современная астрономия?
- 20) Почему радиоволны принимаются с Земли, а рентгеновское излучение космических тел — только из космоса?
- 21) Чем характеризуется современный этап развития астрономии?
- 22) На какие тела Солнечной системы совершали посадку космические аппараты?
- 23) Почему метод определения расстояний путём измерения параллакса называют прямым?

2. Решите задачи.

- 1) Годичный параллакс звезды составляет $\frac{1}{20}$ угловой секунды. Выразите расстояние до неё в световых годах и в метрах.
- 2) Если все масштабы уменьшить так, что Земля станет размером с глобус диаметром 30 см, то как далеко в этом масштабе окажется Луна; Солнце; Марс; ближайшая к Солнцу звезда; Туманность Андромеды?

2

глава

Видимые движения небесных тел

5

Небо дневное и ночное

6

Созвездия и астеризмы

7

Карта звёздного неба

8

Наблюдаемые движения звёзд,
планет, Солнца и Луны

9

Системы небесных координат

10

Время и календарь

11

Движение планет

12

Затмения Луны и Солнца

Дневное безоблачное небо представляет нам знакомую и очень простую картину: на голубом фоне мы видим яркое, чуть желтоватое Солнце. Изредка можно заметить и освещённую Солнцем часть лунного диска. Больше на дневном небе мы обычно ничего не видим, поскольку рассеянный в воздухе солнечный свет так ярок, что на его фоне не различить слабое сияние далёких космических объектов — звёзд и планет.

Но вечером Солнце скрывается за горизонтом, постепенно опускается всё глубже, и его лучи перестают освещать воздух над нашей головой. Сумерки сгущаются, небо темнеет, и на нём появляются сначала самые яркие, а затем и более тусклые звёзды и планеты. Ночное небо намного сложнее и интереснее дневного. Самый далёкий космический объект, который виден на дневном небе, это Солнце, до него 150 млн км. Свет от Солнца до нас идёт 500 с. А ночью мы видим всю Вселенную! Даже без телескопа наш глаз замечает звёзды на расстоянии тысяч световых лет. Чем дальше мы от городских огней, тем темнее ночное небо и тем больше на нём звёзд. Разобраться в этой картине, на первый взгляд, нелегко. Но ещё древние люди придумали, как ориентироваться среди звёзд: они мысленно объединили яркие звёзды в характерные фигуры, напоминающие сказочных персонажей, животных или знакомые предметы. Эти фигуры *принято называть созвездиями*. Фигуры некоторых созвездий объединены популярными мифами, и это облегчает их запоминание.

Глядя на небо, мы не ощущаем разницы в расстояниях до разных небесных объектов. А разница эта велика: Солнце почти в 400 раз дальше от нас, чем Луна, а ближайшие звёзды в сотни тысяч раз дальше, чем Солнце. Но нам все небесные объекты кажутся равноудалёнными, и мы ощущаем себя как будто бы в центре гигантской сферы неопределённого радиуса, на поверхности которой расположились небесные светила. Эту мнимую сферу принято называть *небесной сферой*.

■ **Небесная сфера** — воображаемая сфера произвольного радиуса, в центре которой располагается наблюдатель, а на её поверхность, с точки зрения наблюдателя, спроецированы все небесные объекты.

Образ небесной сферы оказался удобен для изображения видимого взаимного расположения светил, для математических расчётов их видимого движения. Определять расстояния до небесных объектов очень сложно, и не всегда это удаётся сделать с хорошей точностью. А взаимное расположение светил на небесной сфере измеряется довольно просто, и это умели делать ещё наши предки с помощью примитивных угломерных приборов.

Начиная с древнегреческого учёного **Гиппарха** (II в. до н. э.), в астрономии принято разделять все звёзды на несколько уровней яркости (астрономы говорят — *блеска*), называемых **звёздными величинами**. Гиппарх все видимые глазом звёзды впервые разбил на шесть классов по яркости. Самым ярким звёздам он приписал первую звёздную величину, менее ярким — вторую, ещё менее ярким — третью и т. д.

В XIX в. учёные аккуратно измерили свет, идущий от разных звёзд, и оказалось, что между соседними звёздными величинами шкалы Гиппарха потоки света меняются примерно в 2,5 раза, а между едва заметными для глаза звёздами шестой величины и яркими звёздами первой величины — приблизительно в 100 раз. Основываясь на этих измерениях, английский астроном **Норман Роберт Погсон** (1829—1891) ввёл современную *шкалу звёздных величин*. Поскольку между шестой и первой величинами пять «ступенек», он предложил за основание этой шкалы взять корень пятой степени из 100, приблизительно равный 2,512.

Обозначают звёздную величину латинской буквой *m* (от лат. *magnitudo* — величина) в виде верхнего курсивного индекса справа от числа. Направление шкалы звёздных величин обратное, то есть чем больше значение, тем слабее блеск объекта. Например, звезда второй звёздной величины (2^m) в 2,512 раза ярче звезды третьей величины (3^m) и в $2,512 \cdot 2,512 = 6,310$ раза ярче звезды четвёртой величины (4^m). У звёзд *Ковша Большой Медведицы* блеск около 2^m , у *Веги* около 0^m . У наиболее ярких светил значение видимой звёздной величины отрицательно, например у *Сириуса* около $-1,5^m$ (то есть поток света от него примерно в 4 раза больше, чем от *Веги*), а блеск *Венеры* в некоторые моменты почти достигает -5^m (то есть поток света почти в 100 раз больше, чем от *Веги*). Самые тусклые звёзды, доступные современным телескопам, имеют звёздную величину $31,5^m$. А самые яркие светила на небе — это полная *Луна* ($-12,7^m$) и особенно *Солнце* ($-26,7^m$).

Наше ощущение видимого блеска звёзд зависит от потока приходящего от них света. В привычных для физики единицах измерения поток света от звезды нулевой величины (0^m) составляет $2,48 \cdot 10^{-8}$ Вт/м².

6

Созвездия и астеризмы

У разных народов было принято по-разному делить звёздное небо на созвездия, но современная наука в основном выросла на европейских традициях. Поэтому, когда в начале XX в. астрономы объединились в *Международный астрономический союз* (МАС) и решили раз и навсегда утвердить границы и названия созвездий, они взяли за основу греко-римскую традицию наименования созвездий и границ между ними. Всё звёздное небо поделили на 88 созвездий (см. табл. 1 в Приложении). Одно из созвездий — *Змея* — традиционно состоит из двух разделённых частей: между *Головой Змеи* и *Хвостом Змеи* располагается *Змееносец*. Поэтому отдельных площадок на небе получилось 89 (рис. 24). Современные границы созвездий были установлены в 1930-е гг., и впредь их решено не менять.

На той части неба, которая видна из Северного полушария, названия созвездий в основном традиционные, возникшие тысячелетия назад у европейских народов. Многие из них связаны с греко-римскими мифами (*Кассиопея*, *Андромеда*, *Персей*, *Кит*, *Геркулес* и др.). На небе Южного полушария, с которым европейцы познакомились в эпоху Великих географических открытий, многие созвездия были выделены и названы уже в Новое время — в XVI—XVIII вв. Поэтому названия самых южных созвездий часто имеют научно-технический оттенок: *Телескоп*, *Микроскоп*, *Печь*, *Октант*, *Компас* и др.

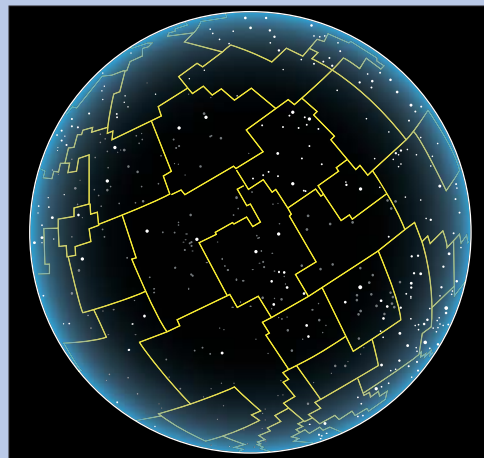


Рис. 24. Вся небесная сфера поделена на 89 площадок, составляющих 88 созвездий (созвездие Змея занимает две отдельные площадки)

Обычно, глядя на знакомую группу ярких звёзд, мы называем её созвездием. Например, семь звёзд, образующих всем известный Ковш, называем созвездием Большая Медведица. Но это неверно. Характерные группы звёзд, легко узнаваемые и имеющие собственные имена, называются **астеризмами**. Большинство астеризмов состоит из ярких звёзд, принадлежащих одному или даже нескольким соседствующим созвездиям. Например, *Ковш* в созвездии *Большая Медведица* (рис. 25), *Пояс* в созвездии *Орион*, *Голова* в созвездии *Дракон*, *Летний Треугольник* — *Вега* (α *Лиры*), *Денеб* (α *Лебедя*) и *Альтаир* (α *Орла*); *Большой Квадрат* из звёзд в *Андромеде* и *Пегасе*. Некоторые астеризмы состоят из тусклых звёзд, например *Плеяды* в созвездии *Телец*.

В настоящее время в астрономии **созвездиями** называют не характерные группы звёзд, а участки небесной сферы, включающие как астеризм из ярких звёзд (если они там есть), так и многочисленные тусклые звёзды и прочие небесные объекты — далёкие галактики, облака меж-

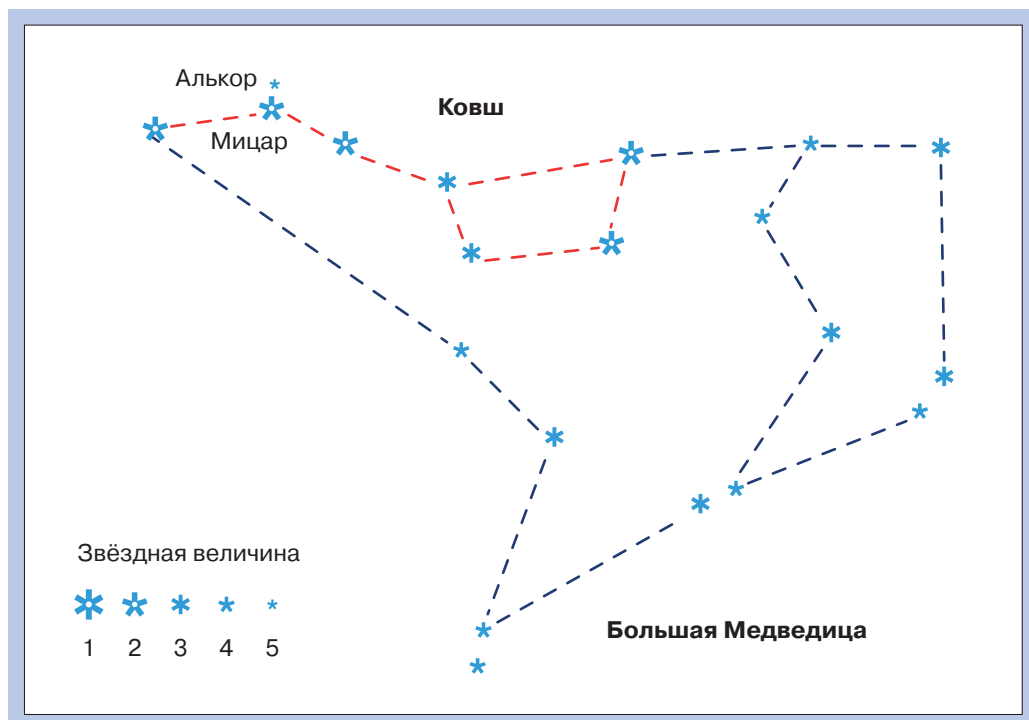


Рис. 25. Астеризм Ковш служит лишь небольшой частью созвездия Большая Медведица

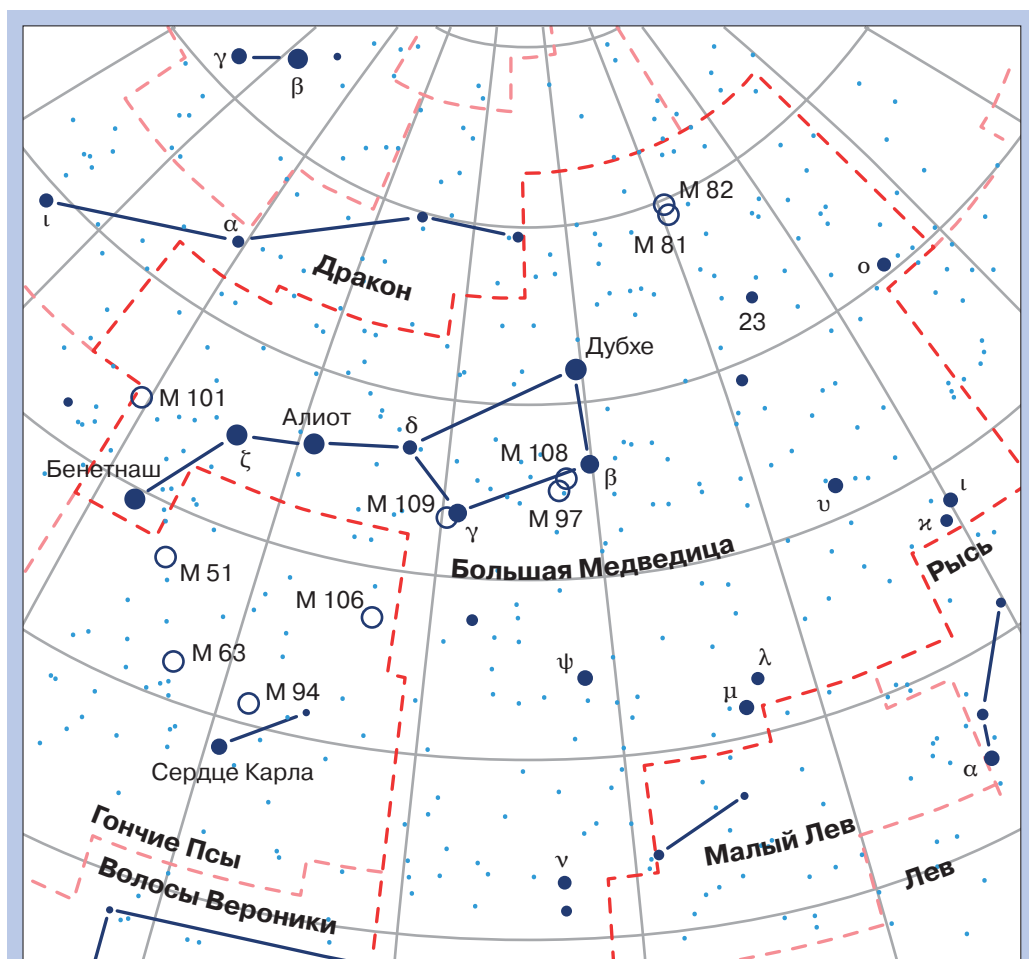
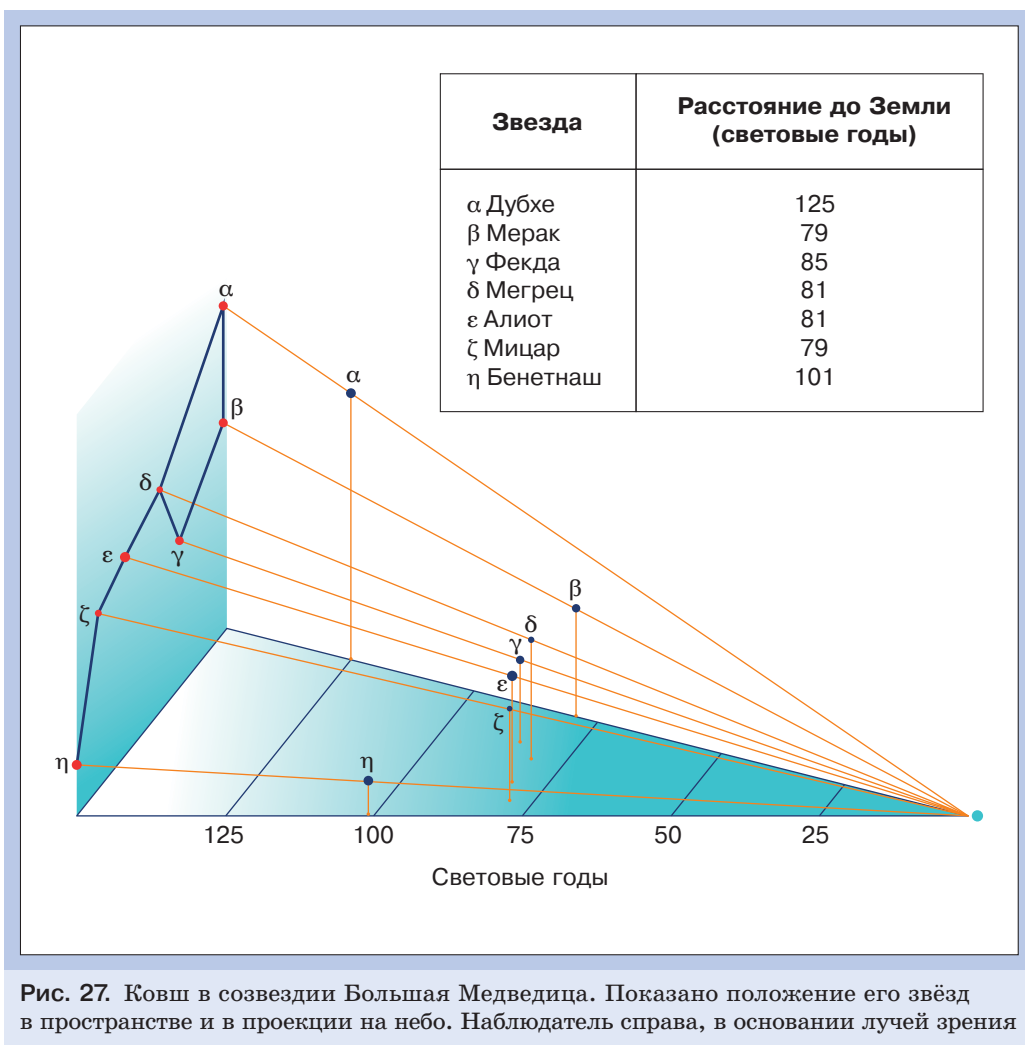


Рис. 26. Созвездие Большая Медведица. Красным пунктиром показаны его границы с соседними созвездиями

звёздного газа и даже планеты, астероиды и кометы, в течение некоторого времени проходящие через эту область неба (рис. 26).

■ **Созвездие** — это участок небесной сферы со всеми проецирующимися на него, с точки зрения земного наблюдателя, небесными объектами.

Следует понимать, что созвездие — это не ограниченная область в космическом пространстве (как, например, планетная система или га-



лактика), а лишь некоторый диапазон направлений, с точки зрения земного наблюдателя (рис. 27). Поэтому, например, вопрос о том, каково расстояние до того или иного созвездия, лишён всякого смысла.

Со временем небесные объекты могут перемещаться из одного созвездия в другое. Быстрее всего это происходит с близкими и быстро движущимися светилами: Луна проводит в одном созвездии не более двух-трёх суток, планеты — от нескольких дней до нескольких лет, а большинство звёзд тысячами и даже миллионами лет не

покидают свои «родные» созвездия, хотя некоторые сравнительно близкие звёзды за последнее столетие всё же пересекали границы созвездий.

7

Карта звёздного неба

Картина звёздного неба при её наблюдении невооружённым глазом меняется очень медленно. Звёздный узор, почти неотличимый от нынешнего, видели и наши далёкие предки. Поэтому можно рисовать карты звёздного неба, которые тысячи лет будут оставаться актуальными. В этом смысле они подобны географическим картам: хотя известно, что материки медленно движутся, а высота гор и русла рек медленно меняются, географические карты длительное время остаются достаточно точными.

Однако проблема с картами звёздного неба возникает та же, что и с географическими: небольшой участок земной поверхности можно изобразить на плоскости, а большую область, например целый материк, без искажений изобразить невозможно, ведь Земля — шар! И звёздное небо представляется нам сферой, в центре которой находимся мы сами. Поэтому на картах звёздного неба обычно изображают небольшие участки небесной сферы, которые без заметных искажений можно разместить на страницах атласа или демонстрировать на экране компьютера. Карты больших участков неба страдают заметным искажением, но могут быть полезны для первого знакомства со звёздами. На рисунках 28—33 показан вид вечернего звёздного неба в разные сезоны в средней полосе России. Точное изображение ночного неба возможно только на сфере: его мы можем увидеть в планетарии.

Те, кто бывал в планетарии, знают, что небесные явления демонстрируются там на полусферическом куполе, на котором можно показать только половину небесной сферы. Это точно отражает ситуацию, в которой находится земной наблюдатель: поверхность планеты тоже закрывает от нас нижнюю половину небесной сферы. Окинуть взглядом всё небо может только космонавт вдали от планеты, выйдя из корабля в открытый космос. А на Земле это можно смоделировать с помощью очков виртуальной реальности с компьютерной программой-планетарием.

Ещё в древности многие яркие звёзды получили собственные имена. До нас дошли около 300 из этих имён, в основном греческого и арабского происхождения: *Вега*, *Сириус*, *Денеб*, *Альтаир*, *Альдебаран*, *Бетельгейзе* и др. Часто это названия частей тела тех фигур, которые дали

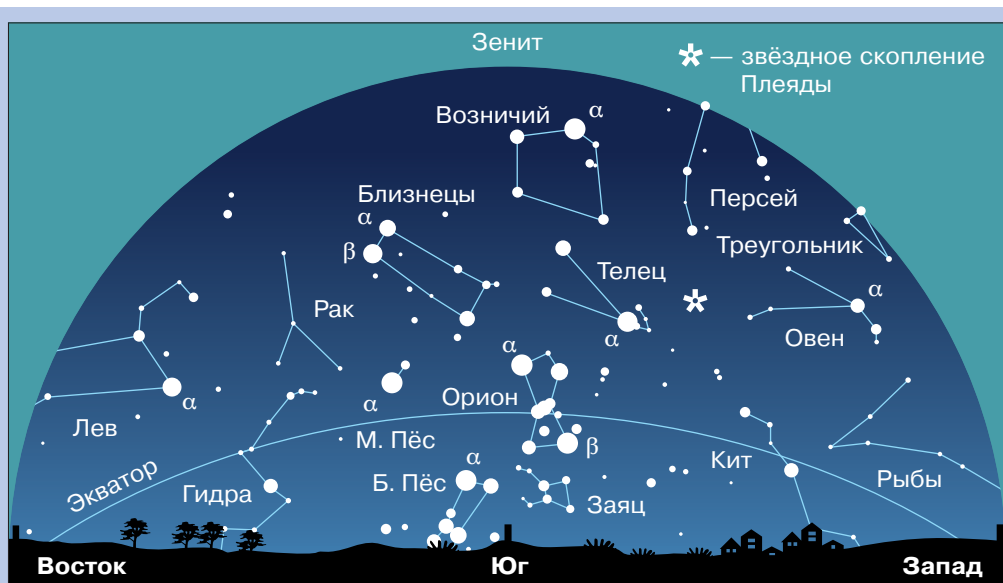


Рис. 28. Зимние созвездия



Рис. 29. Весенние созвездия



Рис. 30. Летне-осенние созвездия



Рис. 31. Осенне-зимние созвездия

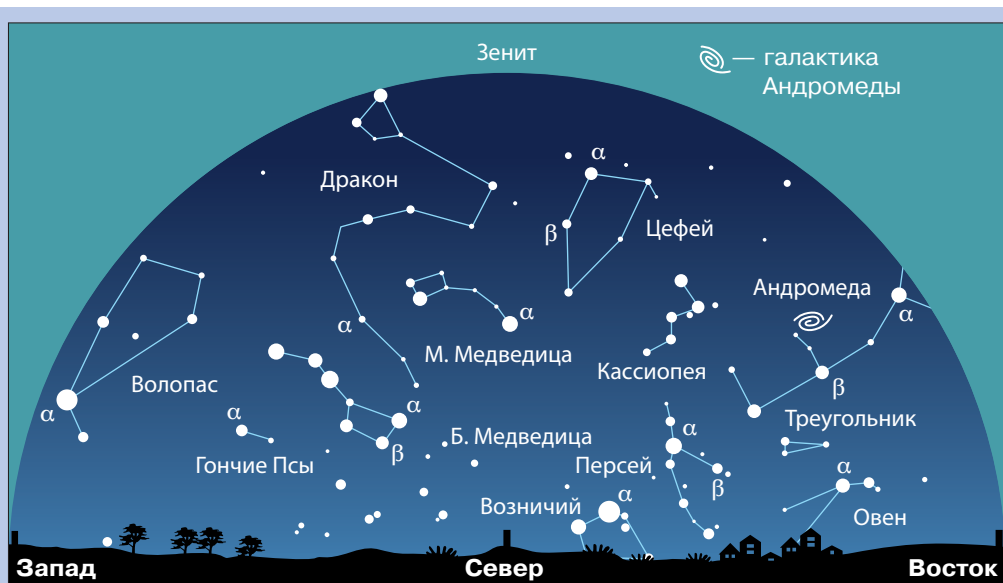


Рис. 32. Полярные созвездия сентябрьским вечером



Рис. 33. Полярные созвездия апрельским вечером

название всему созвездию: *Фомальгаут* (в созвездии *Южная Рыба*) — «рот рыбы», *Денебола* (в созвездии *Лев*) — «хвост льва» и т. д. Астрономы сохраняют эти имена как дань традиции.

Начав в конце XVI в. детальное изучение неба, астрономы столкнулись с необходимостью иметь обозначения для всех без исключения звёзд, видимых невооружённым глазом, а позже — в телескоп. В книге **Иоганна Байера** (1572—1625) «Уранометрия», где изображены созвездия и связанные с их названиями легендарные фигуры, звёзды впервые были обозначены буквами греческого алфавита приблизительно в порядке убывания их блеска: α — ярчайшая звезда созвездия, β — вторая по блеску и т. д. Если не хватало греческих букв, Байер использовал латинские. Полное обозначение звезды по системе Байера состоит из буквы и латинского названия созвездия. Например, *Сириус* — ярчайшая звезда *Большого Пса* (*Canis Major*) — обозначается как α *Canis Majoris* (используется родительный падеж названия созвездия) или сокращённо α *CMa*. *Альгол* — вторая по яркости звезда в *Персее* — обозначается как β *Persei* или β *Per*. Но этот принцип выдержан не для всех созвездий. Например, в созвездии *Большая Медведица* звёзды *Ковша* обозначены греческими буквами просто в порядке их расположения, а не блеска.

8

Наблюдаемые движения звёзд, Солнца и Луны

Несмотря на кажущуюся неизменность картины звёздного неба, при наблюдении в течение даже не очень длительного времени становится ясно, что она меняется, и довольно заметно. Причиной этих изменений являются движения Земли и небесных тел.

Суточное вращение небесной сферы

Луну и планеты на звёздных картах не изображают, поскольку они довольно быстро меняют своё положение относительно «неподвижных» звёзд. Впрочем, и сам рисунок звёздного неба заметно сдвигается с востока на запад, если наблюдать его несколько часов в течение ночи. Наблюдателю на Земле кажется, что небесная сфера вращается вокруг него. Ясно, что это происходит из-за суточного вращения самой Земли вокруг оси. Земля вращается с запада на восток, а нам кажется, что небосвод вращается с востока на запад. Воображаемую ось, вокруг которой происходит вращение небесной сферы, называют осью мира (рис. 34).

■ **Ось мира** — это прямая, проходящая через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли. Вокруг оси мира совершается видимое суточное движение небесных светил. Ось мира пересекается с поверхностью небесной сферы в двух точках: в **северном полюсе мира** и **южном полюсе мира**.

Днём движение небосвода проявляется в утреннем восходе Солнца в восточной части горизонта, затем его перемещении по южной части неба (а для жителей Южного полушария — по северной части неба) и, наконец, вечернем заходе на западе. Ночью мы видим появление звёзд из-за горизонта на востоке и их заход на западе.

Картина суточного вращения небесной сферы зависит от того, на какой географической широте мы находимся. Если мы на *Северном полюсе*, то полюс мира совпадает с точкой зенита, и видимое движение звёзд происходит вокруг зенита, параллельно горизонту (рис. 36). Там звёзды Южного полушария никогда не восходят,

а светила Северного полушария никогда не заходят за горизонт. На Северном полюсе над нами всегда северная половина небесной сферы, и мы никогда не увидим другую. Её видят те, кто находится на Южном полюсе, но зато они лишены возможности увидеть «нашу» половину неба.

Постепенно продвигаясь от полюса к низким географическим широтам, мы замечаем, что меняется вид звёздного неба и характер движения звёзд относительно линии горизонта. Полярная звезда покидает зенит и склоняется всё ниже и ниже, «увлекая за собой» околополярные созвездия. А в южной стороне неба появляются новые созвездия, которые мы не видели, находясь на полюсе. Их тем больше, чем ближе мы к экватору.

Жители Северного полушария видят вращение небосвода против часовой стрелки вокруг северного полюса мира, расположенного вблизи Полярной звезды. Её легко найти, проведя прямую линию через крайние звёзды *Ковша Большой Медведицы* к созвездию *Малая Медведица* (см. рис. 35).

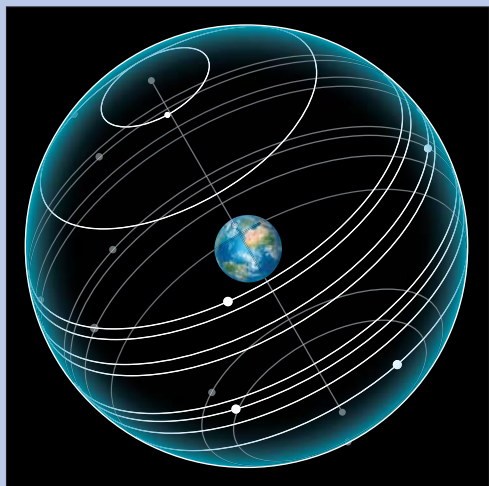


Рис. 34. Видимое вращение небосвода. Суточные пути звёзд параллельны экватору

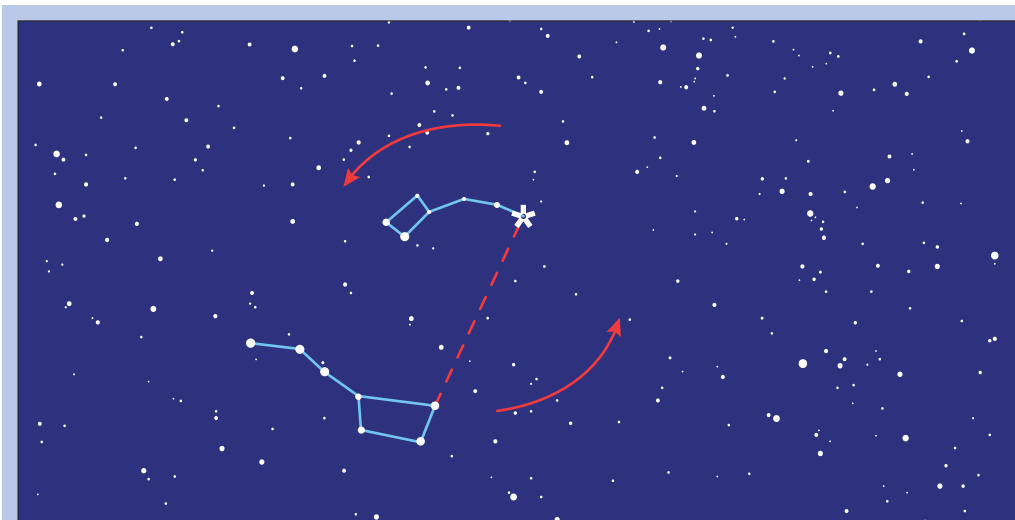


Рис. 35. В Северном полушарии небесная сфера кажется вращающейся вокруг Полярной звезды, а «ковши» могут служить своеобразными стрелками «звёздных часов». * Данным значком на рисунке отмечена Полярная звезда

Вся небесная сфера за 24 ч проходит перед глазами тех, кто живёт на *экваторе* (рис. 37). Там ось мира располагается в плоскости горизонта, полюсы мира лежат на линии горизонта в *точках юга* и *севера*, а все светила в течение суток поднимаются и заходят, проводя по 12 ч над горизонтом и под ним. Конечно, звёзды видны только половину суток, пока на небе нет Солнца. Но если подняться высоко в горы (ещё лучше — в стратосферу) звёзды будут видны и днём. Для жителей *средних широт*, где полюс мира расположен между горизонтом и зенитом, для наблюдений доступна большая часть небесной сферы, но не вся (рис. 38). Часть её, расположенная

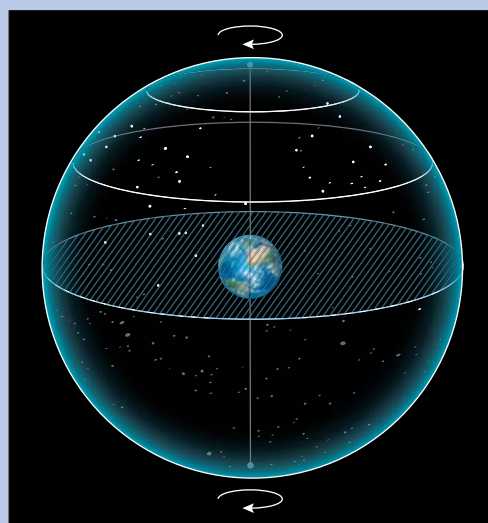


Рис. 36. Видимое вращение небесной сферы для наблюдателя на Северном полюсе

вокруг противоположного полюса мира, никогда не поднимается над горизонтом. Звёзды на ней называются *невосходящими*. Для нас, жителей Северного полушария, невосходящими являются звёзды вблизи южного полюса мира. Зато звёзды вблизи северного полюса мира у нас никогда не скрываются под горизонтом; это *незаходящие* звёзды. А между теми и другими располагаются звёзды, которые регулярно восходят и заходят.

После восхода светило движется с востока на запад, постепенно поднимаясь над горизонтом. В середине этого пути оно достигает максимальной высоты — кульминирует. **Момент верхней кульминации** — это момент достижения светилом максимальной высоты над горизонтом, когда жители Северного полушария видят светило точно над точкой юга, а жители Южного — над точкой севера. Через пол-оборота небесной сферы светило пройдёт точку нижней кульминации, где его высота над горизонтом будет минимальной и может быть отрицательной, если в этой точке светило окажется под горизонтом. Ночью так движутся звёзды, днём — Солнце. В полдень оно занимает на небе самое высокое положение, тени от предметов становятся наиболее короткими и в северных широтах протягиваются с юга на север. Это даёт удобный способ определить стороны горизонта: воткнув вертикально в ров-

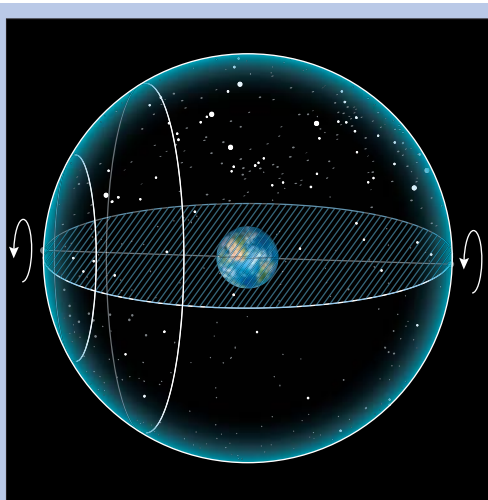


Рис. 37. Видимое вращение небесной сферы для наблюдателя на экваторе Земли

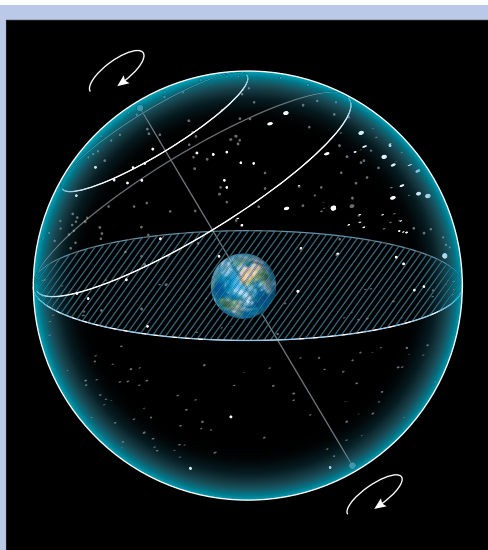


Рис. 38. Видимое вращение небесной сферы для наблюдателя в средних широтах

ную горизонтальную поверхность тонкую палочку, *гнóмон*, и отмечая положение тени, надо найти такое положение, когда она самая короткая (рис. 39). Это и будет **полуденная линия**, указывающая направление на север и на юг.

Герои Жюль Верна на необитаемом острове определяли положение сторон света с помощью гномона.

■ Угловая высота полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения (рис. 40).

Углы ZON и QTP_N прямые по определению. Линии PO и P_NP_S параллельны также по определению. Их пересекает прямая TZ . Значит, в силу свойства углов при параллельных прямых и секущей углы α и β равны. До прямого угла их дополняют углы h_P и φ . Значит, равны и они. Отсюда следует удобный способ определения географической широты: она равна высоте полюса мира.

T — центр Земли, O — точка наблюдения, P — полюс мира, Z — зенит, Q — точка на экваторе, через которую проходит географический меридиан наблюдателя, h_P — высота полюса, φ — широта наблюдателя, NS — полуденная линия, лежащая в плоскости горизонта, P_N и P_S — Северный и Южный полюсы Земли, P_NP_S — ось вращения Земли.

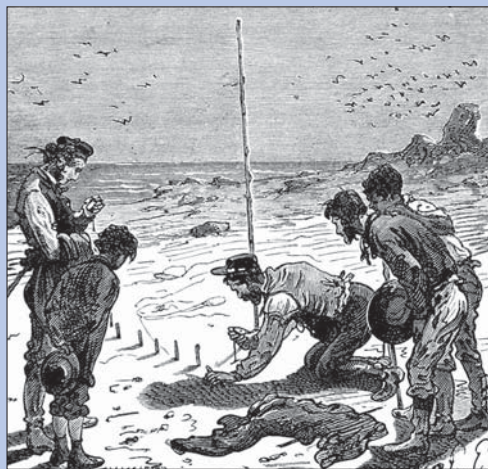


Рис. 39. Герои Жюль Верна на необитаемом острове

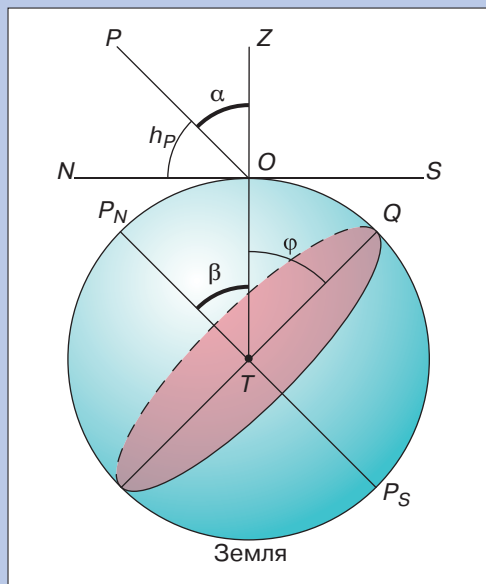


Рис. 40. Связь между высотой полюса мира и географической широтой места наблюдения

Особенно удобно проводить эти измерения на море, где горизонт открыт и практически идеален. Правда, полюс мира на небе ничем не отмечен, но в Северном полушарии рядом с ним находится Полярная звезда. В нынешнем столетии её расстояние от полюса будет около $0,5^\circ$, поэтому высота Полярной звезды над горизонтом служит неплохим ориентиром для определения географической широты.

Движение Солнца и Луны по небесной сфере

Чем ближе наблюдатель к географическому полюсу, тем выше над горизонтом полюс мира и ниже **небесный экватор**. На самом полюсе небесный экватор совпадает с горизонтом, и там светила не кульминируют, а в течение суток движутся параллельно горизонту. Но, помимо суточного движения, Солнце обладает ещё и годичным движением, которое связано не с вращением Земли, а с её движением по орбите. Видимый годичный путь Солнца по небу проходит по большому кругу, называемому **эклиптикой**. Плоскость земной орбиты совпадает с плоскостью эклиптики, то есть *эклиптика — это линия пересечения плоскости земной орбиты с небесной сферой*. Ось вращения Земли наклонена под углом $23,4^\circ$ относительно перпендикуляра к плоскости орбиты. Поэтому плоскость экватора пересекается с плоскостью эклиптики под углом $23,4^\circ$ (рис. 41).

Двигаясь в течение года по эклиптике, Солнце занимает разные положения относительно небесного экватора: полгода оно выше экватора, а полгода — ниже, максимально удаляясь от него на $23,4^\circ$. Поэтому на географических полюсах Земли Солнце полгода проводит над горизонтом (*полярный день*), а полгода — под горизонтом (*полярная ночь*), никогда не поднимаясь там выше $23,4^\circ$.

Этим же определяется смена сезонов года в умеренных широтах (рис. 42). Летом Солнце выше небесного экватора, поэтому и кульминирует в полдень выше над горизонтом и лучше греет землю. Максимальной высоты в Северном полушарии Солнце достигает в июне, в *день летнего солнцестояния*. А через полгода, в *день зимнего солнцестояния*, оно поднимается над горизонтом на минимальную высоту. По этой же причине летом Солнце дольше остаётся над горизонтом и дни длиннее, а зимой поздно восходит, рано заходит и дни короче.

Самое яркое светило на ночном небе — **Луна**. Это естественный спутник Земли, совершающий оборот вокруг нашей планеты за 27,3 сут. А поскольку вокруг своей оси Луна вращается с таким же периодом и в том же направлении, к Земле постоянно повёрнуто одно и то же её полушарие — *видимая сторона Луны*. Обратная сторона Луны с Земли никогда не видна.

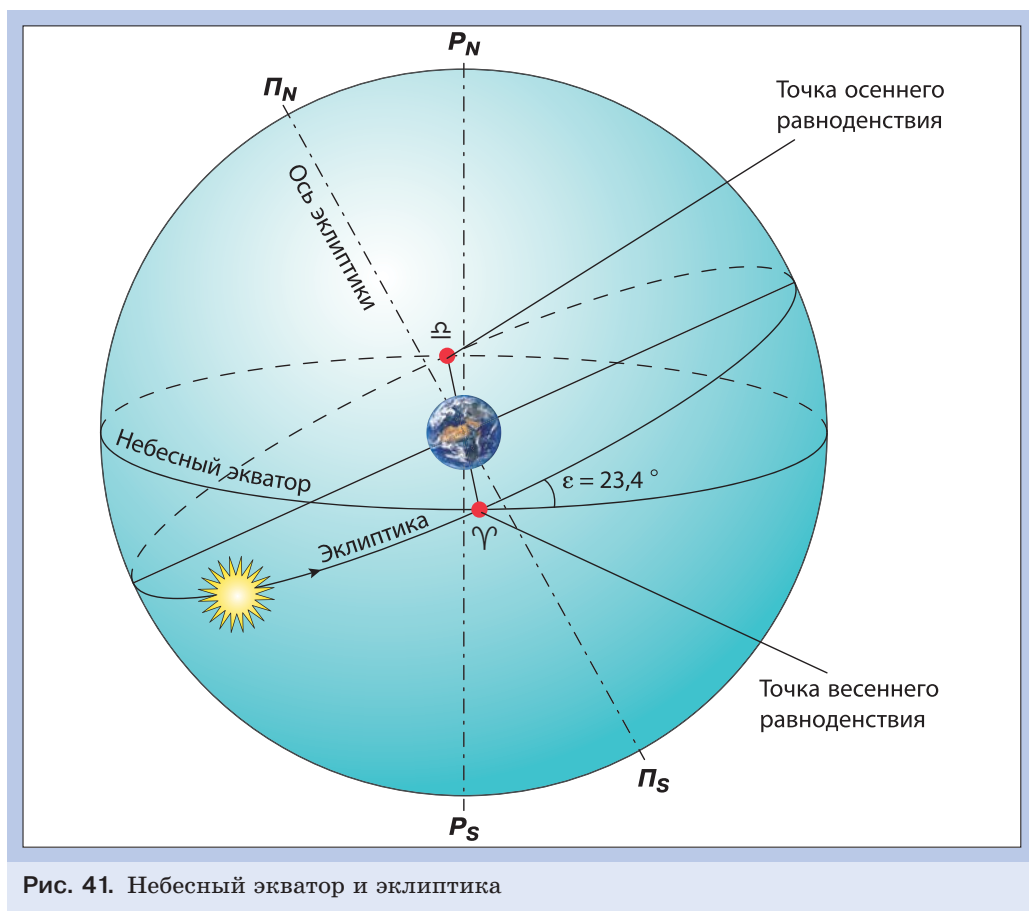


Рис. 41. Небесный экватор и эклиптика

Делая оборот вокруг Земли за 27,3 сут в ту же сторону, в какую вращается земной шар, Луна довольно быстро перемещается на фоне звёздного неба, в среднем на 13° в сутки. При этом движется Луна на фоне звёзд с запада на восток, то есть отстаёт от суточного движения небосвода. Поэтому восходы и заходы Луны каждые следующие сутки происходят примерно на 1 ч позже.

В течение месяца мы наблюдаем не только перемещение Луны по кругу на фоне звёзд, но и изменение её внешнего вида — **смену лунных фаз** (рис. 43, 44). Когда Луна видна с Земли в том же направлении, что и Солнце, она обращена к нам своей ночной стороной, и освещённую сторону Луны мы не видим, это момент *новолуния*. Затем Луна всё больше и больше удаляется к востоку от Солнца, и мы начинаем видеть освещённую сторо-

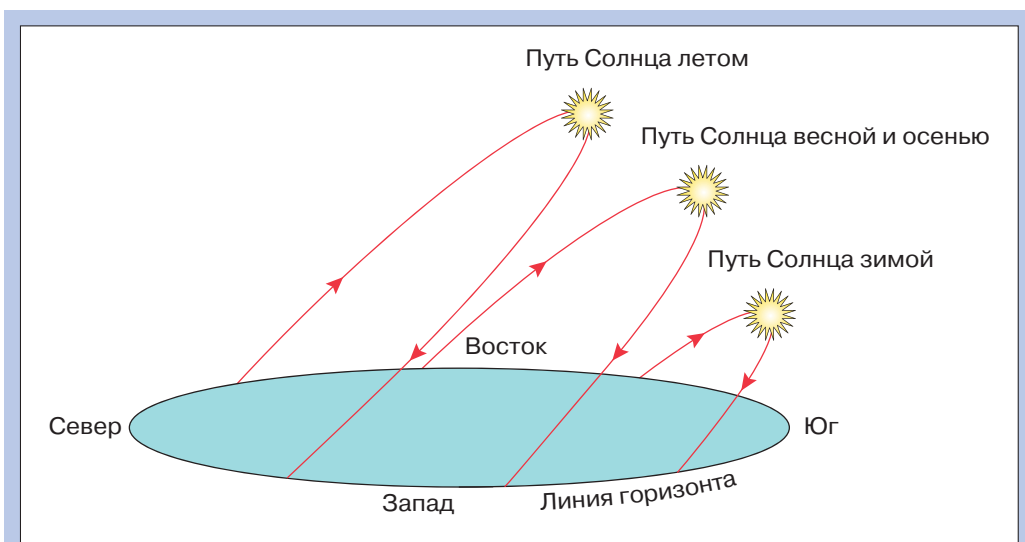


Рис. 42. Видимый путь Солнца над горизонтом в средних широтах Северного полушария в разные сезоны года



Рис. 43. Фотографии Луны в различных характерных фазах: 1 — молодая Луна (лунный серп; своей выпуклой стороной он всегда обращён в сторону Солнца); 2 — первая четверть; 3 — растущая Луна; 4 — полнолуние; 5 — убывающая Луна; 6 — последняя четверть

ну: сначала в виде узкого серпа, затем полумесяца. Через две недели после новолуния видимая сторона Луны полностью освещена Солнцем — наступает *полнолуние*. Следующие две недели размер освещённой части лунного диска уменьшается, и она проходит через все предыдущие фазы в обратном порядке. Полный цикл смены лунных фаз длится немного дольше её орбитального периода — 29,5 сут, поскольку за месяц Земля с Лу-

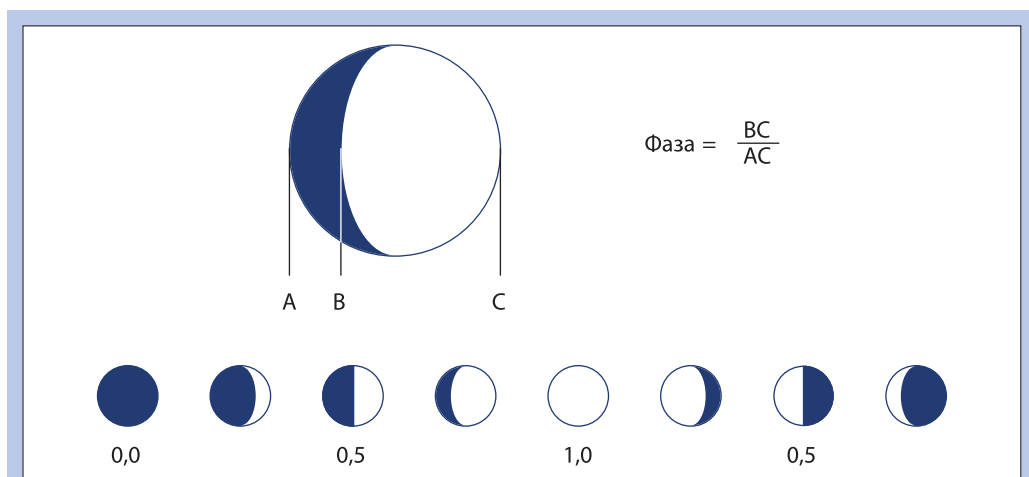
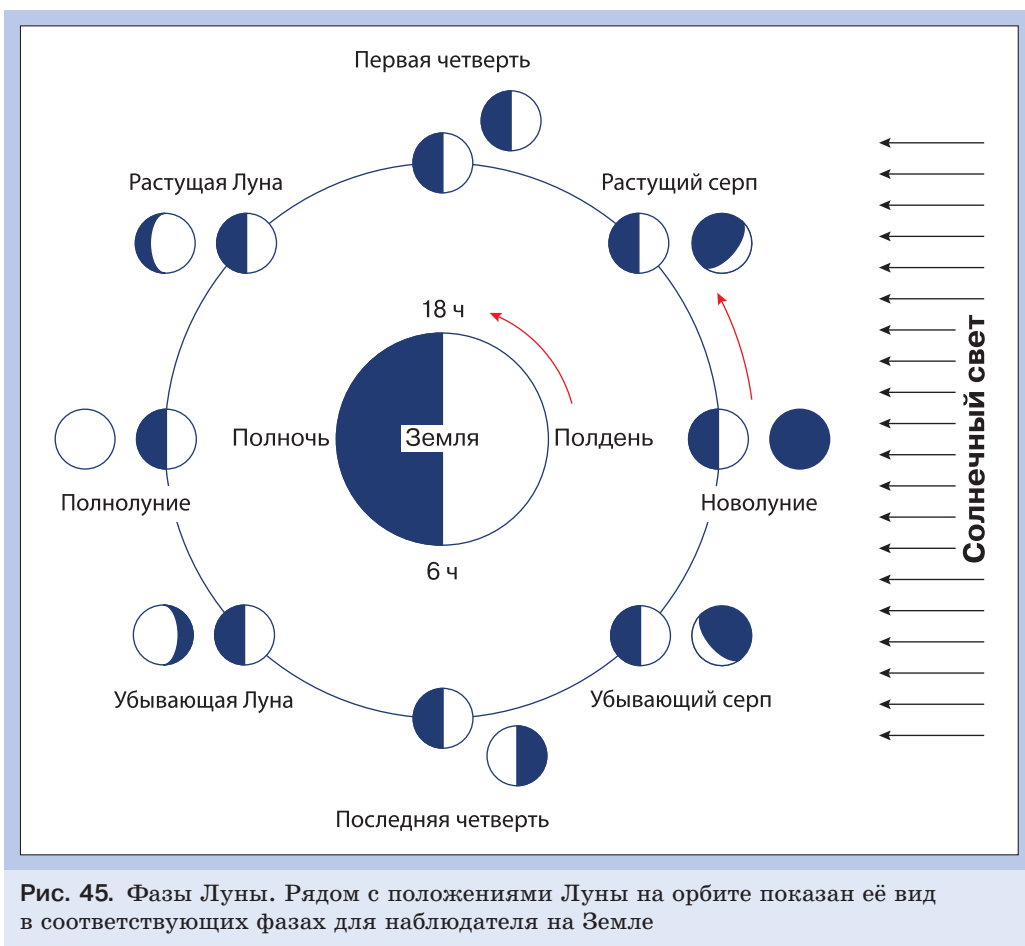


Рис. 44. Фазу Луны или любой другой планеты принято выражать числом от 0 до 1, равным освещённой доле диска

ной успевают пройти $\frac{1}{12}$ часть земной орбиты, и направление прихода солнечных лучей к ним немного меняется (рис. 45). Поэтому Луне требуется пройти по орбите вокруг Земли ещё небольшую её часть, чтобы вернуться к исходной фазе, например от новолуния к новолунию.

Солнце перемещается по небесной сфере на фоне далёких звёзд не так быстро, как Луна. (Солнце на фоне звёзд можно увидеть только во время полного солнечного затмения или в космосе. В телескоп яркие звёзды видны даже днём. Без телескопа положение Солнца на небесной сфере можно отслеживать по звёздам, находящимся точно в противоположной от него области неба, которая кульминирует в полночь.) Видимое перемещение Солнца на фоне звёзд вызвано движением Земли по орбите с периодом 1 год. Значит, для земного наблюдателя Солнце перемещается относительно звёзд примерно на 1° в сутки $\left(\frac{360^\circ}{365 \text{ сут}}\right)$.

движется по *эклиптике*, проходя за месяц по 30° . Эти 30-градусные участки *эклиптики* издревле называют *знаками зодиака*, поскольку эклиптика проходит через созвездия, в основном названные именами животных, реальных или мифических (*Овен, Телец, Рак, Лев, Скорпион, Рыбы, Козерог*), а греческое выражение *зодиакос киклос* как раз и означает «круг из животных». Созвездия, через которые проходит эклиптика, называют **зодиакальными**. Знаки зодиака и созвездия зодиака



в настоящую эпоху не совпадают. Кстати, видимый путь Луны по звёздному небу также проходит недалеко от эклиптики, поскольку орбита Луны наклонена к ней всего на 5° .

Следуя за годичным перемещением Солнца, противоположная ему область эклиптики, которая выше всего поднимается ночью, также перемещается по звёздному небу, совершая один оборот за год (рис. 46). Следовательно, в течение года по ночам перед нами проходят разные участки звёздного неба. Зимой мы видим одни созвездия, так называемые зимние: *Телец*, *Орион*, *Близнецы* и др. А летней ночью видны противоположные им на небе летние созвездия: *Лебедь*, *Лира*, *Орёл* и др. Если наблюдать небо ночь за ночью в одно и то же время суток, например

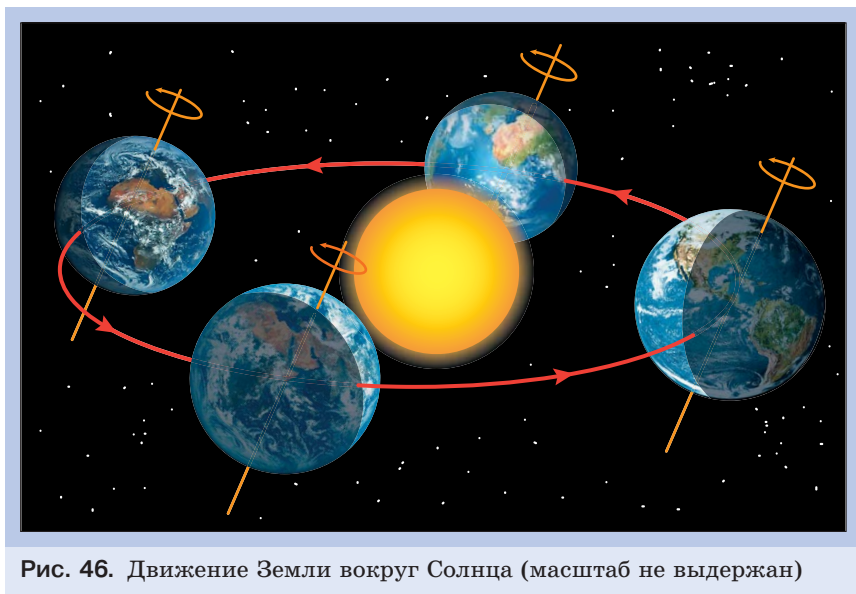


Рис. 46. Движение Земли вокруг Солнца (масштаб не выдержан)

в полночь, то легко заметить, как звёздная картина постепенно сдвигается к западу примерно на 1° в сутки. Вот почему вид звёздного неба меняется в течение года.

9

Системы небесных координат

Созвездия помогают ориентироваться на небе так же, как нам помогают ориентироваться на поверхности Земли континенты и отдельные страны. Но это грубые, приблизительные ориентиры. Значительно точнее позволяют определить положение точки на Земле её **географические координаты**. Астрономы тоже используют разные **системы небесных координат** для точного указания положения светил на небе.

Горизонтальная система небесных координат

Где бы вы ни находились на поверхности Земли, вы легко построите такую систему. На море горизонтальная плоскость — это плоскость, касательная к поверхности воды. На суше рельеф сложный, поэтому там горизонтальную плоскость удобнее провести перпендикулярно *отвесу* (грузику на ниточке). От горизонтальной плоскости до наблюдаемого

объекта отсчитывают угол, называемый **высотой** h (рис. 47). Вверх до *зенита* Z он меняется от 0° до $+90^\circ$, а вниз до противоположной зениту точки — *надир* Z' — от 0° до -90° . Второй угол — **азимут** A — отсчитывается вдоль линии горизонта от точки юга до проекции наблюдаемого объекта на горизонтальную плоскость (см. рис. 47). Отсчёт азимута всегда ведётся в сторону суточного вращения небосвода от 0° до 360° .

Если наблюдатель и объект неподвижны относительно Земли, то горизонтальные координаты удобны, поскольку, однажды измеренные, они остаются неизменными. Например, если вы, глядя из своего окна, определите азимут и высоту шпиля на крыше соседнего дома, то и завтра, и послезавтра значения этих координат останутся теми же.

Однако небесные объекты вследствие суточного вращения Земли постоянно меняют своё положение относительно горизонта, поэтому их

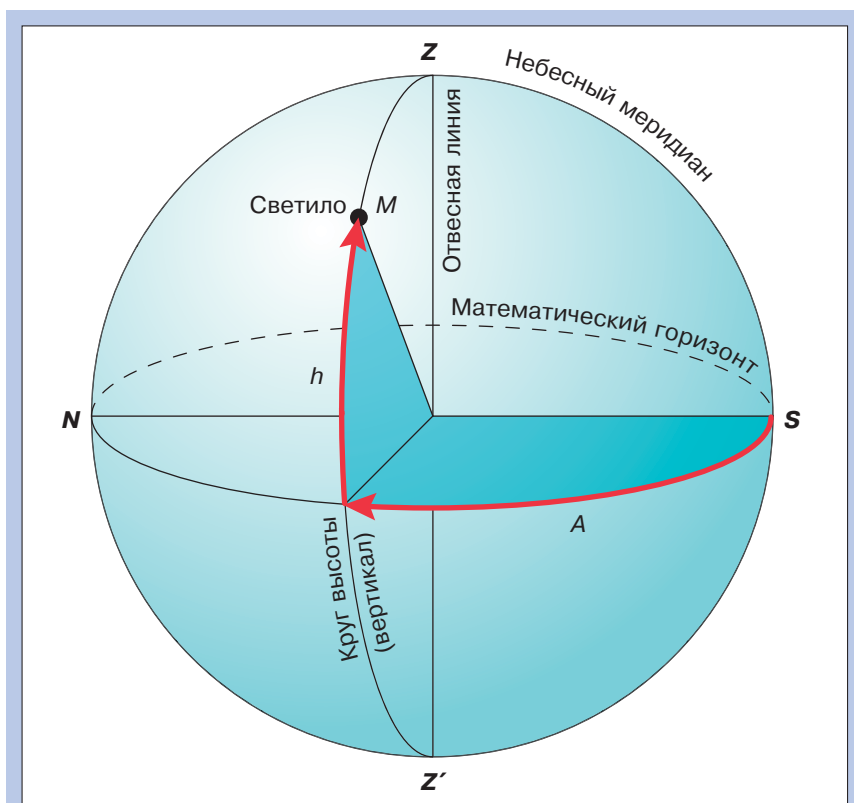


Рис. 47. Горизонтальная система координат

мгновенные горизонтальные координаты не могут служить их точным «адресом». Эту проблему для объектов на поверхности нашей планеты давно решили географы, связав сетку координат с вращающейся Землёй. Вращение планеты задаёт в пространстве её ось и перпендикулярную к ней плоскость экватора. От этой плоскости к северу и югу откладывают угол **географической широты**. С углом долготы сложнее: природа не создала нам на экваторе точку отсчёта долготы. Поэтому мы учредили её сами, приняв по общему соглашению **Гринвичскую обсерваторию** в Англии за нуль-пункт отсчёта **географической долготы**. Сеть географических координат вращается вместе с Землёй, поэтому неподвижные пункты — города, дома, горные вершины, деревья — сохраняют свои координаты неизменными.

Экваториальная система небесных координат

Поскольку видимое движение небосвода вызвано вращением Земли, то используют систему небесных координат, связанную с земной осью и земным экватором. Она так и называется — **экваториальная система координат**. Проекция земного экватора на небесную сферу задаёт **небесный экватор**, от которого к северу со знаком плюс и к югу со знаком минус отсчитывается угловая координата, аналогичная географической широте (рис. 48). В астрономии она называется **склонением** и обозначается греческой буквой δ (дельта). Склонение выражают в угловых градусах, минутах и секундах. Например, у северного полюса мира $\delta = +90^\circ$, а у южного полюса $\delta = -90^\circ$. Найти положение полюсов мира на небе несложно: нужно посмотреть, вокруг какой точки происходит суточное движение звёзд — они обращаются вокруг полюса. А небесный экватор располагается точно между полюсами.

Со второй координатой, аналогичной географической долготе, ситуация сложнее. Невозможно отметить на небесной сфере неподвижную точку, подобную Гринвичской обсерватории на Земле. Но, к счастью, такую точку создала нам сама природа. Благодаря наклону земной оси к её орбитальной плоскости (то есть к плоскости эклиптики) небесный экватор пересекается с эклиптикой в двух точках — в *точках весеннего и осеннего равноденствий*. Двигаясь в течение года по эклиптике, Солнце пересекает небесный экватор именно в этих точках приблизительно 21 марта и 23 сентября, когда день равен ночи. Точку весеннего равноденствия (обозначается Υ) выбрали в качестве начальной точки для отсчёта координаты вдоль *небесного экватора*. Эта координата называется **прямым восхождением** и обозначается греческой буквой α (альфа) (рис. 49). Она отсчитывается в направлении с запада на восток (против часовой

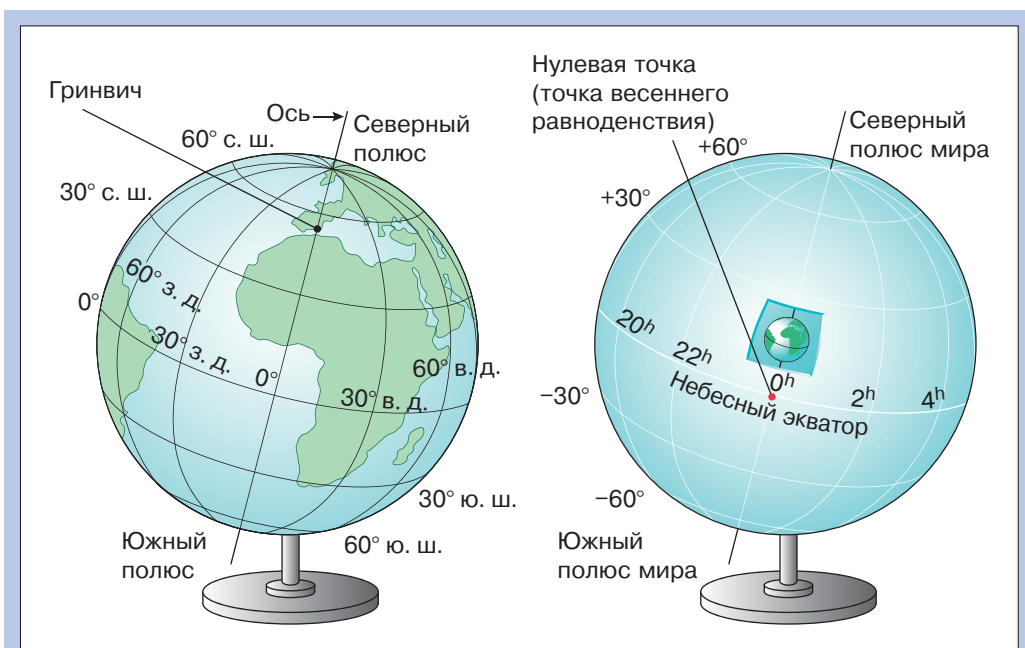


Рис. 48. Система небесных экваториальных координат построена по аналогии с географическими координатами

стрелки, если смотреть с северного полюса мира) и традиционно выражается в часовой мере, то есть в часах (h), минутах (m) и секундах (s), из условия, что полная окружность равна 24 часам ($360^\circ = 24^{\text{h}}00^{\text{m}}00^{\text{s}}$). Правда, в некоторых современных каталогах и компьютерных программах прямое восхождение выражают, как и склонение, в угловых градусах, минутах и секундах. Это упрощает расчёты.

На карту звёздного неба всегда наносится координатная сетка (рис. 50, 51), где по осям откладываются экваториальные координаты: прямое восхождение α (обычно по горизонтали) и перпендикулярно ему склонение δ . Пара этих чисел даёт точную информацию о направлении на небесный объект.

В астрономических каталогах указаны экваториальные координаты всех наблюдаемых звёзд, в том числе ярких, доступных невооружённому глазу. Это позволяет намного точнее измерить широту места наблюдения, чем по высоте Полярной звезды. Все светила в момент верхней кульминации пересекают *небесный меридиан* (это проекция на небесную сферу географического меридиана наблюдателя) (рис. 52). На широте φ

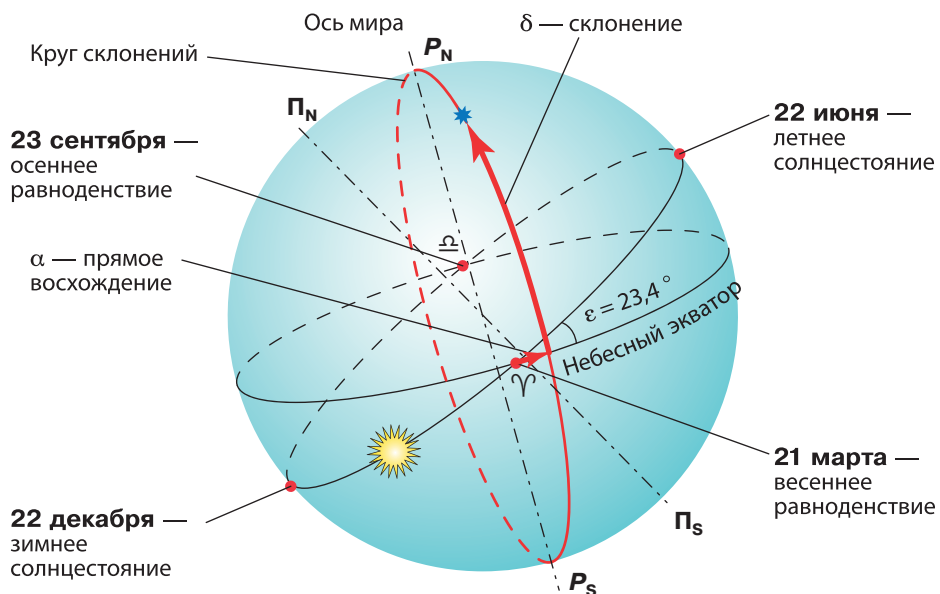


Рис. 49. За начало отсчёта прямого восхождения принята одна из двух точек пересечения небесного экватора с эклиптической — точка весеннего равноденствия (γ). Линия $P_N P_S$ — это ось эклиптики, параллельная оси земной орбиты

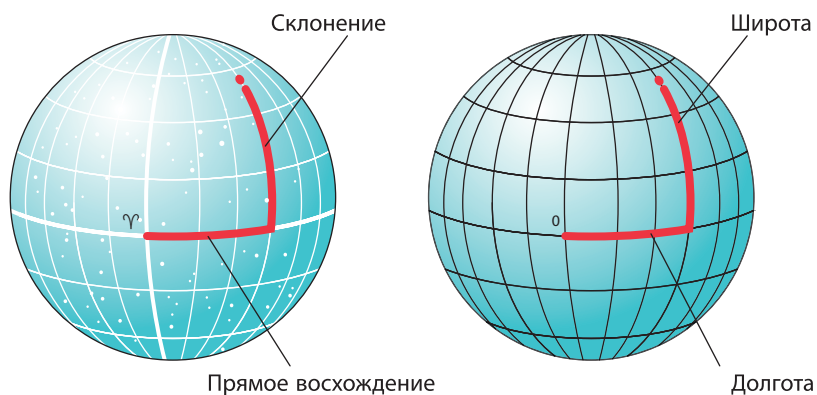


Рис. 50. Небесные экваториальные координаты подобны географическим координатам на Земле



Рис. 51. Сеть экваториальных координат



Рис. 52. Верхняя кульминация звезды с известным склонением (δ) позволяет измерить географическую широту наблюдателя

высота небесного экватора в точке пересечения с небесным меридианом, очевидно, равна

$$h_E = 90^\circ - \varphi.$$

Тогда высота звезды, пересекающей небесный меридиан, составит

$$h_S = \delta + h_E = \delta + 90^\circ - \varphi.$$

Отсюда широта $\varphi = \delta + 90^\circ - h_S$. Измерив высоту звезды в момент её верхней кульминации, легко определить широту места наблюдения.

10

Время и календарь

Необходимость следить за течением времени появилась в незапамятные времена. Решение этой практической задачи и привело к наблюдениям неба, поскольку именно изменения положения светил на небе происходили со строгой периодичностью.

Счёт времени

Один оборот Земли вокруг оси мы называем **сутками**, но редко задумываемся, относительно чего отсчитывается этот оборот, то есть что принимается за начало отсчёта. Казалось бы, это очевидно — вращение Земли отсчитывается относительно направления на Солнце, ведь сутки — это время от восхода Солнца до следующего его восхода. Но вспомним, что, кроме вращения вокруг оси, у Земли есть ещё и орбитальное движение, в результате которого направление на Солнце в пространстве непрерывно меняется приблизительно на 1° в сутки. Оба движения происходят в одном направлении, поэтому, сделав полный оборот вокруг своей оси относительно далёких звёзд (от точки 1 до точки 2 на рис. 53), Земля «вынуждена» повернуться примерно на 1° , чтобы восстановить свою ориентацию относительно Солнца (точка 3). На это требуется около 4 мин. Поэтому **солнечные сутки** примерно на 4 мин длиннее **звёздных суток**.

Большинство людей на Земле не знают о существовании звёздных суток, поскольку ритм их жизни определяется восходами и закатами Солнца. Поэтому солнечные сутки они обычно называют просто сутками. Но астрономов больше интересуют звёздные сутки, поскольку именно по их истечении звёзды на небе возвращаются на своё место относительно горизонта или сторон света. В году, как известно, 365 с небольшим солнечных суток. Однако звёздных суток — на одни больше. Так что на вопрос «Сколько оборотов за год совершает Земля вокруг своей оси?» следует ответить: «366 полных оборотов и ещё чуть-чуть».

В прошлом хранителями времени были астрономы. Они следили за движением звёзд на небе (то есть за вращением Земли), а также за движением Солнца и определяли, когда наступает полдень, когда — полночь, когда ожидать наступления весны или осени и сколько лет прошло между различными событиями. С помощью астрономов была разработана *календарная система счёта времени*, которой мы пользуемся. Но в середине XX в. выяснилось, что «небесные часы» идут неравномерно, то есть скорость вращения Земли не постоянна, хотя это непостоянство, на первый взгляд, малозначительно. Это удалось узнать, сравнивая движение звёзд на небе с ходом очень точных часов, созданных физиками, — *атомных часов*.

Атомные часы — это прибор, генерирующий электромагнитные колебания, частота которых определяется свойствами атомов некоторых химических элементов, например цезия, рубидия или водорода. Но даже самые точные часы могут сбиться. Поэтому **Международный комитет мер и весов** сравнивает показания нескольких сотен атомных часов в разных странах и определяет их поправки относительно средних показаний всех этих часов. Так формируется **международное атомное время** (Time Atomic International, TAI). Единицей времени в астрономии, как и в международной системе единиц СИ, служит *атомная секунда* (с). Для определения её длительности служит излучение атома цезия ^{133}Cs . Частота этого излучения считается равной 9 192 631 770 герц. Она подобрана таким образом, чтобы атомная секунда как можно меньше отличалась от прежней «астрономической» секунды, равной $\frac{1}{86\,400}$ доле суток.

Используют и производные единицы: минута равна 60 с, час — это 3600 с, а сутки — 86 400 с. Короткие интервалы времени выражают в десятичных долях секунды — миллисекундах (мс), микросекундах (мкс) и т. д. В астрономии принято обозначения часов (h), минут (m) и секунд (s) писать справа от соответствующих чисел в виде верхнего индекса прямым шрифтом, например $3^{\text{h}}40^{\text{m}}$, или $22^{\text{h}}45^{\text{m}}37^{\text{s}}$, или $11^{\text{h}}22^{\text{m}}33,444^{\text{s}}$.

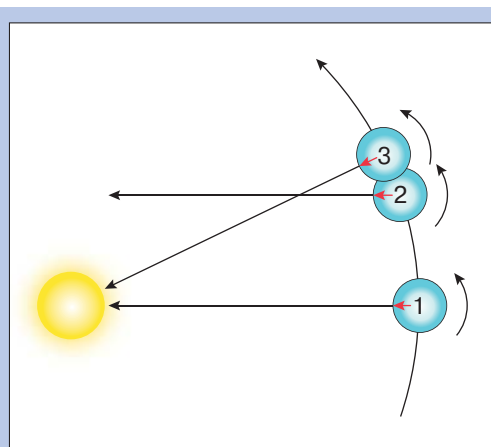


Рис. 53. Объяснение различия звёздных и солнечных суток

Названия единиц времени *сутки* и *год* связаны, конечно, с вращением Земли вокруг оси и её движением вокруг Солнца, но теперь эта связь сохраняется только в названиях. Сейчас уже нет специальных астрономических единиц измерения времени. Тем не менее, чтобы не вызывать неудобства в быту, атомное время стараются согласовывать с суточным циклом Солнца. Но с каким именно солнечным циклом? Ведь на разных географических долготах Солнце в один и тот же день восходит в разные моменты. Поэтому атомное время принято согласовывать с движением Солнца на нулевом меридиане, то есть на меридиане Гринвичской обсерватории, от которого идёт отсчёт географических долгот. Это время называется **всемирным временем** и обозначается UT (Universal Time). В компьютерных сетях часто используют и другое обозначение — GMT (Greenwich Mean Time).

Всемирное время согласует жизнь людей и работу многих приборов с вращением Земли. Случайные изменения скорости этого вращения приводят к внезапным вариациям продолжительности суток, иногда превышающим 0,001 с. Причины их остаются неизвестными.

Кроме случайных вариаций скорости вращения Земли, наблюдается и систематическое изменение: на больших интервалах времени планета неуклонно тормозит своё вращение. В последние столетия сутки увеличиваются со скоростью около 0,002 с за столетие. Причиной служит приливное влияние Луны и Солнца. Их притяжение вызывает деформацию Земли; движущиеся по телу планеты в западном направлении приливные выступы тормозят её вращение.

Как видим, всемирное время, связанное с вращением Земли, не отличается достаточной равномерностью. Очевидно, было бы очень удобно, если бы оно контролировалось и исправлялось с помощью точного атомного времени. С этой целью введено **всемирное координированное время** (Universal Coordinated Time, UTC). Его основой служит атомное время (TAI), которое периодически «обновляется» таким образом, чтобы его отсчёт был близок к всемирному времени.

Пусть, например, мы установили показания атомных часов так, чтобы всемирное и атомное время в данный момент совпадали. Приблизительно через год-два вращение Земли отстанет от атомных часов примерно на 1 с. Это явление называют *вековым замедлением*, но не потому, что данная величина накапливается именно в течение века, а лишь в том смысле, что замедление носит систематический, «вековой» характер. Чтобы учесть отставание Земли, мы подправим счётчик

атомных часов — пропустим в счёте секунд одну секунду, то есть оставим один «тик» атомных часов нумерованным. Можно повторять это действие по мере отставания Земли так, чтобы в течение года атомное время и всемирное совпадали с точностью до секунды. Для многих практических целей этого вполне достаточно и можно не различать атомное и всемирное время.

Такое «подправленное» атомное время и называется *всемирным координированным временем*. Именно оно передаётся по радио и телевидению. Именно в этой шкале времени записываются моменты астрономических наблюдений. Иногда эта шкала называется *всемирным согласованным временем*, что лучше отражает её сущность.

«Лишнюю» секунду (leap second) в счёте атомного времени разрешается пропускать (не нумеровать), если это необходимо, в начале календарных суток 1 января или 1 июля на меридиане Гринвича, то есть по всей Земле одновременно. Это означает, что от сигнала точного времени в 0 ч 31 декабря до сигнала в 0 ч 1 января проходит 86 401 с (а не 86 400 с, как обычно).

В последние десятилетия XX в. лишнюю секунду приходилось вводить довольно регулярно, приблизительно один раз в год. Но любопытно, что с начала 1999 г. до конца 2005 г. не потребовалось вводить лишнюю секунду: вращение Земли с точностью до секунды происходило в согласии с атомной шкалой времени. Лишь 1 января 2006 г. была добавлена секунда, а в следующий раз это пришлось сделать только в начале 2009 г. И вновь в течение нескольких лет подобная процедура не требовалась. Таким образом, в начале XXI в. Земля стала вращаться более стабильно.

Часовые зоны

Жить по всемирному времени удобнее всего жителям Гринвича в Англии и других мест, расположенных строго на *нулевом меридиане*. Но на других меридианах Солнце встаёт в другое время. Если бы мы жили по солнечному времени, то при переезде даже на небольшое расстояние к западу или востоку были бы вынуждены переводить свои часы на несколько минут назад или вперёд. Это неудобно. Поэтому ещё в XIX в. возникло предложение разделить всю Землю вдоль меридианов на **24 часовых пояса** и считать внутри каждого из них время одинаковым, а при пересечении границ часовых поясов переводить часы ровно на 1 ч вперёд, если движемся на восток, и переводить назад, если пере-

мещаемся на запад. Ширина каждого часового пояса по долготе равна 15° , а меридиан Гринвича ($\lambda = 0^\circ$) проходит по центру нулевого часового пояса. В целом это предложение о часовых поясах оказалось удобным, и оно было принято всеми странами, хотя каждая страна внесла в него свои дополнения.

В основном они касаются границ часовых поясов. Если такая граница делит небольшую страну (область, штат) на две территории с разным временем, то удобнее совместить часовую границу с государственной (или административной), чтобы обитатели этой небольшой страны (области, штата) жили по единому времени.

Ещё одно дополнение касается *зимнего и летнего времени*. Некоторые страны всю зимнюю половину года живут по поясному времени (поэтому его часто называют зимним временем), а весной переводят стрелки всех часов на 1 ч вперёд и живут до осени по летнему времени. Делается это для того, чтобы таким ненавязчивым способом заставить людей летом раньше просыпаться и раньше ложиться, полнее используя солнечный свет и экономя электричество. Осенью в этих странах переводят стрелки часов на 1 ч назад и возвращаются к поясному времени.

Традиция зимнего и летнего времени родилась ещё в начале XX в., но в наши дни она становится всё менее оправданной. Люди в больших городах активно живут почти круглые сутки, а большая часть электроэнергии тратится на производствах непрерывного цикла. В Российской Федерации были периоды, когда осуществлялись переходы на летнее время, но с 26 октября 2014 г. от него в очередной раз отказались. Однако во многих странах Европы и в США оно ещё используется.

Большая часть европейской территории России (рис. 54) живёт по московскому времени, которое официально на 3 ч опережает всемирное (UTC+3). Дело в том, что через территорию Москвы проходит меридиан $37,5^\circ$ в. д., являющийся границей между вторым (UTC+2) и третьим (UTC+3) географическими часовыми поясами. Вся территория России к западу от Москвы лежит во 2-м часовом поясе, поэтому Москву традиционно относили к нему. Но в 1930 г. декретом правительства во всех регионах страны часовая стрелка была переведена на 1 ч вперёд против поясного времени. Так в Москве было установлено время, соответствующее UTC+3, получившее название *московское декретное время* или просто *московское время* (MSK). Самые восточные области России на 9 ч опережают московское время. Например, время на Камчатке равно MSK+9 (UTC+12). Время, по которому живёт какой-либо конкретный регион, часто называют *гражданским временем* (см. рис. 54).



Рис. 54. Часовые зоны России. Указано различие с московским временем

Деление Земли на области с одинаковым гражданским временем выглядит сейчас чрезвычайно запутанно. Фактически это уже не часовые пояса — тонкие и длинные сегменты, ограниченные меридианами и протянувшиеся от полюса до полюса, а весьма хаотично разбросанные большие и малые области суши, гражданское время в которых порою весьма сильно отличается от среднего солнечного. Так, есть государства, где время на всей их огромной территории отсчитывается по столичным часам. Пример — Китай, протянувшийся на четыре часовых пояса, но весь живущий по пекинскому времени UTC+8.

Есть немало границ часовых зон, пересекая которые нам следует переводить часы не на 1 ч вперёд или назад, а сразу на 2 ч (такие границы есть и в современной России) и даже на 3 ч или же всего на полчаса. Действительно, есть страны, в которых время отличается от Гринвичского не на целое число часов. Например, Иран живёт по времени UTC+3:30, Афганистан UTC+4:30, Индия UTC+5:30, Центральная Австралия UTC+9:30, а Непал даже UTC+5:45. Ввиду столь сложного устройства гражданского времени на Земле ясно, что термин «часовой пояс» устарел. Стандартное английское «time zone» теперь точнее нужно переводить как «часовая зона» или «часовая область».

Существование часовых зон делает условным понятие «полдень», которое подразумевает, что в 12 ч дня Солнце достигает в направлении на юг наивысшего положения на небе, то есть кульминирует, ведь на всей территории часовой зоны часы показывают одно и то же время, а верхняя кульминация Солнца происходит в разные моменты в зависимости от долготы (λ) пункта наблюдения. Например, долгота Гринвича $\lambda_{\Gamma} = 0^\circ$, а долгота Москвы $\lambda_{\text{М}} = 37^\circ 37' 04'' = 37,6178^\circ$ в. д.

За 24 ч Земля поворачивается на 360° , а за какое время она повернётся на угол $(\lambda_{\text{М}} - \lambda_{\Gamma})$ между Москвой и Гринвичем? Очевидно, за

$$24 \text{ ч} \cdot \frac{37,6178^\circ}{360^\circ} = 2,5079 \text{ ч} \approx 2,5 \text{ ч}.$$

В момент верхней кульминации Солнца в Гринвиче будет 12 ч, а в Москве, живущей по времени 3-й часовой зоны, будет 15 ч. Но с момента кульминации Солнца в Москве прошло всего 2,5 ч, следовательно, по московскому времени она произошла в 12 ч 30 мин (секунды мы не учитываем). Таким образом, в Москве истинный полдень наступает через полчаса после полуденного боя курантов.

Нужно заметить, что мы несколько упростили картину, рассказывая о времени и видимом движении Солнца. На самом деле Земля движется по орбите неравномерно, поскольку её орбита не окружность, а эллипс. Поэтому и видимое движение Солнца по эклиптике происходит неравномерно, то немного ускоряясь, то замедляясь. Поэтому, по сравнению с воображаемым «идеальным Солнцем», реальное то опережает его, то запаздывает вплоть до четверти часа, что также влияет на моменты наступления истинного полдня.

Календарь — система летосчисления

Итак, сутки мы делим на более короткие интервалы времени с помощью часов, минут и секунд. А для более продолжительных интервалов времени существует **календарь**. Можно сказать, что календарь — система счисления промежутков времени, по продолжительности превышающих сутки. А по сути, это способ деления года на удобные интервалы времени. Слово «календарь» происходит от латинского *calendae* — календы — название первого дня каждого месяца у древних римлян. Основой календаря служит периодическое движение небесных светил, проявляющееся в периодических явлениях природы: смене дня

и ночи (сутки), смене времён года (солнечный календарь), смене фаз Луны (лунный календарь).

Разные народы в разные эпохи использовали самые разнообразные календари, и до сих пор ещё нет единого для всех общемирового календаря. Создать удобный календарь — дело непростое, поскольку нужно согласовать вращение Земли относительно направления на Солнце (сутки), обращение Земли по орбите (год) и период смены лунных фаз (месяц).

Лунный месяц — удобная единица времени, поскольку она длиннее суток, но короче года. В древности Луна привлекала всеобщий интерес как прибор для измерения времени, ибо весьма несложно наблюдать смену её фаз. Особую роль играла Луна в жарких странах арабского Востока, поскольку в период полнолуния она хорошо освещает землю, но не греет её так же жаростно, как Солнце. В эти периоды особенно интенсивной была ночная жизнь, торговля и путешествия. До сих пор в некоторых мусульманских странах и в Израиле используется *лунный* или *лунно-солнечный* календарь. Месяцы в этих календарях попеременно содержат 28 или 29 сут, чтобы соответствовать периоду смены лунных фаз, так называемому **синодическому месяцу** продолжительностью около 29,5 сут.

Год в лунном календаре, состоящем из 12 месяцев, содержит 354 или 355 сут, то есть он существенно короче того года, за который происходит смена сезонов, так называемого **тропического года** — периода между последовательными пересечениями Солнцем небесного экватора в точке *весеннего равноденствия* (365 сут 5 ч 49 мин с точностью до минуты). Чтобы год лунного календаря по средней продолжительности соответствовал тропическому году, используется лунно-солнечный календарь (таков, например, еврейский календарь, официально принятый в Израиле), в котором каждые два или три года добавляют тринадцатый лунный месяц.

В странах с умеренным климатом уже давно используется *солнечный календарь*, не связанный с фазами Луны. Его задача — выразить продолжительность тропического года в виде целого числа солнечных суток, поскольку людям нравится начинать новый год в момент начала новых суток, то есть в полночь. Первой удачной попыткой был **юлианский календарь** — древнеримский солнечный календарь, предшественник современного григорианского календаря. Он был введён с 1 января 45 г. до н. э. Юлием Цезарем (отсюда и название). В юлианском календаре три года подряд считались по 365 дней, а четвёртый, високосный, содержал 366 дней. Средняя продолжительность года получалась равной

$365\frac{1}{4}$ сут, что на 11 мин 14 с больше тропического года. Високосными считались все годы, порядковые номера которых делятся на 4, например 1996 г., 2000 г., 2004 г., 2008 г. и т. д.

Юлианский календарь полтора тысячелетия удовлетворял европейские народы. Но постепенно он стал отставать от реальной смены сезонов года. Поэтому в XVI в. был разработан новый, **григорианский календарь**, так называемый *новый стиль*. Это современный солнечный календарь, который начал вводиться с 1582 г. в результате реформы юлианского календаря (*старый стиль*), произведённой на основе буллы папы римского Григория XIII (отсюда и название).

Различие между старым и новым стилями состоит в том, что в григорианском календаре из числа високосных исключены те вековые годы (то есть годы, оканчивающиеся двумя нулями), число сотен в которых не делится на 4. Например, 1800 г., 1900 г., 2100 г. То есть из каждых четырёх вековых лет три следовало считать обычными и только те, которые делятся на 400, считать високосными (например, 2000 г.). Средняя продолжительность года при этом всего на 26,8 с больше продолжительности года тропического, что приводит к ошибке в одни сутки лишь за 3224 года, тогда как в старом, юлианском, календаре ошибка в одни сутки накапливается за 128 лет. Для устранения ошибки, накопившейся в юлианском календаре, при переходе к григорианскому календарю пропускалось 10 суток в XVI—XVII вв., 11 — в XVIII в., 12 — в XIX в. и 13 суток в XX—XXI вв.

К новому стилю разные страны переходили постепенно, в течение нескольких веков. Например, в России григорианский календарь был введён в 1918 г. Сегодня он используется в большинстве стран мира. Хотя по своей продолжительности григорианский календарь хорошо согласован с движением Земли вокруг Солнца, у него есть немало недостатков. Например, продолжительность месяцев в нём разная — от 28 до 31 дня, что усложняет экономические расчёты. Поэтому регулярно возникают предложения по реформе календаря, но пока они не получили поддержки большинства стран.



Найдите информацию о проектах всемирного календаря в энциклопедии «Википедия» (<https://ru.wikipedia.org/wiki/>).



Движение Солнца на фоне звёздного неба выглядит сравнительно просто, поскольку оно отражает монотонное обращение Земли вокруг Солнца. Видимое движение Луны тоже выглядит несложно, поскольку отражает её монотонное обращение вокруг Земли. Зато движение планет, на первый взгляд, кажется чрезвычайно запутанным. На фоне звёздного неба планеты перемещаются то с запада на восток, то, остановившись, поворачивают на запад, а затем вновь продолжают движение на восток (рис. 55). Странное **петлеобразное движение планет** вызвано тем, что вместе с Землёй они обращаются вокруг Солнца, непрерывно меняя расстояние и скорость относительно Земли, то опережая Землю, то отставая от неё (рис. 56). К тому же орбитальные плоскости планет, хотя и близки к плоскости земной орбиты (то есть к эклиптике), всё же наклонены к ней на небольшие углы, что ещё сильнее усложняет их видимое движение.

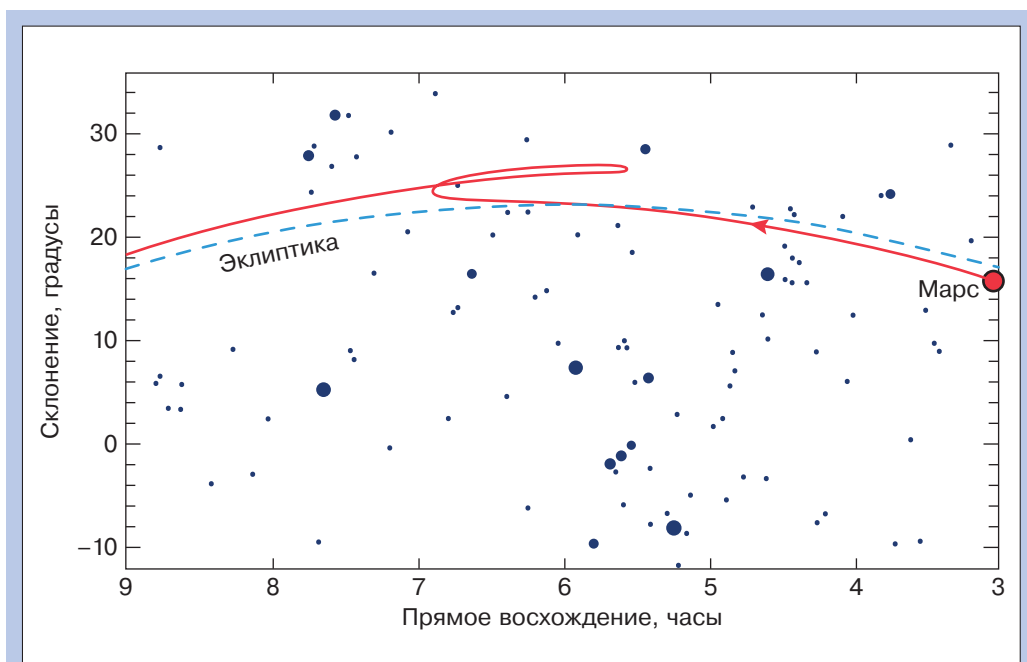
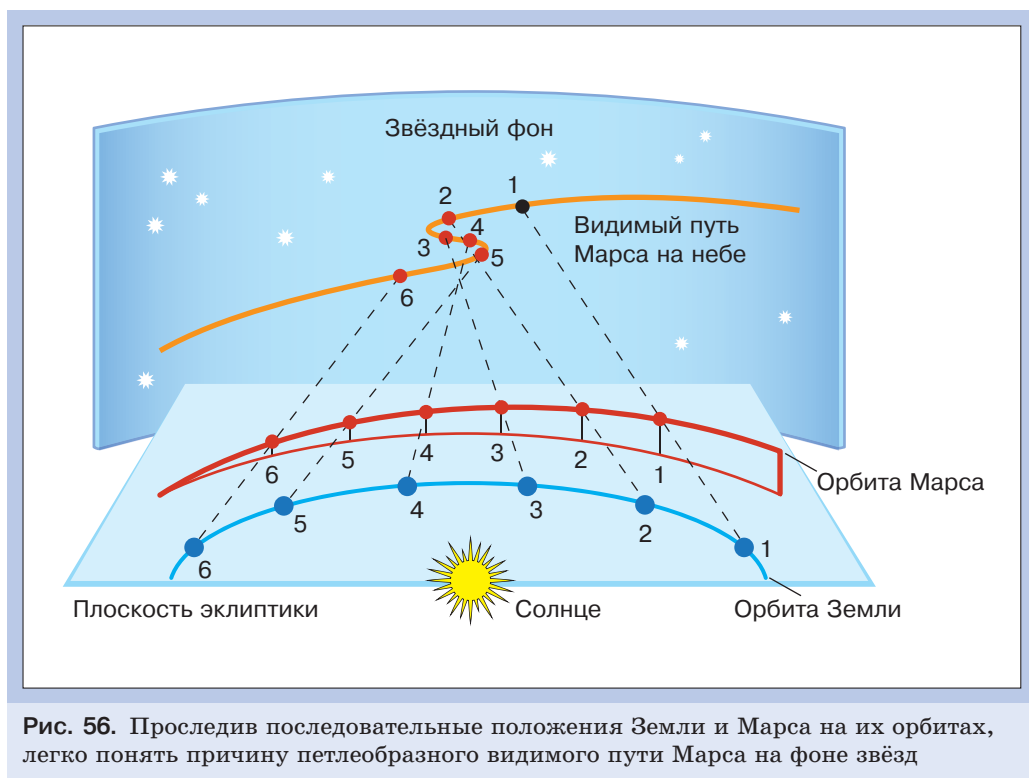


Рис. 55. Движение Марса по небу с июля 2007 г. по июнь 2008 г.



Планеты, расположенные от Солнца дальше Земли, так называемые **внешние планеты**, то есть Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, движутся по своим протяжённым орбитам медленнее Земли. Поэтому Земля регулярно догоняет и опережает их, что и создаёт иллюзию петлеобразных видимых траекторий этих планет (см. рис. 56). «Петля» на траектории планеты возникает в период её **противостояния**, когда планета видна с Земли в направлении, противоположном Солнцу (рис. 57).

Угловое расстояние планеты от Солнца для земного наблюдателя называется *элонгацией*. У внутренних планет элонгация не может быть больше 90° , а у внешних планет может иметь любое значение (рис. 58).

Внутренние планеты Меркурий и Венера, с точки зрения земного наблюдателя, никогда далеко не удаляются от Солнца, поэтому их трудно изучать в телескоп. Особенно это касается Меркурия — ближайшей к Солнцу планеты. Наибольшая элонгация Меркурия лежит в пределах от 18° до 28° (поскольку его орбита весьма эллиптическая), а Венеры — от 47° до 48° (рис. 59).

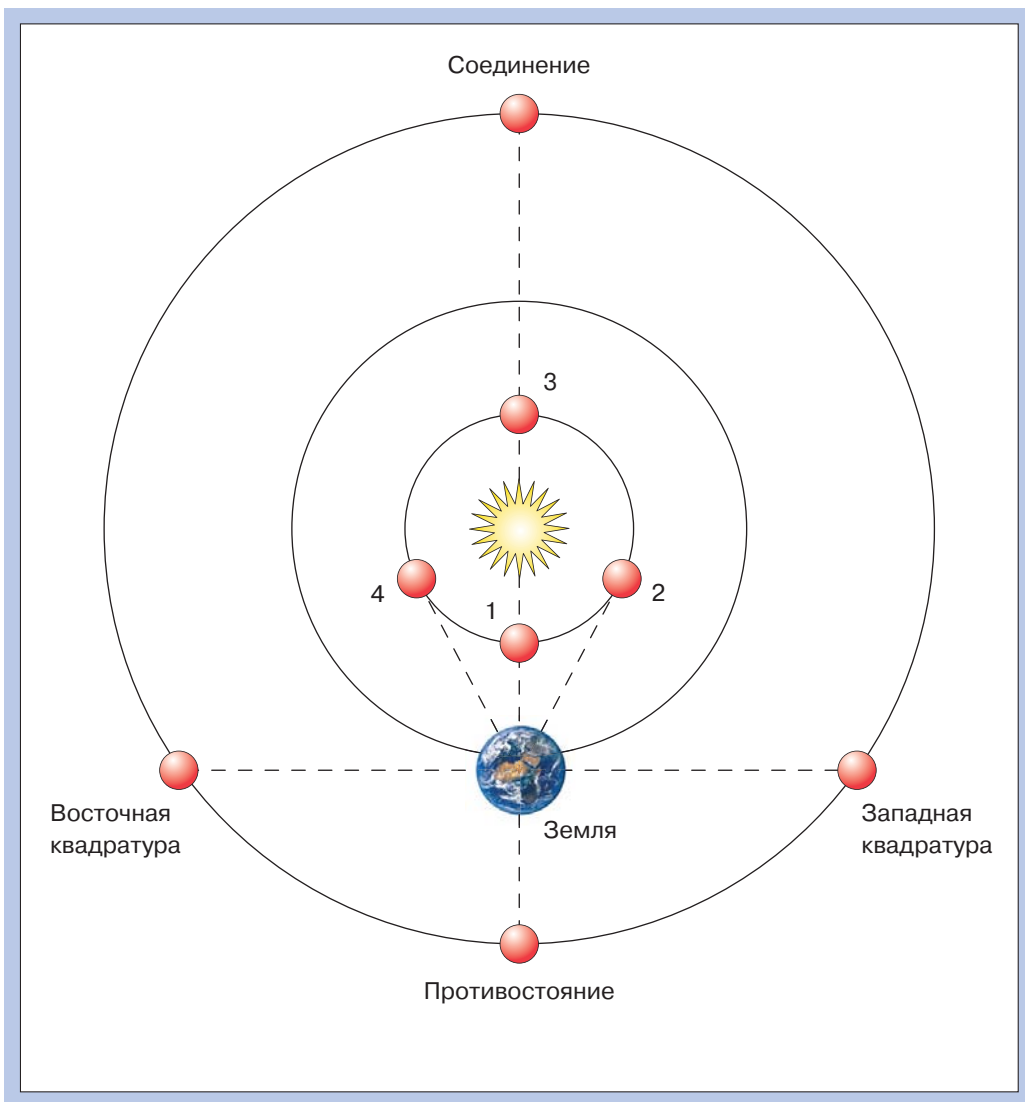


Рис. 57. Конфигурации планет относительно направления от Земли к Солнцу

Конфигурации внешних планет указаны на рисунке. Квадратурой называют элонгацию, равную 90° . Конфигурации внутренних планет: 1 — нижнее соединение; 2 — наибольшая западная элонгация; 3 — верхнее соединение; 4 — наибольшая восточная элонгация.

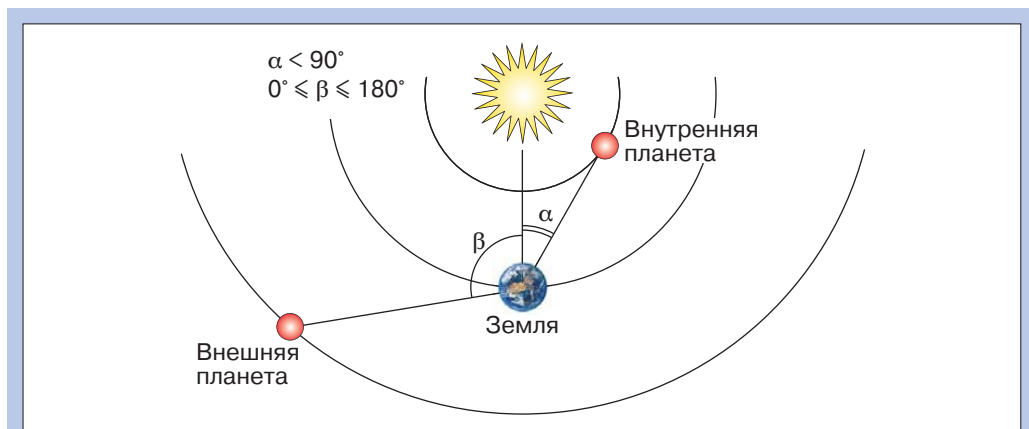


Рис. 58. Элонгация у внешних и внутренних планет

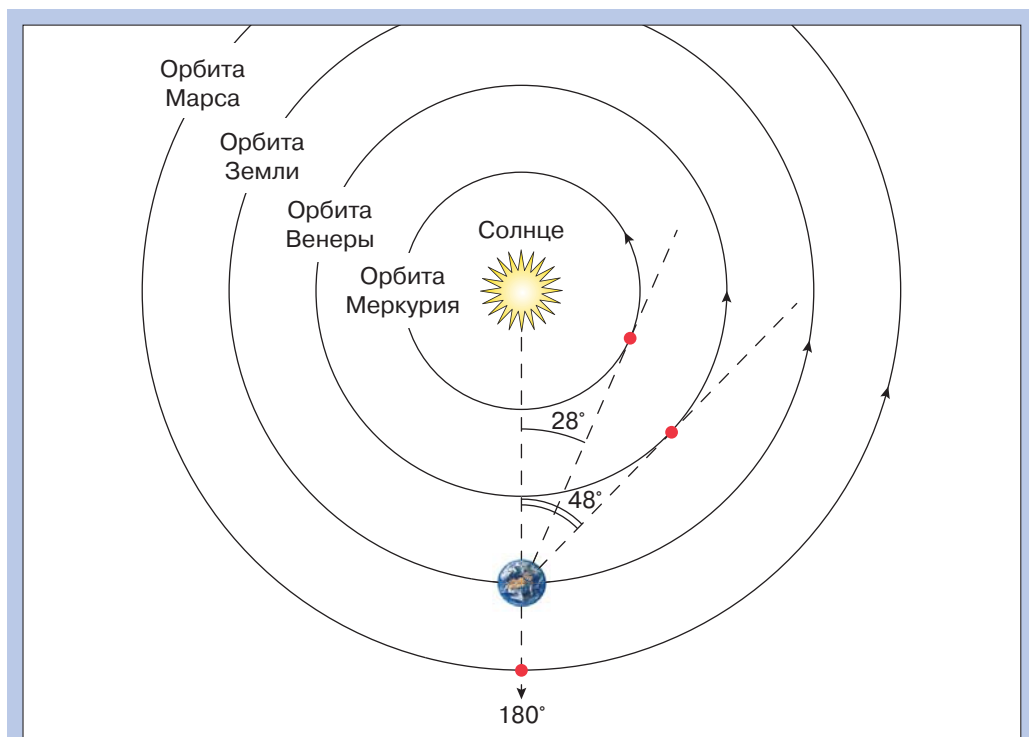


Рис. 59. Наибольшая элонгация Меркурия и Венеры

Каждое небесное тело, освещённое Солнцем, в том числе Земля, отбрасывает в пространство сужающийся конус тени и расширяющийся конус *полутени*. **Тень** — это область пространства, попадая в которую наблюдатель не видит поверхность Солнца; в области полутени он видит часть поверхности Солнца. В соответствии с этим **лунные затмения** делят на **теновые** и **полутеновые**. В первом случае хотя бы часть лунного диска проходит через область земной тени, во втором случае — через область полутени. В обоих случаях затмение может быть **полным** или **частным**, в зависимости от того, полный диск Луны скрывается в земной тени/полутени или только его часть.

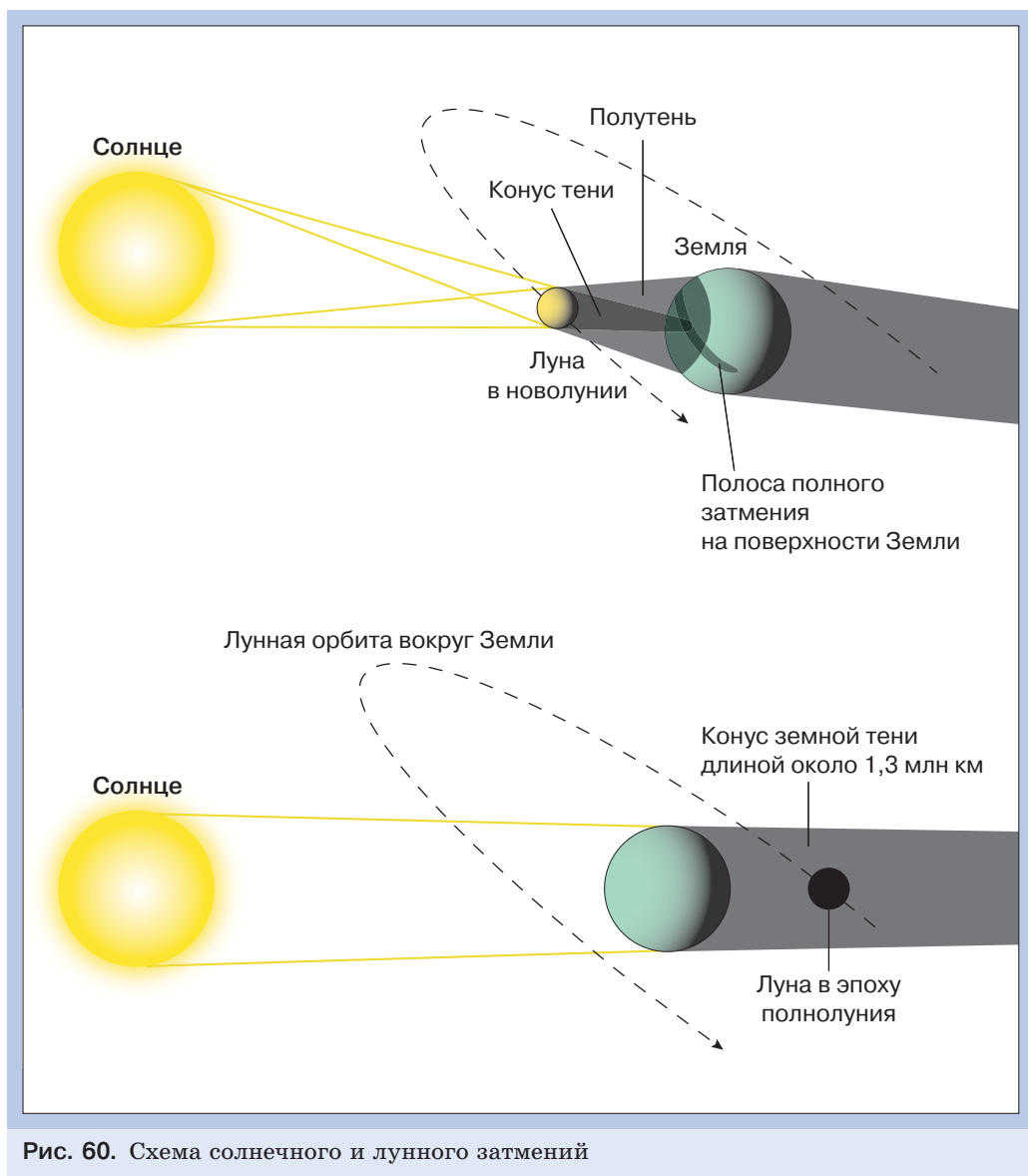
То же и с Солнцем: если наблюдатель попадает в тень Луны, он видит **полное солнечное затмение**, если в полутень — **частное**. Полное затмение Солнца не заметить нельзя: днём на несколько минут наступают почти ночная темнота. Но неглубокое частное затмение Солнца, если заранее о нём не знать, вполне можно и не заметить. То же и с лунными затмениями: теновое затмение Луны выглядит эффектно, а полутеновое — почти незаметно.

Принципиальная разница между солнечным и лунным затмениями состоит в том, что лунная тень покрывает малую часть земной поверхности, а земная тень полностью скрывает Луну от прямых солнечных лучей (рис. 60). Земная полутень на рисунке не показана: она почти незаметно ослабляет яркость Луны.

Длительность лунного затмения (рис. 61) зависит от того, насколько глубоко в земную тень проникает Луна. Самые длительные затмения — центральные, когда Луна проходит через центр земной тени. При этом полное теновое затмение продолжается около 2 ч.

Казалось бы, Луна должна попадать в тень Земли каждый месяц в момент *полнолуния*. Это было бы так, если бы плоскости лунной и земной орбит совпадали, но они не совпадают. Плоскость орбиты Луны примерно на 5° наклонена к эклиптике. Центр земной тени лежит на эклиптике, а угловой радиус этой тени для наблюдателя на Земле составляет около $0,7^\circ$. Угловой радиус лунного диска около $0,25^\circ$. Следовательно, если Луна удаляется от эклиптики более чем на 1° , она не попадает в тень Земли. Именно поэтому Луна чаще проходит мимо земной тени, чем попадает в неё.

Затмения как Луны, так и Солнца происходят лишь в те моменты, когда Луна проходит вблизи **узлов** своей **орбиты**, то есть пересечений её



орбитальной плоскости с плоскостью эклиптики (в которой всегда находится Солнце). Вблизи узлов Луна проходит дважды в месяц, но для затмения нужно, чтобы в эти же моменты и Солнце тоже оказалось вблизи одного из узлов: если вблизи того же узла, где Луна, то наблюдается сол-

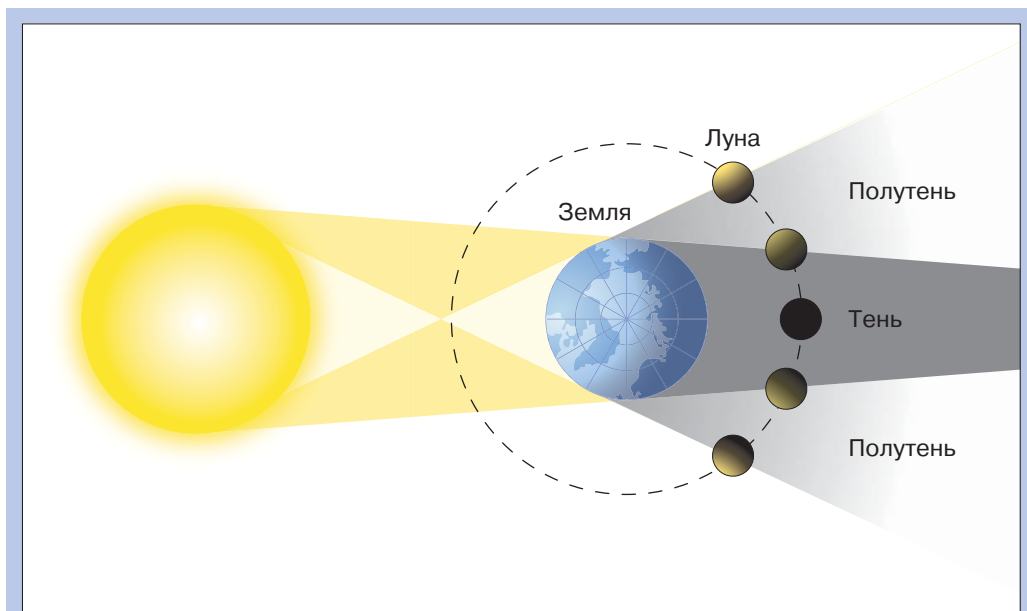


Рис. 61. Схема лунного затмения

нечное затмение, а если противоположного, то лунное. Происходит это не так уж и часто. Например, максимальное количество лунных затмений всех типов за год всего лишь четыре (например, столько их приходится на 2020 и 2038 гг.), минимальное — два.

Солнечные затмения происходят приблизительно с такой же частотой, однако шанс увидеть полное лунное затмение намного выше, чем полное солнечное. Дело в том, что при наличии ясного неба лунное затмение видят все жители ночного полушария Земли, а солнечное — только те жители дневного полушария, кому посчастливилось попасть в узкую **полосу полной фазы солнечного затмения**, по которой пробегает маленькая (250—270 км в диаметре) лунная тень. Если жить на одном месте, то на ожидание полного солнечного затмения уйдёт около 300 лет. Поэтому научные экспедиции и просто любознательные люди отправляются туда, где ожидается прохождение лунной тени в день полного солнечного затмения (рис. 62). Обстоятельства солнечных и лунных затмений астрономы вычисляют очень точно на много лет вперёд, используя законы небесной механики. Поэтому заранее можно подготовиться к наблюдению лунного затмения или наметить поездку в район полного солнечного затмения.



Рис. 62. Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. Снимок получен на Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН. На горизонте — Эльбрус

Основные выводы

- Относительное положение звёзд на небе можно считать неизменным. Поэтому, чтобы легче было ориентироваться на небе, с древних времён группы звёзд стали условно объединять в **созвездия**. Появились карты звёздного неба, несущие информацию о **координатах** звёзд и их видимой яркости.
- Видимые движения Солнца, Луны и планет имеют сложный характер, поскольку мы их наблюдаем не с неподвижной Земли, а с вращающегося вокруг оси и обращающегося вокруг Солнца земного шара.
- Для удобства описания видимых движений небесных тел используются такие понятия, как **небесная сфера**, в центре которой условно находится наблюдатель, и большие круги на ней: **горизонт**, **небесный экватор** и **эклиптика**. Вдоль эклиптики движется Солнце, делая один оборот в течение года, что является отражением обращения Земли вокруг Солнца.
- *Высота*, на которую поднимаются звёзды над горизонтом, зависит от их расстояния от небесного экватора и от *географической широты* места наблюдения. Поэтому вид звёздного неба и характер суточного движения звёзд зависит не только от времени года, но и от широты.
- Единицы времени год и сутки связаны с видимым движением Солнца. Современная **система календарного счёта** времени также основана на *астрономических наблюдениях*.
- Когда Луна, Земля и Солнце оказываются примерно на одной прямой линии, наблюдаются **солнечные** и **лунные затмения**.

Задания и упражнения

1. **Ответьте на вопросы.**
 - 1) Что характеризует звёздная величина звёзд?
 - 2) На сколько созвездий разделено небо?
 - 3) Какая точка на небесной сфере называется зенитом?
 - 4) Что такое эклиптика?
 - 5) Как движутся звёзды и Солнце над горизонтом, если наблюдать их:
а) с Северного полюса; б) с Южного полюса; в) с экватора?
 - 6) Как найти на небе положение полюса мира?
 - 7) Что такое зодиакальные созвездия?
 - 8) Что такое точки осеннего и весеннего равноденствий?
 - 9) Как меняется вид ночного неба в течение года?
 - 10) Почему цикл смены лунных фаз немного не совпадает с периодом обращения Луны вокруг Земли?

- 11) Расположите планеты Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун в порядке роста скорости их перемещения на звёздном небе.
- 12) Сколько полных оборотов вокруг оси делает Земля за год?
- 13) Что такое всемирное время?
- 14) Почему солнечные затмения наблюдаются в любом месте Земли значительно реже, чем лунные?
- 15) Почему солнечные и лунные затмения повторяются не каждый месяц?

2. Решите задачи.

- 1) Какую звёздную величину имеет звезда, которая по видимой яркости в миллион раз слабее звезды первой звёздной величины?
- 2) Зная, что видимое движение Солнца происходит в полосе $\pm 23,4^\circ$ от небесного экватора, определите для широты вашего места жительства, на какую максимальную и минимальную высоту поднимается Солнце над горизонтом в полдень. В какие дни это бывает?
- 3) На сколько градусов высота Полярной звезды над горизонтом различается для наблюдателей в Санкт-Петербурге (географическая широта 60°) и в Москве (широта 56°)?

3

глава

Движение космических тел под действием сил гравитации

13

Геоцентрическая
система мира

14

Система
Коперника

15

Движение планет
вокруг Солнца.
Законы Кеплера

16

Закон всемирного
тяготения

17

Орбиты
космических тел

18

Небесная механика
и орбиты космических
аппаратов



Переход от геоцентрической системы к гелиоцентрической, начавшийся в XVI в., позволил не только верно объяснить наблюдаемые движения Солнца и планет, но и найти объяснения этим движениям, происходящим под действием гравитационных сил притяжения к Солнцу.

В древности некоторые учёные, например Аристарх Самосский, подозревали, что сложные видимые перемещения планет на фоне звёзд отражают не только их собственное движение в пространстве, но и движение самой Земли вокруг Солнца. Но в ту эпоху ещё не было надёжных доказательств движения Земли. Поэтому общепринятой была **геоцентрическая система мира**, развитая греческими философами **Пифагором** (VI в. до н. э.), **Аристотелем** (IV в. до н. э.) и их последователями.

Согласно взглядам приверженцев геоцентрической системы, шарообразная Земля не вращается вокруг оси и неподвижно находится в центре мира, а все небесные тела, включая звёзды, обращаются вокруг неё. Действительно, наш повседневный опыт говорит нам о неподвижности Земли, а научных наблюдений, надёжно доказывающих вращение Земли и её обращение вокруг Солнца, в эпоху Аристотеля ещё не было.

Авторитет Аристотеля в древнем мире был так велик, что уверенность в геоцентрической системе сохранялась многие века, вплоть до эпохи Возрождения, то есть до конца XV столетия. Однако и во времена Аристотеля, и позже учёные стремились описать видимое движение светил в математической форме, чтобы иметь возможность его прогнозировать. Вся грандиозная картина звёздного неба движется идеально равномерно (поскольку Земля вращается равномерно), поэтому прогнозировать её легко. А вот планеты на фоне звёзд блуждают, иногда на какое-то время меняя направление движения на обратное. При этом считалось, что все небесные тела могут двигаться только равномерно и по «идеальным» кривым, то есть по окружностям.

Чтобы согласовать эти предпосылки с наблюдениями и научиться вычислять положение планет среди звёзд, была создана математическая

теория на основе простой механической модели: планета равномерно обращается по малой окружности — **эпициклу**, центр которой движется вокруг Земли по большой окружности — **деференту**. Складывая два равномерных круговых движения, получаем, с точки зрения земного наблюдателя, петлеобразную траекторию планеты. Простая и красивая идея!

Окончательный вид этой теории придал во II в. н. э. греческий математик, астроном и географ **Клавдий Птолемей**. Он довёл эту модель до великолепного состояния (рис. 63). Птолемей понимал, что видимое движение планет значительно сложнее, чем можно изобразить с помощью одного эпицикла, «насаженного» на деферент. Значит, этот небесный механизм нужно было усложнить. На первый эпицикл Птолемей «посадил» второй эпицикл с иным периодом, размером и наклоном; на него — третий и т. д. Получилась довольно замысловатая система, похожая на часовой механизм с многочисленными шестерёнками, позволявшая с помощью элементарных вычислений объяснить видимое движение планет.

С помощью математического приёма — **разложения сложного движения на несколько гармонических составляющих** — можно объяснить сложный характер движения Луны и планет с переменной скоростью.

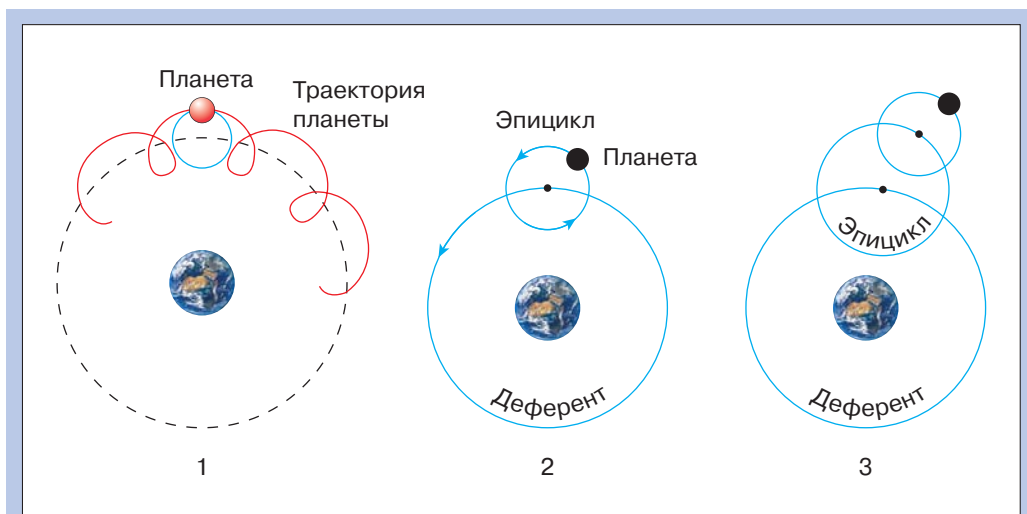


Рис. 63. Система эпициклов по Птолемею: 1 — понятное движение планеты позволяет смоделировать один эпицикл; 2 — простая модель с одним эпициклом; 3 — более сложная модель с двумя эпициклами

Птолемей не знал современной математики, но он интуитивно и совершенно верно понял, что сложное движение планет можно представить в виде серии равномерных круговых движений (рис. 64). Эту теорию он изложил в книге «Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати томах». Математической теорией Птолемея учёные пользовались полторы тысячи лет, постоянно уточняя её для соответствия вычисленного положения планет наблюдаемому.

➔ Более подробную информацию об «Альмагесте» Птолемея вы найдёте на сайте <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1178345&s=>.

■ В переводе с древнегреческого на русский «Альмагест» Птолемея впервые был издан в Москве в 1998 г. Каждый, кто отважится взять в руки эту книгу и прочитать первые десятки её страниц (а всего вместе с комментариями их более 650), проникнется глубоким уважением к знаниям и научной любознательности наших далёких предков.



Рис. 64. Геоцентрическая система мира Птолемея

Уже сам Птолемей заметил расхождение своей теории равномерных круговых движений с наблюдениями и для улучшения теории использовал понятие **экванта**, или уравнивающей точки. Предполагается, что движение центра эпицикла планеты выглядит равномерным при наблюдении не из центра деферента, а из точки экванта, которая смещена относительно него. Земля также находится не в центре деферента, а смещена в противоположную сторону симметрично экванту. При этом для земного наблюдателя эпицикл планеты будет двигаться неравномерно, что лучше отражает видимое движение планеты. Таким образом, уже в эпоху Птолемея геоцентрическая система мира в своём математическом аппарате стала не совсем ГЕОцентрической, хотя в ней Земля по-прежнему считалась неподвижной.

Геоцентрическая система господствовала в науке вплоть до эпохи Возрождения, поскольку сама идея движения Земли в пространстве оказалась очень трудной для восприятия людей, не замечающих этого движения в обычных земных явлениях. К тому же и в Библии Земля предстаёт как центр мира, созданного Богом.

14

Система Коперника

В эпоху Возрождения в астрономии произошла первая революция. Она связана с именем великого польского учёного **Николая Коперника**. Он глубоко изучил труд Птолемея и сам много наблюдал движение Солнца и планет. В результате работы, занявшей почти всю его жизнь, Коперник пришёл к выводу, что система мира Птолемея неверна. В центре мира находится Солнце, а не Земля, и вокруг него обращаются все планеты вместе с Землёй.

Гелиоцентрическая система Коперника (рис. 65) легко объясняла, почему *Меркурий* и *Венера*, которые ближе к Солнцу, чем Земля, в своём видимом движении никогда не удаляются от Солнца дальше определённых угловых расстояний, а остальные планеты описывают на небе петлеобразные пути. Угловой размер петель попятного движения планет позволил Копернику верно оценить относительный размер планетных орбит (рис. 66), поскольку для удалённых планет размер петли есть не что иное, как параллактическое смещение, вызванное движением Земли по орбите.

Теория Коперника не была полностью свободна от недостатков птолемеевой системы. Не зная ещё истинных путей планет и считая их окружностями, Коперник был вынужден сохранить эпициклы и deferенты для объяснения неравномерности движений. Однако он значительно упростил расчёты, выбросив в описании движения каждой планеты первый и самый важный эпицикл, связанный с движением самой Земли по орбите. К тому же в системе Коперника Земля приобрела *суточное вращение*.

Свою теорию в конце жизни Коперник опубликовал в книге «О вращении небесных сфер» (рис. 67).

Само её название говорит о том, что Коперник не смог отказаться от идеи равномерных круговых движений. К тому же, стремясь согласовать свою систему с наблюдаемым движением планет, он был вынужден сделать её не совсем ГЕЛИОцентрической, поскольку центр всех планетных

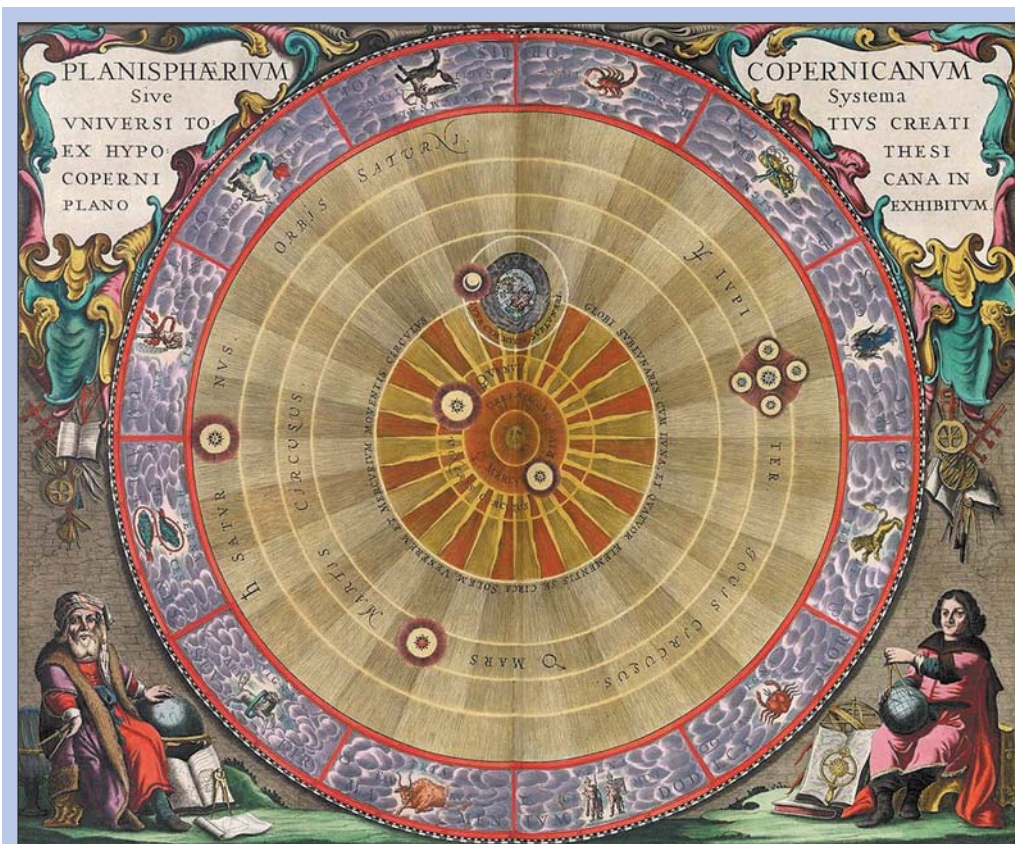


Рис. 65. Гелиоцентрическая система мира

орбит совпадал у него не с Солнцем, а с центром земной орбиты, который находился на небольшом расстоянии от Солнца. Тем не менее работа Коперника стала революционной, поскольку с неё начался поворот к современной науке.

Многие просвещённые современники оценили труд Коперника и стали сторонниками новой системы мира. Среди них особенно хорошо известно имя итальянского философа **Джордано Бруно**. Если Коперник низвёл Землю до уровня рядовой планеты, то Бруно выступал со смелым утверждением, что Солнце — рядовая звезда и что Вселенная не ограничена «сферой неподвижных звёзд», а безгранична. Развивая учение Коперника, Бруно с огромным энтузиазмом и убеждённостью говорил о бесконечности Вселенной и бесчисленности планет в глубинах космоса.

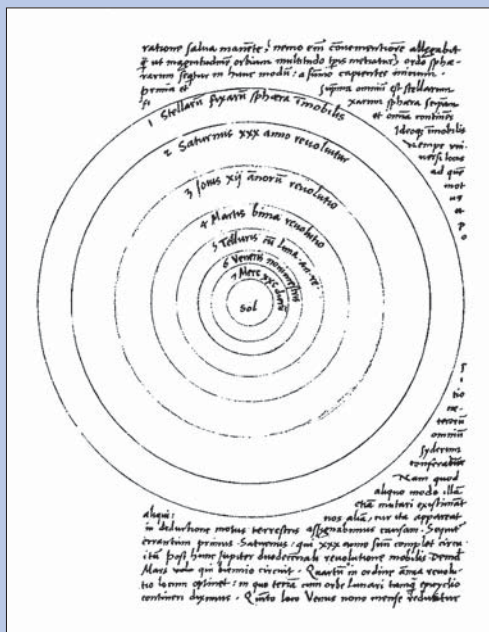
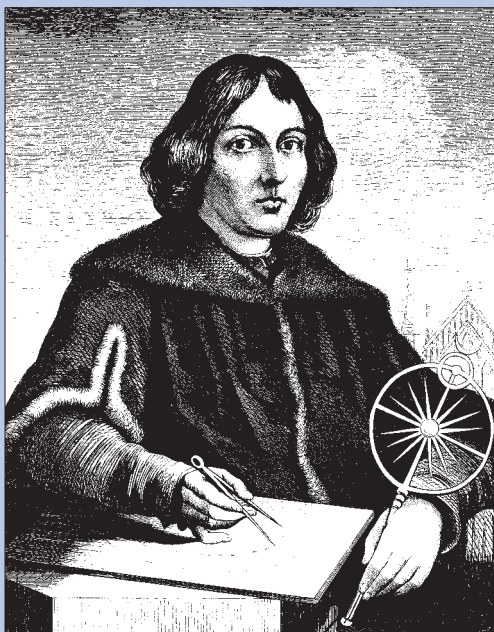


Рис. 67. Н. Коперник (1473—1543) и страница из рукописи его книги «О вращении небесных сфер» с изображением гелиоцентрической системы

15

Движение планет вокруг Солнца. Законы Кеплера

Таблицы движения планет, составленные Коперником на основе его гелиоцентрической системы, сначала удовлетворяли своей точностью, но с годами стали всё больше расходиться с наблюдениями. А качество самих астрономических наблюдений с годами лишь возрастало. Наибольшей точности измерения углов на небе, возможной при наблюдении без применения телескопа, достиг в конце XVI в. датский астроном **Тихо Браге**. Ошибки измеренных им координат планет не превышали 2 мин дуги, что близко к пределу разрешающей способности человеческого зрения. Такой угловой размер будет иметь точка в конце этого предложения, если вы отодвинете страницу от лица на расстояние вытянутой руки.

За многие годы тщательных наблюдений планет Тихо Браге накопил большой массив данных, но сам не смог на их основе построить новую теорию движения планет, более точную, чем у его предшественников. Поэтому для обработки своих наблюдений он пригласил немецкого математика **Иоганна Кеплера**, убеждённого сторонника системы мира Коперника. Основываясь на *гелиоцентрической системе*, Кеплер выполнил огромное число расчётов относительных расстояний от Солнца до Земли и Марса. Для этого он впервые рассчитал таблицы *тригонометрических функций*. Основываясь на полученных значениях относительных расстояний, Кеплер смог вычертить орбиты Земли и Марса вокруг Солнца и стал подбирать различные математические кривые, наилучшим образом соответствующие этим *траекториям*. В конце концов, испробовав разные кривые, он нашёл, что **планеты движутся вокруг Солнца не по окружностям, как принимал Коперник, а по эллипсам** (рис. 68).

Эллипс — плоская замкнутая кривая, у которой неизменна сумма расстояний от любой её точки (M) до двух особых внутренних точек, называемых **фокусами** (F_1 и F_2). Отрезок прямой, соединяющий наиболее удалённые друг от друга точки эллипса (A и B), называется его **большой осью**. Перпендикулярный отрезок CD называется **малой осью**. Отрезки AO и CO — полуоси. Фокусы лежат на большой оси симметрично относительно центра эллипса (O).

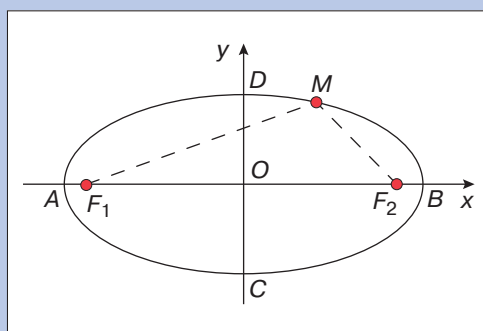


Рис. 68. Эллипс

Почти 20 лет потратил Кеплер на обработку наблюдений Марса, выполненных Тихо Браге. В итоге он установил **три эмпирических закона** движения планет:

1) каждая планета движется вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце (рис. 69);

2) отрезок прямой между планетой и Солнцем «заметает» площади, пропорциональные времени (то есть покрывает равные площади за равные промежутки времени). Тем самым Кеплер объяснил неравномерность движения планеты по орбите: приближаясь к Солнцу, она движется быстрее, а удаляясь — медленнее (см. рис. 69);

3) квадраты времён обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца, а среднее расстояние планеты от Солнца равно половине длины большой оси эллиптической

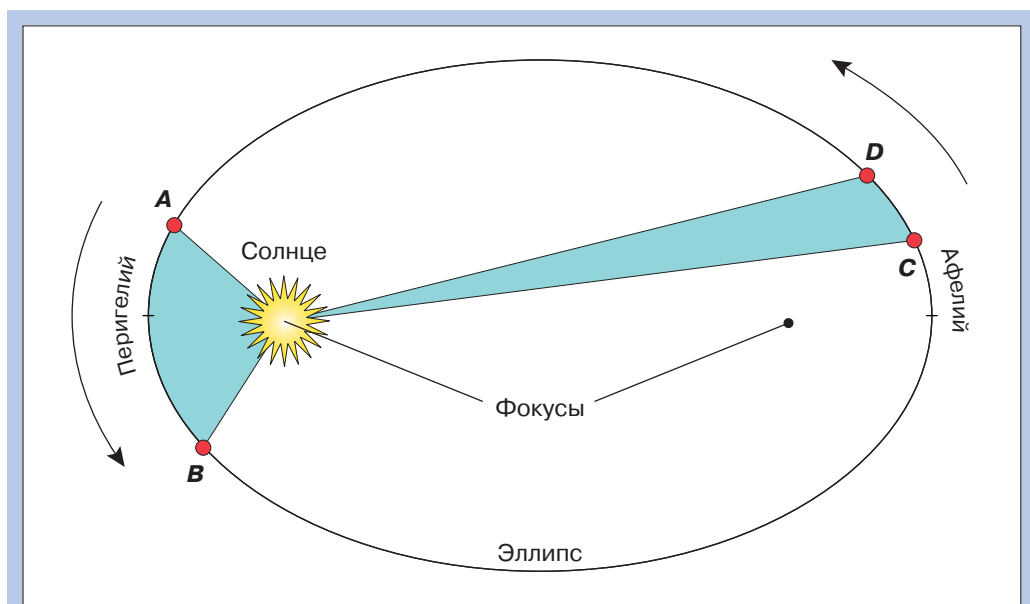


Рис. 69. Первый и второй законы Кеплера. Солнце находится в фокусе эллиптической орбиты. Дуги AB и CD планета проходит за одинаковое время

орбиты. Таким образом, если T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет, а A_1 и A_2 — средние расстояния от Солнца, то $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{A_1^3}{A_2^3}$.

Первые два закона, как показал Кеплер, справедливы и для движения Луны вокруг Земли. Спустя более чем полвека эмпирические закономерности, выведенные Кеплером из наблюдений планет, помогли Исааку Ньютону сформулировать основные законы механики и ввести в науку представление о гравитационном взаимодействии тел.

16 Закон всемирного тяготения

Представление о том, что планеты движутся вокруг Солнца из-за того, что оно их притягивает, возникло задолго до Ньютона. Об этом догадывался ещё Кеплер. Однако он полагал, что сила притяжения между телами убывает обратно пропорционально первой степени расстояния между ними. Опираясь на законы Кеплера, английские физики Роберт Гук и Исаак Ньютон поняли, что сила гравитационного притяже-

ния убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. Позже Ньютон доказал универсальность закона тяготения для всех тел в природе, как для земных, так и для небесных, показав, что сила, определяющая вес тел на Земле, и сила притяжения Луны к Земле имеют единую природу. На основе этого закона удалось объяснить наблюдаемые движения Луны и планет. Дальнейшие астрономические наблюдения показали, что закон тяготения Ньютона действует и в других звёздных системах. Так на основе астрономических наблюдений был сформулирован и доказан закон всемирного тяготения.

■ Если M_1 и M_2 — массы тел, а r — расстояние между их центрами, то закон всемирного тяготения записывается в виде $F = \frac{GM_1 M_2}{r^2}$, где $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ и называется **гравитационной постоянной**.

Эта формула является точной лишь для частиц, имеющих исчезающе малые размеры по сравнению с расстоянием между ними. Однако она строго справедлива и для тел конечного размера, внутри которых вещество распределено сферически симметрично. Для астрономических объектов эти условия почти всегда выполняются с большой точностью, что и позволило Ньютону найти правильное выражение для силы гравитационного взаимодействия и затем доказать, что из сформулированных им законов механики и закона всемирного тяготения вытекают все три закона Кеплера.

Законы механики и закон всемирного тяготения Ньютона позволили строго математически рассчитывать *траектории* тел, движущихся под действием гравитации.

Рассмотрим, как движутся под действием взаимного тяготения два тела с массами M и m (назовём их телами M и m). Эту задачу называют задачей двух тел. Ускорение a_m тела m вызвано силой притяжения со стороны тела M , то есть $F = \frac{GMm}{r^2} = ma_m$.

$$\text{Следовательно, } a_m = \frac{GM}{r^2}.$$

По третьему закону Ньютона тело m действует на тело M с той же силой, сообщая ему ускорение $a_M = \frac{Gm}{r^2}$.

Таким образом, отношение ускорений обратно пропорционально отношению масс этих тел $\left(\frac{a_m}{a_M} = \frac{M}{m}\right)$, и если одно из тел намного массивнее другого, то его ускорение будет незначительным и им можно пренебречь.

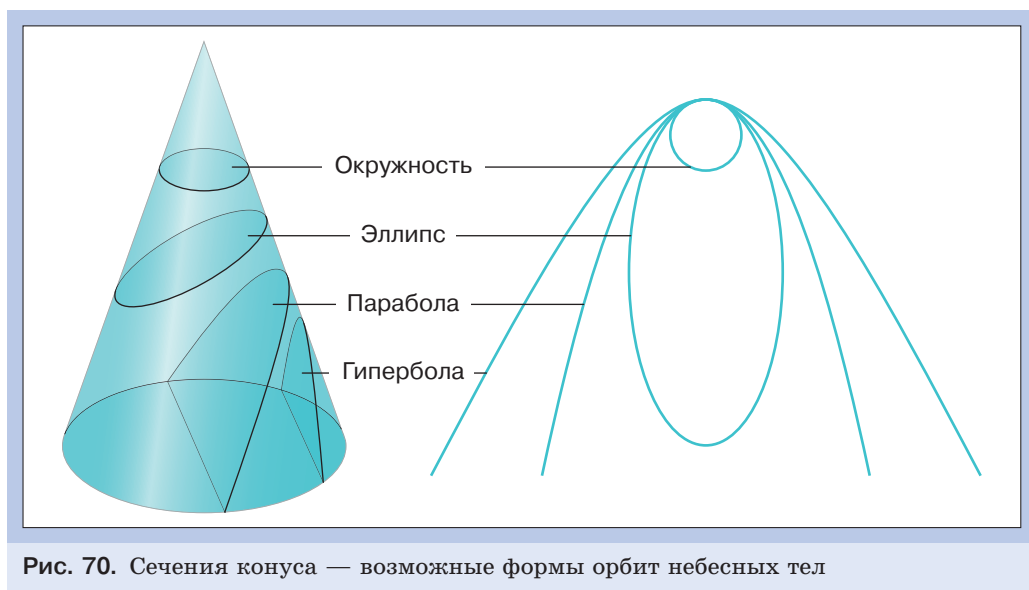


Рис. 70. Сечения конуса — возможные формы орбит небесных тел

Например, если M — это Солнце, а m — планета Солнечной системы, то $\frac{M}{m} > 1000$ и Солнце можно считать неподвижным (или движущимся равномерно, что с точки зрения *принципа инерции* Галилея одно и то же), а планету считать обращающейся вокруг неподвижного центра тяготения.

■ Ньютон математически доказал, что под действием *тяготения* тело m может двигаться относительно тела M по кривым трёх типов: **эллипс**, **парабола** или **гипербола**. Окружность является частным случаем эллипса.

Формы этих кривых можно получить сечением конуса плоскостью, поэтому их принято называть **коническими сечениями**. Эллипс получается при пересечении конуса плоскостью, при котором линия пересечения оказывается замкнутой (рис. 70). При пересечении плоскостью, параллельной какой-либо образующей конуса, получается незамкнутая кривая — парабола. При пересечении конуса плоскостью под ещё большим углом к его основанию тоже получается незамкнутая кривая — гипербола.

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

■ Под действием силы тяготения со стороны точечного или сферического тела всякое другое тело движется по одному из конических сечений,

то есть по одной из трёх кривых: эллипсу, параболе или гиперболе. Притягивающее тело всегда находится в соответствующем фокусе кривой.

Окружность — это частный случай эллипса, когда оба фокуса совпадают с центром кривой, а парабола — это «пограничная» кривая между эллипсами и гиперболами. Даже падение одного тела на другое по прямой линии тоже можно представить как движение по предельно сжатому эллипсу, у которого фокусы расположены на концах большой оси. Заметьте: прямая линия — это тоже коническое сечение, возникающее в предельном случае, когда секущая плоскость касается конуса по его образующей. Таким образом, движение тела относительно притягивающего по закону всемирного тяготения центра в общем случае происходит либо по замкнутой кривой (эллипс), либо по разомкнутой кривой (гипербола).

17 Орбиты космических тел

С точки зрения математики самый простой случай — это круговое движение. Пусть тело массы $m \ll M$ движется с линейной скоростью v_k вокруг тела M по окружности радиуса r_k (рис. 71). Это возможно только в том случае, если вектор скорости тела m в каждой точке орбиты перпендикулярен направлению на тело M и если движение происходит под действием силы, создающей центростремительное ускорение

$a = \frac{v_k^2}{r_k}$. Единственная сила, создающая ускорение, — **сила тяготения**, равная $\frac{GMm}{r_k^2}$. Приравни-

вая $\frac{v_k^2}{r_k}$ к ускорению $\frac{GM}{r_k^2}$, создаваемому тяготением, получаем:

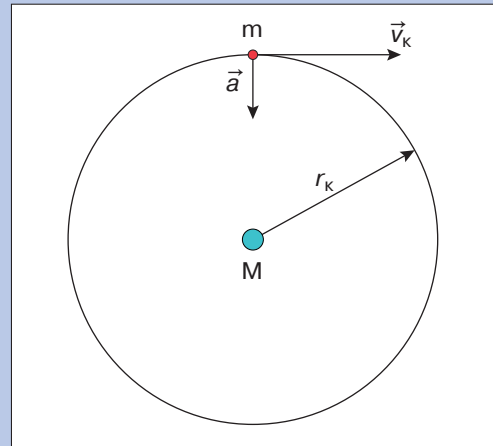
$$v_k^2 = \frac{GM}{r_k}.$$


Рис. 71. Схема кругового движения тела

■ Вывод: круговое движение возможно при строго определённом направлении скорости движения и её значении, зависящем от радиуса орбиты и массы центрального тела.

Если нужно искусственный спутник Земли (ИСЗ) вывести на круговую орбиту, то ему необходимо сообщить на орбите именно эту скорость, направив её строго перпендикулярно радиусу орбиты. Чем дальше от Земли движется спутник, тем меньше его скорость.

Скорость, которую должен иметь спутник для движения по круговой орбите, радиус которой равен радиусу Земли, называется **первой космической скоростью**:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3}} = 7,9 \text{ км/с, где}$$

M_3 и R_3 — масса и радиус Земли. Запущенный с меньшей скоростью, спутник будет двигаться по эллиптической орбите внутри круговой и, скорее всего, врежется в Землю. Запущенный с большей скоростью, спутник тоже будет двигаться по эллиптической орбите, но уже за пределом круговой, касаясь её в точке запуска (рис. 72).

Однако эллиптическое движение возможно только при значениях v_0 , меньших некоторого предела, называемого **параболической скоростью**, значение которой равно

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{2GM}{r_k}} = \sqrt{2}v_k.$$

Если запуск происходит вблизи поверхности Земли, эту скорость называют **второй космической скоростью**:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_3}{R_3}} = \sqrt{2}v_1 = 11,2 \text{ км/с.}$$

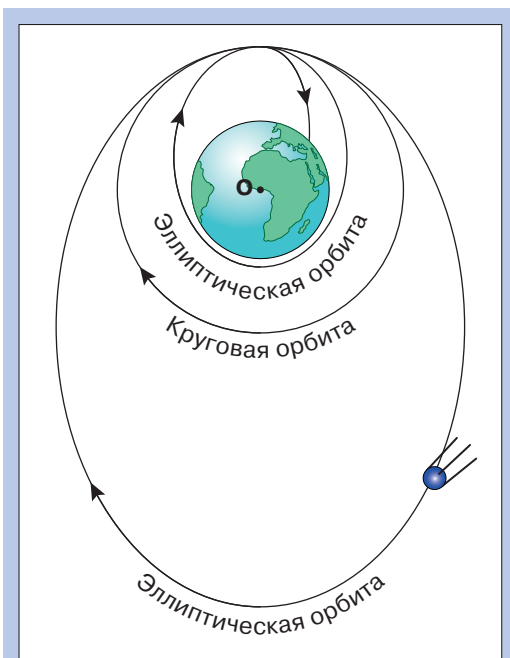


Рис. 72. Орбиты искусственных спутников Земли

При запуске со второй космической скоростью тело m движется по незамкнутой кривой — параболе и навсегда покидает тело M . Если $v > v_{\text{п}}$, то тело m движется по гиперболе и также уходит от тела M . В предельном случае, когда скорость тела очень велика, его траектория становится почти прямой линией (рис. 73).

Используя законы механики и закон всемирного тяготения, Ньютон объяснил не только первый, но и два других закона Кеплера. Легко доказать выполнение третьего закона Кеплера для случая кругового движения со скоростью $v_{\text{к}}$.

$$v_{\text{к}} = \sqrt{\frac{GM}{r_{\text{к}}}}.$$
 Если период обращения

тела m вокруг тела M составляет T , то линейная скорость движения этого тела по орбите равна $v_{\text{к}} = \frac{2\pi r_{\text{к}}}{T}$.

Подставляя в эту формулу выражение для круговой скорости, получим $\sqrt{\frac{GM}{r_{\text{к}}}} = \frac{2\pi r_{\text{к}}}{T}$ или $T = 2\pi\sqrt{\frac{r_{\text{к}}^3}{GM}}$.

Эта формула справедлива и для эллиптической орбиты, если вместо радиуса окружности $r_{\text{к}}$ подставить большую полуось A эллипса. Поскольку для всех планет Солнечной системы в этой формуле фигурирует одна и та же масса Солнца, то сразу следует доказательство **третьего закона Кеплера** ($T^2 \sim r^3$). Но значительно полезнее представить эту формулу в виде $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$.

Таким образом, достаточно измерить радиус орбиты и период обращения по ней спутника, чтобы вычислить массу центрального тела. Именно так измеряют массы звёзд и планет, наблюдая движение вокруг них их ближайших соседей. Таким соседом в звёздной системе может быть вторая звезда, а у планеты это может быть её естественный или искусственный спутник.

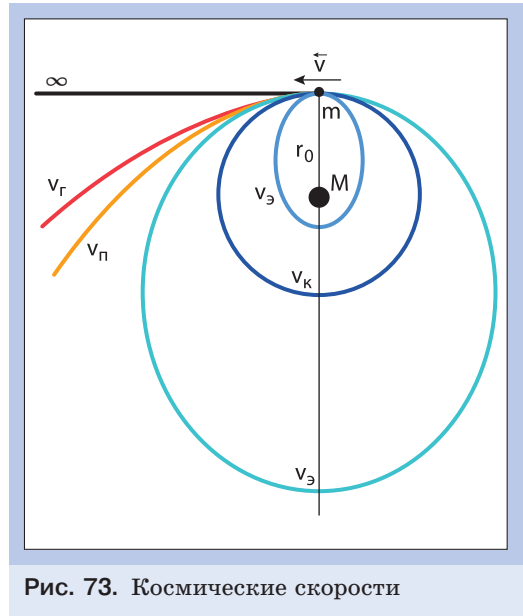


Рис. 73. Космические скорости

Развитие ньютоновой механики в её астрономическом приложении в XVIII в. происходило стремительно и привело к рождению **небесной механики**, изучающей тонкими математическими методами движение небесных тел с учётом их взаимного притяжения. Триумфом небесной механики стало открытие восьмой планеты Солнечной системы — *Нептуна* на основании теоретических расчётов.

В 1781 г., обозревая в телескоп небо, английский астроном **Вильям Гершель** открыл седьмую и самую далёкую от Солнца планету — *Уран*. Следя за движением новооткрытой планеты и сопоставляя его с результатами расчётов, астрономы обнаружили отклонения наблюдаемого положения планеты от теоретически вычисленного. Была высказана гипотеза, что на периферии Солнечной системы имеется неизвестное небесное тело, которое своим притяжением искажает (возмущает) движение Урана. В 1846 г. положение этой гипотетической планеты практически одновременно и независимо друг от друга рассчитали два астронома: **Леверье** во Франции и **Адамс** в Англии. Когда немецкие астрономы **Галле** и **д'Арре** навели телескоп на область неба, указанную Леверье, они почти сразу же обнаружили ранее неизвестную планету. Её называли Нептуном.

Открытие Нептуна стало ярким подтверждением высочайшей точности теории движения небесных тел и ньютоновой механики в целом.

Небесная механика позволяет рассчитывать движения не только естественных тел Солнечной системы, но и космических аппаратов. Их траектории иногда имеют чрезвычайно сложный характер из-за одновременно действующих сил притяжения со стороны Земли, Луны, Солнца и планет.

В тех случаях, когда наблюдаемое движение естественных или искусственных небесных тел входит в противоречие с расчётами, учёным приходится учитывать влияние не только гравитации, но и других сил (давление излучения, торможение в газовой среде, удары твёрдых космических частиц), а если и это не помогает — применять математический аппарат более точной механики и теории гравитации — специальной и общей теорий относительности А. Эйнштейна. При этом расчёты с высочайшей точностью согласуются с наблюдениями. Однако в большинстве случаев ньютонова механика вполне обеспечивает практическую точность расчётов.

Без знания небесной механики было бы невозможно развитие **космонавтики** и освоение космического пространства. Наша страна стала родиной космонавтики благодаря не только талантливым инженерам и умелым рабочим, но и высокой математической культуре специалистов по небесной механике, которые умеют точно рассчитывать траектории космических аппаратов, летящих к далёким планетам.

Запуск научного аппарата или пилотируемого корабля в космос — невероятно сложная задача. Чтобы многотонный груз вывести на околоземную орбиту, его нужно разогнать до скорости около 8 км/с, а для отправки к другим планетам — до скорости более 11 км/с. Это в десятки раз быстрее скорости полёта сверхзвукового самолёта. Чтобы набрать такую скорость при старте с космодрома, ракета к тому же должна преодолеть притяжение Земли (то есть собственный вес) и сопротивление плотных слоёв воздуха. Поэтому ракетные двигатели обладают колоссальной мощностью, создают огромную тягу и расходуют очень много топлива. Неудивительно, что масса ракеты-носителя во много раз превосходит массу её полезной нагрузки.

Например, ракета «Союз» (рис. 74) весом более 300 т создаётся только для того, чтобы вывести на низкую околоземную орбиту маленький космический корабль «Союз» весом около 7 т. Стартовая масса ракеты с кораблём около 308 т. Из них сама конструкция ракеты весит всего около 27 т, а масса залитого в неё топлива (горючее + окислитель) около 274 т. То есть около 90 % веса ракеты приходится на топливо. Полезная нагрузка составляет всего 2 %. А при запуске автоматических межпланетных станций (АМС) к другим планетам их масса составляет всего лишь около

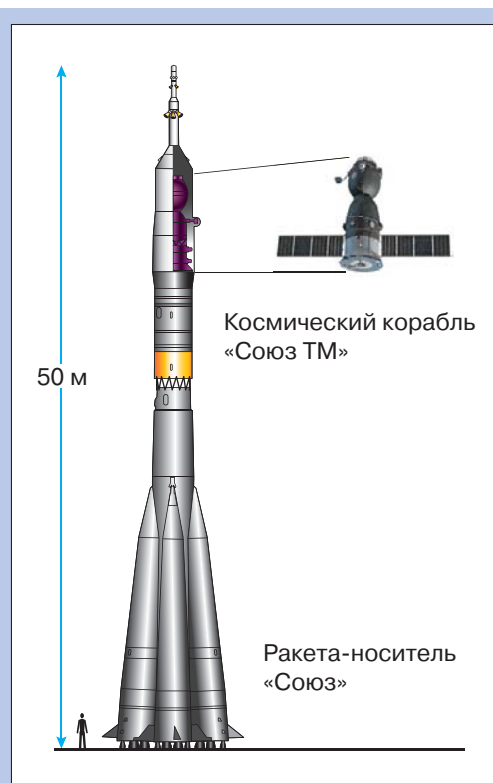


Рис. 74. Ракета-носитель «Союз» (Россия) и её полезная нагрузка — космический корабль «Союз ТМ»

0,5 % от стартовой массы ракеты. При этом до последнего времени (до 2018 г.) большинство запусков в космос производилось одноразовыми ракетами, что делает космонавтику очень дорогим занятием. Однако результаты исследования и использования космического пространства окупают эти затраты. Трудно представить нашу жизнь без спутникового телевидения, надёжных прогнозов погоды, систем глобальной навигации (GPS, ГЛОНАСС и др.), без регулярного мониторинга Земли из космоса, позволяющего нам, не вставая из-за стола, увидеть любой уголок планеты. Все эти задачи решают ИСЗ, облетающие Землю по разным орбитам, круговым и эллиптическим.

Среди всех круговых орбит особенно интересна **геостационарная орбита**, на которой орбитальный период длится столько же, сколько оборот Земли вокруг своей оси, то есть 23 ч 56 мин. Если запустить спутник на круговую орбиту, лежащую в экваториальной плоскости Земли на расстоянии примерно 36 тыс. км от земной поверхности (от центра планеты это будет 42 тыс. км), то, двигаясь в плоскости экватора с периодом в одни звёздные сутки, ИСЗ всегда будет висеть над одной и той же точкой *земного экватора*, где он будет располагаться в *зените* (рис. 75). С удалением наблюдателя от этой точки высота геостационарного спутника будет уменьшаться, пока на расстоянии около 9000 км он не скроется за горизонтом. Практически через геостационарный спутник можно поддерживать радиосвязь между точками на Земле, удалёнными друг от друга не более чем на 16 тыс. км.

Сейчас на геостационарной орбите работают сотни спутников. Они особенно полезны для прямого телевизионного вещания, поскольку домашнюю спутниковую антенну («тарелку») достаточно один раз нацелить на такой спутник и можно быть уверенным, что он всегда будет на месте, в одной и той же точке неба и никуда не денется.

Поскольку геостационарная орбита удалена от Земли на десятки тысяч километров, приходящий оттуда радиосигнал весьма слаб.

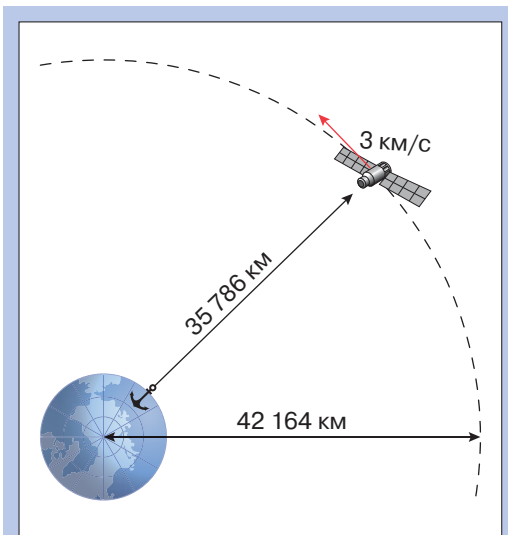


Рис. 75. Геостационарная орбита

Именно поэтому для приёма телевизионных программ дома нам приходится устанавливать концентраторы излучения — спутниковые «тарелки», точно нацеленные на конкретный спутник. Такая система не годится для автомобильных навигаторов, мобильных телефонов и планшетов, использующих сигналы со спутников для определения своего места на поверхности Земли. Поэтому спутники систем GPS, ГЛОНАСС и др. движутся по значительно более низким орбитам, чтобы их сигналы можно было принимать даже на компактную ненаправленную антенну карманного приёмника.

Принцип работы систем глобального позиционирования состоит в следующем. Спутник постоянно сообщает, где он находится и каково точное время на его бортовых часах. Приняв сигнал, наш компьютер по своим часам определяет, сколько времени шёл сигнал до него от спутника, и, умножив это время на скорость света, вычисляет расстояние до спутника. Поскольку одновременно на небе видны несколько спутников систем GPS и ГЛОНАСС, компьютер таким же методом вычисляет расстояния до них и, зная их положение в пространстве, определяет своё положение. Наши мобильные навигаторы определяют своё положение с ошибкой не более нескольких метров, а стационарные устройства — с ошибкой менее сантиметра. Следовательно, с такой же точностью должно быть известно в каждый момент времени положение спутников, несущихся в пространстве со скоростью много километров в секунду. Именно с такой точностью удаётся вычислять их положение методами небесной механики. При этом нужно учитывать, что Земля — не симметричный шар, а тело весьма сложной геометрии с неоднородным распределением плотности в недрах. Поэтому траектория ИСЗ — это не идеальная окружность или эллипс, а довольно сложная кривая, требующая изощрённых методов расчёта.

Не меньшее математическое искусство требуется и для расчёта межпланетных траекторий. Планеты своей массой значительно уступают Солнцу. Поэтому, удалившись от Земли примерно на 1,5 млн км, космический аппарат практически попадает в полную власть солнечной гравитации и движется по одному из конических сечений вокруг Солнца. Используя законы Кеплера, можно оценить длительность перелёта с одной планеты на другую. Обычно это происходит по эллиптической орбите, которая в *перигелии* (ближайшей к Солнцу точке) касается орбиты внутренней планеты, а в *афелии* (наиболее удалённой точке) касается орбиты внешней планеты. Такую траекторию называют **полуэллипсом Гомана — Цандера** (рис. 76). Большая полуось этой орбиты равна полусумме больших полуосей орбит планет (A_1 и A_2), а длительность перелёта (T) равна половине орбитального периода эллиптической орбиты Гома-

на — Цандера. Используя третий закон Кеплера и выразив A_1 и A_2 в астрономических единицах, находим T в годах: $T = 0,5 \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right)^{\frac{3}{2}}$.

Например, для перелёта Земля — Марс имеем $A_1 = 1$ а. е. (орбита Земли), $A_2 = 1,52$ а. е. (орбита Марса) и длительность перелёта

$$T = 0,5 \left(\frac{1 + 1,52}{2} \right)^{\frac{3}{2}} = 0,71 \text{ года} = 8,5 \text{ мес.}$$

Разумеется, это средняя длительность перелёта, поскольку орбиты Земли и Марса не совсем круговые, особенно у Марса.

В точках 1 и 2 реактивный двигатель сообщает аппарату приращение скорости (v_1 и v_2) сначала для перехода с круговой орбиты первой планеты на эллиптическую орбиту перелёта, а затем для перехода на круговую орбиту второй планеты. Момент старта выбирается так, чтобы в точке 2 встретились аппарат и планета-цель.

Приблизившись к планете, аппарат попадает в область её гравитационного влияния и под действием притяжения к ней начинает разгоняться в её сторону. Для посадки на поверхность планеты его нужно точно прицелить в неё, то есть скорректировать направление полёта, а для выхода на околопланетную орбиту — притормозить полёт аппарата, снизив его скорость со второй до первой космической.

Первые межпланетные перелёты в начале 1960-х гг. к Венере и Марсу совершили космические аппараты СССР и США. В наши дни полёты к далёким планетам — Юпитеру, Сатурну и далее — происходят по более сложным траекториям, с пролётом мимо промежуточных планет, которые своим притяжением ускоряют движение космического аппарата. Для этого требуется заранее вычислить точное положение планет и проложить траекторию полёта, что возможно только с применением мощных компьютеров.

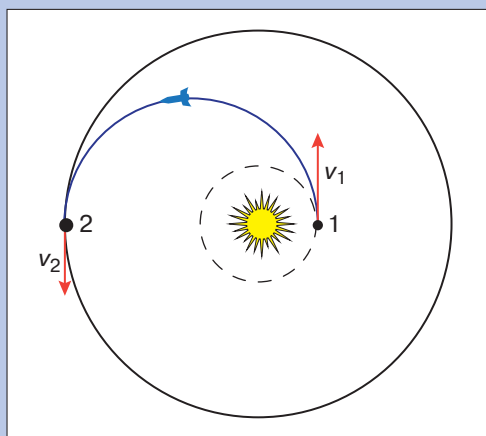


Рис. 76. Простейшая траектория межпланетного перелёта космического аппарата — полуэллипс Гомана — Цандера

В заключение следует сказать несколько слов о *прецессии* и других приливных эффектах.

Взаимное гравитационное влияние Солнца, планет и их спутников не только управляет их движением по орбитам, но и заметно изменяет форму их тел, а также действует на их вращение вокруг своей оси. В совокупности эти эффекты называются **приливыми**, поскольку они же, в частности, вызывают морские приливы и отливы.

Причина приливных эффектов в том, что разные части планеты по-разному удалены от источника гравитации — другой планеты или звезды — и поэтому испытывают небольшое взаимное ускорение. Это вызывает деформацию тела планеты. А если планета вращается относительно направления на источник гравитации, то волна деформации движется по поверхности планеты, то приподнимая поверхность, то опуская её: это и есть морские приливы и отливы.

Наибольшее приливное влияние Земля испытывает со стороны небольшой, но близкой Луны и далёкого, но массивного Солнца. При этом приливное влияние Луны вдвое сильнее солнечного. Кроме морских приливов, они вызывают медленное изменение направления оси вращения Земли, называемое **прецессией**. Ось Земли совершает конусообразное движение вокруг оси эклиптики, делая оборот примерно за 26 тыс. лет. Вместе с земной осью прецессию испытывает и плоскость небесного экватора, а значит, и точка весеннего равноденствия, с которой связана экваториальная система координат.

Основные выводы

- В течение многих веков Земля считалась центром мира, а сложный характер *видимого движения планет* на фоне звёзд объяснялся их одновременным движением по окружностям разного размера (деферентам и эпициклам) вокруг неподвижной Земли.
- **Коперник** показал, что эти движения можно объяснить и по-другому, считая, что Земля и планеты обращаются вокруг Солнца.
- **Кеплер**, используя **гелиоцентрическую систему** Коперника, эмпирически нашёл **три закона движения планет**, которые были позднее объяснены **Ньютоном** как результат движения планет под действием *силы притяжения* со стороны Солнца, убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния от него.
- Из **закона всемирного тяготения** следует, что любые два тела, притягивающие друг друга, движутся по кривым, называемым коническими сечениями: по *эллипсу*, *гиперболе* или *параболе*.

- Движение по окружности — это частный случай движения по эллипсу, скорость этого движения постоянна и зависит от массы притягивающего тела и расстояния до него. Формы планетных орбит представляют собой эллипсы, близкие к окружностям.
- Через закон всемирного тяготения рассчитываются и *траектории движения космических аппаратов*. Чтобы космический аппарат обращался по окружности на околоземной орбите, требуется орбитальная скорость около 8 км/с, а при скорости около 11 км/с траектория аппарата становится параболической и, следовательно, невозвратной.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Каким образом в рамках «неправильной» геоцентрической системы удавалось рассчитывать видимые движения планет, хорошо согласующиеся с наблюдениями?
- 2) Почему система Коперника вызывала резкое отторжение в умах даже образованных людей?
- 3) Какое направление имеют скорости и ускорения планет, обращающихся вокруг Солнца?

2. Решите задачи.

- 1) Зная расстояние до Солнца и продолжительность года, рассчитайте скорость движения Земли по орбите.
- 2) Зная расстояние до Нептуна в астрономических единицах, определите, во сколько раз скорость его орбитального движения отличается от скорости Земли.
- 3) Первый ИСЗ обращался по орбите, близкой к окружности, радиусом, приблизительно равным радиусу Земли. Рассчитайте период его обращения.
- 4) Луна ближе к Земле, чем Солнце, примерно в 400 раз. Период движения Луны вокруг Земли составляет примерно $\frac{1}{13}$ часть года. Исходя из этого, оцените, во сколько раз Солнце массивнее Земли.

4

глава

Солнечная система

19

Общий обзор
Солнечной системы

20

Планеты-карлики и малые
тела Солнечной системы

21

Метеоры, метеориты
и астероидная опасность

22

Экзопланеты

Размер и состав Солнечной системы

Планеты найдены у многих звёзд, но детально изучена лишь наша Солнечная система, где вокруг Солнца обращаются большие и карликовые планеты со своими спутниками, а также астероиды, кометы и метеороиды. Каждая планета уникальна. С помощью космических аппаратов были исследованы с близкого расстояния все большие планеты и некоторые малые тела Солнечной системы.

■ **Солнечная система** — это звезда Солнце и окружающие её тела, которые удерживаются гравитацией Солнца и поэтому никогда не покидают его окрестностей (рис. 77). Это планеты, спутники планет, планеты-карлики и так называемые **малые тела Солнечной системы**. К малым телам относятся: *астероиды, кометы, метеорные тела (метеороиды)*. Помимо этого, в Солнечной системе присутствует *космическая пыль и межпланетная плазма*.

Основная масса Солнечной системы (99,86 %) заключена в Солнце, то есть оно в 715 раз массивнее всех остальных тел Солнечной системы, вместе взятых. Поскольку Солнце значительно массивнее всех прочих тел Солнечной системы, оно постоянно находится практически точно в центре масс этой системы. В то же время почти весь момент импульса Солнечной системы заключён в орбитальном движении планет-гигантов, прежде всего Юпитера и Сатурна.

Наиболее далёкие от Солнца объекты Солнечной системы, наблюдаемые в телескоп, расположены на расстоянии около 100 а. е. Это расстояние можно назвать **наблюдаемым радиусом** Солнечной системы. Но вычисления показывают, что в самой удалённой точке своих орбит — в **афелии** — эти тела находятся на расстоянии примерно 1000 а. е. от Солнца. Более того, с учётом влияния гравитации соседних звёзд и всей нашей звёздной системы — Галактики — в целом можно утверждать, что

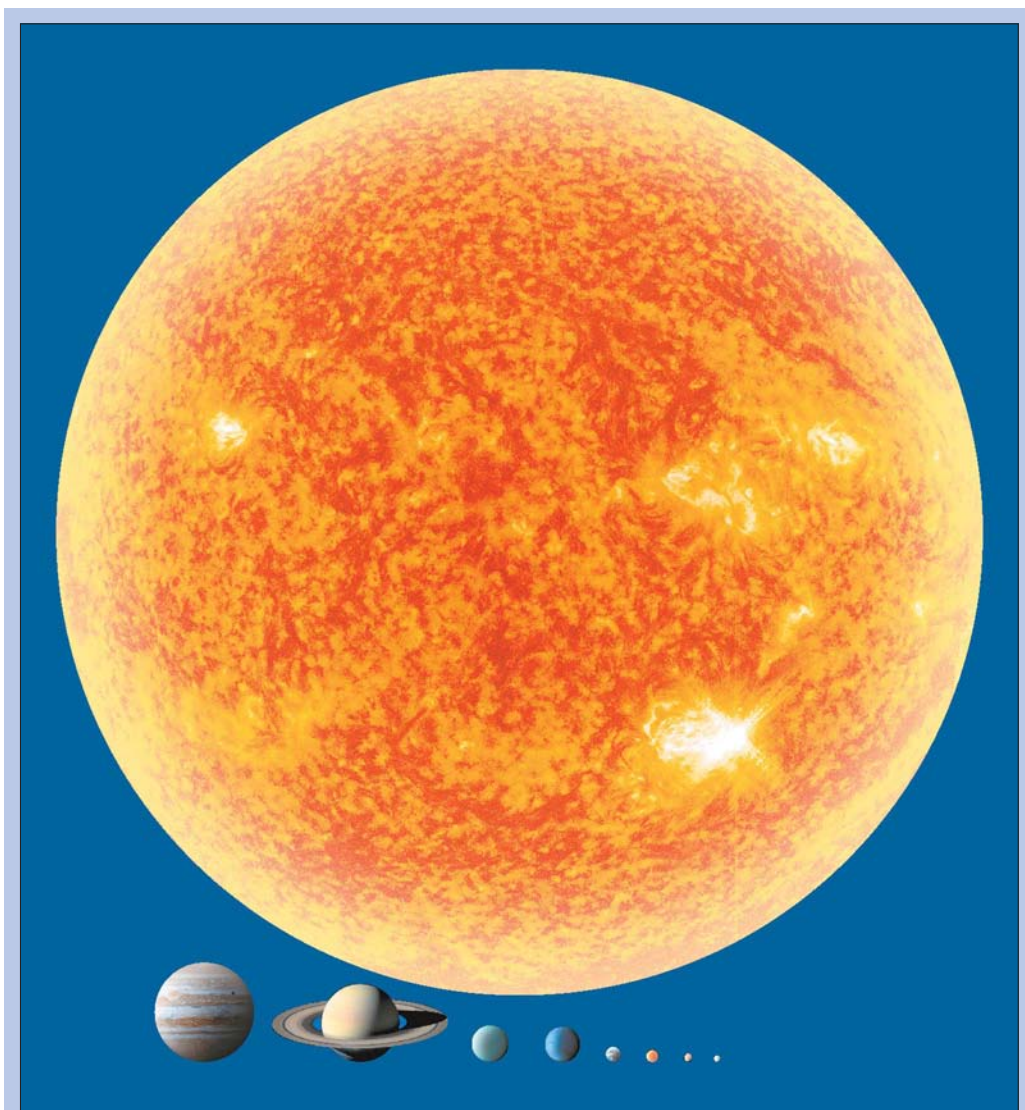
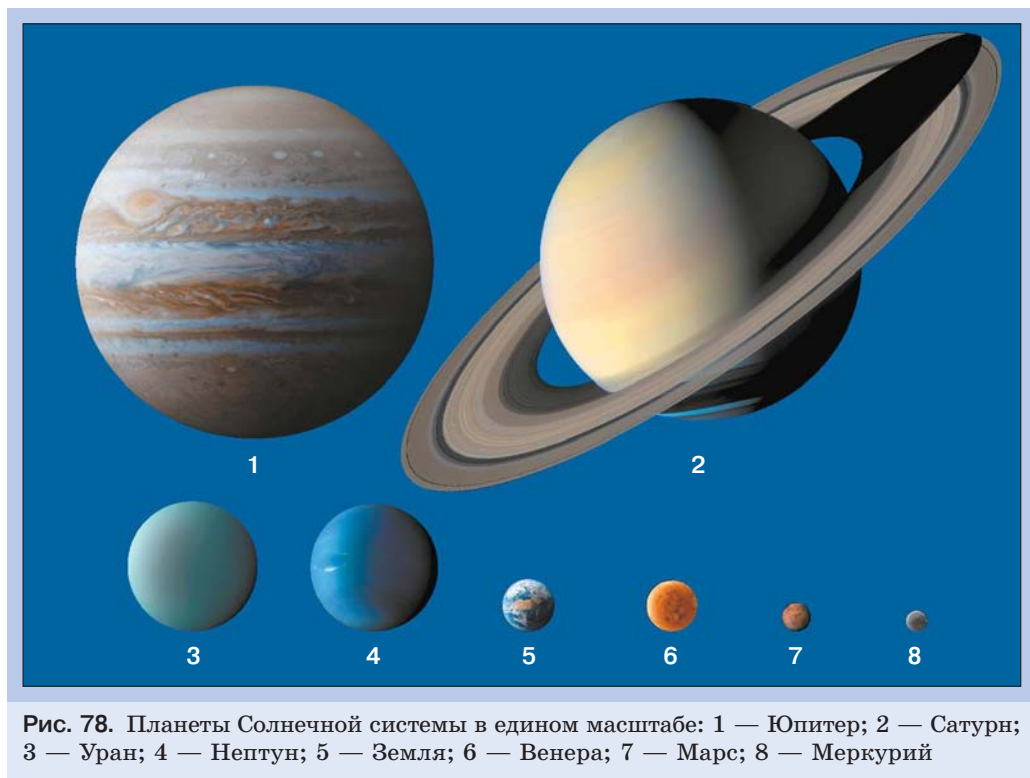


Рис. 77. Относительный размер Солнца и планет Солнечной системы

область, в пределах которой возможно устойчивое движение небесных тел вокруг Солнца, простирается до расстояния порядка 100 тыс. а. е., что сопоставимо с расстояниями до ближайших звёзд. Это значение можно считать предельным радиусом Солнечной системы.



В Солнечной системе, помимо Солнца, известно восемь больших тел, которые официально называются **планетами** или **большими планетами** (рис. 78). По порядку от Солнца это *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун*. По массе и составу их делят на две группы: небольшие твёрдые *планеты земной группы* (Меркурий, Венера, Земля, Марс) располагаются ближе к Солнцу, а *газово-жидкие планеты-гиганты* (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) движутся по внешним орбитам. Примерно 99,5 % суммарной массы планет Солнечной системы приходится на долю планет-гигантов.

Среди всех планет земной группы существенным магнитным полем обладает только Земля. У остальных планет оно очень слабое. Магнитное поле Меркурия примерно в 100 раз слабее земного, а у Марса и Венеры оно ещё меньше. Но у планет-гигантов магнитное поле сильнее, чем у Земли.

У всех планет-гигантов, а также у Земли и Марса есть **спутники** — сравнительно небольшие объекты, связанные со своими планетами взаимным притяжением. Их около двухсот, и они очень разнообразны.

У планет земной группы мало спутников: на четыре планеты всего три спутника, тогда как у планет-гигантов их более ста семидесяти. Среди планет земной группы самый большой спутник — у Земли, это Луна. Ещё два маленьких — у Марса: Фобос и Деймос, каждый размером менее 30 км. А Меркурий и Венера вообще не имеют спутников.

Не исключено, что в Солнечной системе, помимо известных восьми планет, есть и другие, ещё не открытые. Они могут скрываться на расстоянии более 300 а. е., где солнечные лучи освещают их так слабо, что современные телескопы не в состоянии их обнаружить. Гипотеза о существовании девятой планеты основана на изучении орбит самых далёких тел Солнечной системы (рис. 79). Их эллиптические орбиты ориентированы неслучайным образом: создаётся впечатление, что некое массивное тело «дирижирует» движением этих тел. Математическое моделирование позволило даже вычислить предполагаемую орбиту девятой планеты, масса которой может быть в несколько раз больше массы Земли.

Некоторые спутники не уступают своим размером планете Меркурий и даже имеют *атмосферу* более плотную, чем у Земли (например, спутник Сатурна Титан). Большинство же спутников невелики: их размер от 1 до 50 км.

Кроме больших планет и их спутников, в отдельное семейство выделены **планеты-карлики**. Это *Плутон, Эрида, Макемаке, Хаумея и Церера*. По традиции их называют именами богов или богинь в мифологии разных народов. Размером и массой они уступают крупным спутникам планет, но движутся вокруг Солнца самостоятельно; некоторые из них имеют свои спутники и даже разреженную атмосферу. Кроме Цереры, все карликовые планеты располагаются за пределами орбит больших планет. Наверняка там ещё много подобных тел, которые пока не обнаружены.

Чрезвычайно многочисленную группу составляют **малые тела Солнечной системы**. Они включают объекты, которые не являются планетой, спутником планеты или планетой-карликом. Таким образом, в число малых тел Солнечной системы попали все кометы и астероиды.

Кометы — это небольшие тела, в составе которых преобладает лёд, а *астероиды* в основном состоят из камня и металлов. Пока малое тело находится на большом расстоянии от Солнца, трудно понять, астероид это или ледяное ядро кометы, поскольку вдали от Солнца так холодно, что даже ледяное тело не испаряется и не демонстрирует типичного для кометы газового хвоста. Вблизи Солнца льды кометы испаряются и окутывают ядро временной атмосферой, которая вытягивается в виде хвоста.

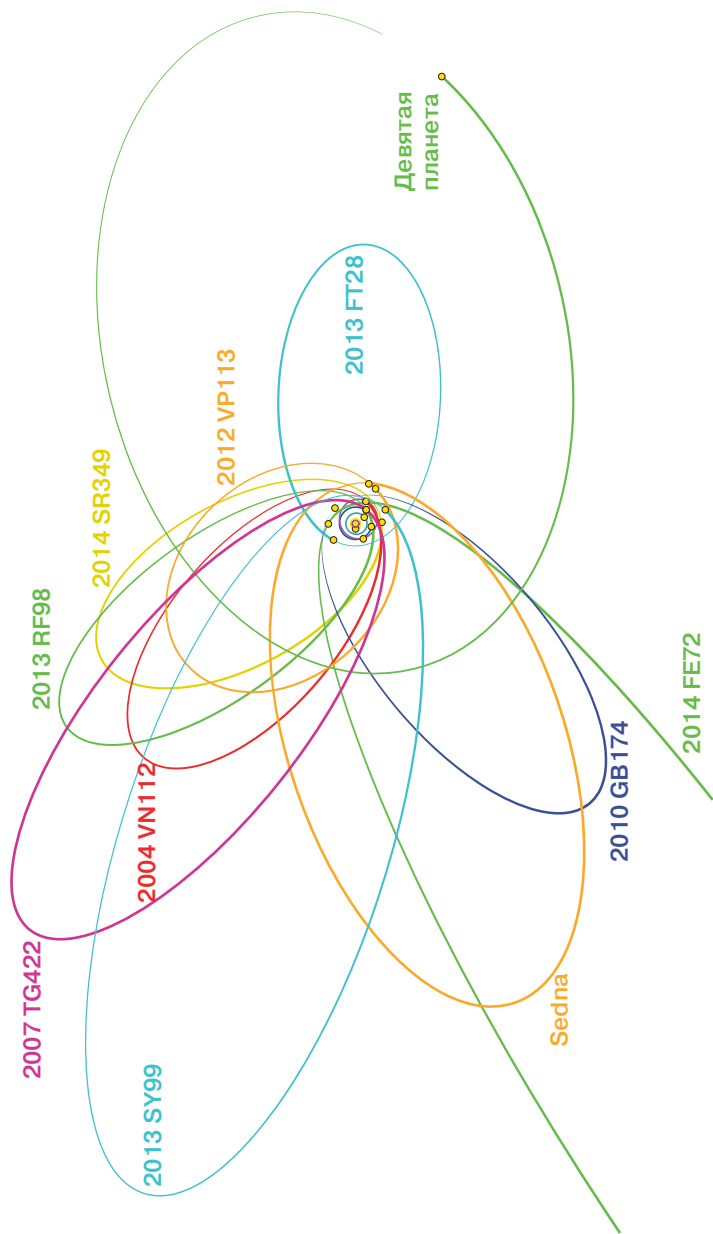


Рис. 79. Орбиты самых удалённых известных тел Солнечной системы и девятой гипотетической планеты. Положения известных тел показаны жёлтыми точками. Положение предполагаемой девятой планеты на её орбите неизвестно

Кометы в основном движутся вдалеке от Солнца (иначе бы они быстро растаяли), а астероиды — сравнительно недалеко. Большинство из них заполняет промежуток между орбитами Марса и Юпитера, так называемый *Главный пояс астероидов*, на расстоянии от 2,2 до 3,2 а. е. от Солнца. В этой области обнаружено уже порядка миллиона тел размерами от нескольких сотен метров до 500 км. Отдельные семейства астероидов и комет движутся в области орбит планет-гигантов и даже за пределами их орбит. Это *транснептуновые объекты*, населяющие область радиусом от 30 до 50 а. е. от Солнца, так называемый *пояс Койпера*. Там пока удаётся заметить только сравнительно крупные объекты, хотя нет сомнений, что и мелких тел в поясе Койпера очень много.

Самая внешняя область Солнечной системы, вплоть до её предельного радиуса, очевидно, тоже не пуста. Время от времени оттуда к Солнцу прилетают ледяные кометы, которые движутся по очень сильно вытянутым эллиптическим (почти параболическим) орбитам, удаляясь в афелии от Солнца на многие тысячи и даже десятки тысяч астрономических единиц. Эту область называют *облаком Оорта* (рис. 80). Оценки показывают, что там находятся многие миллиарды небольших ледяных тел.

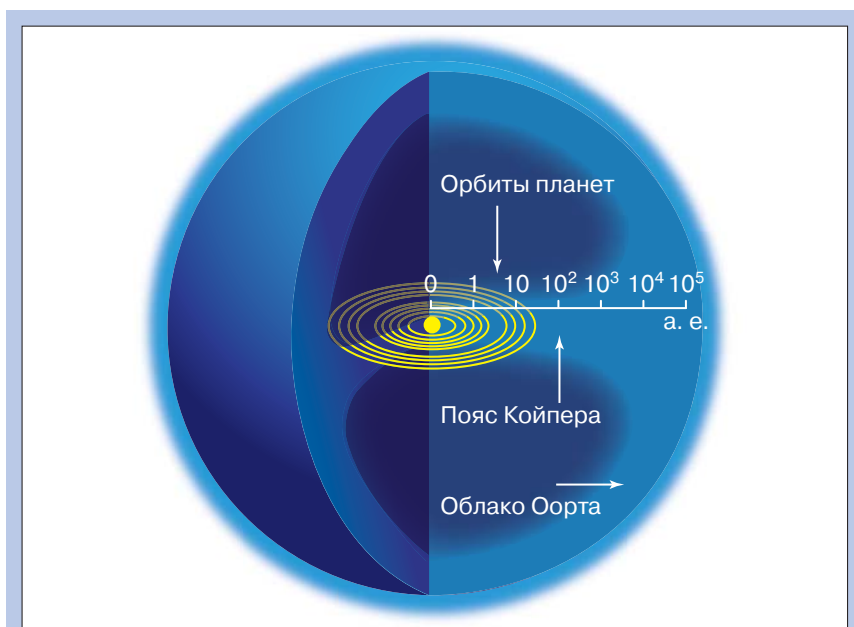


Рис. 80. Строение внешних областей Солнечной системы. Расстояния от Солнца даны в логарифмическом масштабе

Всё пространство между большими и малыми телами Солнечной системы заполнено *солнечным ветром* (крайне разреженной плазмой, истекающей с поверхности Солнца), а также содержит гигантское количество метеороидов (твёрдых частиц или тел размером от миллиметров до метров) и совсем мелкую, микронного размера *межпланетную пыль*, образующуюся при взаимных соударениях более крупных тел.

Луна

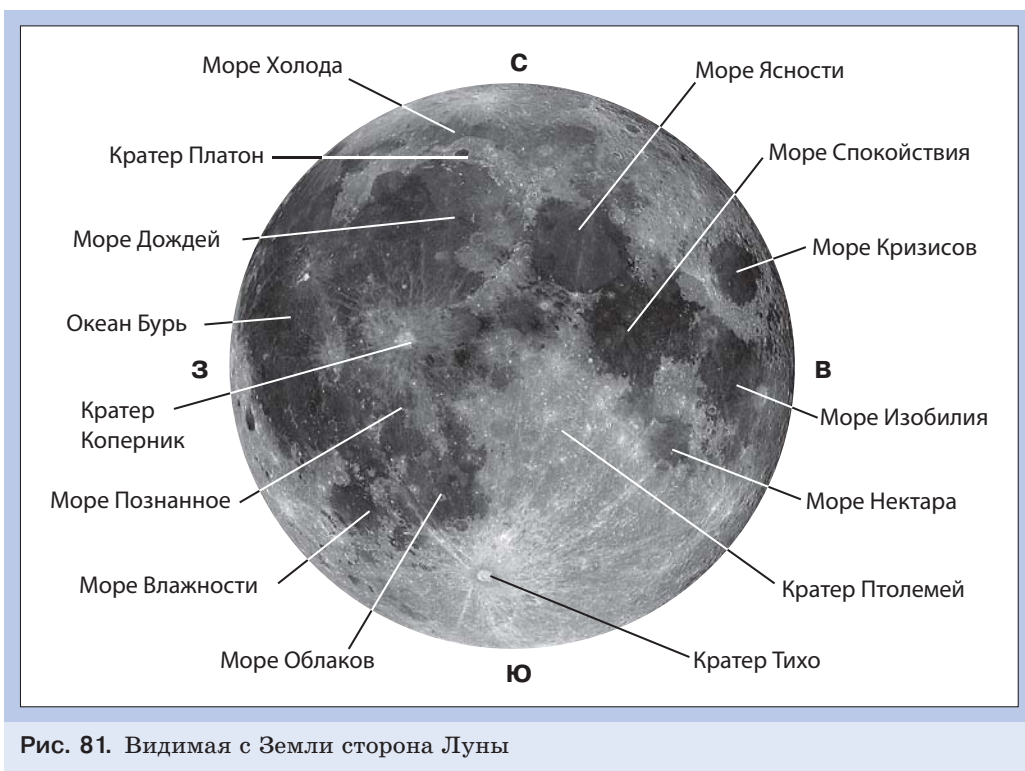
Луна — естественный спутник Земли и самое близкое к нам тело Солнечной системы. Поэтому для нас она играет особую роль. Это единственное ночное светило, диск которого и даже отдельные детали поверхности мы можем различить невооружённым глазом. Среднее расстояние между центрами Луны и Земли 384 400 км. Это более чем в сто раз меньше, чем расстояние от Земли до любого другого объекта Солнечной системы. Поэтому только лунную поверхность можно подробно рассмотреть в телескоп, чем и наслаждаются любители астрономии (рис. 81). Именно к Луне отправились первые космические роботы, и только на лунной поверхности смогли пока побывать люди.

У Луны практически нет атмосферы. Её поверхность покрыта **реголитом** — раздробленным метеоритами материалом коренных пород. Масса Луны $7,35 \cdot 10^{22}$ кг (в 81,3 раза меньше, чем масса Земли). Радиус Луны 1737 км (в 3,67 раза меньше радиуса Земли). Средняя плотность 3,34 г/см³ (в 1,65 раза меньше земной). Сила тяжести на поверхности Луны в 6 раз меньше земной.

Средняя температура лунной поверхности 107 °С днём и –153 °С ночью. Но полный диапазон температуры ещё больше: днём в некоторых областях на экваторе поверхность раскаляется до 120 °С, а ночью остывает до –170 °С. В полярных же областях всегда очень холодно.

Период обращения Луны по орбите и период вращения вокруг оси совпадают и равны 27,32 сут, поэтому Луна всегда обращена к Земле одной стороной, которую называют **видимой**. Обратная сторона Луны никогда не видна с Земли, её удалось увидеть только с помощью *космических зондов*. Оказалось, что два полушария Луны сильно различаются: на видимой стороне расположены обширные тёмные *моря* — глубокие долины, заполненные излившейся из недр лавой, а поверхность обратной стороны почти вся «материковая», там таких морей почти нет (рис. 82). До сих пор это различие не получило удовлетворительного объяснения.

Максимальный перепад высот на Луне наблюдается в пределах материковых областей и достигает 17 км (для сравнения: на Земле перепад



высот твёрдой поверхности составляет 20 км). Наивысшая точка имеет высоту 9 км над средним уровнем поверхности и находится на обратной стороне, в горах Лейбница. Самая глубокая впадина на Луне глубиной 8 км также находится на обратной стороне, в районе южного полюса.

Первым поверхности Луны достиг советский космический аппарат «Луна-2» в 1959 г., а аппарат «Луна-3» в том же году впервые сфотографировал и передал на Землю снимки обратной стороны Луны. Первую *мягкую посадку* на Луну осуществил тоже советский аппарат «Луна-9» (1966 г.). А «Луна-10» в том же году стала первым **искусственным спутником** Луны. В 1968 г. советский лунный корабль «Зонд-5» с животными на борту впервые облетел Луну и вернулся на Землю. С 1970 по 1976 г. советские автоматические станции впервые доставили на Луну самоходные лаборатории «**Луноход-1**» и «**Луноход-2**», прошедшие маршруты в десятки километров, а также трижды взяли пробы лунного грунта с глубины до 1,8 м и доставили их на Землю (рис. 83).

С отставанием от советской программы исследования Луны развивалась и американская лунная программа, в основном нацеленная на подготовку полёта туда человека. В СССР также готовились к полёту космонавтов на Луну, но в этом направлении американская программа оказалась более успешной. Первый полёт американских астронавтов к Луне с выходом на окололунную орбиту и последующим возвращением на Землю состоялся 21—27 декабря 1968 г. По сути, *это был первый межпланетный полёт человека*, его осуществил экипаж космического корабля «Аполлон-8»: Ф. Борман, У. Андерс и Дж. Ловелл.

А в первую пилотируемую экспедицию с посадкой на Луну отправился 16 июля 1969 г. экипаж «Аполлона-11» — Нил Армстронг, Базз Олдрин и Майкл Коллинз. Впервые человек ступил на поверхность Луны 20 июля 1969 г. Армстронг и Олдрин провели там несколько часов, устанавливая научные приборы и собирая образцы грунта. За этим полётом последовало ещё пять успешных экспедиций на поверхность Луны, всего там побывало 12 астронавтов. Последняя экспедиция «Аполлон-17» состоялась в декабре 1972 г. С тех пор люди на Луне не были.

Однако исследование Луны автоматическими зондами успешно продолжается. Искусственные спутники Луны, созданные в США, Западной Европе, Китае, Японии и Индии, собрали за последние годы детальные данные о топографии лунной поверхности, её химическом составе и распределении плотности в недрах. Советская программа исследования Луны прервалась в 1976 г., но отечественные учёные совместно с коллегами из других стран продолжают эти исследования. Например, с помощью прибора LEND, созданного российскими учёными и установленного на зон-

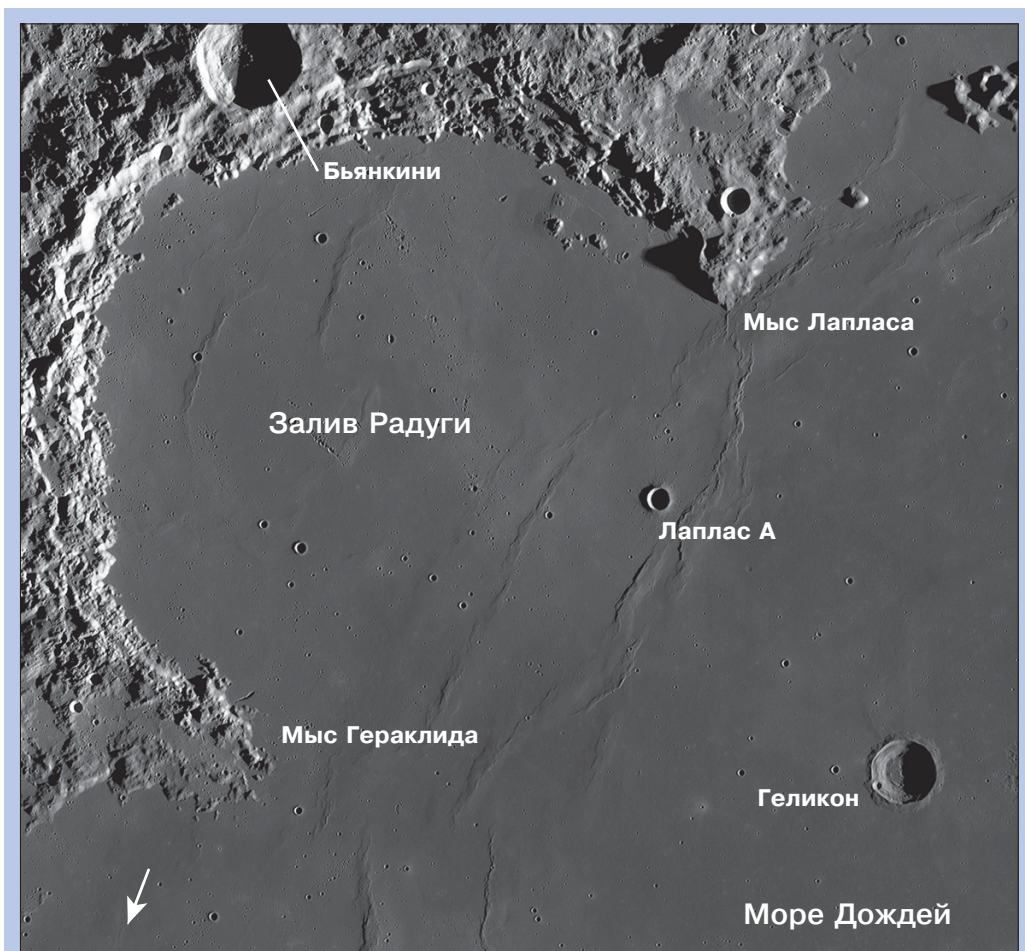


Рис. 83. Залив Радуги на Луне. Сторона кадра 360 км. Стрелкой показано положение «Лунохода-1»

де LRO (NASA), найдены участки Луны, наиболее богатые водородом — главным компонентом воды. Хотя лунная поверхность абсолютно суха, под грунтом есть залежи вечной мерзлоты. В основном они сосредоточены в полярных областях, но встречаются и на низких широтах. Эти места наиболее привлекательны для создания на Луне первых поселений.

Доставленные на Луну сейсмографы показали, что Луна — сейсмически очень спокойное тело. В настоящее время вулканическая деятельность там если и есть, то очень слабая.

Самыми заметными деталями на поверхности Луны являются кольцевые образования — **кратеры**. Некоторые из них можно видеть в телескоп или даже в хороший бинокль. Кратер обычно представляет собой углубление, окружённое *кольцевым валом*. В центре иногда находятся одна или несколько небольших горок. Крупнейшие кратеры превышают в диаметре 100 км, но в основном они очень мелкие. Большинство кратеров возникло в результате сопровождавшихся взрывами падений космических камней — *метеоритов* — на твёрдую поверхность Луны.

Покрытая кратерами поверхность Луны типична для безатмосферных планет и их спутников. Большинство крупных кратеров на таких телах — древние, им миллиарды лет. Они сохранились лишь потому, что отсутствует атмосферная эрозия, то есть нет ни ветра, ни дождей. В этом смысле поверхность Луны — это музей истории Солнечной системы. Наша Земля обстреливалась метеоритами не меньше, чем Луна, но на Земле даже крупные кратеры сохраняются не более 200 млн лет.

Впрочем, молодые кратеры есть и на Луне. Например, *кратер Тихо*, которому всего около 100 млн лет (рис. 84, 85). Он не только отлично сохранился сам, но и выброшенное из него при взрыве вещество до сих пор легко заметить на поверхности Луны. Оно светлыми полосами легло далеко от кратера и залетело даже на обратную сторону Луны. Значит, выброшено оно было со скоростью, близкой к первой космической для Луны (1,7 км/с). Вполне возможно, что при таких взрывах лунный грунт может выбрасываться и с большей скоростью, превышающей вторую космическую (для Луны 2,4 км/с), и совсем отрываться от Луны. Но рядом наша Земля. И действительно, кусочки Луны иногда падают на Землю. В коллекциях учёных уже более 350 найденных на Земле метеоритов, по своим свойствам чрезвычайно похожих на образцы лунного грунта, доставленного автоматическими и пилотируемыми экспедициями с Луны.



Рис. 84. Кратер Тихо (ниже центра фото)

Кратер Тихо диаметром 85 км в южном полушарии Луны — один из популярных объектов для наблюдения у астрономов-любителей. В период полнолуния (как на этом снимке) хорошо видны выбросы грунта, возникшие от удара метеорита.

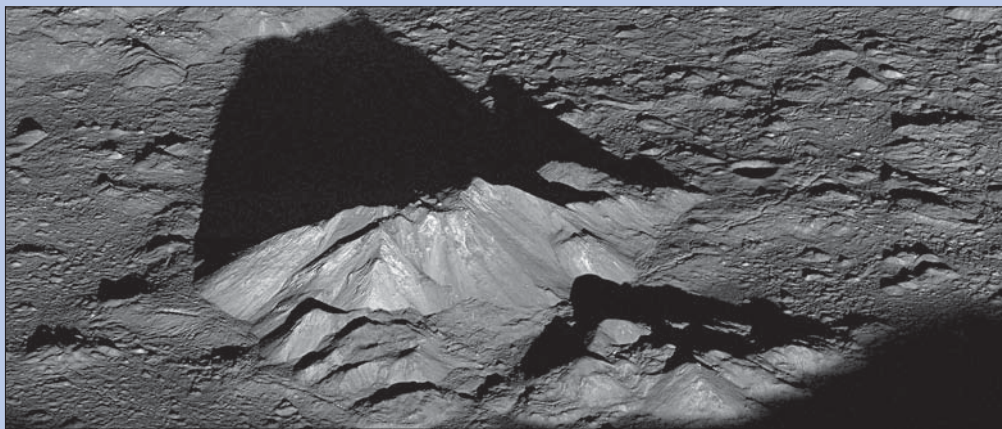


Рис. 85. Центральный пик в кратере Тихо. Дно кратера лежит на глубине 4,8 км, а центральная гора возвышается на 2 км над уровнем дна. Протяжённость снимка слева направо около 15 км. Фото LRO (NASA)

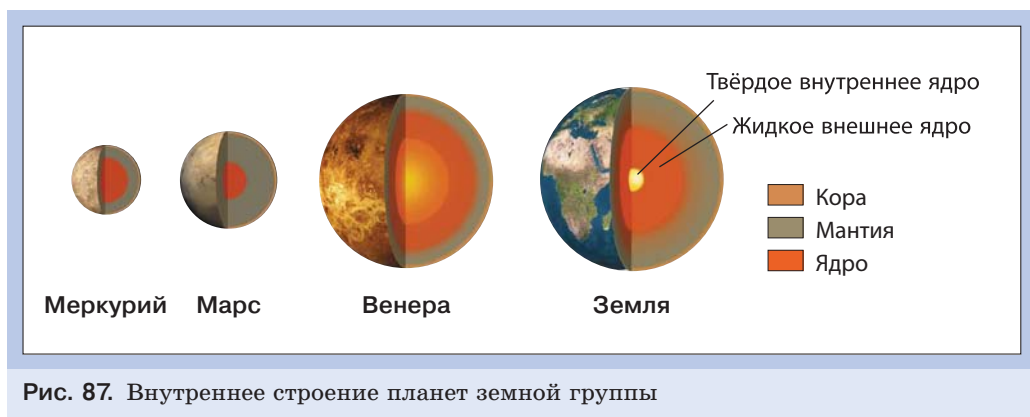
Хотя Луна изучена значительно полнее, чем любое другое небесное тело, с ней связано ещё много нерешённых проблем и научных загадок. На обратную сторону Луны первые приборы были доставлены только 3 января 2019 г. китайским зондом «Чанъэ-4». Ни одна экспедиция не бурила поверхность Луны глубже 2 м. Неясно происхождение некоторых деталей на лунной поверхности, например глубоких провалов, похожих на колодцы, и извилистых долин, похожих на русла высохших рек. И самое главное — до сих пор нет точного представления о *происхождении Луны*. Сейчас астрономы рассматривают несколько гипотез:

- 1) самостоятельное формирование Луны в другой области Солнечной системы и её захват при пролёте мимо Земли;
- 2) совместное формирование Земли и Луны рядом, но независимо друг от друга;
- 3) удар небольшой планеты по молодой Земле, выбросивший в космос часть её вещества, из которого позже сформировалась Луна.

Новый этап исследования и освоения Луны начинается в наши дни. В нём активно участвуют Россия, США, Китай и Западная Европа.

Планеты земной группы

Меркурий, Венера, Земля и Марс во многом похожи друг на друга (рис. 86). Они занимают самую внутреннюю часть планетной системы, имеют сравнительно небольшой размер, высокую плотность и бедны лёг-



кими химическими элементами. По внутреннему строению **планеты земной группы** мало различаются: они, как правило, имеют металлическое ядро, мягкую мантию и твёрдую кору различной толщины (рис. 87). Маленький Меркурий лишён атмосферы, более крупный Марс обладает разреженной атмосферой, а массивные Земля и Венера удерживают у своей поверхности вполне плотную атмосферу, которая у Земли благоприятствует жизни, а у Венеры настолько плотная и горячая у поверхности, что препятствует существованию жизни земного типа.

Орбитальное и осевое вращение планет земной группы. Периоды обращения планет по своим орбитам закономерно увеличиваются с удалением от Солнца. Быстрее всех по орбите движется Меркурий: со сред-

ней скоростью 48 км/с он совершает оборот вокруг Солнца за 0,24 земного года. Венера, двигаясь со скоростью 35 км/с, завершает оборот за 0,62 года. Земля, естественно, — за год; её скорость около 30 км/с. А Марс, средняя скорость которого 24 км/с, — за 1,9 года. Самая сильная эллиптичность орбиты у Меркурия (см. табл. 2 в Приложении). К тому же плоскость орбиты Меркурия заметно наклонена к плоскости эклиптики, близ которой лежат орбиты всех остальных планет. А наименьшей эллиптичностью обладает орбита Венеры: эта планета движется практически по окружности.

Но в одном Венера и Меркурий очень схожи: их суточное вращение — самое медленное среди всех планет. Эти периоды были определены с Земли методом *радиолокации планет*. Один оборот вокруг оси (**звёздные сутки**) у Меркурия длится 58,6 земных суток (то есть $\frac{2}{3}$ меркурианского года), а у Венеры составляет 243 сут, что даже превышает длительность венерианского года. Оси вращения обеих планет, в отличие от осей вращения Земли и Марса, почти перпендикулярны их орбитальным плоскостям, но направления вращения разные: Меркурий, как и большинство планет, вращается в прямом направлении (то есть так же, как движется по орбите), а *Венера вращается вокруг своей оси в обратном направлении*, и в этом одна из её загадок. Сложение орбитального и осевого движения Венеры приводит к тому, что солнечные сутки на ней длятся 116 земных суток, так что в течение года на Венере Солнце дважды поднимается над горизонтом и опускается под горизонт.

Любопытная особенность Меркурия (рис. 88, 89) состоит в том, что период его осевого вращения находится в точном соотношении 2:3 с периодом обращения вокруг Солнца (87,97 сут). Поэтому за свой год планета совершает ровно полтора оборота вокруг оси. Поскольку вращение Меркурия вокруг оси и вокруг Солнца происходит в одну и ту же сторону,

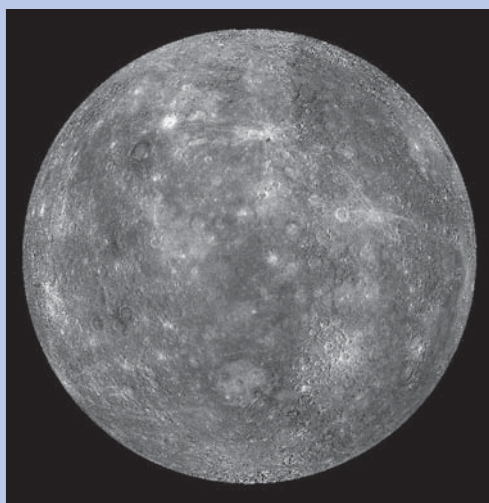


Рис. 88. Фотокарта Меркурия, составленная по снимкам зонда «Мессенджер» (NASA)

солнечные сутки здесь длиннее звёздных, и смена дня и ночи длится вдвое дольше меркурианского года.

Земля и Марс вращаются почти одинаково — в прямом направлении, с суточным периодом около 24 ч, и даже оси их вращения наклонены почти на одинаковый угол: между полярной осью и перпендикуляром к орбитальной плоскости у Земли угол 23° , а у Марса — 25° . Именно этот наклон ответственен за смену времён года на Земле и Марсе, представляющих Солнцу поочерёдно то своё южное, то своё северное полушарие.

Атмосферы планет земной группы. У Меркурия атмосфера практически отсутствует — эта планета давно её потеряла или вообще не имела, что неудивительно, учитывая небольшую массу планеты и её близость к Солнцу. Венера, Земля и Марс обладают атмосферами. Особенно плотная атмосфера у Венеры, открытая ещё **М. В. Ломоносовым** по наблюдениям прохождения Венеры по диску Солнца. Давление атмосферы у поверхности Венеры составляет около 90 земных атмосфер. На Земле такое давление имеет место в морской воде на глубине около 900 м. Основные компоненты венерианской атмосферы — углекислый газ (96 %) и азот (менее 4 %). На высотах 50—70 км располагается три слоя облаков, состоящих из аэрозольных частиц — капелек серной кислоты, возможно, с примесями некоторых химических соединений. Советские *межпланетные станции* «**Vega-1**» и «**Vega-2**», запущенные в 1984 г., сбросили в облачный слой Венеры аэростатные зонды с научной аппаратурой, которые в течение почти двух земных суток дрейфовали в атмосфере, проводя важные измерения.

Уникальной особенностью атмосферы Венеры является мощный незатихающий ветер на большой высоте, который несёт облака и верхние слои атмосферы в сторону вращения планеты (то есть в направлении, обратном вращению Земли). Скорость ветра растёт почти от нуля у поверхности до ураганного значения около 100 м/с на верхней границе обла-



Рис. 89. Поверхность Меркурия очень напоминает лунную поверхность. Фото зонда «Мессенджер» (NASA)

ков. Получается, что облачный слой вращается с периодом, в 60 раз более коротким (около четырёх суток), чем поверхность планеты. Это движение атмосферы называется **суперротацией**. Причина суперротации пока непонятна.

На Марсе атмосфера очень разрежена, вблизи поверхности её плотность примерно такая же, как плотность воздуха на высоте около 30 км над Землёй. Как и на Венере, более 95 % объёма газов марсианской атмосферы приходится на углекислый газ. В небольшом количестве присутствуют азот, аргон и водяной пар. Над поверхностью планеты часто образуются локальные завихрения — *торнадо*, поднимающие пыль и песок в высоту на несколько километров. Иногда мощные *пылевые бури* делают марсианскую атмосферу совершенно непрозрачной.

Поверхности планет земной группы (рис. 90). Чем дальше от Солнца располагается планета, тем меньше тепла и света она получает, однако температура на поверхности зависит также и от наличия и состава атмосферы. У Меркурия практически нет атмосферы, и солнечные лучи беспрепятственно проникают к его поверхности. Максимальная температура на Меркурии достигает почти 430 °С. Но самая высокая температура наблюдается на поверхности Венеры, расположенной почти вдвое дальше от Солнца, чем Меркурий. Её мощная атмосфера из углекислого газа удерживает тепло, сохраняя у поверхности одинаковую температуру днём и ночью — около 470 °С. Это выше температуры плавления свинца и олова, которые могли бы там плескаться в виде озёр. Причина этого заключается в *составе и плотности атмосферы*. Многие атмосферные газы, особенно пары воды (H_2O) и двуокись углерода (CO_2), обладают интересным свойством: они прозрачны для видимого света, но поглощают инфракрасное излучение. Поэтому солнечные лучи легко проходят сквозь атмосферу планеты к поверхности, нагревая её, а эффективно остывать поверхность не может, поскольку её инфракрасное (тепловое) излуче-

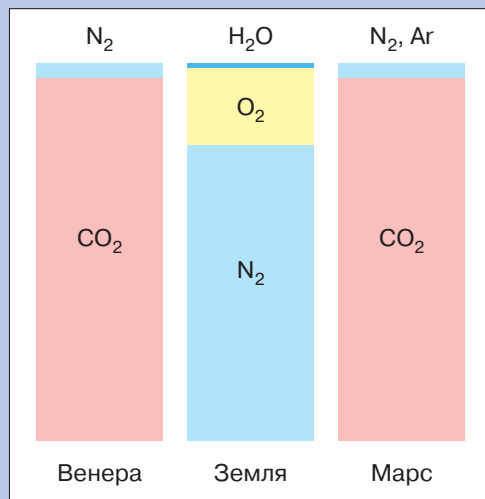
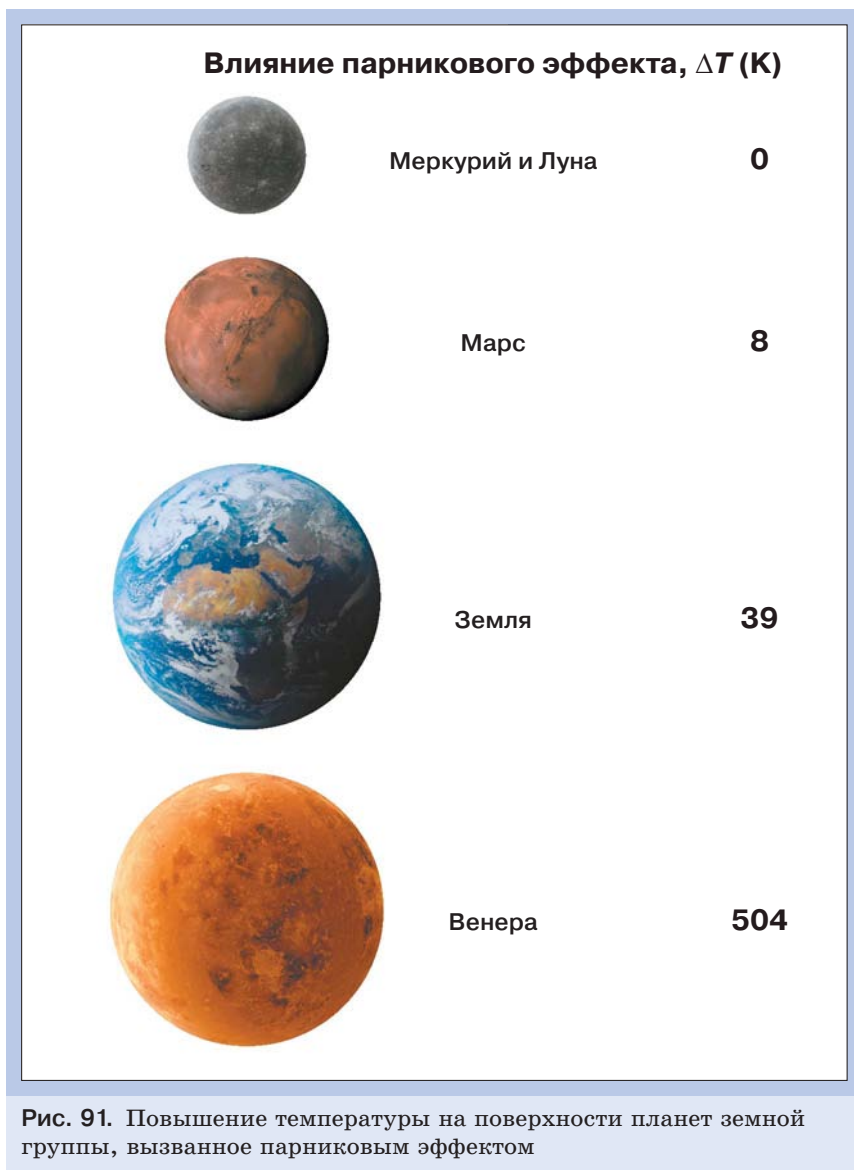


Рис. 90. Состав атмосферы планет земной группы. Меркурий практически лишён атмосферы

ние с трудом пробивается сквозь атмосферу в космос. Это явление называют **парниковым эффектом**, поскольку оно, как стеклянный парник весной, приводит к росту температуры поверхности планеты (рис. 91). Парниковый эффект проявляет себя и на Земле, заметно поднимая её



среднюю температуру, но на Венере благодаря мощной углекислотной атмосфере его влияние на температуру поверхности намного эффективнее.

Сквозь плотные венерианские облака поверхность не видна: в облаках нет просветов (рис. 92). Детальные изображения и карты поверхности Венеры были получены только по результатам *радиолокации* планеты *космическими аппаратами СССР и США*. Оказалось, что на Венере довольно много кратеров и других структур. Поверхность Венеры сформирована *вулканическими процессами*, её существенная часть покрыта застывшей лавой. Вода на Венере практически отсутствует. Для изучения планеты с 1970 по 1985 г. на её поверхность было совершено 10 успешных мягких посадок *автоматических станций* серии «Венера» (СССР) (рис. 93). Аппараты работали до 2 ч при температуре около 470 °С и давлении 92 атм, пока не испарялся охладитель, и обеспечивали функционирование научных приборов. Производилось бурение поверхности, забор грунта и его исследование. Многое удалось узнать о Венере, но остался важный вопрос: почему Венера, которая так похожа на Землю по размеру и массе, так разительно отличается от нашей планеты по условиям на поверхности? Куда делась вода, которая наверняка

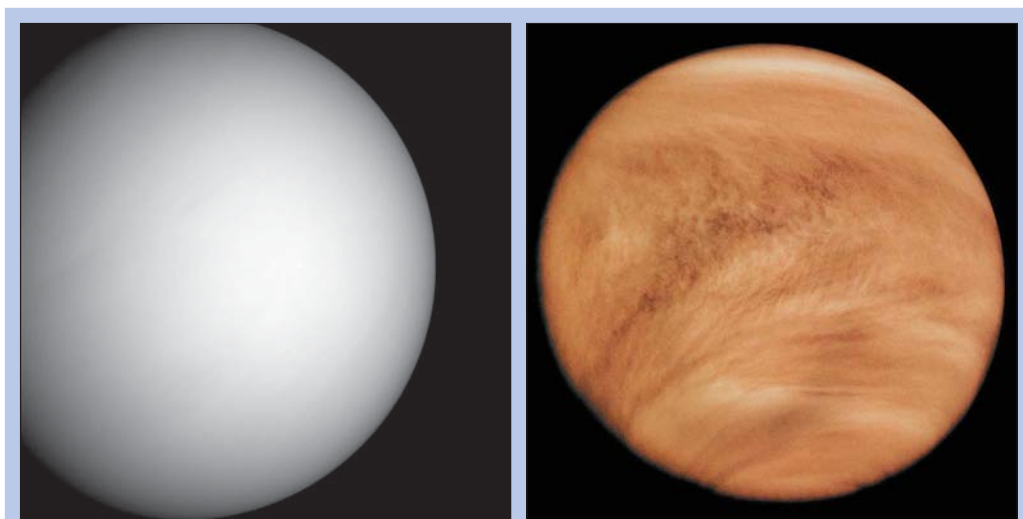


Рис. 92. Слева: Венера в диапазоне видимого света. Так воспринимает её человеческое зрение. Фото зонда «Маринер-10» (NASA). Справа: Венера в ультрафиолетовом диапазоне, более чётко выделяющем структуру облаков. Фото зонда «Пионер-Венера» (NASA)



Рис. 93. Поверхность Венеры в месте посадки аппарата «Венера-13» (СССР)

была на Венере, и почему там сохранилась древняя углекислотная атмосфера, в то время как на Земле она обогатилась кислородом?

Итак, среди подобных ей планет *Земля выделяется тремя свойствами*: наличием массивного спутника, большого количества жидкой воды на поверхности и весьма сильного магнитного поля. Вероятно, это и сыграло решающую роль в появлении жизни именно на Земле (рис. 94).

На каждой планете земной группы наблюдаются горы и кратеры — следы вулканической деятельности и метеоритных бомбардировок поверхности. Больше всего их на Меркурии, где отсутствие влаги и ветра сохраняет их неопределённо долгое время. Поэтому поверхность Меркурия очень похожа на поверхность Луны (см. рис. 89). Изучение карт рельефа поверхностей планет земной группы показало, что перепады высот (от самой высокой точки до самой низкой) увеличиваются с расстоянием от Солнца: на Меркурии перепад высот менее 10 км, на Венере — 15 км, на Земле — 20 км (включая океанские впадины), на Марсе — более 30 км. Отличительной особенностью Марса (рис. 95) являются гигантские древние *вулканические горы*, самые крупные из которых достигают в высоту 26 км. Другой особенностью Марса, заметной даже в небольшой телескоп, являются



Рис. 94. Земля. Вид из космоса

светлые *полярные шапки*, покрывающие высокоширотные области планеты. Они состоят из водяного льда и твёрдой двуокиси углерода (CO_2). В летний период полярная шапка тает, уменьшается в размерах, а зимой нарастает вновь.

Условия на поверхности Меркурия и Венеры исключают наличие там жизни земного типа. Зато на Марсе она могла бы быть. Правда, атмосфера Марса (CO_2 95 %, N_2 2,7 %, Ar 1,6 %) весьма разреженная — давление у поверхности 0,006 бар. Эта атмосфера почти не ослабляет космическую радиацию, поэтому на поверхности условия для жизни малопригодны. Но уже на глубине один-два метра под грунтом радиация значительно слабее, есть признаки воды, что вполне удовлетворяет условиям жизни неприхотливых земных организмов.

Температура у поверхности Марса от -90 до 0°C , а в редких случаях вблизи экватора может подниматься до $10\text{—}20^\circ\text{C}$ выше нуля, средняя температура составляет -62°C . Для сравнения: среднегодовая температура на Земле около $+15^\circ\text{C}$. Атмосфера Марса очень сухая: эквивалентная толщина слоя атмосферной осаждённой воды не более $10\text{—}20$ мкм (на Земле — около 1 см). Остальная вода скована в недрах вечной мерзлотой. Примечательно, что на Марсе существует много узких и длинных долин, вероятно образованных потоками воды, это своеобразные русла высохших рек. Вода в жидком виде сейчас на Марсе не наблюдается, для этого там слишком холодно и слишком низкое давление атмосферы. Однако предполагается, что миллиарды лет назад марсианский климат был более тёплым, а атмосфера — более плотной.

Скорость ветра у поверхности Марса обычно не превышает нескольких метров в секунду, но иногда возрастает до $40\text{—}50$ м/с, вызывая *глобальные пылевые бури* — специфические марсианские явления, продолжающиеся порой несколько месяцев. Детальное исследование Марса и поиски жизни на нём — захватывающая перспектива для науки в ближайшие десятилетия.



Рис. 95. Марс. Фото космического телескопа «Хаббл» (NASA/ESA)

Планеты-гиганты и их спутники

Группа более удалённых от Солнца планет, включающая **Юпитер**, **Сатурн**, **Уран** и **Нептун**, совершенно не похожа на группу планет земного типа. Это очень массивные **планеты-гиганты**. Средняя плотность их вещества удивительно низкая: от $0,7 \text{ г/см}^3$ у Сатурна до $1,6 \text{ г/см}^3$ у Нептуна. У этих планет нет твёрдой поверхности в привычном для нас смысле. Они состоят в основном из *водорода* и *гелия*, также соединений водорода (H_2O , NH_3 , CH_4). Их видимая поверхность не что иное, как облачный покров *мощной атмосферы*, окружающей океан жидкого молекулярного водорода.

Периоды обращения планет-гигантов вокруг Солнца весьма велики: от 12 лет у Юпитера до 164 лет у Нептуна. Однако вокруг своей оси они *вращаются очень быстро*, быстрее любой из планет земной группы: средний период вращения видимых поверхностей Юпитера и Сатурна составляет около 10 ч, а Урана и Нептуна — около 17 ч.

Температура верхнего облачного слоя Юпитера и Сатурна -140°C . Остальные гиганты ещё холоднее: температура в атмосфере на уровне давления 1 атм составляет у Урана -197°C , а у Нептуна -200°C .

В недрах Юпитера и Сатурна большой объём предположительно занимает слой жидкого водорода, частично в металлическом состоянии. При высоком давлении единственный электрон атома водорода теряет связь с ядром (протоном) и становится свободным электроном проводимости, как в металлах. Поэтому водород в таком состоянии называют металлическим. Глубоко в недрах планет-гигантов возможно наличие твёрдого ядра (рис. 96).

Наличие обширного жидкого электропроводящего слоя в недрах планет-гигантов делает их мощными источниками *магнитного поля*. Например, магнитное поле Юпитера на уровне его облачного слоя в 10—15 раз сильнее, чем поле у поверхности Земли. Поэтому Юпитер окружён обширной *магнитосферой*, препятствующей проникновению к нему потоков *солнечного ветра*, за исключением областей вблизи *магнитных полюсов*. В магнитосфере Юпитера накапливается много высокоэнергетических частиц — протонов и электронов, выбрасываемых Солнцем. Радиационные пояса Юпитера превышают земные во много раз по протяжённости и уровню радиации. Пребывание в них космонавтов совершенно исключено: кратковременное попадание туда стоило бы им жизни. Даже *беспилотные аппараты* с трудом выдерживают условия вблизи Юпитера. Для них создаётся специальная электроника, способная работать при высоком уровне радиации.

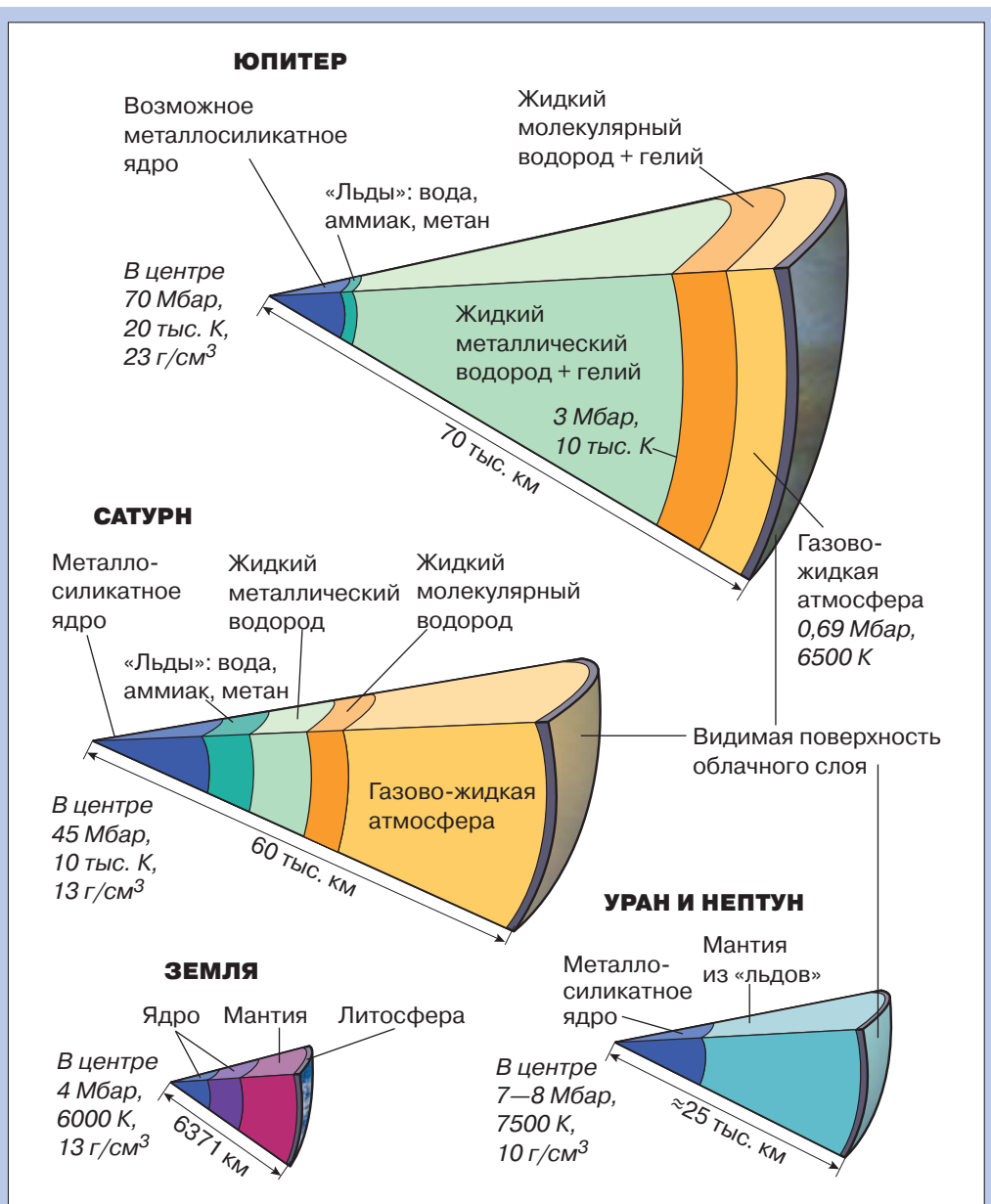


Рис. 96. Внутреннее строение планет-гигантов (по расчётам) и Земли. Масштаб размеров не выдержан

Магнитное поле Сатурна заметно слабее юпитерианского и по магнитной индукции на уровне облаков почти не отличается от земного. Но объём занимаемого им пространства намного больше, чем у земной магнитосферы, ведь и сама планета гораздо больше Земли. Радиационные пояса Сатурна не так опасны, как юпитерианские. Дело в том, что быстрые протоны и электроны, захваченные магнитным полем Сатурна, часто сталкиваются с частицами *кольца Сатурна* и поглощаются ими. Поэтому вблизи самой планеты, где располагается кольцо, радиация существенно ослаблена.

Все планеты-гиганты окружены *системами колец и множеством спутников*, большая часть из которых была открыта в последние десятилетия с помощью космических аппаратов и наземных телескопов. Яркие и легко заметные в телескоп кольца есть только у Сатурна, у остальных планет они практически неразличимы с Земли и впервые были сфотографированы автоматическими зондами. Выдающееся кольцо Сатурна действительно намного массивнее других колец. К тому же его частицы покрыты слоем льда и поэтому хорошо отражают солнечный свет. Частицы в кольцах остальных планет-гигантов намного темнее.

Любопытной особенностью планет-гигантов является то, что они *излучают тепло*, причём энергия этого излучения больше, чем энергия, которую они получают от Солнца. Без этого планеты были бы ещё холоднее. Источником внутренней тепловой энергии, как предполагают, является очень медленное сжатие внутренних плотных областей планет.

Интерес к **спутникам планет** у астрономов не меньший, чем к самим планетам. У Юпитера в настоящее время насчитывается 79 спутников, самый крупный — *Ганимед* диаметром 5268 км. У Сатурна как минимум 62 спутника, крупнейший — *Титан*, 5150 км. Урана имеет 27 спутников, крупнейший из них — *Титания*, 1580 км. У Нептуна 14 спутников во главе с *Тритоном* диаметром 2700 км (см. табл. 5 в Приложении).

Крупнейшие спутники планет-гигантов по их физическим свойствам можно считать полноценными планетами, попавшими в «гравитационный плен» к ещё более крупным телам. Поэтому их вполне можно было бы называть планетами-спутниками. Ближайшие из таких спутников к Земле (не считая Луну) — это *галилеевы спутники Юпитера*, названные так в честь их открытия **Галилео Галилеем** (1609). По порядку от Юпитера это *Ио*, *Европа*, *Ганимед* и *Каллисто*. Каждый из них крупнее и массивнее карликовой планеты Плутон, три из них превосходят Луну, а самый крупный — Ганимед — даже превосходит (размером, но не массой) настоящую планету Меркурий.

Среди галилеевых спутников наибольший интерес привлекают два ближайших к Юпитеру — *Ио* и *Европа*. **Ио** — самый экзотический спут-

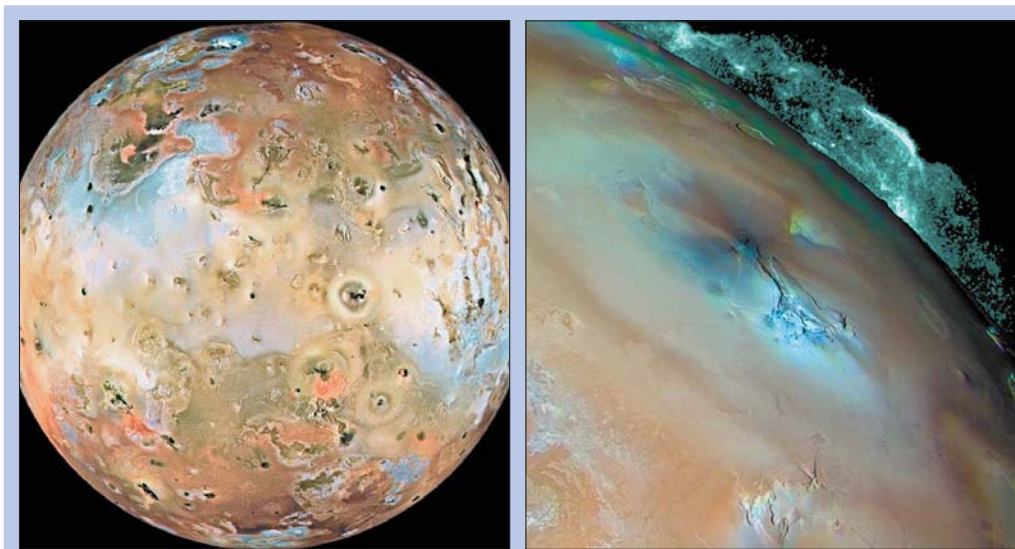


Рис. 97. Слева: спутник Юпитера Ио. Справа: извержение одного из вулканов на Ио, скрытого за горизонтом. Фото зонда «Галилео» (NASA)

ник в свите Юпитера (рис. 97). На его поверхности действует более 120 вулканов, мощные извержения которых заметно меняют внешний вид поверхности Ио буквально за считанные месяцы. Хотя температура поверхности Ио не превышает -120°C , вблизи действующих вулканов она поднимается до $+150^{\circ}\text{C}$, а в кальдере крупного вулкана Пеле зарегистрировано даже $+300^{\circ}\text{C}$. В условиях крайне разреженной атмосферы и небольшой силы тяжести высота вулканических выбросов на Ио обычно достигает 100 км (см. рис. 97), а газовые султаны над самыми активными вулканами типа Пеле поднимаются на 300 км. По склонам вулканов на сотни километров разливаются лавовые потоки.

Активная вулканическая деятельность на Ио в основном объясняется мощным гравитационным влиянием Юпитера. Из-за разницы в расстояниях ближней и дальней сторон спутника от планеты действующее на них притяжение существенно различается. В результате Юпитер придаёт Ио чуть-чуть дынеобразную форму. Этот эффект называют *приливым*, поскольку так же действует Луна своим притяжением на Землю, вызывая деформацию поверхности океанов — **приливы**. Но влияние Луны невелико: поверхность наших океанов поднимается и опускается в среднем всего на полметра, а Ио в результате приливного эффекта вытянута в направлении Юпитера примерно на 7 км. Этой деформацией всё

бы и ограничилось, если бы Ио обращалась вокруг Юпитера на неизменном расстоянии, то есть по круговой орбите. Но массивные соседи-спутники своим гравитационным притяжением сбивают Ио с кругового пути и вынуждают то чуть приближаться к Юпитеру, то удаляться от него. От этого приливные силы становятся то сильнее, то слабее, вызывая трение между соседними слоями твёрдых пород, и недра разогреваются точно так же, как кусочек пластилина, когда его разминают в руках. В этом и состоит причина невероятной *вулканической активности Ио*. Для специалистов-вулканологов Ио — самый привлекательный исследовательский полигон в Солнечной системе.

А для биологов наиболее привлекательным местом в Солнечной системе (помимо Земли, разумеется) является второй спутник Юпитера — **Европа**. Её поверхность сплошь покрыта льдом, как полярные области Земли. На ледяной поверхности Европы не видно ни гор, ни вулканов, ни метеоритных кратеров, поэтому она более других планет и спутников похожа на ровный бильярдный шар. Но расчёты, основанные на наблюдениях с борта пролетавших мимо Европы космических аппаратов, показывают, что под толстой ледяной корой спутника находится необъятный океан солёной воды (рис. 98). Его глубина может достигать десятков километров, а объём жидкой воды может быть больше, чем в Мировом океане Земли.

Помимо жидкой воды, Европа, кажется, имеет и другие компоненты, необходимые для жизни: приливное влияние Юпитера служит ей источником тепла, которое может поддерживать вулканическую деятельность на дне океана. А вулканы — привлекательное место для живых организмов, поскольку служат источником разнообразных химических соединений. Пока можно сказать лишь одно: в трещинах ледового панциря Европы заметны следы органических соединений, но являются ли они результатом жизнедеятельности неведомых нам организмов, неясно. Биологи с нетерпением ждут возможности изучить подлёдный океан Европы, а инженеры работают над проектом космического аппарата, который проникнет сквозь ледяной покров спутника и, превратившись в подводную лодку, исследует первый внеземной океан.



Рис. 98. Европа — спутник Юпитера

Крупнейший и самый интересный спутник Сатурна — **Титан**. Он вполне оправдывает своё имя, лишь немного уступая крупнейшему спутнику в Солнечной системе — Ганимеду и так же, как он, превосходя размером Меркурий (рис. 99). Ещё наземные наблюдения показали, что Титан имеет *плотную атмосферу*. Межпланетные зонды обнаружили, что основным компонентом атмосферы Титана (как и земной атмосферы!) является *азот* (85 %), а кроме него, присутствуют аргон, метан и другие углеводороды. Похоже, атмосфера Титана напоминает атмосферу юной Земли в период зарождения жизни на нашей планете.

Температура у поверхности Титана очень низкая, -180°C , поэтому химические реакции происходят там очень медленно. И даже если вещество на Титане эволюционирует в сторону зарождения жизни, вряд ли этот процесс продвинется далеко. Вспомните, как замирает развитие бактерий, когда мы кладем продукты в морозильную камеру холодильника. А на Титане намного холоднее.

Давление атмосферы у поверхности Титана составляет 1,5 атм, поэтому при столь низкой температуре там возможно существование озёр

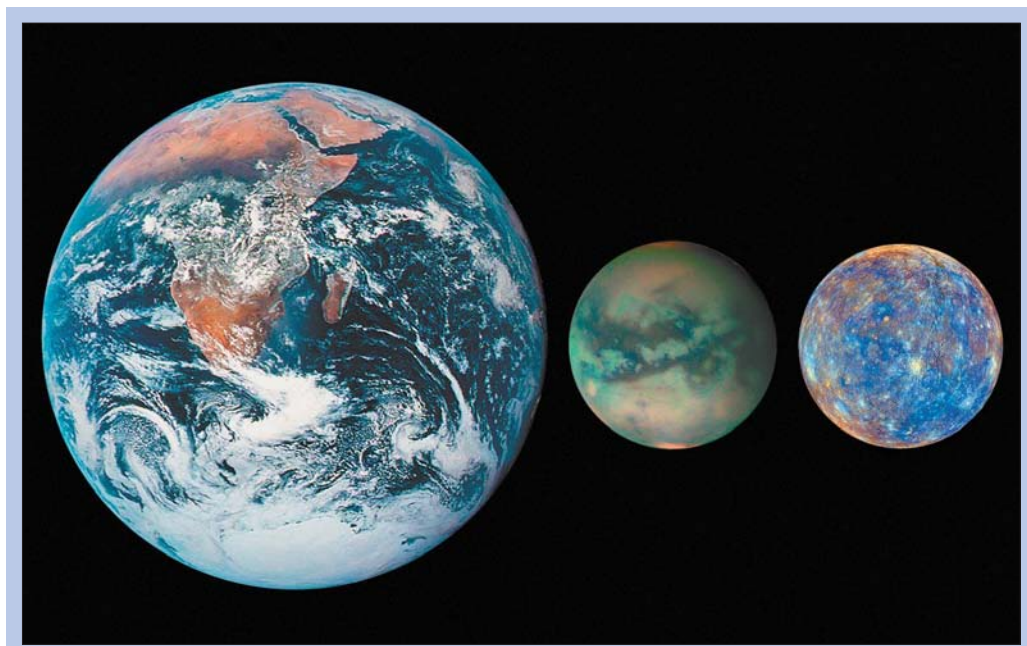


Рис. 99. Сравнительные размеры Земли, Титана и Меркурия. Все три изображения реальные, цветовой контраст усилен

из углеводородов. И они там действительно есть: в полярных областях Титана обнаружены *углеводородные моря и озёра*. Их открыл зонд «Кассини» (NASA), который прибыл в систему Сатурна в 2004 г., стал первым искусственным спутником «окольцованной планеты» и работал до сентября 2017 г. С собой он принёс посадочный аппарат «Гюйгенс» (Европейское и Итальянское космические агентства), который 14 января 2005 г. впервые опустился на поверхность Титана и, проработав там несколько часов, показал нам ландшафт этой замечательной маленькой планеты (рис. 100). Как и ожидалось, он выглядит безжизненно — слишком холодно! Но расчёты показывают, что в недрах Титана температура выше, и там могут быть условия для развития жизни.

Очень интересен с точки зрения биологии ещё один спутник Сатурна — Энцелад. Его диаметр всего 500 км, но средняя плотность

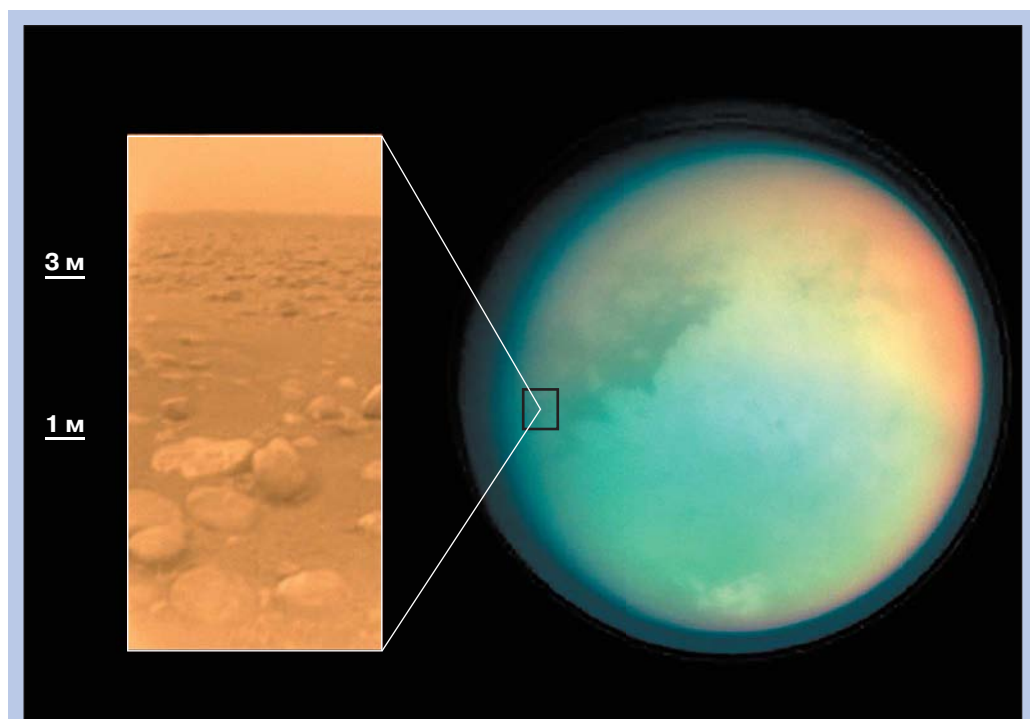


Рис. 100. Слева: единственное изображение поверхности Титана, переданное с места посадки зонда «Гюйгенс». Указано расстояние от камеры. Справа: Титан. Хорошо видна его толстая атмосфера. Квадратиком указано место посадки зонда «Гюйгенс»

довольно низкая ($1,61 \text{ г/см}^3$) и форма идеально сферическая, что указывает на наличие большой доли воды в его недрах. Поверхность Энцелада покрыта идеально белой ледяной корой, настолько хорошо отражающей солнечный свет, что температура там ещё на 20°C ниже, чем на Титане.

Северное полушарие Энцелада довольно густо покрыто метеоритными кратерами (рис. 101), а в районе южного полюса видны обширные бескратерные равнины. Астрономы предполагали, что несколько сотен миллионов лет назад на Энцеладе происходили извержения ледяных вулканов, выбросы которых омолодили поверхность, то есть покрыли её толстым слоем снега, который скрыл под собой кратеры. Однако никто не ожидал, что в наши дни на поверхности спутника бьют фонтаны. Тем не менее это так.

В южной полярной области Энцелада (на снимке — внизу) видны длинные фиолетовые разломы коры, названные «тигровыми полосами». Именно оттуда бьют водяные гейзеры. Фото зонда «Кассини» (NASA).

Наблюдения с борта аппарата «Кассини» показали, что *струи воды* (в виде пара и льдинок) взлетают над поверхностью Энцелада с такой силой, что частично даже улетают в космос. Эти струи были открыты на изображениях, переданных в момент, когда, пролетая мимо Энцелада, зонд получил команду посмотреть назад, в направлении Солнца. Энцелад при этом был виден аппарату с ночной стороны, а небольшая часть его дневной стороны выглядывала из-за

ночной как тонкий полумесяц. Рассеивающие солнечный свет частицы, выброшенные с поверхности спутника, должны быть хорошо видны с этого направления. Выбранная тактика наблюдений оказалась успешной: на полученном изображении (рис. 102) видно несколько струй, вылетающих из тех мест, где раньше были обнаружены

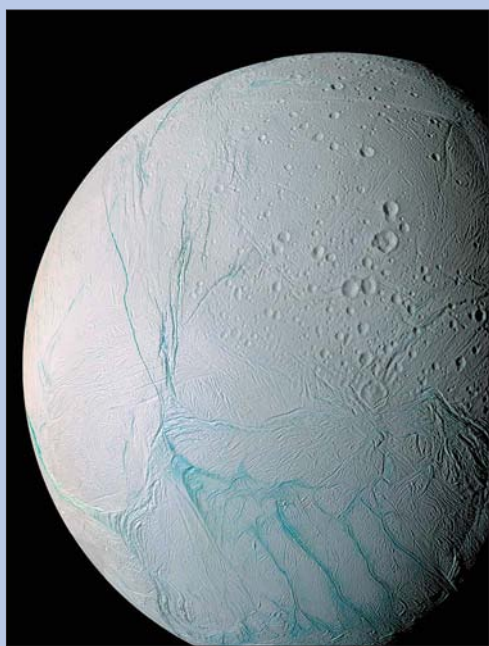


Рис. 101. Энцелад



Рис. 102. Фонтаны Энцелада

разломы поверхности — «тигровые полосы».

Стало ясно, что подо льдом Энцелада море. Вода поднимается по трещинам во льду и, вскипая при уменьшении давления, стремительно расширяется и выплёскивается наружу. Большая часть воды, разумеется, падает на поверхность и замерзает. Но поскольку вторая космическая скорость на поверхности Энцелада всего около 200 м/с, часть выброшенного вещества устремляется в космос и образует ещё одно тонкое *кольцо* вокруг Сатурна.

Открытие жидкой воды на Энцеладе сделало его важной целью для поисков жизни вне Земли.

20

Планеты-карлики и малые тела Солнечной системы

Планеты-карлики

По состоянию на 2018 г. в группу **планет-карликов** входит пять объектов: **Плутон**, **Эрида**, **Макемаке**, **Хаумея** и **Церера**. Но нет сомнения, что в неё войдут и другие уже обнаруженные тела (Седна, Орк, Варуна и др.), а также ещё многие до сих пор не открытые. Дело в том, что за исключением Цереры все планеты-карлики располагаются на далёкой периферии Солнечной системы — в *поясе Койпера* и далее, где их трудно обнаружить. Согласно определению **планета-карлик** удовлетворяет следующим условиям:

- обращается вокруг Солнца;
- не является спутником планеты;
- обладает достаточной массой, чтобы сила тяжести превосходила сопротивление вещества и придавала телу планеты форму, близкую к сферической;

— обладает не настолько большой массой, чтобы быть способной расчистить окрестности своей орбиты от других тел.

Именно последнее свойство отличает обычные крупные планеты от планет-карликов. Массивные планеты благодаря своему тяготению доминируют в окрестности своей орбиты, заставляя окружающие и встречающиеся тела менять свои орбиты, но сами почти не реагируют на их притяжение. Орбиты больших планет не пересекаются друг с другом. У каждой из них своя «зона ответственности».

Планеты-карлики не так массивны, чтобы контролировать движение всех тел вблизи своей орбиты. Они полностью подчиняются притяжению Солнца и больших планет, хотя сами на них почти никакого влияния не оказывают. Их траектории могут пересекаться друг с другом, и они даже могут иногда сталкиваться. Из пяти карликовых планет две удалось изучить довольно подробно. В 2015 г. вблизи Плутона пролетел межпланетный зонд «**Новые горизонты**» (New Horizons, NASA), сфотографировавший большую часть поверхности планеты и её спутники. В том же году зонд «**Рассвет**» (Dawn, NASA) вышел на орбиту вокруг Цереры и детально исследовал её поверхность. Остальные планеты-карлики пока наблюдают издалека с помощью телескопов, поэтому их характеристики до сих пор известны не очень точно.

Среди карликовых планет пояса Койпера лучше других изучен **Плутон** (рис. 103). Он не похож ни на одну из больших планет. Его диаметр 2380 км — меньше, чем у Луны. Это очень холодная планета (-230°C), ведь она расположена в 40 раз дальше от Солнца, чем Земля. У Плутона есть крупный спутник диаметром лишь вдвое меньше самой планеты — **Харон** (рис. 104), расположенный на расстоянии менее 20 тыс. км от Плутона. Эту пару нередко называют двойной планетой. Вокруг них обращаются ещё четыре небольших спутника. У планет-карликов Эрида, Хаумея и Макемаке тоже есть спутники.

Для Плутона, Харона и подобных им планет-карликов, находящихся в поясе Койпера, вероятно, характерна толстая ледяная кора, хотя состав слагающих их пород, по-видимому, разный. По своим параметрам, внутреннему строению и составу пород Плутон больше похож на ледяные спутники планет-гигантов, чем на планеты земной группы.

Различие важнейших свойств в группе планет-карликов не больше, чем у планет земной группы. Например, размеры планет-карликов и *ускорение свободного падения* вблизи их поверхности различаются менее чем в 3 раза, а массы — менее чем в 20 раз (примерно такое же различие между Землёй и Меркурием). Сила тяжести на поверхности карликовых планет приблизительно в 20 раз меньше, чем на Земле. Вторая



Рис. 103. Планета-карлик Плутон. Фото зонда «Новые горизонты» (New Horizons, NASA)

космическая скорость у их поверхности составляет около 1 км/с, что даже меньше, чем у Луны (2,4 км/с).

Казалось бы, карликовые планеты должны быть полностью лишены атмосферы, ведь её нет даже у Луны. Но следует помнить, что Луна намного ближе к Солнцу и днём её поверхность горячая. Молекулы газа движутся там быстро и улетают в космос. А на планетах-карликах такой холод, что молекулы газа не всегда могут «подпрыгнуть» высоко даже в слабом гравитационном поле. Поэтому планеты-карлики могут удерживать вокруг себя разреженную атмосферу. Например, у Плутона (рис. 105) она состоит в основном из азота (N_2) с небольшой долей метана

(CH₄) и оксида углерода (CO). На поверхности Плутона лежит азотный снег. Поэтому, когда планета по своей вытянутой орбите приближается к Солнцу, снег испаряется, и атмосфера становится плотнее. А с удалением от Солнца значительная часть атмосферного газа замерзает и ложится на поверхность в виде снега.

Объекты в поясе Койпера настолько удалены от нас, что определить их форму и размер, а также найти у них маленькие спутники с помощью современных телескопов чрезвычайно трудно.



Рис. 104. Харон, спутник Плутона. Фото зонда «Новые горизонты» (NASA)



Рис. 105. Закат Солнца на Плутоне чётко выявляет наличие у него атмосферы, которая имеет сложную слоистую структуру. На снимке можно различить около 20 слоёв. Фото зонда «Новые горизонты» (New Horizons, NASA)

Астрономы не торопятся включать в группу планет-карликов новые тела из пояса Койпера. Расчёты показывают, что чисто ледяные тела принимают округлую форму при диаметре более 400 км, а более твёрдые льдисто-каменистые тела типа Цереры — при диаметре более

900 км. О составе тела говорит его средняя плотность: у ледяных тел она около 1 г/см^3 , а у каменных около 3 г/см^3 . Для вычисления средней плотности нужно знать массу и объём тела. Определить массу удаётся в том случае, если у тела есть спутник, а для вычисления объёма нужно точно измерить размеры тела. Но объекты в поясе Койпера так трудно наблюдать, что об их плотности данные пока не надёжны.

Астероиды

■ **Астероиды** — это *малые тела* Солнечной системы, не демонстрирующие (подобно кометам) испарение вещества с поверхности. В большинстве своём это твёрдые тела неправильной формы, обращающиеся вокруг Солнца, в основном в *Главном поясе астероидов*, хотя орбиты некоторых астероидов далеко выходят за пределы этого пояса.

Астероидов диаметром более 200 км около тридцати. Из них крупнейшие — **Веста** (средний диаметр 525 км) (рис. 106) и **Паллада** (512 км). Они настолько массивны, что под действием собственной гравитации приняли почти сферическую форму, но всё же к планетам-карликам их пока не относят.

Ещё около 250 астероидов Главного пояса имеют диаметры до 100 км, астероидов с диаметрами более 1 км порядка 100 тыс. По оценкам, в Солнечной системе существуют миллионы астероидов размером с небольшую скалу (порядка 10 м) и несчитанное число размером с булыжник. Вероятно, они образовались вследствие дробления при взаимных столкновениях более крупных тел. Небольшие астероиды имеют весьма причудливую форму. Некоторые образуют двойные системы или имеют спутники. В прошлом астероиды часто называли малыми планетами, но теперь этот термин не используется (чтобы не было путаницы с планетами-карликами).

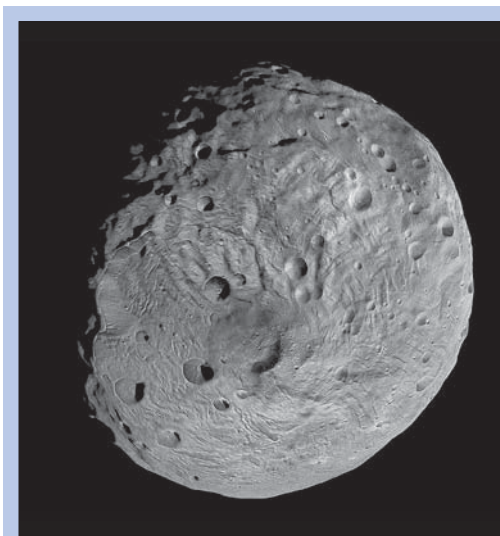


Рис. 106. Астероид Веста.
Вид со стороны южного полюса.
Фото зонда «Рассвет» (Dawn, NASA)

Некоторые из астероидов сближаются с орбитой Земли и даже пересекают её, что делает возможным их столкновение с Землёй. Мелкие осколки астероидов регулярно падают на Землю в виде *метеоритов*. Поэтому поиск и учёт астероидов в Солнечной системе — важная задача астрономии.

В XIX в. астрономы искали астероиды путём визуальных наблюдений и обнаружили около 300 самых крупных. В XX в. применяли фотографирование на химические эмульсии (фотопластинки) и до конца 1980-х гг. открыли ещё около 3000 астероидов. Затем фотопластинку начали вытеснять электронные приёмники света, что значительно облегчило труд «охотников за астероидами», переложив монотонную работу по поиску мелких небесных тел на компьютер. К 1995 г. уже было открыто около 18 тыс. астероидов. А к 2000 г. появились первые автоматические телескопы — наземные и космические, вообще не требующие постоянного присутствия наблюдателя. В результате к 2012 г. число зарегистрированных астероидов превысило 500 тыс., а к 2018 г. приблизилось к миллиону. И темп открытий не снижается, причём современные телескопы обнаруживают мелкие тела не только в Главном поясе астероидов, но и между орбитами *планет-гигантов* и даже в *поясе Койпера*.

Впрочем, несмотря на многочисленность астероидов, их полная масса, по крайней мере в Главном поясе, составляет лишь около 5 % массы нашей Луны. Оценить массу вещества в поясе Койпера пока сложно, но похоже, что и там его недостаточно, чтобы построить одну нормальную планету. Поэтому астероиды не могут быть осколками большой планеты.

Для надёжного обнаружения астероида мало один раз сфотографировать его. Необходимо в течение нескольких месяцев или даже лет наблюдать за ним, чтобы надёжно определить его орбиту и уже никогда не терять его и отличать от других астероидов. К тому же нередко астероиды под действием притяжения планет меняют свои орбиты, поэтому необходимо регулярно рассчитывать взаимное движение планет и астероидов и путём наблюдений проверять, не отклонились ли объекты от рассчитанных по законам небесной механики путей.

Среди астероидов иногда попадаются двойные системы с компонентами сравнимого размера. Кроме того, иногда удаётся заметить у крупных астероидов маленькие спутники, но для этого необходимо приблизиться к нему с помощью *межпланетного зонда*.

Измеряя *блеск* астероидов, астрономы давно уже заметили, что практически у всех он изменяется за короткое время: от часов до недель.

Ясно, что эти изменения связаны с неправильной формой и вращением астероидов. Это подтвердили первые же снимки с близкого расстояния, полученные космическими зондами (рис. 107, 108). Они показали также, что поверхность астероидов изрыта метеоритными кратерами разного размера. Судя по всему, формой и структурой поверхности малые тела обязаны многочисленным столкновениям друг с другом.

Фото получено японским зондом «Хаябуса» в 2005 г. Взяв образец вещества с поверхности астероида Итокава, зонд в 2010 г. вернулся к Земле и сбросил на парашюте капсулу, вместе с которой в руки учёных впервые попало вещество с астероида.

Астероиды Главного пояса движутся по слабо эксцентричным или почти круговым орбитам. Они находятся в «безопасной» зоне, где гравитационное влияние на них больших планет,



Рис. 107. Астероид Итокава (25143 Itokawa). Размер $535 \times 294 \times 209$ м



Рис. 108. Слева: астероид Ида. Размер $60 \times 25 \times 19$ км. Справа: её естественный спутник Дактиль диаметром 1,4 км. Фото зонда «Галилео» (NASA)

в первую очередь Юпитера, минимально. Считается, что именно Юпитер «виноват» в том, что на месте Главного пояса астероидов в период молодости Солнечной системы не смогла сформироваться крупная планета. Своим притяжением он разбрасывал лёгкие тела, направляя одни из них к Солнцу, а другие — в пояс Койпера, в облако Оорта или вообще вон из Солнечной системы. Сохранились немногие, они и населяют сегодня Главный пояс. Наклоны орбит астероидов к плоскости эклиптики достигают 70° , но обычно не превышают 10° . Двигутся по орбитам они в том же направлении, что и планеты.

Визиты космических зондов к астероидам (см. рис. 107) пока были немногочисленны, а образец вещества доставлен на Землю лишь однажды, поэтому о большинстве астероидов учёные судят по характеру отражённого ими солнечного света, то есть цвету, а ещё лучше — по спектру. В соответствии с ним астероиды делят примерно на два десятка спектральных классов. Это позволяет разбить огромное количество малых тел на несколько групп с приблизительно одинаковым типом поверхности и даже оценить химико-минеральный состав их вещества. Для этого подыскивают образцы с похожим цветом или спектром среди земных горных пород и минералов, а также среди метеоритов из научных коллекций (ведь *метеориты* — это кусочки астероидов, случайно попавшие на Землю).

Подбирая образцы-аналоги с похожими цветовыми и спектральными характеристиками, считают, что в первом приближении их химический и минеральный состав соответствует веществу астероидов данного типа. Как оказалось, в сравнении с земными горными породами вещество астероидов в целом выглядит значительно более простым и даже примитивным. Это говорит о том, что физические и химические процессы в веществе астероидов были не такими разнообразными и сложными, как в недрах и на поверхности планет земной группы. Это убеждает астрономов в том, что астероиды являются «строительным материалом» планет.

При изучении распределения астероидов в пространстве обнаружилась явная связь типа их вещества с расстоянием до Солнца. Оказалось, что чем более простой минеральный состав имеют астероиды (то есть чем больше в них летучих соединений), тем дальше, как правило, они находятся от Солнца. Ближе к Солнцу движутся астероиды, богатые металлами и тугоплавкими соединениями. А дальше от Солнца, на периферии Главного пояса располагаются астероиды, в основном состоящие из низкотемпературных гидратированных силикатов (температура разложения или плавления от 500 до 1000°C) с примесью углерода или органических

соединений. Это хорошо согласуется с тем фактом, что сам Главный пояс астероидов служит пограничной областью между тугоплавкими планетами земного типа и состоящими из летучих элементов планетами-гигантами.

Эта общая тенденция к росту доли летучих соединений сохраняется и за орбитами планет-гигантов, в поясе Койпера. Средние плотности планет-карликов составляют от 1,5 до 2,6 г/см³, что указывает на большую долю в их массе *замёрзших газов* (вода, азот, метан и др.). У малых тел в этой области плотность едва превышает 1 г/см³. По сути, это уже не астероиды, а ядра комет.

Кометы

Кометы — самые необычные по внешнему виду небесные объекты, доступные для наблюдения невооружённым глазом (рис. 109). Они привлекают внимание человека с глубокой древности. Вместе с астероидами и метеорными телами кометы относят к *малым телам* Солнечной системы.

■ Особенность комет состоит в том, что при сближении с Солнцем у них появляется хвост, почти всегда направленный в сторону от Солнца. Астрономы давно поняли, что *хвост кометы* — это газ и пыль, улетающие с поверхности твёрдого тела, нагретого Солнцем, и отброшенные в сторону давлением солнечного света и солнечного ветра. Но само тело кометы — её ядро — долго не удавалось увидеть.

Эта фотография сделана 19 января 2007 г. с горы Сьерро-Паранал (Европейская южная обсерватория, Чили).

На это оказались способны только космические зонды. В 1986 г. аппараты «**Vera-1**» и «**Vera-2**» (СССР) и «**Джотто**» (ESA) приблизились к ядру знаменитой **кометы Галлея**, и люди впервые увидели твёрдое тело кометы. С тех пор космические аппараты неоднократно сближались с ядрами комет, фотографировали их, проникали под их поверхность и даже



Рис. 109. Комета Макнота (C/2006 P1 McNaught)

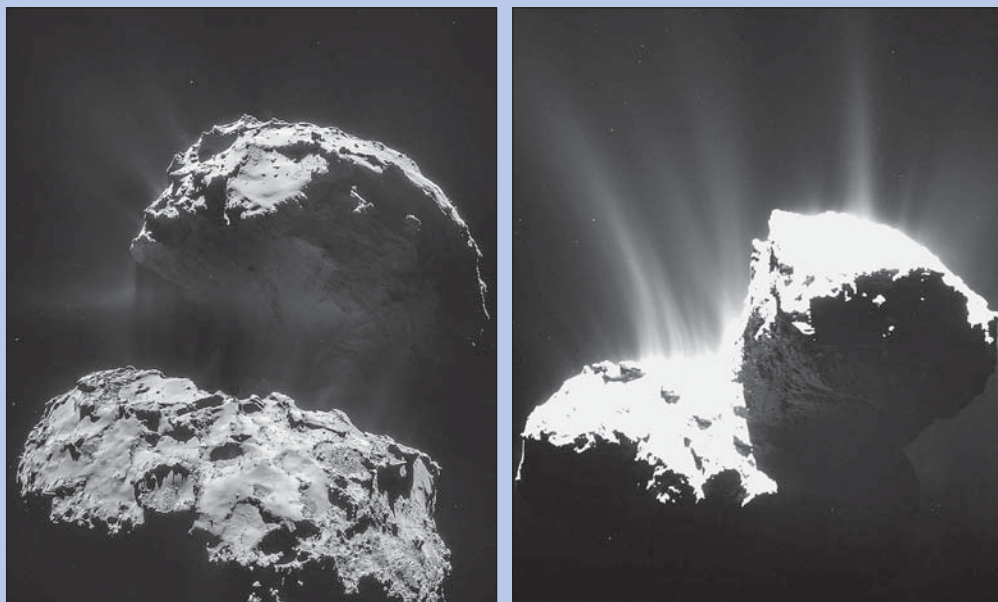


Рис. 110. Слева: ядро кометы Чурюмова — Герасименко. Справа: при сближении с Солнцем ядро этой кометы интенсивно испарялось. Фото зонда «Розетта» (ESA)

доставили на Землю образец пыли, улетевшей с поверхности ядра. Наиболее детально было изучено ядро кометы Чурюмова — Герасименко (рис. 110), на орбите вокруг которого с 2014 по 2016 г. работал зонд «Розетта» Европейского космического агентства, посадивший (не вполне удачно) на поверхность ядра спускаемый аппарат «Филы».

Ядра комет состоят в основном из водяного льда с примесью других летучих элементов и пыли. Снаружи они покрыты очень тёмной корой, содержащей много органических соединений. Вероятно, они синтезируются под действием солнечного ультрафиолетового излучения и накапливаются на поверхности по мере испарения льдов. Этим комета напоминает городские мартовские сугробы, покрытые тёмной коркой накопившейся за зиму пыли. В газе, покидающем ядро кометы Чурюмова — Герасименко, в основном присутствуют молекулы воды, но ещё были найдены монооксид и диоксид углерода, а также 16 органических соединений, включая аминокислоту глицин. Это говорит в пользу гипотезы о том, что предбиологическая эволюция вещества могла протекать в космосе ещё задолго до того, как на Земле сложились условия для жизни.

Наблюдения за кометой Чурюмова — Герасименко показали, что, приблизившись к Солнцу, она теряла десятки тысяч тонн вещества в сутки, а в момент прохождения *перигелия* орбиты потери возросли до 100 тыс. т в сутки (см. рис. 110). За один пролёт вблизи Солнца с ядра испаряется слой толщиной около 1 м. Поскольку орбитальный период кометы 6,4 года, она полностью испарится примерно через 10 тыс. лет. Это очень короткий срок, значит, комета недавно оказалась на орбите, столь близкой к Солнцу. Действительно, расчёты показали, что прежде она двигалась дальше от Солнца и испарялась гораздо медленнее. Но под гравитационным влиянием Юпитера комета недавно перешла на её нынешнюю орбиту и теперь быстро теряет вещество.

Такая судьба рано или поздно ждёт все кометы с коротким орбитальным периодом. Они слишком часто приближаются к Солнцу. Но существуют и другие кометы, которые прилетают к Солнцу с таких больших расстояний — из *облака Оорта*, — что между их визитами проходят десятки миллионов лет. Эти кометы называют **долгопериодическими**. А кометы с орбитальным периодом менее 200 лет — **короткопериодическими**.

21

Метеоры, метеориты и астероидная опасность

Глядя на ночное небо, мы не раз замечали «падающие звёзды» — метеоры. Это мелкие космические частицы, которые, стремительно влетая в атмосферу Земли, нагреваются от столкновения с молекулами воздуха и мгновенно превращаются в облачко плазмы (рис. 111). Они исчезают на высоте 80—90 км и никогда не долетают до поверхности Земли.

Размер этих частиц не больше миллиметра, а масса около $\frac{1}{100}$ грамма.

Как же такая песчинка может вызвать вспышку, которая видна нам с расстояния в сотни километров? А всё дело в огромной скорости её движения: если космические частицы догоняют Землю, то сталкиваются с её атмосферой со скоростью от 11 км/с (*вторая космическая скорость*) до 17 км/с, а если летят навстречу, то до 72 км/с. При малой массе они несут большую кинетическую энергию.

Происхождение этих космических песчинок вполне очевидно: они были потеряны кометами и астероидами при разрушении их верхних

слоёв. В некоторые периоды года частота метеорных вспышек резко возрастает, наблюдаются **метеорные потоки**. Многим известен поток *Персеиды*, приходящийся на первую половину августа. Вспышки метеоров кажутся расходящимися в разные стороны от созвездия Персей, откуда и название потока. В год наблюдается дюжина больших метеорных потоков и сотни малых. Каждый из них длится несколько суток и происходит в то время, когда Земля пересекает орбиту какой-либо кометы. Частицы, вызывающие вспышки метеоров (их называют **метеорными телами** или **метеороидами**), были потеряны кометой при её прохождении вблизи Солнца и постепенно заполнили область вдоль её орбиты.

Плотность частиц в пространстве не постоянна. Поэтому иногда Земля проходит через более плотные *облака кометной пыли*, и на ночном небе наблюдаются настоящие звездопады — **метеорные дожди**. Наиболее яркие метеоры, заметно превышающие по яркости Венеру, называют **болидами**.

Не только мелкие песчинки, но и крупные космические камни размером с булыжник обычно не преодолевают земную атмосферу: они сильно нагреваются, дробятся, плавятся, испаряются и растворяются в воздухе. Но если размер метеороида составляет несколько метров, то есть шанс, что его осколки долетят до поверхности Земли. Такие выпавшие на поверхность планеты остатки метеороидов называют **метеоритами**. Они представляют большую ценность для науки, поскольку сами прилетают к нам из космоса как образцы астероидного и кометного вещества, а иногда даже как осколки с поверхности планет и их спутников (Марса, Луны).

На снегу или в каменистой пустыне определить метеорит легко (рис. 112, 113). Но на сложной поверхности — в горах или в лесу — только опытный глаз может безошибочно определить метеорит. От сильного нагрева при полёте в атмосфере поверхность метеорита покрывается тёмной корой плавления, и на ней нередко потоками воздуха «высверливаются» небольшие углубления — **регмаглипты**. Это надёжный



Рис. 111. Метеор из потока Леониды



Рис. 112. Каменный метеорит, выпавший 7 октября 2008 г. в африканской пустыне после того, как в небе над Суданом разрушился астероид размером около 3 м

признак метеорита. По составу среди метеоритов наиболее распространены каменные (более 90 %), затем идут железные (рис. 114) и железо-каменные. Каменные метеориты порою нелегко отличить от земных камней, а железные гораздо легче: они реагируют на магнит, да и внешний вид у них весьма характерный.

Небольшие метеориты — подарок для науки, но крупные могут принести неприятности. Пока надёжно не зафиксировано ни одного случая убийства человека метеоритом, но попадания были, и неприятности тоже были. Летом 1908 г. над сибирской тайгой взорвался крупный метеорит разме-



Рис. 113. Находка метеорита

ром около 70 м, ударной волной повалив деревья в радиусе десятков километров. Это событие известно как падение **Тунгусского метеорита** (рис. 115), хотя следов его вещества на земле обнаружено не было. Вероятно, это была небольшая ледяная комета. А 15 февраля 2013 г. каменное тело размером около 20 м пролетело в небе над Челябинском и, разрушившись в воздухе, выпало осколками на снег. От прямых попаданий никто не пострадал, но ударная волна сломала в городе несколько крыш, выбила множество окон. Более тысячи человек, стоявших в этот момент у окна и смотревших на след метеорита, пострадало от порезов лица стеклом.

Падение метеорита размером более 100 м на Землю может вызвать большие разрушения (рис. 116), а его падение в океан — высокую волну *цунами*, которая очень опасна для прибрежных поселений. Поэтому актуа-



Рис. 114. Фрагмент Сихотэ-Алинского метеорита. 1947 г.



Рис. 115. Вывал леса в районе взрыва Тунгусского метеорита

лен вопрос: откуда к нам приходят крупные метеориты и можно ли предвидеть их падение и предотвратить его?

У внутреннего края Главного пояса астероидов есть группы тел, орбиты которых вытянуты в центральную область Солнечной системы и могут пересекаться с орбитами Марса, Земли, Венеры и даже Меркурия. Орбиты этих астероидов уже не так стабильны, как у членов Главного пояса: они быстро эволюционируют под влиянием не только Юпитера, но и планет земной группы.



Рис. 116. Метеоритный кратер Берринджера. Аризона. США

Знаменитый метеоритный кратер Берринджера в Аризоне диаметром 1240 м и глубиной 175 м образовался при падении железного метеорита размером около 50 м. Его возраст 50 тыс. лет, но в сухом горном климате он неплохо сохранился.

Ясно, что такие астероиды, пересекая орбиту Земли, создают угрозу столкновения. Существует даже общее название группы малых тел с большими полуосями орбит менее 1,3 а. е. — «объекты, сближающиеся с Землёй». К началу 2018 г. таких объектов было обнаружено около 17 тыс., из них 107 комет, а остальные — астероиды. Половина из них имеют размер более 140 м, что грозит при их падении на Землю серьёзными разрушениями. А почти 1000 из них имеют размер более 1 км и поэтому представляют потенциальную угрозу для всей биосферы Земли. Действительно, раз в несколько десятков миллионов лет Земля переживает глобальную катастрофу, связанную с падением таких астероидов. Но вероятность такой катастрофы в течение жизни одного человека пренебрежимо мала.

Потенциально опасными астероидами называют астероиды диаметром не меньше 100—150 м, которые в обозримом будущем могут (с некоторой вероятностью) подойти к Земле на расстояние, меньшее или равное $\frac{1}{20}$ а. е., или 7,5 млн км. Таких астероидов существует несколько тысяч, их стремятся найти и отслеживать их движение.

Хотя в последние годы поиск подобных тел астрономы ведут очень активно, ясно, что общее их количество может быть заметно больше: до 1500—2000 размером более 1 км и до 140 тыс. — размером более 100 м (даже такие объекты грозят нам локальными катастрофами). Поэтому *задача астрономии* состоит в обнаружении всех этих тел, а задача *небесной механики* — в точном прогнозе их движения, чтобы заранее знать о предстоящих столкновениях с Землёй. Астрономы активно решают эти задачи, так что в ближайшие годы практически все опасные астероиды будут выявлены, и можно будет спокойно разрабатывать технические средства для того, чтобы отвести их от Земли.

Но останется проблема с *долгопериодическими кометами*: они прилетают в район земной орбиты с далёкой периферии Солнечной системы, где никакой телескоп их не видит. Эти кометы летят с большой скоростью по почти параболическим орбитам, так что после их обнаружения остаётся совсем немного времени, чтобы в случае опасности предпринять защитные меры. Во всяком случае, чем более зоркими будут наши телескопы, тем раньше мы заметим опасность со стороны таких комет. К счастью, прилетают они очень редко.

Как видим, изучение Солнечной системы имеет не только чисто научное, но и вполне *прикладное значение*. Солнечная система — наш дом, и мы должны подробно его изучить, чтобы узнать обо всём полезном, что в нём есть, обо всех опасностях, которые могут в нём скрываться, и о будущем, которое нас в нём ожидает. Но без научного фундамента эти задачи не решить. Поэтому астрономы пытаются выяснить, как сформировалась Солнечная система и как изменялась она за прошедшие 4,5 млрд лет.

Астрономов интересуют причины, по которым так сильно отличаются планеты земной группы от планет-гигантов. Главная причина очевидна — различное расстояние от Солнца. И дело здесь не только и не столько в количестве тепла и света, получаемом этими планетами. Просто на заре эволюции планетной системы условия формирования планет были различными вблизи Солнца и на большом расстоянии от него. Существенно различались и плотность вещества, из которого формировались планеты, и его химический состав. Вопрос о том, почему существовали такие различия и как происходило образование планет, пытаются решить один из разделов астрономии — *космогония*. Материалом для размышлений учёных служат детальные данные о Солнечной системе и других планетных системах, как существующих (см. пункт 22), так и формирующихся (см. пункт 37).

■ Планеты, принадлежащие не нашей Солнечной системе, а иным планетным системам у других звёзд, называют **экзопланетами** или **внесолнечными планетами**. Очевидно, существуют и планеты, не связанные силой притяжения с конкретной звездой, а свободно движущиеся в межзвёздном пространстве. Общепринятого названия для них пока не утвердилось. Предлагаются варианты: планеты-сироты, межзвёздные планеты и др.

Обнаруживать экзопланеты очень сложно, ведь планета светит отражённым светом своей звезды, перехватывая и отражая лишь малую его часть. Например, отражённый от Земли свет в оптическом диапазоне спектра при наблюдении с большого расстояния будет в миллиарды раз слабее излучения Солнца. До недавних пор технические возможности астрономии не позволяли заметить столь тусклые источники света рядом с ярко сияющими звёздами. Поэтому надежды астрономов обнаружить экзопланеты основывались на том, чтобы, наблюдая звезду, заметить влияние на неё соседних с ней планет.

Открытие экзопланет

Практические поиски экзопланет начались в середине XX в. С 1938 по 1990 г. поиски велись только с помощью оптических угломерных (*астрометрических*) измерений: предпринимались попытки зарегистрировать периодические смещения положения выбранной звезды под влиянием обращающихся вокруг неё планет. Хотя даже для ближайших звёзд эти колебания, как правило, по амплитуде не превосходят $0,01''$, что ниже реальных ошибок астрометрических измерений, была надежда выделить их на фоне ошибок, учитывая периодический характер смещения звезды, связанный с орбитальным движением планеты. Этот метод обнаружения планет называется **астрометрическим** (рис. 117). За несколько десятилетий астрометрический метод не принёс надёжных результатов. Начиная с 1942 г. несколько раз публиковались сообщения об открытии экзопланет, но ни одно не подтверждалось дальнейшими наблюдениями.

Первую систему из трёх экзопланет открыл радиоастроном **Алекс Вольцжан** в 1991 г. Изучая нейтронную звезду-радиопульсар PSR B1257+12, он заметил периодическое изменение частоты прихода импульсов, вызванное смещением пульсара вдоль луча зрения под влия-

нием притяжения окружающих его планет. Это открытие вызвало у астрономов крайнее изумление. Известно, что рождению нейтронной звезды предшествует взрыв сверхновой, вызывающий большую потерю массы (в виде сброшенной оболочки звезды). Поэтому исходная планетная система, если бы она существовала, скорее всего, не смогла бы сохраниться: имея большие орбитальные скорости, планеты улетели бы от лёгкой нейтронной звезды. Но если взорвавшаяся звезда составляла пару с более массивным компонентом, то из вещества второй звезды, перетекавшего на пульсар уже после взрыва, возможно, могли бы образоваться планетообразные тела. До сих пор исчерпывающего объяснения этому открытию не дано.

«Настоящая» экзопланета была впервые надёжно обнаружена в 1995 г. Это сделали астрономы Женевской обсерватории (Швейцария) **Мишель Майор** и **Дидье Кёло**, построившие спектрометр, способный с высокой точностью измерять смещение линий в спектре звезды (см. пункт 27). Их расчёт был на то, что притяжение к планетам вызовет периодическое изменение скорости звезды вдоль луча зрения, а это в си-

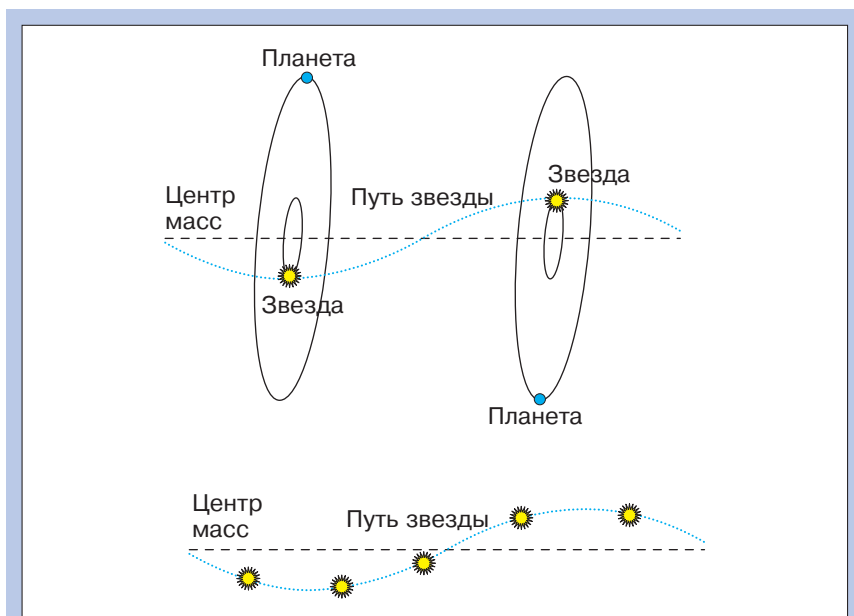


Рис. 117. Астрометрический метод обнаружения экзопланет

лу эффекта Доплера приведёт к смещению спектральных линий с тем же периодом. Такой метод обнаружения экзопланет называется доплеровским или методом лучевых скоростей (рис. 118).

Пусть звезда имеет массу M , а обращающаяся вокруг неё планета — массу m . Тогда расстояние звезды от центра масс этой системы по сравнению с расстоянием планеты составит $\frac{m}{M}$. Если планета движется по орбите с периодом P и скоростью v , то звезда будет двигаться вокруг их общего центра масс с тем же периодом, но со скоростью $V = v \left(\frac{m}{M} \right)$. Например, для системы «Солнце — Юпитер» $\frac{M}{m} = 1000$, а орбитальная скорость Юпитера $v = 13$ км/с. Следовательно, Солнце движется вокруг их общего центра масс со скоростью $V = \left(\frac{1}{1000} \right) \cdot 13$ км/с = 13 м/с. Это скорость бегуна-спринтера, но для звезды чрезвычайно маленькая. В результате эффекта Доплера линии в спектре звезды будут смещаться относительно своей длины волны λ на величину $\lambda \left(\frac{V}{c} \right)$, где c — скорость света (300 тыс. км/с). Для системы «Солнце — Юпитер» относительное смещение длины волны линий в спектре Солнца составит $\frac{13 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 4,3 \cdot 10^{-8}$. Заметить такое малое смещение линий в спектре крайне сложно.

Периодическое смещение линий в спектре звезды указывает на её орбитальное движение в планетной системе.

Майор и Кёло были не единственными, кто в те годы вёл поиск экзопланет доплеровским методом. Подобными поисками занимались уже несколько групп астрономов, но первая удача, отчасти случайно, пришла именно к группе Майора. Начав в 1994 г.

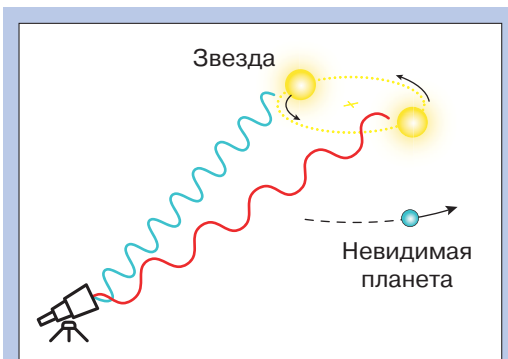


Рис. 118. Метод лучевых скоростей

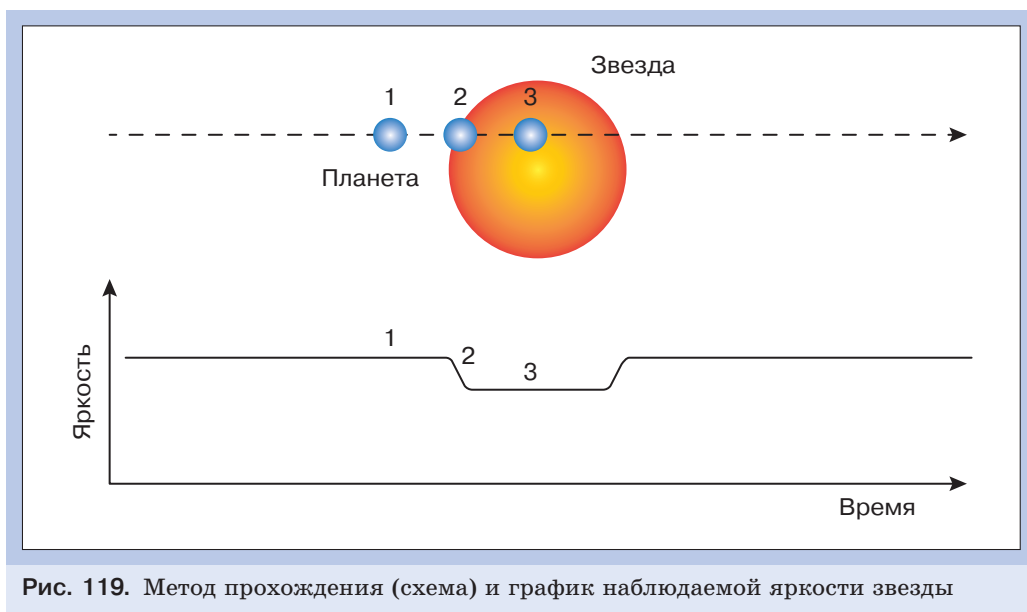


Рис. 119. Метод прохождения (схема) и график наблюдаемой яркости звезды

регулярные измерения лучевых скоростей 142 звёзд из близкого окружения Солнца, они довольно быстро обнаружили «покачивания» звезды 51 Пегаса (51 Peg) с периодом 4,23 сут, вызванные влиянием на неё планеты, по массе близкой к Юпитеру. Обнаружение первых *внесолнечных планетных систем* считается одним из крупнейших научных достижений XX в.

К концу XX в. было обнаружено около 20 планетных систем у близких звёзд. Затем частота открытий возросла. К 2012 г. было обнаружено уже более 760 планет (до шести планет в системе). Большинство из них было открыто доплеровским методом — по периодическому изменению лучевой скорости звезды, но уже начинал приносить плоды и другой метод, ныне ставший наиболее эффективным. Это **метод прохождения**, или **транзита**, при котором наблюдение ведётся не за изменением положения или скорости звезды, а за изменением её яркости (рис. 119).

Если орбита экзопланеты ориентирована к нам «ребром», то на каждом обороте планета проходит на фоне звезды, немного закрывая её от нас своим диском.

По размеру планеты обычно намного меньше звёзд, поэтому планета может заслонить лишь малую часть поверхности звезды. Например, даже гигант Юпитер в 10 раз меньше Солнца, значит, для удалённого наблюдателя он может закрыть лишь 1 % солнечной поверхности, ослабив

этим яркость Солнца на 1 %. Земля в 10 раз меньше Юпитера, поэтому её прохождение на фоне Солнца ослабило бы блеск нашего светила всего лишь на 0,01 %, что очень трудно заметить. Тем не менее современные методы *фотометрии* позволяют измерить такие малые колебания блеска звёзд. Особенно надёжно это можно сделать с помощью космических телескопов, которым не мешают флуктуации прозрачности земной атмосферы. Самым эффективным разведчиком экзопланет оказался космический телескоп «Кеплер» (NASA), выведенный в 2009 г. на околосолнеч-



Рис. 120. Космический телескоп «Кеплер» (NASA) обнаруживал экзопланеты, наблюдая за их прохождением на фоне диска родительской звезды. В 2018 г. объявлено о завершении его миссии

ную орбиту, близкую к орбите Земли (рис. 120). Он одновременно измерял яркость 145 тыс. звёзд в основном в созвездиях *Лиры* и *Лебедь*, что позволило обнаружить тысячи экзопланет.

Применяются и другие методы поиска экзопланет, но пока они не очень эффективны. К началу 2020 г. в основном методами прохождения и лучевых скоростей надёжно обнаружено более 4160 экзопланет примерно у 3100 звёзд. Обнаружилась планета даже у ближайшей к нам звезды — Проксимы в созвездии Кентавр. Есть планета и в системе α Кентавра. Четыре планеты, похожие на Землю, найдены у одной из ближайших звёзд — τ Кита. Можно уже уверенно сказать, что значительная доля звёзд в нашей Галактике обладает планетными системами.

Свойства экзопланет

О физических характеристиках некоторых экзопланет известно уже довольно много, хотя увидеть экзопланету как светящуюся точку вблизи звезды удалось лишь в нескольких случаях. Наблюдение за прохождением экзопланеты на фоне звезды позволяет измерить размер экзопланеты, а метод *лучевых скоростей* даёт оценку её массы и орбитальной скорости. Оба метода дают орбитальный период, что позволяет вычислить радиус орбиты. Этих данных достаточно, чтобы получить представление о физических свойствах экзопланеты и даже о вероятных условиях на её поверхности.

По своим характеристикам экзопланеты оказались очень разнообразны. Встречаются как небольшие, уступающие по массе Земле, так и гигантские, в несколько раз массивнее Юпитера.

Верхней границей массы экзопланет условно считается 13 масс Юпитера, поскольку в недрах более массивных тел в процессе их формирования могут протекать некоторые термоядерные реакции (отличные от основной звёздной реакции превращения водорода в гелий), что заставляет отнести их к так называемым *бурым* (коричневым) *карликам* — переходному типу между планетами и звёздами. Нижняя граница массы планет устанавливается самим определением понятия «планета» как тела, способного своей гравитацией придать себе сфероидальную форму. Для каменистого тела это диаметр около 1000 км. Такие «мини-планеты» в тысячи раз легче Земли, поэтому обнаруживать их невероятно сложно: они почти не затеняют звезду при прохождении на фоне её диска и почти не влияют на её движение своей слабой гравитацией.

Точность регистрации лучевой скорости звезды по эффекту Доплера достигла сейчас 1 м/с. Это близко к теоретическому пределу, в основном связанному с мешающим точному измерению скорости звезды бурным движением газа в её атмосфере. Поэтому мы не в состоянии обнаруживать доплеровским методом планеты типа Земли вблизи звёзд типа Солнца, для чего нужна была бы точность измерения скоростей в десятки раз более высокая. Однако уже достигнутая точность позволяет обнаружить планеты, которые в несколько раз массивнее Земли (так называемые «суперземли»), вблизи звёзд менее массивных, чем Солнце. Такие планеты способны удерживать атмосферу, и они действительно были обнаружены; их уже найдено несколько десятков. Некоторые из них находятся на таких расстояниях от своих звёзд, которые, как можно ожидать, обеспечивают на поверхности планеты комфортную для жизни температуру.

Поиски внеземной жизни

Захватывающая научная задача — поиски новых форм жизни за пределами Земли. Пока биологи не представляют себе иных форм жизни, кроме нашей, органической, основанной на углероде и универсальном растворителе — жидкой воде. Поэтому поиски внеземной жизни нацелены на то, чтобы найти планеты, похожие на Землю не только по размеру и массе, но и по температуре на поверхности, обеспечивающей наличие жидкой воды, то есть при нормальном атмосферном давлении имеющие температуру от 0 до 100 °С. Для этого планета должна располагаться не слишком близко к звезде и не слишком далеко от неё, а в узком интервале расстояний, называемом **зоной жизни**.

В Солнечной системе в этой зоне находится *Земля* и у её холодной границы *Марс*. Другие планеты и спутники по условиям на их поверхности не попадают в зону жизни, хотя в недрах некоторых спутников планет-гигантов всё же могут быть подходящие для жизни условия. Например, у *Европы* (спутника Юпитера) и *Энцелада* (спутника Сатурна) под толстой ледяной корой предполагается существование океанов жидкой воды при комнатной температуре. Что касается экзопланет, то заглянуть под их поверхность мы пока не можем, поэтому приходится ограничиваться поисками условий для жизни на поверхности. Для этого требуется получить спектр атмосферы экзопланеты и попытаться обнаружить в нём линии химических соединений, которые могут быть присущи жизни, так называемые *биомаркеры*. Обычно ими считают пары воды, молекулы кислорода и метана (как возможного продукта жизнедеятельности организмов). Но чтобы исследовать спектр экзопланеты, нужно как ми-

нимум получить её оптическое изображение, что пока удаётся лишь для наиболее крупных из них. В ближайшие годы (2020—2025 гг.) в строй войдут гигантские телескопы нового поколения с объективами диаметром 30—40 м, которые позволят не только фотографировать землеподобные экзопланеты, но и исследовать их спектры для поиска в них следов жизни.

Основные выводы

- **Солнечная система** простирается на сотню тысяч астрономических единиц и по этой причине изучена ещё далеко не полностью. Открытие новых объектов продолжается высокими темпами.
- Большие планеты делятся на две группы: **планеты земного типа** и **планеты-гиганты**, различия между которыми связаны с *условиями их образования*.
- Обнаружение новых тел Солнечной системы в основном ведётся с помощью наземных телескопов, а детальное исследование планет, их спутников, астероидов и комет — с помощью автоматических зондов.
- Космические путешествия человека пока ограничились полётами на Луну, но уже видна перспектива полётов на *Марс*. Там, а также на некоторых спутниках планет-гигантов, возможно, есть условия для существования жизни.
- Исследование планетных систем у других звёзд показывает большое разнообразие их строения и позволяет лучше понять прошлое нашей планетной системы.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Каков размер Солнечной системы и чем он ограничен?
- 2) Какие основные группы объектов выделяют в Солнечной системе?
- 3) Чем отличаются планеты-карлики от больших планет?
- 4) Чем отличается видимая сторона Луны от обратной?
- 5) Сколько исследователей побывало на поверхности Луны?
- 6) Чем различаются метеороид, метеор и метеорит?
- 7) Почему с точки зрения защиты Земли от угрозы из космоса кометы опаснее астероидов?
- 8) По какой причине поверхность Венеры горячее, чем поверхность Меркурия, который ближе к Солнцу?

- 9) Почему смена времён года происходит на Земле и Марсе и не происходит на Венере?

2. Решите задачи.

- 1) Экзопланета втрое массивнее Юпитера и обращается на расстоянии 1 а. е. вокруг звезды с массой Солнца. Каковы амплитуда и период колебаний лучевой скорости звезды для наблюдателя, расположенного в плоскости орбиты экзопланеты?
- 2) В атмосферу Земли влетает метеороид массой 100 т со скоростью 40 км/с и полностью разрушается. Какая при этом выделится энергия?
- 3) Чему равно ускорение свободного падения вблизи поверхности и вторая космическая скорость для шарообразного ядра кометы с плотностью вещества 1 г/см^3 и диаметром 5 км?

5

глава

Методы астрономических исследований



23

Типы астрономических измерений

24

Телескопы

25

Шкала
электромагнитных волн

26

Внеатмосферные
астрономические
наблюдения

27

Спектральный
анализ

Астрономия — наука наблюдательная. Она основана на получении информации о космических объектах путём различного рода измерений. Для этого используют телескопы разных конструкций, которые позволяют наблюдать даже очень тусклые и далёкие источники и получать резкие изображения исследуемых объектов. Наземные и космические телескопы открыли возможность изучать объекты в широком диапазоне электромагнитного спектра — от гамма-лучей до радиоволн.

С самого начала своего существования до настоящего времени астрономия базируется на измерениях нескольких типов.

Угломерные измерения

Угломерные измерения — измерения угловых размеров небесных тел и угловых расстояний между ними, а также их положений (координат) на небе. Астрономия как наука о космических объектах началась именно с угловых измерений высот кульминации светил, скорости перемещения Луны и Солнца по небу, определения координат звёзд и положения планет на небесной сфере. Для измерения углов между различными направлениями в дотелескопическую эпоху использовали самые разные инструменты (рис. 121, 122) — от деревянных реек на штативе с укреплёнными на них транспортиром и отвесом до гигантских каменных угломерных дуг диаметром десятки метров (их остатки, например, сохранились в обсерватории Улугбека, построенной правителем Самарканда в XV в.).

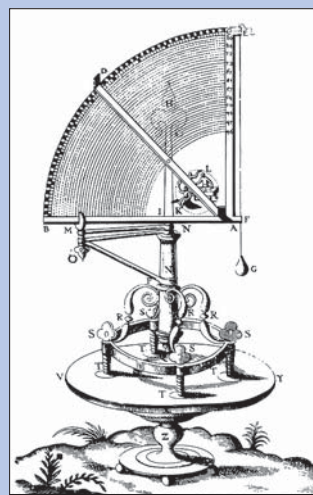


Рис. 121. Малый квадрант Тихо Браге

Малый квадрант Тихо Браге (см. рис. 121), расположенный в обсерватории Ураниенбург (построена в 1576 г.), служил для измерения высоты светил над горизонтом. На концах средней подвижной рейки находятся диоптры — узкие визирные щели для наведения на светило.

➔ Найдите информацию об обсерватории Улугбека в энциклопедии «Википедия» (<https://ru.wikipedia.org/wiki/>).



О структуре Солнечной системы, о расстоянии до Луны, Солнца, планет и звёзд узнали именно на основе угломерных измерений.

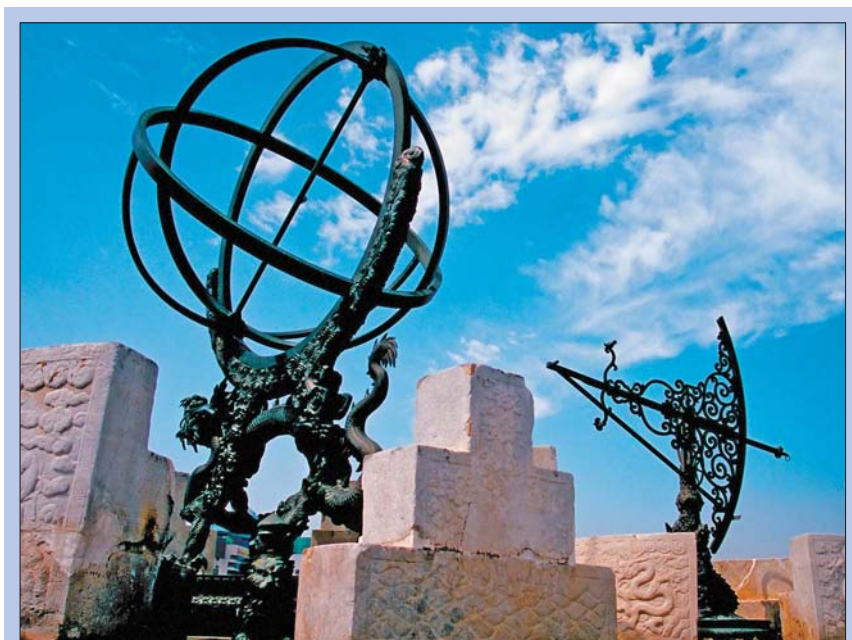


Рис. 122. Армилярная сфера Пекинской обсерватории (на фото — слева), построенная в 1442 г., служила для определения координат светил

Фотометрические измерения

Фотометрические измерения — оценка видимой яркости светил, которая проводилась долгое время лишь визуально, а затем, начиная с конца XIX в., и более точно с помощью фотометров — приборов, реагирующих

на слабые потоки света. Фотометрические измерения, в частности, дали возможность определять яркость и цвет звёзд, мощность их излучения. Это позволило узнать, что представляют собой звёзды и как они меняются в течение своей жизни.

Спектральные наблюдения, или анализ спектров космических источников

■ **Спектр** — это распределение энергии излучения по длинам волн.

Спектральный анализ пришёл в астрономию в конце XIX в., а в настоящее время большую часть информации о космических телах: о Солнце и об атмосферах планет, о звёздах, галактиках, о межзвёздном газе и других объектах — астрономы получают по спектральным наблюдениям.

Лабораторные исследования

Лабораторные исследования касаются только тех космических материалов, которые можно изучить непосредственно. Это упавшие на Землю метеориты, а также образцы вещества, доставленные, например, с Луны или изученные на месте космическими аппаратами при мягкой посадке на Луну, Марс или Венеру либо на малые тела Солнечной системы. Анализ состава различных объектов используется для того, чтобы понять, как возникли и как эволюционируют планеты и малые тела Солнечной системы.

24

Телескопы

Все современные методы дистанционного исследования космических тел используют **телескопы**. Они очень разнообразны по конструкции, техническому оснащению и решаемым задачам. На поверхности Земли используют два типа телескопов: **оптические** и **радиотелескопы**. За пределами атмосферы могут работать телескопы, принимающие не проходящее сквозь атмосферу излучение: гамма-лучи, рентгеновское, ультрафиолетовое и далёкое инфракрасное излучение небесных тел.

Основные задачи, которые решает любой телескоп, сводятся к следующим двум:

1) собрать как можно больше световой энергии и направить её на приёмник (детектор) излучения. В качестве детектора может выступать

глаз человека или искусственно созданные приёмники излучения. В оптическом диапазоне это фотопластинка (широко использовалась в прошлом веке) или фотоэлектрические приёмники, например полупроводниковые матрицы, сигнал с которых преобразуется в цифровой формат для дальнейшей обработки и визуализации;

2) построить как можно более «резкое» изображение источника (или источников) на данном участке неба. Степень «резкости» изображения характеризуется так называемой **разрешающей силой телескопа**. Любой источник бесконечно малого углового размера, или, как говорят, «точечный» источник (например, далёкая звезда), воспринимается при наблюдениях в телескоп чуть размытым, как источник пусть малого, но конечного размера. Чем этот размер меньше, тем «резче» изображение, построенное телескопом. За разрешающую силу (её ещё называют угловым разрешением) обычно принимают угловой размер «точечного» источника, каким его «видит» телескоп или любое другое оптическое устройство. Разрешающая сила глаза человека обычно составляет 1—2 угловые минуты. Разрешающая сила оптических телескопов зависит от многих факторов, включая состояние атмосферы, но в принципе она может быть в сотни раз лучше, чем у глаза, составляя доли угловой секунды.

Оптические телескопы

Главным элементом любого телескопа служит объектив, собирающий свет. Чем больше его размер, тем с большей площади собирается приходящий свет и тем более тусклые источники можно наблюдать. В качестве объектива используют либо линзы (или системы линз), строящие изображение источников в фокальной плоскости, либо вогнутые зеркала (или системы зеркал). В первом случае телескоп называют **рефрактором**, во втором — **рефлектором**. Существуют и смешанные зеркально-линзовые (так называемые катадиоптрические) системы.

Схемы этих телескопов показаны на рисунке 123.

В рефлекторах на пути света, отражённого от зеркала-объектива, обычно располагается ещё одно — вторичное — зеркало, которое выводит фокальную плоскость за пределы трубы телескопа.

Изображение, построенное объективом в фокальной плоскости, рассматривается глазом в окуляр, играющий роль сильной лупы, либо попадает на светочувствительный приёмник излучения. Изображение оцифровывается и записывается на носители информации для дальнейшей обработки. В случае спектральных наблюдений свет перед тем, как попасть на детектор, проходит через спектрограф, где разлагается в спектр.

Типы телескопов

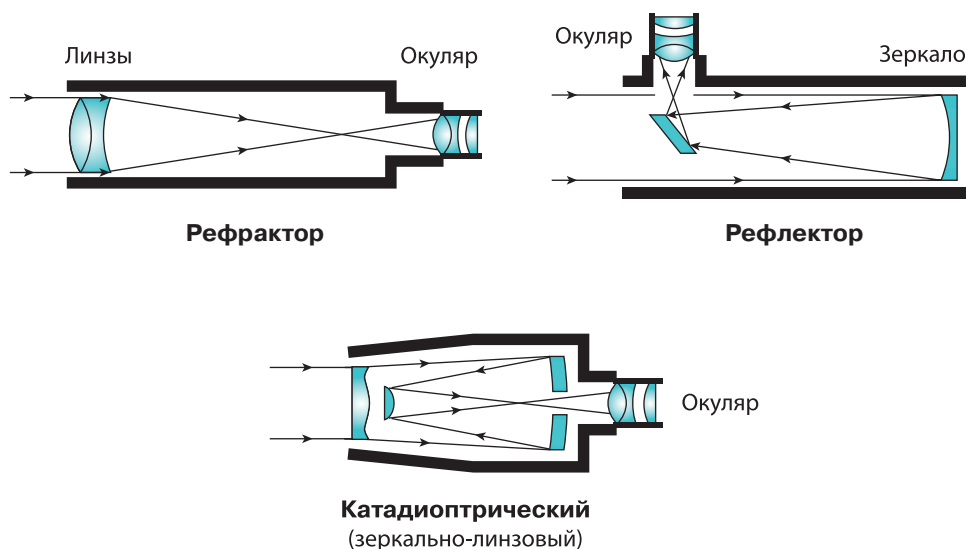


Рис. 123. Схемы телескопов для визуальных наблюдений: рефрактор, рефлектор и зеркально-линзовый, в котором объективом служит система из линзы и зеркала

Все большие современные оптические телескопы относятся к рефлекторам. Размеры зеркальных объективов у нескольких самых крупных телескопов мира составляют 8—10 м (рис. 124). Идёт работа по созданию телескопов с размером зеркал более 30 м (рис. 125). Зеркальные объективы диаметром до 8,5 м изготавливают сплошными, придавая их тыльной поверхности для лёгкости и жёсткости сотовую форму или делая их тонкими и для поддержания формы помещая в специальную оправу. А самые большие зеркальные объективы делают составными, состоящими из десятков и даже сотен отдельных сегментов. Материалом для изготовления зеркал служат твёрдые специально изготавливаемые сплавы с отражающим свет покрытием и с очень малым коэффициентом теплового расширения, чтобы неоднородности температуры не искажали форму отражающей поверхности.

Свет от любого космического источника проходит сквозь атмосферу, неоднородности которой, связанные с турбулентными движениями воздуха, заставляют луч света «дрожать», что приводит к размытию изображения и ухудшает разрешающую силу телескопа. Для того чтобы свести к минимуму потерю углового разрешения, крупные телескопы снабжают так называемой **адаптивной оптикой** — специальными оптико-электронными устройствами с компьютерным контролем, которые управляют светом, проходящим через телескоп. Атмосферное дрожание луча непрерывно анализируется системой, которая выдаёт команды на быстрое изменение формы отрагательной поверхности дополнительного зеркала, устанавливаемого внутри телескопа. Форма зеркала меняется так, чтобы компенсировать дрожание, устраняя в значительной степени искажающее влияние атмосферы. Так удаётся значительно улучшить качество изображения, создаваемого телескопом.



Рис. 124. Большой азимутальный телескоп Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (БТА САО РАН). Диаметр его зеркального объектива 6 м



Рис. 125. Проект гигантского телескопа Европейской южной обсерватории с составным зеркальным объективом диаметром около 40 м

Радиотелескопы

Радиоизлучение внеземного происхождения, приходящее из межзвёздного пространства, впервые было обнаружено ещё в 1930-х гг., причём случайно, при исследовании атмосферных помех дальней радиосвязи. Но бурное развитие радиоастрономии началось позднее, в 1960-е гг., когда были созданы достаточно большие радиотелескопы. К концу 1960-х гг. на небе было обнаружено уже несколько десятков тысяч радиоисточников различной природы.

Как и оптический телескоп, радиотелескоп собирает энергию электромагнитных волн, падающих на объектив, роль которого выполняют

антенны радиотелескопа. Они бывают различных конструкций, могут представлять собой совокупность металлических щитов, отражающих радиоволны, или большое количество диполей, но большинство крупных радиотелескопов обладают параболическими (рис. 126) или сферическими (рис. 127) антеннами, которые фокусируют приходящие из космоса потоки радиоволн на высокочувствительные приёмные устройства, называемые **радиометрами**.

Радиотелескопы долгое время не могли конкурировать с оптическими телескопами по угловому разрешению, поскольку позволяли получить лишь очень размытые изображения радиоисточников. Причина этого заключается в неустранимом препятствии — **дифракции радиоволн на краю объектива (антенны)**, которая ограничивает возможность фокусировки сигнала. Точечный радиоисточник воспринимается радиотелескопом не как точка, а как пятно, угловой размер которого тем больше, чем больше отношение длины волны излучения к диаметру антенны. Длины волн радиоизлучения на много порядков больше, чем оптического, поэтому дифракция значительно сильнее портит изображения в радиодиапазоне.



Рис. 126. Радиотелескоп с параболической антенной диаметром 64 м (Паркс, Австралия)

Антенна радиотелескопа в Аре-сибо (о. Пуэрто-Рико) имеет сферическую форму поверхности диаметром 305 м. Она неподвижно лежит на земле, а наведение радиотелескопа осуществляется перемещением приёмной аппаратуры над ним, подвешенной с помощью канатов на трёх высоких опорах. В результате радиотелескоп может наблюдать широкую область вокруг зенита, через которую в ходе суточного вращения Земли проходит значительная часть небесной сферы.



Рис. 127. Антенна радиотелескопа в Аресибо

Из-за дифракции точечный источник электромагнитных волн, будь то свет или радиоволны, воспринимается антенной или объективом телескопа как пятно с угловым размером, примерно равным $\frac{\lambda}{D}$ радиан, где λ — длина волны излучения, а D — диаметр объектива (антенны). Учитывая, что в 1 радиане содержится примерно 200 тыс. угловых секунд, для углового разрешения β получаем простую формулу: $\beta \approx 2 \cdot 10^5 \frac{\lambda}{D}$ угловой секунды. Отсюда следует, что для того, чтобы радиотелескоп, работающий, например, на длине волны 1 м, обладал угловым разрешением не хуже, чем невооружённый глаз человека (около 100 угловых секунд), его антенна должна иметь размер не менее 2 км. Но на длине волны 10 см для этого достаточно размера $D = 200$ м. Самая большая чашеобразная антенна — у китайского радиотелескопа FAST, её диаметр 500 м. Она неподвижно установлена на земле. Антенны, которые могут поворачиваться, отслеживая движение источника по небу, скромнее по размеру: наиболее крупные из них имеют диаметр около 100 м.

Радиоинтерферометры

Для того чтобы добиться высокого углового разрешения в радиодиапазоне, создают системы из нескольких антенн, которые одновременно принимают сигналы от одного и того же радиоисточника, а записи сигналов обрабатываются совместно. Такие системы называются **радио-**

интерферометрами (рис. 128). Отдельные антенны радиоинтерферометра можно рассматривать как маленькие части огромной «супер-антенны», которая своей площадью покрывает их все. В этом случае угловое разрешение также будет определяться отношением $\frac{\lambda}{D}$, но величина D будет относиться уже не к диаметру одной антенны, а к расстоянию между наиболее удалёнными друг от друга антеннами радиоинтерферометра.

Современные радиоинтерферометры используют антенны радиотелескопов, находящиеся друг от друга на расстоянии до нескольких тысяч километров. Поэтому достигнутое ими угловое разрешение на сантиметровых и дециметровых волнах намного превышает угловое разрешение не только глаза, но и любых оптических телескопов. Рекордсменом здесь явилась система, объединяющая несколько радиоантенн на разных континентах Земли, совместно с российским орбитальным радиотелескопом «Радиоастрон» с диаметром антенны 10 м, который функционировал с 2011 по 2019 г. (рис. 129). Он был выведен на вытянутую орбиту и мог удаляться

от Земли на расстояние более 300 тыс. км. Таким образом, был создан самый крупный радиоинтерферометр в мире. Его угловое разрешение достигало десяти миллионных долей угловой секунды. Под таким углом, например, была бы видна двухрублёвая монета с расстояния Луны. Столь высокое угловое разрешение нужно для изучения структуры и механизмов образования радиоисточников очень малого углового размера.



Рис. 128. Радиоинтерферометр VLA Национальной радиоастрономической обсерватории США

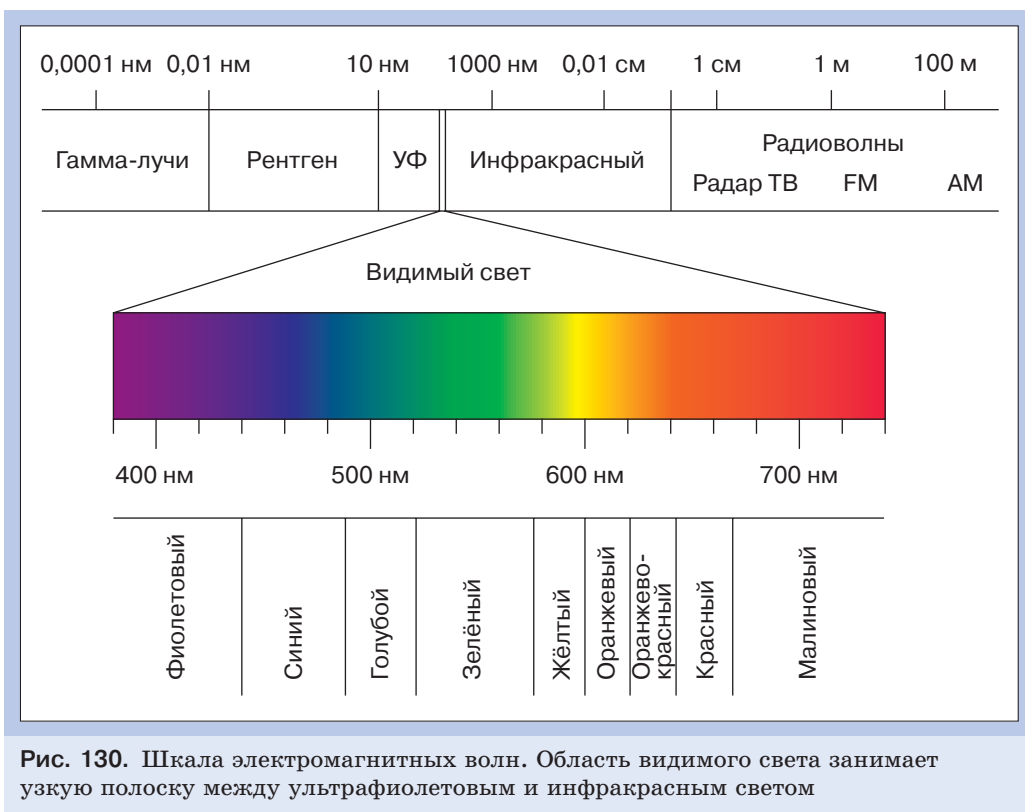


Рис. 129. Космический радиотелескоп «Радиоастрон» (Россия)

Электромагнитные волны различаются длиной волны λ или частотой $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света. Длины волн могут измеряться в любых единицах длины, чаще всего в метрах, сантиметрах, нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) или ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Диапазон электромагнитных волн весьма широк: от очень коротковолновых (высокочастотных) колебаний, называемых **гамма-лучами**, которые рождаются при распаде или взаимодействии ядер атомов, до длинноволнового (низкочастотного) **радиоизлучения**. Большая часть электромагнитных волн задерживается атмосферой, однако существует два широких «окна прозрачности», в которых излучение всё же доходит до земной поверхности. Это оптическое «окно» с примерными границами от 350 до 800 нм и радиоокно с границами примерно от 1 мм до 20—25 м (границы зависят от состояния верхнего слоя атмосферы) (рис. 130). Поэтому в наземных обсерваториях используются два вида телескопов — оптические и радиотелескопы. Частично достигает Земли и инфракрасное излучение на некоторых длинах волн, где атмосферное поглощение, связанное с углекислым газом и парами воды, не очень большое. Это излучение тоже можно наблюдать, хотя и в ослабленном виде, с поверхности Земли, особенно если обсерватория находится высоко в горах.

Из космического пространства приходит излучение во всех диапазонах электромагнитного спектра, причём в разных диапазонах спектра наиболее яркими и заметными будут разные источники излучения. Лишь Солнце остаётся самым ярким объектом на небе в любом диапазоне длин волн.

В каждом спектральном диапазоне есть свои выделяющиеся по яркости источники на небе. Так, самыми заметными источниками высокочастотного излучения в *рентгеновском* и *гамма-диапазоне* являются активные ядра далёких галактик, плотные и очень горячие газовые диски вокруг некоторых очень компактных звёзд в двойных звёздных системах, а также очень горячий газ в межгалактическом пространстве в скоплениях галактик. В *ультрафиолетовой области спектра* наиболее яркие объекты — это молодые, массивные и горячие звёзды. Основная энергия, которую они излучают, приходится на ультрафиолетовый свет. В более длинноволновом диапазоне — в *оптических лучах* — мы можем видеть на небе звёзды и сравнительно близкие к нам тела Солнечной системы. В инфракрасной области, примыкающей к оптической



с длинноволновой стороны, ярче всего выглядят звёзды со сравнительно низкой температурой (3000—4000 К), а на более длинных волнах инфракрасного диапазона в десятки и сотни микрометров (десятки и сотни тысяч нанометров) наблюдается свечение пыли в межзвёздных облаках. Наиболее яркие источники в самом длинноволновом диапазоне — в области радиоволн — это полоса Млечного Пути, центральная часть нашей Галактики, и некоторые далёкие галактики, называемые радиогалактиками, а также холодные облака межзвёздного газа и расширяющиеся оболочки взорвавшихся звёзд.

Таким образом, в различных областях спектра видны разные объекты и небо выглядит совершенно по-разному.

Ни один приёмник света — ни естественный (наш глаз), ни искусственный (камера телескопа) — не способен воспринять весь диапазон спектра. Поэтому для каждой области спектра создают отдельные телескопы, способные принимать именно эти лучи.

Для исследования космических источников в гамма-области, рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра создаются специализированные космические обсерватории, работающие за пределами атмосферы. Некоторые из них находятся на околоземных орбитах, некоторые — далеко от Земли. Первые космические лаборатории открыли нам, как выглядит небо в невидимом с Земли рентгеновском и инфракрасном свете. Оно оказалось совсем непохожим на знакомое нам звёздное небо, на нём видны другие источники, причём как точечные, звездopodobные, так и протяжённые. С годами совершенствовались и методы регистрации излучения, возрастала чувствительность детекторов и разрешающая сила телескопов. Так, если первые рентгеновские телескопы могли только обнаружить рентгеновский источник, измерить его рентгеновскую яркость и грубо оценить координаты, то современные рентгеновские обсерватории умеют получать резкие изображения источников в рентгеновских лучах, на которых видны мелкие детали.

Космический телескоп «Хаббл» (рис. 131), запущенный в США ещё в 1990 г., был единственным крупным инструментом, рассчитанным на наблюдения в диапазоне видимого света. Атмосфера не мешала этим наблюдениям, поэтому, хотя зеркало телескопа «Хаббл» не очень велико по астрономическим меркам — всего 2,4 м в диаметре, ему удалось получить непревзойдённые по резкости изображения самых различных объектов и уловить слабые потоки света от далёких звёзд и галактик, которые недоступны даже самым большим телескопам на Земле. Остальные космические обсерватории, которые были запущены или проектируются в настоящее время, рассчитаны не на область видимого излучения, а на те диапазоны спектра, которые недоступны с поверхности Земли (рис. 132, 133).



Рис. 131. Космический телескоп «Хаббл» (NASA/ESA) работает на высоте около 600 км от поверхности Земли

Советская орбитальная обсерватория «Астрон» была запущена в 1983 г. с ультрафиолетовым телескопом диаметром 80 см и двумя рентгеновскими телескопами (см. рис. 132).

Внеатмосферные наблюдения значительно расширили наши знания об окружающем мире. Были открыты ранее неизвестные типы космических тел, исследованы объекты самой различной природы — от звёзд нашей Галактики с необычно высокой или необычно низкой температурой до излучения звёзд, газа и пыли в предельно далёких галактиках. За пределами Солнечной системы были обнаружены тысячи планет. О некоторых из этих объектов речь пойдёт в следующих главах.



Рис. 132. «Астрон»

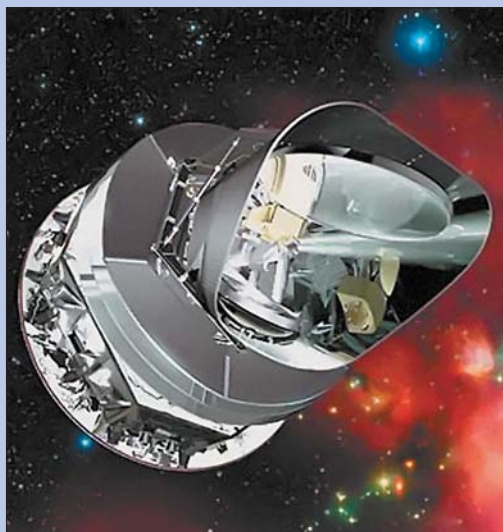


Рис. 133. Орбитальные телескопы Европейского космического агентства: «Планк» (слева) для наблюдений в микроволновом диапазоне и «Гершель» (справа) для наблюдений в далёком инфракрасном диапазоне

Различные типы спектров

Свет, который кажется нам белым, — это совокупность лучей различных длин волн, то есть различных цветов — от красного до сине-фиолетового. Если узкий пучок яркого, например солнечного, света пропустить сквозь призму, он растянется в узкую цветную полосу спектра с плавными переходами от одного цвета к другому, поскольку для света с различными длинами волн показатель преломления стекла различен. На этом свойстве призмы были основаны конструкции первых спектрографов для изучения спектров различных источников. Позднее стеклянную призму в спектральных аппаратах сменила дифракционная решётка.

Спектральную полосу можно сфотографировать, но сама по себе она даёт лишь качественную картину спектра, демонстрируя присутствие излучения с различными длинами волн. В физике и астрономии **спектром** принято называть количественное распределение энергии излучения в зависимости от длины волны. Спектр может быть представлен не только как изображение полосы, но и в виде графика (рис. 134).

Если спектр непрозрачных тел (например, раскалённого металла) всегда непрерывный, то спектр Солнца — непрерывный с хорошо заметными тёмными линиями, находящимися всегда на тех же самых местах в спектральной полоске (рис. 135). Эти линии образуются в солнечной атмосфере. Они получили название **фраунгоферовы линии** — по имени немецкого физика XIX в. Йозефа Фраунгофера, впервые их исследовавшего. Подобные линии есть и в спектрах других звёзд. Горячие прозрачные газы имеют спектр иного типа, состоящий из отдельных светлых линий. Такой спектр принято называть **спектром излучения** или **эмиссионным спектром**. Он наблюдается у многих астрономических объектов.

Выяснилось, что каждый химический элемент имеет свои линии, которые могут быть как эмиссионными, так и линиями поглощения, в зависимости от свойств источника, но длины волн их всегда будут одними и теми же. Так, в конце XIX в. в науку пришёл спектральный анализ, позволяющий изучать химический состав и свойства источников дистанционно, на каком бы расстоянии от нас они ни находились. Правда, измерять количественно содержание разных химических элементов в источнике по его спектру научились не сразу. Это удалось сделать только после появления одной из фундаментальных физических теорий — *квантовой механики*, объяснившей механизмы излучения света атомами.

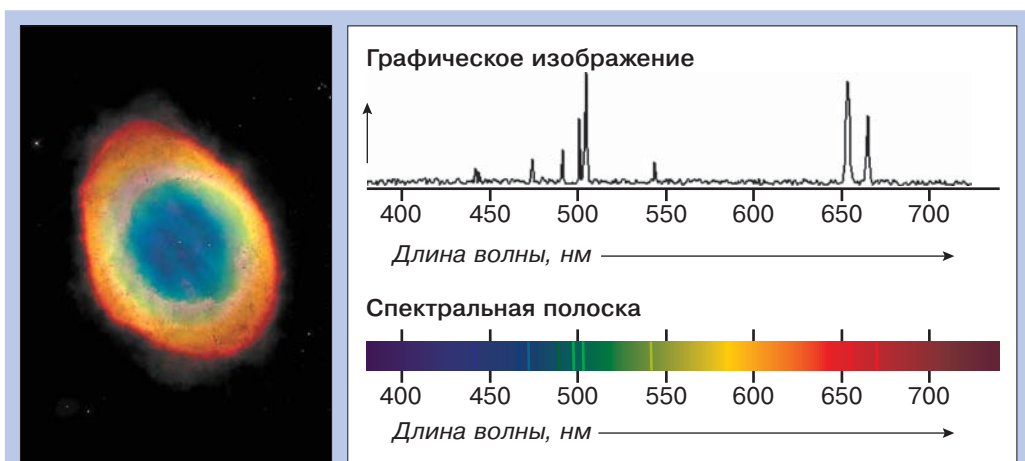


Рис. 134. Газовая туманность М57 (слева) и её спектр в графическом изображении и в виде спектральной полоски (справа)

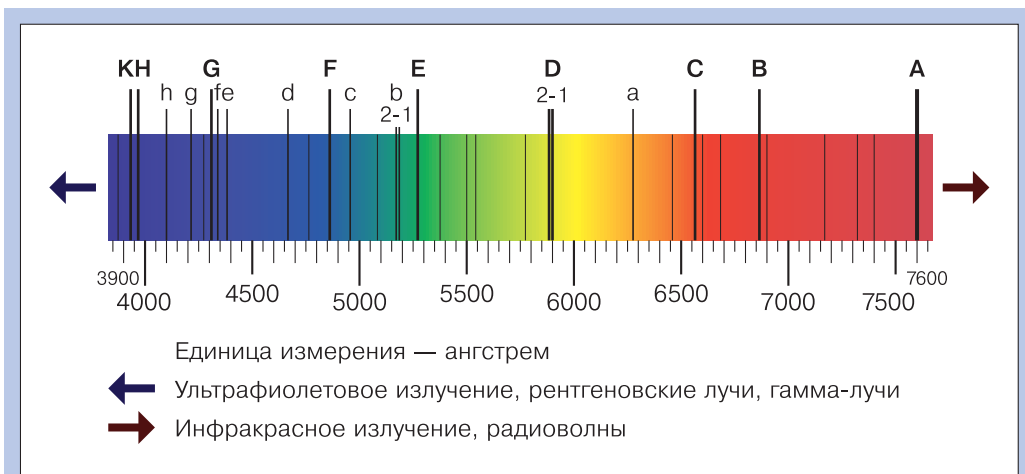


Рис. 135. Положение наиболее сильных тёмных линий в оптическом спектре Солнца от 3900 до 7600 ангстрем. Вверху приведены обозначения линий. Самые заметные линии принадлежат водороду, кальцию, магнию, натрию, железу

Применительно к астрономическим объектам спектральный анализ доказал, что планеты светятся отражённым светом Солнца (у них спектр почти такой же), а спектр звёзд может быть разным и зависит в первую очередь от цвета звезды или от её температуры.

Астрономов давно интересовала природа светлых пятнышек, названных **туманностями**, разбросанных по всему небу и видимых, за несколькими исключениями, только в телескопы. Когда удалось получить их спектры, то оказалось, что они бывают двух разных типов: *непрерывный спектр с линиями поглощения*, как у звёзд, и *линейчатый*, как у газа. В первом случае туманности представляют собой далёкие звёздные системы, во втором — горячие облака межзвёздного газа в нашей Галактике (см. рис. 134). И в том и в другом случае спектральные линии принадлежат известным химическим элементам.

Подведём итог:

- спектры твёрдых непрозрачных тел — непрерывные, без линий;
- спектры звёзд — непрерывные, с линиями поглощения, причём набор линий может быть разным в зависимости от температуры звезды даже при одном и том же химическом составе;
- спектры планет и астероидов близки к спектру Солнца (хотя наличие атмосфер планет приводит к появлению дополнительных линий в спектре);
- спектры разреженных газов (газовые межзвёздные облака, газовые хвосты комет) содержат линии излучения тех элементов, из которых состоит газ.

Анализ спектров позволяет не только отличить свечение газа от звёздного свечения и узнать химический состав источников света. По измерению формы и относительной яркости спектральных линий, как оказалось, можно оценить температуру и плотность звёздных атмосфер и межзвёздного газа, понять, в результате действия каких процессов рождается излучение, то есть подробно исследовать физическое состояние той среды, свет которой исследуется. Поэтому с появлением спектрального анализа в астрономии появилось новое быстро развивающееся направление — *астрофизика*.

Эффект Доплера в астрономии

В изучении астрономических объектов очень важную роль сыграло то обстоятельство, что точное измерение длин волн спектральных линий (как поглощения, так и излучения) даёт возможность определить скорость, с которой источник приближается или удаляется от нас. Для этого используется хорошо известный в физике **эффект Доплера**. Этот эффект относится к любым волновым процессам — будь то свет, звук, радиоволны или ещё какое-либо излучение.

Согласно эффекту Доплера при непрерывном изменении расстояния до источника меняется длина волны приходящего от него света, следова-

тельно, сдвигаются все без исключения линии в спектре. В большинстве случаев эти сдвиги очень малы, но их всё же можно обнаружить.

Если у неподвижного источника длина волны какой-либо спектральной линии равна λ_0 , а источник удаляется со скоростью V , то длина волны линии станет равной λ , что несколько больше, чем λ_0 . Относительная величина изменения длины волны определяется отношением скорости V к скорости распространения волн c (для света это 300 тыс. км/с):

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{V}{c}.$$

Если источник не удаляется, а приближается к нам, то формула не меняется, только скорость надо будет считать отрицательной, а это значит, что длины волн будут не возрастать, а уменьшаться. Например, если звезда приближается к нам со скоростью 30 км/с, а длина волны линии равна 656 нм (это красная линия водорода), то сдвиг линии составит $\frac{-30 \cdot 656}{300\,000} = -0,0656$ нм, то есть линия будет немного смещена в сторону коротковолнового (синего) конца спектра. Эту величину можно уверенно измерить.

Приведённая формула для эффекта Доплера верна, только если $V \ll c$. В подавляющем большинстве случаев эта простая формула вполне пригодна для точной оценки скоростей астрономических объектов. Например, скорости звёзд нашей Галактики относительно Солнца, за редким исключением, не превышают 300 км/с. В астрономии скорости, сопоставимые со скоростью света, встречаются почти исключительно у очень далёких галактик.

Основные выводы

- Современная астрономия использует различные типы измерений для исследования космических объектов.
- Основным астрономическим инструментом является **телескоп**. Наземные обсерватории используют два типа телескопов — **оптические** и **радиотелескопы**, соответствующие оптическому и радиоокну прозрачности атмосферы.
- Излучение, не проникающее сквозь атмосферу, исследуется за пределами атмосферы с помощью специализированных космических обсерваторий.

- В разных диапазонах электромагнитного спектра могут наблюдаться объекты разной природы. Использование **спектрального анализа** дало возможность исследовать физические свойства источника, его химический состав, а также определять скорости, с которыми объект приближается или удаляется от нас.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Какие виды измерений используются в современной астрономии?
- 2) Каков принцип работы телескопа?
- 3) Что такое угловое разрешение телескопа?
- 4) Чем радиотелескопы отличаются от оптических телескопов?
- 5) Для чего используются радиоинтерферометры?
- 6) Зачем создаются внеатмосферные обсерватории?
- 7) Какую информацию можно извлечь из спектров небесных тел?

2. Решите задачи.

- 1) Во сколько раз больше света от звезды будет попадать в глаз наблюдателя, если он использует для наблюдения телескоп с объективом диаметром 10 см? Принять, что зрачок глаза имеет диаметр 5 мм.
- 2) Определите, каково угловое разрешение телескопа «Хаббл» с объективом диаметром 240 см, ограниченное дифракцией света, для излучения с длиной волны 600 нм.
- 3) Межзвёздный водород излучает в радиодиапазоне на длине волны 21 см. На какой длине волны приходит к нам излучение водорода в этой линии от галактики, которая удаляется от нас со скоростью 30 тыс. км/с?

6

глава

Солнце и звёзды

28

Солнце как
звезда

29

Атмосфера Солнца
и солнечный ветер

30

Солнечная
активность

31

Звёзды как
газовые шары

32

Строение
звёзд

33

Эволюция Солнца
и звёзд

34

Переменные
звёзды

Солнце — центральный объект Солнечной системы, значительно превосходящий по массе все планеты, их спутники, астероиды и кометы, вместе взятые. Хотя Земля удалена от Солнца на 150 млн км, для нас оно — главный источник света и тепла, без которого была бы невозможна жизнь.

Солнце — самая близкая звезда. Другие звёзды находятся от нас гораздо дальше. Они могут быть как много больше, так и много меньше Солнца. Звёзды могут жить миллиарды лет, но в конце концов термоядерные источники их энергии иссякают.

Общие сведения о Солнце

Астрономы относят Солнце к категории звёзд, называемых **жёлтыми карликами**, каких немало наблюдается на небе, однако лишь несколько звёзд такого типа можно увидеть без телескопа. Среди ярких звёзд сходные с Солнцем характеристики имеют оба компонента *двойной звезды α Кентавра*, хорошо видимой в Южном полушарии. Это ближайшие к нам звёзды такого же типа, как Солнце, но даже до них в 275 тыс. раз дальше, чем до Солнца. В несколько раз дальше, чем α Кентавра, — на расстоянии около 12 св. лет — в *созвездии Кит* находится ещё одна солнцеподобная звезда, известная как *Tau Kuma* (обозначение: τ Ceti), едва заметная невооружённым глазом. Очевидно, что только на Солнце астрономы могут достаточно детально исследовать многие процессы, которые невозможно наблюдать у других звёзд из-за большого расстояния до них.

По **размеру** Солнце в 109 раз, а по **массе** — в 333 тыс. раз превышает Землю. Но если разделить массу Солнца на его объём, то окажется, что средняя **плотность** солнечного вещества небольшая — всего 1,4 г/см³, вчетверо меньше, чем у Земли. В отличие от твёрдой Земли Солнце, как и другие звёзды, представляет собой очень горячий **газовый шар**, состоящий в основном из самых лёгких газов — водорода и гелия. Этот шар очень плотный внутри и разреженный в самых внешних слоях.

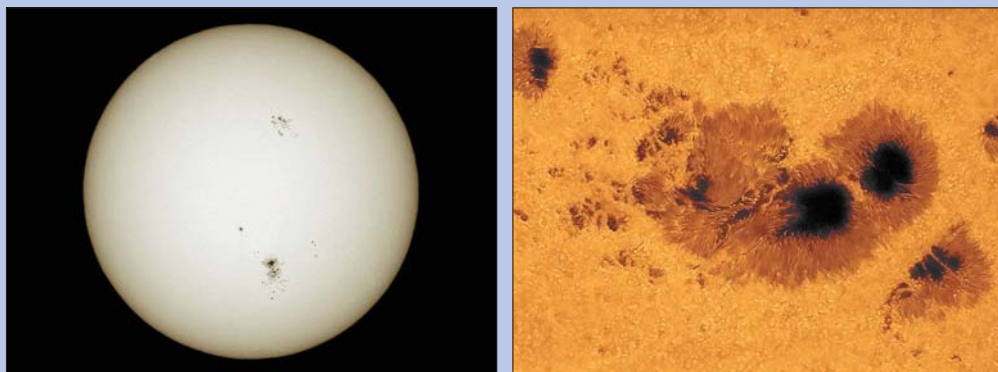


Рис. 136. Слева: Солнце с двумя крупными и двумя мелкими группами пятен в фотосфере. Справа: крупная группа солнечных пятен, размер которой в несколько раз превышает диаметр Земли

При рассматривании Солнца в телескоп на его диске, как правило, хорошо видны тёмные пятна (рис. 136).

Чаще всего **солнечные пятна** возникают отдельными группами, и их вид меняется день ото дня. Систематические наблюдения за пятнами на Солнце начались только после изобретения телескопа (XVII в.), хотя изредка, когда небо покрыто сильной дымкой, ослабляющей солнечный свет, большие группы пятен бывают заметны даже невооружённым глазом.

Если наблюдать пятна день за днём, легко заметить, что они меняются, их число не остаётся постоянным. Отдельные крупные пятна могут существовать неделями, мелкие исчезают и появляются быстрее, а иногда на Солнце пятна вообще отсутствуют.

Пятна на Солнце первым увидел Галилей в свой ещё несовершенный телескоп. Он заметил, что эти пятна непрерывно перемещаются по солнечному диску в одну сторону, и понял, что Солнце вращается. В настоящее время его вращение хорошо изучено, причём не только по перемещению отдельных деталей, наблюдаемых на Солнце, но и путём измерения скоростей движения по **эффекту Доплера**, то есть *по небольшому сдвигу спектральных линий, измеряемому в разных местах солнечного диска*.

Оказалось, что Солнце вращается не совсем так, как Земля или другие твёрдые тела. Его вращение неоднородно. Самый короткий период вращения имеют экваториальные области, а районы, расположенные около полюсов, совершают оборот за время, большее примерно на 20 %.

Относительно Земли экваториальные области Солнца делают полный оборот примерно за 27 сут. Но из-за того, что Земля движется вокруг

Солнца в ту же сторону, в которую вращается Солнце, для земного наблюдателя этот период несколько длиннее истинного периода осевого вращения Солнца, который для его экваториальных областей составляет 25 сут 6 ч (этот период называется **сидерическим**, то есть **звёздным**).

Энергия Солнца

Земля получает примерно одну миллиардную часть энергии, излучаемой Солнцем.

■ Площадка в один квадратный метр, расположенная на расстоянии 1 а. е. от Солнца перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной атмосферы, ежесекундно получает от Солнца примерно $1,4 \cdot 10^3$ Дж световой энергии. Эта величина называется **солнечной постоянной**.

Энергия, приходящая на 1 км^2 поверхности, составляет уже 1400 МВт. На Земле такой мощности достигают только крупные электростанции. Уже сейчас широко используются солнечные панели, превращающие энергию солнечного света в электрическую энергию (рис. 137), а в будущем использование солнечной энергии будет, по-видимому, только возрастать: этому источнику энергии не грозит скорое истощение.



Рис. 137. Солнечные панели

Физическая причина яркого света Солнца очень проста: она связана с высокой температурой видимой поверхности. Солнце светит так, как светило бы любое тело такого же размера, нагретое до температуры около 6000 К.

■ Излучение нагретых тел называют **тепловым излучением**, им обладают все тела в природе.

Полная мощность теплового излучения Солнца составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт. Эта энергия в форме света и других электромагнитных волн рассеивается в безбрежном космическом пространстве, и только крошечная его часть перехватывается Землёй и другими планетами Солнечной системы.

■ Мощность излучения Солнца, как и других звёзд, называют **светимостью (L)**. Светимость Солнца равна

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Очень часто светимость Солнца используется как внесистемная единица мощности, удобная для сравнения светимостей звёзд или звёздных систем. Например, светимость *Сириуса* составляет $21 L_{\odot}$, а светимость *Бетельгейзе* примерно равна $8400 L_{\odot}$.

Энергии, которую Солнце выделяет всего за 1 с, хватило бы для жителей Земли на несколько сотен тысяч лет при современном уровне потребления энергии.

Чтобы ощутить гигантскую мощность излучения Солнца, представим, что с помощью фантастического рефлектора все солнечные лучи направлены на Землю. Тогда через 4 мин испарились бы в космос все наши океаны, а через 10 дней земной шар, превратившись в газ, разлетелся бы на атомы.

Солнце быстро бы остыло, если бы его видимая поверхность не подогревалась изнутри за счёт той энергии, которая рождается в его ядре.

■ **Ядром** Солнца называют центральную область, по размеру в 4—5 раз меньшую, чем весь солнечный шар, там температура достигает 13—15 млн К и происходят термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

Потоки лучистой энергии, рождаемые при этом, медленно «просачиваются» к поверхностным слоям сквозь плотный газ в **зоне лучистого пе-**

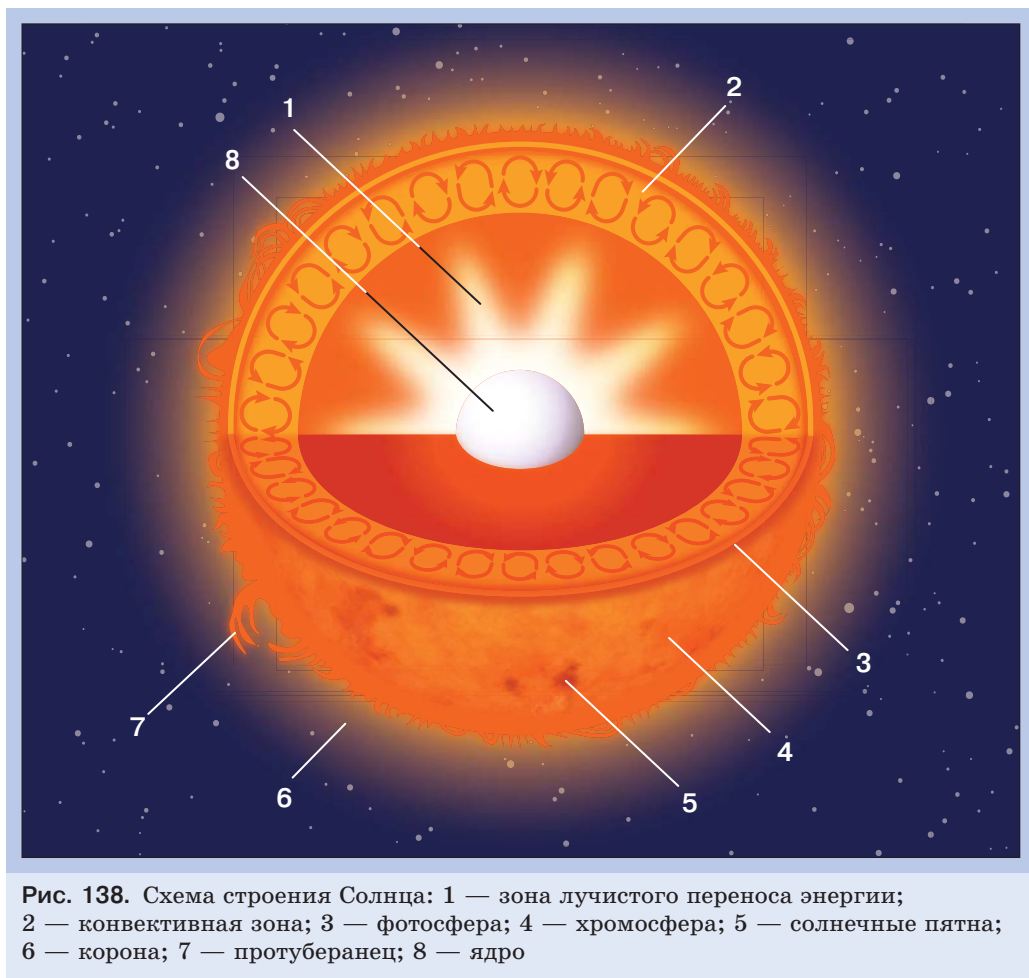


Рис. 138. Схема строения Солнца: 1 — зона лучистого переноса энергии; 2 — конвективная зона; 3 — фотосфера; 4 — хромосфера; 5 — солнечные пятна; 6 — корона; 7 — протуберанец; 8 — ядро

реноса энергии. На расстоянии около 200 тыс. км от поверхности механизм переноса энергии меняется: возникают конвективные потоки, которые более эффективно переносят тепло, чем излучение.

Достигнув видимой поверхности Солнца, газ охлаждается, излучая в виде света запасы своей энергии, становится плотнее и «тонет» в окружающей менее плотной среде, опускаясь в горячие недра Солнца за новой порцией энергии. Внешний слой, где происходят такие циклические движения вещества, называют **конвективной зоной** (рис. 138). Этот слой находится непосредственно под видимой поверхностью Солнца, называемой фотосферой.

Внешние, наиболее разреженные слои Солнца называют **солнечной атмосферой**. В ней выделяют несколько слоёв: непрозрачную **фотосферу** и прозрачные, очень разреженные **хромосферу** и **солнечную корону**.

Фотосфера

Свет, приходящий к нам от Солнца, испускается самым нижним слоем солнечной атмосферы. Он получил название *фотосфера*, что в переводе с греческого означает «сфера света».

■ **Фотосфера** — это видимая поверхность Солнца, самый нижний слой солнечной атмосферы.

Толщина фотосферы всего 200—300 км (то есть менее 0,04 % радиуса Солнца). И хотя газовый шар не имеет резкой границы, но с расстояния 150 млн км переход от верхнего «края» к полной непрозрачности вещества на «дне» фотосферы в таком тонком слое для земного наблюдателя практически незаметен, поэтому Солнце даже в телескоп кажется диском с резкими краями.

Плотность фотосферы невелика — она в тысячу раз меньше, чем плотность воздуха у поверхности Земли. Но газ, из которого она состоит, находится в постоянном движении. Фотосфера пронизывается восходящими и нисходящими потоками, по этой причине она выглядит как совокупность непрерывно меняющихся светлых пятнышек, называемых **гранулами**, размерами тысячи километров каждое (рис. 139). Отдельные гранулы живут всего несколько минут: горячий газ отдаёт своё тепло, охлаждается и уходит вглубь за новой порцией энергии.

Самыми заметными деталями фотосферы являются **солнечные пятна**. Они кажутся чёрными на ярком фоне фотосферы. На самом деле это эффект контраста: пятна тоже ярко светятся, но их яркость в несколько раз ниже, чем у окружающей фотосферы, и поэтому они выглядят как тёмные участки. Причина пониженной яркости — *более низкая температура*. Если фотосфера светит как поверхность, нагретая примерно до 6000 К, то температура пятен на 1000—1500 К ниже. А причина этого — **магнитное поле**, в котором движется солнечная плазма. Поскольку она содержит заряженные частицы, магнитное поле влияет на её движение, затрудняя перемещение конвективных потоков.

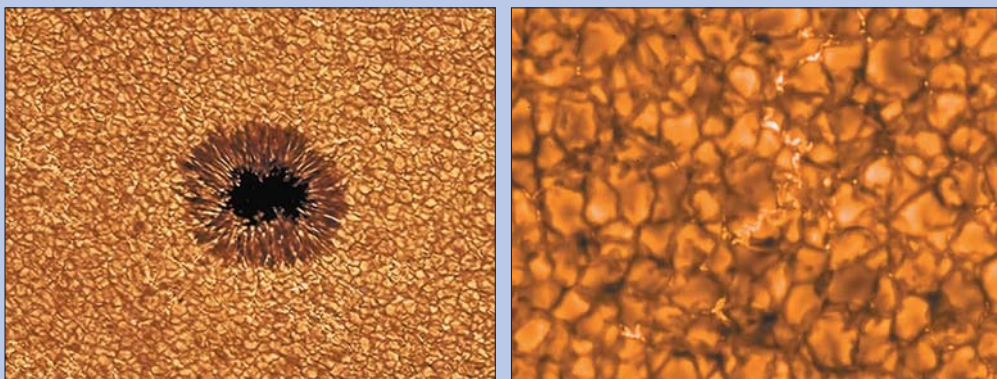


Рис. 139. Слева: грануляция солнечной фотосферы вокруг одиночного пятна. Справа: грануляция солнечной фотосферы (крупным планом). Размер одной гранулы составляет 700 км и более

Солнце — *многополюсный магнит*, и солнечное магнитное поле имеет довольно сложный характер. В среднем его магнитная индукция лишь в 2—3 раза больше, чем у земного магнитного поля, но локальные значения индукции поля в фотосфере на отдельных участках могут быть в сотни, а в солнечных пятнах — в тысячи раз выше среднего. Основная энергия магнитного поля Солнца сосредоточена глубоко под поверхностью, на глубине в десятки тысяч километров. Там энергия поля поддерживается энергией вращения Солнца. Время от времени в отдельных областях магнитное поле «прорывается» из глубины к поверхности, и, если поле достаточно сильное, оно влияет на происходящий конвективный теплообмен, уменьшая поток энергии из глубин Солнца к фотосфере. В местах выхода поля на поверхность возникают более холодные области — тёмные пятна.

■ **Солнечные пятна** — это области выхода сильного магнитного поля из недр Солнца на видимую поверхность.

Хромосфера и солнечная корона

Разреженный прозрачный газ, располагающийся выше фотосферы, образует внешние слои солнечной атмосферы.

■ Прилегающий к фотосфере слой разреженного газа толщиной несколько тысяч километров называется **хромосферой**. Температура газа в хромосфере растёт с высотой.

Спектр хромосферы совсем не такой, как у фотосферы.

Спектр **фотосферы** непрерывный, с линиями поглощения, — это и есть наблюдаемый спектр Солнца.

Если же получить отдельно **спектр хромосферы**, он окажется *линейчатым*, содержащим яркие линии излучения. Это спектр горячего прозрачного газа.

Газ хромосферы находится в постоянном движении, образуя многочисленные **газовые струи** и **петли** размером с целые земные континенты. Эти образования непрерывно возникают и рассасываются в хромосфере за десятки минут. Отдельные потоки солнечного вещества в виде дуг или выбросов вещества поднимаются высоко над хромосферой.

Во время полного солнечного затмения хромосфера видна как тонкий розоватый ободок, окаймляющий диск Солнца, закрытый Луной (рис. 140). Это связано с тем, что излучение хромосферы сконцентрировано в отдельных спектральных линиях излучения, которые и придают ей *окраску* (отсюда и название — **хромосфера**, то есть *сфера цвета*). С помощью специальных солнечных телескопов наблюдать хромосферу можно и не дожидаясь затмений, но только на тех длинах волн, которые соответствуют сильным спектральным линиям, например красной линии *водорода* H_{α} (656 нм) или линии *ионизованного кальция* в ультрафиолетовом диапазоне (393 нм).



Рис. 140. Корона и хромосфера (розовый ободок) Солнца. Снимок сделан во время солнечного затмения 11 августа 1999 г.

■ Над хромосферой находится внешний слой солнечной атмосферы — **солнечная корона**.

Корона простирается на десятки радиусов Солнца, а с Земли она лучше всего видна во время полных солнечных затмений, потому что её яркость в миллион раз ниже, чем у солнечного диска. Корона в это время наблюдается как слабое сияние вокруг закрытого Луной солнечного диска (рис. 141).



Рис. 141. Солнечная корона в момент полного затмения 9 марта 2016 г. Снимок получен путём совмещения многих изображений, контраст выровнен компьютерной обработкой

Чем дальше от Солнца, тем ниже яркость короны, поскольку ниже плотность горячего газа, который её образует. Постепенно корона переходит в потоки плазмы, непрерывно текущие от Солнца через всю Солнечную систему, которые получили название *солнечный ветер*.

Наиболее примечательными деталями короны являются **протуберанцы** — *гигантские потоки плазмы* размером десятки, а иногда и сотни тысяч километров, поднимающиеся из солнечной хромосферы, а затем обычно скатывающиеся назад (рис. 142). Газ протуберанцев скользит, как по рельсам, вдоль линий индукции магнитного поля, которое пронизывает все слои солнечной атмосферы, влияя на движение газовых потоков. Скорости протуберанцев различны. Иногда протуберанцы надолго почти неподвижно висят над поверхностью Солнца. Но изредка возникают активные протуберанцы, в которых газ обладает такой скоростью, что может покинуть Солнце безвозвратно.

Температура газа протуберанцев, как и температура хромосферы, — около 10 тыс. К, но газ солнечной короны, в котором они движутся, на-

много горячее. Эта особенность короны была выявлена не сразу.

О высокой температуре говорит необычный **спектр короны**: он лишён заметных линий поглощения и тех линий излучения, которые присутствуют в спектре хромосферы. Те линии излучения, которые всё же были обнаружены, долгое время не могли отождествить ни с одним химическим элементом таблицы Менделеева. Предполагалось даже, что они принадлежат неизвестному науке элементу — коронию. Однако в конце концов установили, что это *линии железа, лития* и некото-

рых других элементов, которые находятся в необычных условиях очень *высокой температуры* и *низкой плотности*. Чтобы линии появились, атомы этих элементов должны потерять много своих электронов, то есть стать многократно ионизованными ионами. А для этого температура короны должна составлять 1—2 млн К, то есть корона оказывается значительно горячее поверхности Солнца.

Наблюдения излучения короны в рентгеновских лучах подтвердили её высокую температуру. Благодаря этой температуре происходит расширение короны в окружающее межпланетное пространство. Поэтому можно сказать, что все планеты движутся в **солнечной атмосфере**.

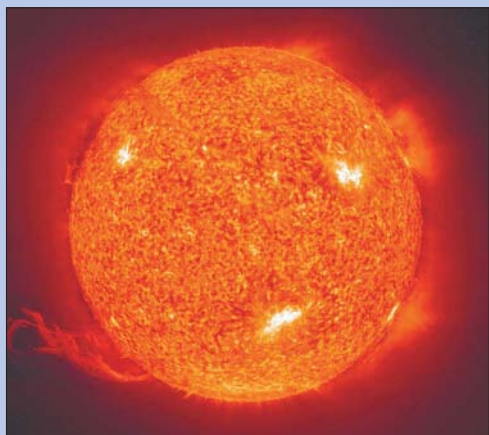


Рис. 142. Гигантский солнечный протуберанец (внизу слева)

Роль магнитного поля в разреженной плазме солнечной атмосферы очень велика. Это связано с тем, что солнечная плазма — хороший проводник электрического тока. В соответствии с **законами электродинамики** любое изменение магнитного поля рождает в проводнике индукционные токи, которые, в свою очередь, влияют на породившее их поле. Это приводит к тому, что газовые потоки в своём движении как бы увлекают за собой линии индукции, а если магнитное поле достаточно сильное, то оно контролирует движение плазмы.

Магнитное поле в области солнечных пятен в тысячи раз сильнее среднего по Солнцу. Сильное поле тормозит движение конвективных потоков, несущих тепло к поверхности, в результате чего возникают

солнечные пятна. Магнитное поле в хромосфере и короне заставляет газ течь вдоль линий магнитной индукции, препятствуя поперечным движениям. А взаимодействие потоков замагниченной плазмы, имеющих противоположное направление магнитной индукции, приводит к возникновению **солнечной вспышки**, при которой освобождается огромная энергия, заключавшаяся до вспышки в магнитном поле.

Солнечный ветер

Гравитационное поле Солнца не в состоянии удержать быстро движущиеся атомы горячей солнечной короны, и газ постоянно оттекает от Солнца, создавая *солнечный ветер*.

■ **Солнечным ветром** называют непрерывный поток заряженных частиц, текущий из солнечной короны через всю Солнечную систему.

Со скоростью 400—600 км/с он пролетает через всю планетную систему, уходя от Солнца значительно дальше самой далёкой планеты. Таким образом, наша Земля и другие тела Солнечной системы находятся в расширяющейся солнечной короне.

Солнечный ветер очень разрежен, концентрация частиц в нём вдали от Солнца не превышает нескольких миллионов атомов в кубометре. При такой низкой концентрации он не может нагреть никакие тела в межпланетном пространстве, но его частицы активно взаимодействуют с отдельными атомами, а посредством магнитного поля, связанного с ним, солнечный ветер взаимодействует с ионизованным веществом комет и разреженных атмосфер планет.

До поверхности Земли и даже до плотных слоёв земной атмосферы солнечный ветер не доходит: этому препятствует **магнитное поле Земли**. Поскольку солнечный ветер — это поток заряженных частиц (в основном протонов и электронов), земное магнитное поле не даёт ему проникнуть сквозь магнитосферу, и ветер «обтекает» Землю.

При этом магнитное поле Земли, взаимодействуя с солнечным ветром, теряет свою симметрию, его линии магнитной индукции «поджимаются» потоками ветра со стороны Солнца и образуют длинный магнитный хвост с противоположной стороны (рис. 143). В отличие от Земли *Венера* и *Марс* не защищены магнитным полем, и их атмосферы подвержены прямому воздействию потоков солнечного ветра. Меркурий обладает магнитным полем, которое в 100 раз слабее земного.



Рис. 143. Магнитосфера Земли, обдуваемая солнечным ветром

30 Солнечная активность

На протяжении четырёх столетий на Земле проводятся систематические наблюдения Солнца. За это время накопились научные данные, позволяющие сделать вывод о том, что наша звезда живёт довольно бурной жизнью. В солнечной атмосфере образуются и разрушаются пятна, извергаются протуберанцы, происходят кратковременные вспышки и корональные выбросы солнечного вещества. Весь этот комплекс явлений называют **солнечной активностью**. Физические процессы на Солнце, приводящие к изменениям солнечной активности, оказывают непосредственное влияние на планеты, в том числе на Землю. Поэтому исследования в этой области имеют очень большое практическое значение.

Солнечные вспышки

■ **Солнечные вспышки** — это внезапное и кратковременное, на несколько минут, локальное возрастание температуры в солнечной атмосфере до многих миллионов градусов, сопровождающееся выделением колоссальной энергии (рис. 144).

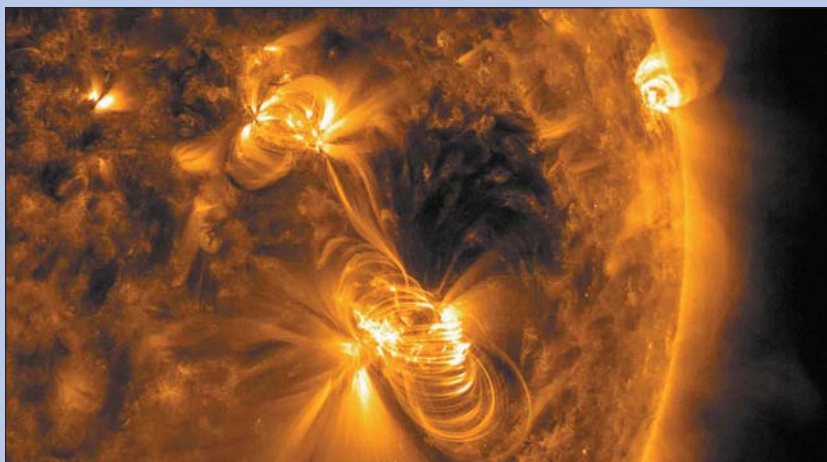


Рис. 144. Солнечные вспышки

Энергия мощных вспышек иногда достигает 10^{25} Дж. Для примера: энергия взрыва мощной водородной бомбы почти в миллиард раз меньше. Столь мощные вспышки наблюдаются редко, хотя на несколько порядков более слабые вспышки происходят почти ежедневно.

Солнечные вспышки рождаются на большой высоте над видимой поверхностью Солнца — в хромосфере или над хромосферой. С Земли они наблюдаются как появление очень яркой области небольшого размера на солнечном диске. Особенно хорошо они заметны в спектральных линиях горячего газа. При вспышке возникает мощное **рентгеновское излучение** — результат высокой температуры газа. Нагретые вспышкой потоки горячего газа распространяются вдоль линий индукции вниз, к фотосфере, где газ плотнее, и вызывают яркое свечение среды при столкновении с более плотным газом.

При солнечной вспышке происходит не только нагрев газа. Резкое изменение магнитного поля в области вспышки приводит к ускорению заряженных частиц, выбрасываемых в межпланетное пространство с около-световой скоростью. Эти *потоки высокоэнергичных частиц* (в основном протонов и электронов) называют **солнечными космическими лучами**.

После мощной вспышки поток солнечного ветра резко усиливается, и может произойти так называемый **корональный выброс** замагниченного солнечного вещества, обычно имеющий форму быстро расширяющейся газовой петли. Масса плазмы, заключённой в таких выбросах, достигает 10 млрд т, а скорость достаточна, чтобы выброс достиг Земли

за 1—3 дня. К счастью, атмосфера Земли и её магнитное поле защищают земную поверхность от губительной радиации и корональных выбросов. Механизм формирования корональных выбросов остаётся не совсем понятным.

Физический механизм вспышек довольно сложен и связан с взаимодействием локальных магнитных полей в атмосфере Солнца, который приводит к мощному электрическому разряду в плазме и сильному нагреву электропроводящей газовой среды. По сути, энергия, выделяемая при вспышке, — это энергия, которая была заключена в магнитном поле. При вспышке она переходит в другие виды энергии: энергию горячего газа, энергию излучения, которое сопровождает вспышку, и энергию солнечных космических лучей.

Движения газовых потоков на Солнце рожают своего рода **звуковые волны**, то есть *колебания вещества, распространяющиеся по всем направлениям со скоростью звука*, в том числе вглубь Солнца. Эти колебательные движения газа вызывают небольшие периодические изменения локальных значений температуры, плотности и других параметров солнечной плазмы. Такие волны были обнаружены по измерениям яркости и лучевых скоростей газа в различных участках солнечного диска. Скорости колебательных движений газа очень малы. Наибольшая амплитуда изменения скорости (несколько десятков сантиметров в секунду) характерна для колебаний с периодами 4—6 мин (так называемые **пятиминутные колебания**).

■ Научное направление, изучающее внутреннее строение Солнца на основании измерения и анализа колебаний, распространяющихся в толще Солнца и на его видимой поверхности, называется **гелиосейсмологией**.

Проанализировав частоты колебаний и создаваемую ими картину **интерференции** (*сложения волн*), можно рассчитать, как меняется скорость звука в газе с глубиной, уточнив при этом представление о внутреннем строении Солнца. Так был, в частности, исследован характер вращения Солнца, изменение угловой скорости вращения с глубиной. Оказалось, что неоднородный характер вращения сохраняется только в пределах конвективной зоны (около 200 тыс. км), глубже Солнце вращается как единое целое, с одним периодом, хотя ядро Солнца, по-видимому, отличается значительно более быстрым вращением.

Активность Солнца и её влияние на Землю

Количество пятен на Солнце, а также частота солнечных вспышек и связанных с ними явлений характеризуют степень **активности Солнца**. Она не постоянна и меняется от месяца к месяцу, из года в год. Эти изменения обладают определённой периодичностью.

■ Один период активности — от минимума до минимума — называют **солнечным циклом**.

Хорошо известен периодический характер изменения солнечной активности. Она меняется с периодом 11 лет, хотя периодичность не очень чёткая, и могут быть отклонения на один-два года от этого значения. Очередной максимум ожидается около 2024 г. Мощность излучения Солнца в течение цикла активности меняется незначительно — всего на 0,1 %, что практически не влияет на тепловой баланс нашей планеты. Однако всё же изменение активности Солнца ощущается на Земле.

Уровень солнечной активности можно выразить количественно индексом W , подсчитав общее число солнечных пятен и их групп:

$$W = k \cdot (f + 10g),$$

где k — нормировочный коэффициент, который определяется для каждого конкретного наблюдателя и телескопа, с которым он проводит эти наблюдения, f — полное количество пятен, наблюдаемых на Солнце, g — число групп, образованных этими пятнами (одиночное пятно тоже считается группой). Индекс W (число Вольфа) назван в честь швейцарского астронома Р. Вольфа, предложившего в 1849 г. такой метод определения уровня солнечной активности.

В годы максимальной активности становятся более частыми **полярные сияния**, возникающие, когда в верхние слои атмосферы вблизи магнитных полюсов нашей планеты влетают потоки частиц высокой энергии — солнечные космические лучи, которые рождаются при солнечных вспышках. Кроме того, в эти годы на Земле чаще (иногда по несколько раз в месяц) наблюдаются *магнитные бури*.

■ **Магнитными бурями** называют кратковременное изменение земного магнитного поля и связанное с этим возникновение мощных электрических токов вокруг планеты.

Магнитные бури вызываются потоками солнечного ветра — корональными выбросами, «налетающими» на магнитосферу Земли. С ростом солнечной активности возрастает плотность верхних слоёв земной

атмосферы, а это сказывается на интенсивности торможения космических аппаратов на низких орбитах, и они быстрее могут падать на Землю. В космических аппаратах после мощных солнечных вспышек может выйти из строя электронная аппаратура. Повышение радиационного фона после вспышек представляет угрозу жизни и здоровью космонавтов.

Сильные вспышки на Солнце могут, воздействуя на магнитное поле Земли и состояние верхней атмосферы, вызывать помехи в радиосвязи, рождать сильные индукционные токи в линиях электропередачи или трубопроводах на Земле. Могут они сказываться и на чувствительных живых организмах, в том числе на людях с ослабленным здоровьем. Поэтому в ряде стран, в том числе в России, осуществляется прогноз активности Солнца и связанной с ней «космической погоды».

31

Звёзды как газовые шары

Звёзды — самые многочисленные объекты на небе. Современная техника наблюдений сделала доступными для прямого исследования миллиарды звёзд в одной только нашей Галактике.

Основные характеристики звёзд

■ Как и Солнце, **звёзды** — это массивные горячие газовые шары, гравитационное поле которых сдерживает их от расширения.

Основные характеристики звёзд, определяемые из наблюдений, — это их **масса**, **светимость** (мощность излучения), **температура** поверхности и **размер**. Важной характеристикой служит также **химический состав** звёздных атмосфер, но у большинства звёзд он близок к солнечному.

Измерения показали, что мир звёзд поразительно разнообразен. Многие звёзды похожи на Солнце, однако есть такие, которые на месте Солнца заняли бы всё пространство до орбит Сатурна или Урана. При этом известные звёзды размером меньше Земли, а нейтронные звёзды, масса которых больше массы Солнца, имеют размер всего 10—20 км.

Есть «холодные» звёзды с температурой 1000—2000 К и даже ниже, но есть и такие, температура которых составляет многие десятки тысяч кельвинов. Известны звёзды со светимостью в десятки тысяч раз более низкой, чем Солнце, но существует немало и таких, светимость которых в десятки тысяч раз выше солнечной.

Массу звёзд можно выражать в *килограммах* (кг), светимость — в *ваттах* (Вт), температуру — в *кельвинах* (К), размер — в *метрах* (м). Но очень часто для удобства эти параметры выражают в **солнечных единицах**, а именно:

в массах Солнца $M_{\odot}$;

в светимостях Солнца $L_{\odot}$;

в радиусах Солнца $R_{\odot}$;

в единицах температуры поверхности Солнца $T_{\odot}$.

Можно пользоваться их округлёнными значениями:

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг};$$

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт};$$

$$T_{\odot} = 6000 \text{ К};$$

$$R_{\odot} = 700\,000 \text{ км} = 7 \cdot 10^8 \text{ м}.$$

Температура поверхности звёзд

Звёзды, как и Солнце, излучают потоки света, потому что они горячие. Любое нагретое тело рождает электромагнитное излучение, и чем выше его температура, тем ярче свечение. Такое излучение называют тепловым.

Фотосфера, то есть видимая поверхность каждой звезды, излучает свет на всех длинах волн. Но с ростом температуры всё большая часть излучения приходится на *коротковолновую часть спектра*. Поэтому с температурой меняется характер излучения: чем температура выше, тем более коротковолновым становится излучение тела.

Наиболее **холодные звёзды** излучают преимущественно в *инфракрасной, красной или оранжевой области спектра*. На глаз они кажутся розоватыми.

Наиболее **горячие звёзды** излучают больше всего энергии в *голубой, фиолетовой или ультрафиолетовой области спектра*. Они выглядят голубоватыми.

Человеческий глаз воспринимает цветовые оттенки только у наиболее ярких звёзд, тусклые звёзды выглядят одинаково бесцветными. Однако с помощью астрономических приборов — **звёздных фотометров** — можно с большой точностью измерять цвет звёзд, оценивая его по их видимой яркости, которая измеряется через специально подобранные цветные светофильтры. Более точно, чем по цвету, температуру звёздных атмосфер определяют по распределению энергии в их спектрах или по спектральным линиям.

Из физики известно, что максимум в распределении энергии в спектре приходится на длину волны $\lambda_{\max}$, которая связана с температурой тела простым законом, называемым **законом Вина**.

■ Формулировка **закона Вина** очень проста: если длины волн измерять в нанометрах (нм), то $\lambda_{\text{max}} = \frac{2,9 \cdot 10^6}{T}$.

Температура звёзд типа Солнца (6000 К) соответствует длине волны $\lambda_{\text{max}} = 480$ нм, которая попадает в *сине-зелёную область спектра*.

Для звёзд с температурой 20 тыс. К значение λ_{max} лежит уже в *ультрафиолетовой области* 145 нм.

Звёзды с температурой 2000—3000 К излучают в основном инфракрасный свет.

Здесь надо иметь в виду, что по непрерывному спектру или цвету можно определить только температуру фотосферы, а вглубь звезды температура должна расти до многих миллионов градусов в центре. Её оценивают по теоретическим моделям внутреннего строения звёзд.

Светимость звёзд

Звёзды очень сильно различаются по наблюдаемой яркости. Это связано как с тем, что они находятся на разном расстоянии от нас, так и с тем, что они различаются по мощности излучения.

■ Мощность излучения, то есть количество энергии, излучаемое за одну секунду, называется **светимостью**. Обычно она измеряется в единицах светимости Солнца $L_{\odot}$.

Если бы звёзды находились от нас на одном расстоянии, то их светимость можно было бы характеризовать их видимой звёздной величиной: чем светимость выше, тем звёздная величина меньше. Поэтому возникло ещё одно выражение светимости: её характеризует звёздная величина, какую имела бы звезда при её наблюдении с фиксированного расстояния 10 пк, или около 2 млн а. е. Такая звёздная величина обозначается заглавной буквой M и называется **абсолютной звёздной величиной**.

Найдём связь между видимой m и абсолютной M звёздными величинами и светимостью звезды L .

Пусть расстояние до звезды r [пк].

Поскольку световой поток падает с расстоянием как $\frac{1}{r^2}$, при условном размещении звезды на расстоянии 10 пк от нас она станет ярче в $\left(\frac{r}{10 \text{ пк}}\right)^2$ раз, если $r > 10$ пк, или тусклее в $\left(\frac{10 \text{ пк}}{r}\right)^2$ раз, если $r < 10$ пк.

По определению звёздных величин (см. гл. 2), в первом случае её звёздная величина уменьшится на

$$2,5 \lg \left(\frac{r}{10 \text{ пк}} \right)^2 = 5 \lg \left(\frac{r}{10 \text{ пк}} \right),$$

во втором — ровно на столько же возрастёт. Поскольку

$$\lg \left(\frac{r}{10 \text{ пк}} \right) = -\lg \left(\frac{10 \text{ пк}}{r} \right)$$

и учитывая, что звёздная величина с расстояния 10 пк принимается нами за абсолютную звёздную величину M , мы можем написать формулу, пригодную для обоих рассматриваемых случаев:

$$m - M = 5 \lg \left(\frac{r}{10 \text{ пк}} \right), \text{ или } M = m - 5 \lg r + 5.$$

Если поглощение света в межзвёздном пространстве мало или уже учтено при оценке m , то разность $(m - M)$ зависит только от расстояния r до звезды. Поэтому её называют **модулем расстояния**.

Пусть теперь $M_{\odot}$ — абсолютная звёздная величина Солнца, или, что одно и то же, его видимая звёздная величина с расстояния 10 пк. Если звезда имеет светимость больше солнечной, то на том же расстоянии её звёздная величина M будет меньше, чем $M_{\odot}$, а если светимость ниже солнечной, то M будет, наоборот, больше, чем для Солнца:

$$M = M_{\odot} - 2,5 \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right).$$

Подставив полученное выражение для M в предыдущую формулу, мы получим окончательную формулу, связывающую светимость звезды, её видимую звёздную величину и расстояние до неё:

$$m = M_{\odot} - 2,5 \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) + 5 \lg r - 5. \quad (6.1)$$

Абсолютная звёздная величина Солнца хорошо известна: для видимой области спектра $M_{\odot} = +4,8$. Используя это значение, можно по полученной выше формуле оценить светимость звезды, если известно расстояние до неё и видимая звёздная величина, или найти расстояние до неё по видимой звёздной величине и светимости.

Наблюдаемые звёзды очень сильно различаются по светимости.

Самая высокая светимость — у **голубых и красных сверхгигантов**, она доходит до сотен тысяч светимостей Солнца. Ярче вспыхивают толь-

ко взрывающиеся звёзды. Яркие звёзды, которые легко найти на небе, — это *голубой сверхгигант Ригель* (β Ориона), *красные сверхгиганты* — *Антарес* (α Скорпиона) и *Бетельгейзе* (α Ориона).

Звёзды-карлики, наоборот, имеют низкую светимость, часто недотягивающую даже до одной тысячной доли $L_{\odot}$.

Большая часть звёзд, наблюдаемых глазом на небе, имеет светимость, превышающую светимость Солнца, но это не потому, что таких звёзд больше в природе, а потому, что они видны с более далёких расстояний.

Размеры звёзд

Звёзды находятся очень далеко от нас, они представляются точками, и прямое измерение их диаметров возможно лишь для небольшого числа объектов. Наиболее простой путь узнать **размер** звезды — это *сопоставить её температуру и светимость*.

Из физики известно, что полная мощность L во всём диапазоне длин волн теплового излучения тела (звезды), имеющего форму шара, связана с температурой видимой поверхности T и радиусом шара R простым соотношением, известным как **закон Стефана — Больцмана**:

$$L = (\sigma T^4) \cdot 4\pi R^2, \quad (6.2)$$

где σ — коэффициент пропорциональности, называемый **постоянной Стефана — Больцмана**, равный $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Записав это выражение для звезды и для Солнца и разделив одно на другое, получим:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4 \cdot \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2. \quad (6.3)$$

Это выражение позволяет оценить радиус звезды, если её температура и светимость известны:

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

Оценки радиусов звёзд привели к выводу о том, что звёзды по своим размерам различаются больше, чем по любым другим характеристикам (рис. 145).

Самые маленькие звёзды имеют размеры, сопоставимые с планетами Солнечной системы. Это так называемые **белые карлики**.

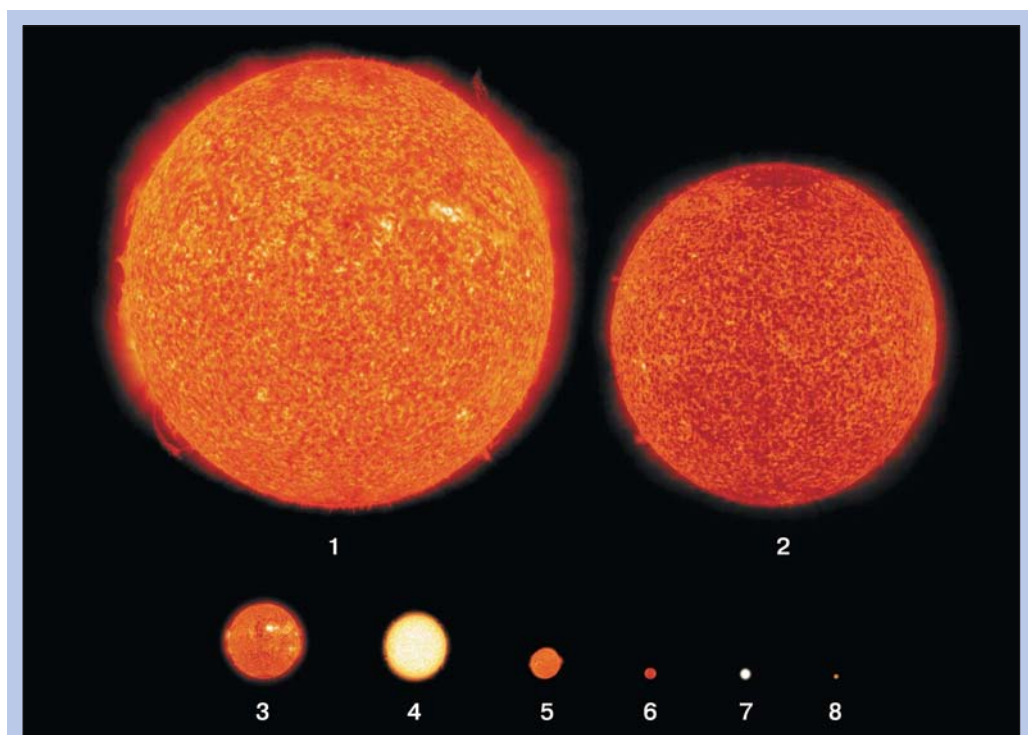


Рис. 145. Сравнительные размеры звёзд-гигантов и Солнца: 1 — Бетельгейзе; 2 — Антарес; 3 — Альдебаран; 4 — Ригель; 5 — Арктур; 6 — Поллукс; 7 — Сириус; 8 — Солнце

Необычные **нейтронные звёзды** ещё в тысячи раз меньше.

Самые большие звёзды — это **красные гиганты** и (особенно) **красные сверхгиганты**. Размеры последних могут превышать размер Солнца более чем в тысячу раз. Будь такая звезда на месте Солнца, внутри неё оказались бы все планеты до Сатурна. Среди ярких звёзд неба рекорд держит Бетельгейзе. Её диаметр больше солнечного примерно в тысячу раз.

Масса и плотность звёзд

Масса — это наиболее важная характеристика любой звезды. Прямые оценки масс звёзд возможны только по их *гравитационному полю* с использованием закона всемирного тяготения. Это реализуется только для звёзд, образующих пары, где обе звезды обращаются вокруг общего центра масс.

Имеются, однако, и косвенные способы оценки масс, которые основаны на *соотношении между массой звезды и её светимостью*. Эти соотношения хорошо известны, но они различны для звёзд разных типов. В любом случае для их построения исходными данными всё равно служат прямые оценки масс звёзд, входящих в двойные звёздные системы.

■ **Массы** почти всех наблюдаемых звёзд заключены в интервале от 0,1 до 10 масс Солнца ($M_{\odot}$), хотя в очень редких случаях масса звезды может превышать 50—100 $M_{\odot}$.

Чем меньшей массой обладают звёзды, тем больше их в природе. Звёзды, имеющие массу больше 10 $M_{\odot}$, крайне редки. Наиболее массивные звёзды с массой более 20—30 $M_{\odot}$ большую часть своего вещества постепенно сбрасывают в межзвёздную среду и «худеют».

Хотя «лёгких» звёзд с массой 0,3—0,1 $M_{\odot}$ очень много, они остаются мало исследованными, их называют **красными карликами**.

■ **Красные карлики** — это звёзды, которые имеют температуру около 3000 К и ниже, из-за низкой температуры и малого размера их светимость очень мала. По этой причине они видны только на сравнительно близком расстоянии.

Нижний предел масс звёзд составляет 0,07—0,08 $M_{\odot}$. При меньшем значении массы температура в центре звёзд не поднимается выше нескольких миллионов кельвинов, и протон-протонная термоядерная реакция, вырабатывающая энергию звёзд, не может начаться, а термоядерная реакция с тяжёлым изотопом водорода (дейтерием), которая может идти при более низкой температуре, быстро заканчивается из-за малого количества «топлива»: дейтерия в природе очень мало. Поэтому такие газовые шары (их называют коричневыми или бурыми карликами) остывают и сжимаются, так и не став настоящими звёздами.

■ **Коричневые карлики** — это тела, промежуточные по своим свойствам между звёздами и газовыми планетами-гигантами типа Юпитера.

Таким образом, основное физическое различие между звёздами и планетами — это различие их массы. Именно масса определяет, могут ли в недрах газового шара протекать термоядерные реакции.

Красные и коричневые карлики — самые многочисленные объекты в мире звёзд, их гораздо больше, чем таких звёзд, как наше Солнце.

Итак, если по размерам звёзды различаются в десятки тысяч раз, то по массам — всего в сотни раз, что значительно меньше. Поэтому гигантские звёзды обычно имеют очень низкую среднюю плотность вещества.

■ Под **средней плотностью вещества** понимают массу звезды, делённую на её объём.

Если у звёзд типа Солнца средняя плотность близка к плотности воды, то у звёзд-гигантов и сверхгигантов из-за их больших размеров она значительно ниже, чем плотность воздуха, которым мы дышим. Тем не менее у них есть *плотное ядро из сильно сжатого горячего газа*. Сама звезда даже при низкой плотности остаётся непрозрачным телом, так что мы видим только тот свет, который исходит от её поверхностных слоёв.

Изучение спектров звёзд позволило по наличию и степени выраженности тех или иных линий поглощения разделить их на ряд **спектральных классов**. Исторически они обозначаются латинскими буквами, причём не по алфавиту: **O, B, A, F, G, K, M**. Оказалось, что присутствие тех или иных линий в спектре определяется прежде всего температурой звезды.

Самые горячие звёзды относятся к классу **O** (30—60 тыс. К).

Звёзды типа Солнца имеют класс **G** (5000—6000 К).

У звёзд класса **M** температура всего 2000—3500 К.

Позднее были добавлены спектральный класс **L** для наиболее холодных «инфракрасных» звёзд с температурой около 2000 К и класс **T** для ещё более холодных тел — коричневых карликов.

Интересно сравнить свойства звёзд на диаграмме «температура — светимость» или «светимость — спектральный класс». Она называется **диаграммой Герцшпрунга — Рассела** или **Г-Р диаграммой** (рис. 146).

Оказалось, что звёзды образуют на Г-Р диаграмме ряд последовательностей (см. рис. 146). Около 90 % всех звёзд лежат на так называемой **главной последовательности**, простирающейся от массивных и горячих звёзд высокой светимости (слева сверху диаграммы) до маломассивных холодных карликовых звёзд (справа внизу). К этой последовательности относится и наше Солнце.

На главной последовательности расположено так много звёзд, потому что на этой стадии звёзды проводят большую часть своей жизни — пока в их плотных ядрах не иссякнет водородное топливо для термоядерных реакций.

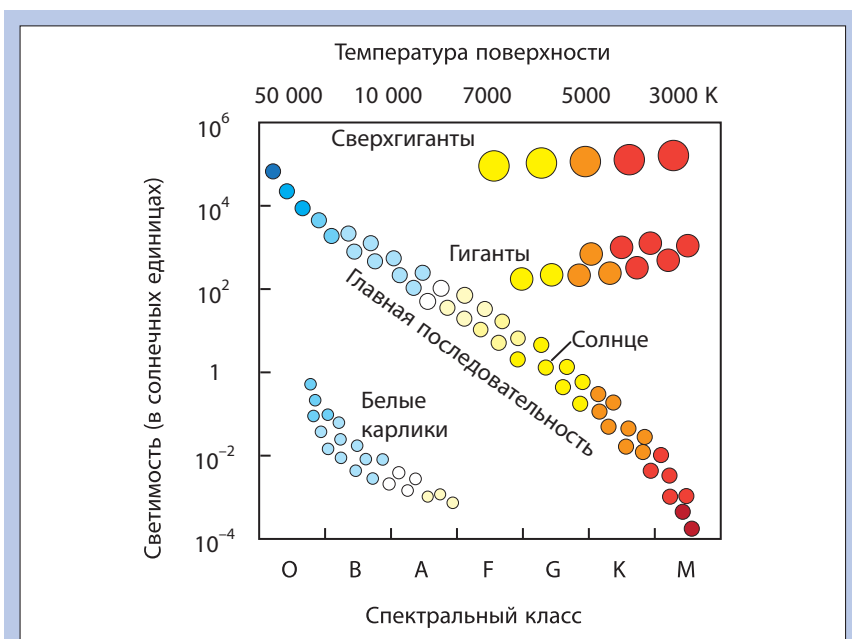


Рис. 146. Диаграмма «температура — светимость»

Сверхгиганты, гиганты, красные и белые карлики — все они занимают на Г-Р диаграмме определённое место в зависимости от того, какова масса звезды и на какой стадии эволюции она находится. Эта диаграмма используется для оценки примерных значений возраста или массы звёзд.

32 Строение звёзд

На примере Солнца мы уже видели, что звёзды — это горячие газовые шары, окружённые разреженной атмосферой. В первой половине XIX в. французский философ Огюст Конт утверждал, что из-за огромной удалённости звёзд мы никогда не сможем о них узнать ничего, кроме того, что они существуют. Однако очень скоро благодаря открытию спектрального анализа появилась возможность получать информацию о физических характеристиках и свойствах этих далёких объектов.

Химический состав атмосферы звёзд

В атмосферах звёзд образуются наблюдаемые спектральные линии. Спектральный анализ показал, что на звёздах есть все устойчивые химические элементы таблицы Менделеева, каждый из которых обладает своим набором спектральных линий. Как и в случае Солнца, у большинства звёзд около 98 % массы принадлежит водороду и гелию. Примечательно, что на Земле и землеподобных планетах водорода и гелия очень мало: лёгкие газы легче всего покидают тела со слабым гравитационным полем. Гелий вообще был открыт только в 1868 г., причём не на Земле, а на Солнце, во время полного солнечного затмения. Тогда в спектре солнечной атмосферы была обнаружена его ярко-жёлтая линия, которую не могли отождествить ни с каким известным химическим элементом. Только через несколько лет гелий удалось выделить из земных пород. Это и дало такое название элементу (*гелиос* — по-гречески *Солнце*).

■ **Газ**, из которого состоят звёзды, очень горячий, при такой высокой температуре молекулы разрушаются, распадаются на атомы и ионы. Лишь спектры наиболее холодных звёзд свидетельствуют о наличии некоторых наиболее термоустойчивых молекул, например CN, CH, TiO, которые образуют широкие полосы поглощения.

Фотосферы звёзд, дающие нам видимый свет, — это наиболее холодные области в звёздах. Вглубь от поверхности звезды температура и плотность газа непрерывно растут. Особое состояние газа — в центральных областях звёзд, где очень высокие плотность и температура «включают» термоядерную реакцию превращения водорода в гелий.

Плотность газа в *центре звёзд* может достигать сотен и тысяч граммов в кубическом сантиметре. Кажется удивительным, что при таких плотностях газ сохраняет свойства *идеального газа*, то есть его *давление пропорционально произведению плотности на температуру*. Казалось бы, там частицы газа должны быть прижатыми друг к другу. Однако это не так.

Дело в том, что большинство атомов всех химических элементов в недрах звёзд полностью ионизованы, а электроны и атомные ядра имеют размеры, несравненно меньшие, чем нейтральные атомы или молекулы, которые существуют при более низкой температуре. Поэтому расстояние между частицами даже в центре звезды остаётся много больше их размеров, а это важное условие, при котором газ можно считать идеальным.

Источники звёздной энергии

Звёзды типа Солнца могут светить, не переставая, миллиарды лет. Никакая химическая реакция с выделением тепла не в состоянии поддерживать наблюдаемую светимость звёзд так долго. Источник энергии должен быть иной природы.

В XX в. получила развитие новая область физики, занимающаяся изучением атомных ядер и их взаимодействия. Было показано, что ядра одних химических элементов при определённых условиях могут превращаться в ядра других элементов. При этом энергия выделяется в двух случаях: либо при *делении тяжёлых атомов*, либо при *объединении (синтезе) лёгких*. В звёздах очень мало атомов тяжёлых элементов, поэтому практическое значение имеет только **реакция синтеза**, которая действительно может служить долговременным источником энергии звёзд.

■ В центральной области звезды, называемой **термоядерным ядром звезды** и составляющей 20—30 % её радиуса, происходит реакция превращения ядер атомов водорода (**протонов**) в ядра атомов гелия (**α -частицы**).

Однако протоны, как и атомные ядра других элементов, имеют положительный электрический заряд, и при их сближении они отталкивают друг друга. Чтобы произошло взаимодействие двух протонов и между ними подействовали ядерные силы (которые на малых расстояниях сильнее сил отталкивания зарядов), протоны должны сблизиться до расстояний порядка 10^{-15} м. Для этого они должны лететь навстречу друг другу с большими скоростями. Лишь очень большая кинетическая энергия протонов может позволить им преодолеть силу отталкивания и вступить в ядерное взаимодействие. А это возможно только в очень горячей плазме, где велики тепловые скорости движения частиц.

■ Поэтому ядерные реакции утяжеления атомных ядер называют **термоядерными**.

Но даже в центре звёзд средняя скорость теплового движения частиц ещё недостаточна для преодоления сил электростатического отталкивания при сближении протонов. Ситуацию спасает то, что при одной и той же температуре разные частицы всегда имеют разные скорости тепловых движений, и в реакцию вступает только крошечная доля наиболее энергичных протонов с кинетической энергией значительно выше средней. Благодаря этим быстрым протонам и светят звёзды.

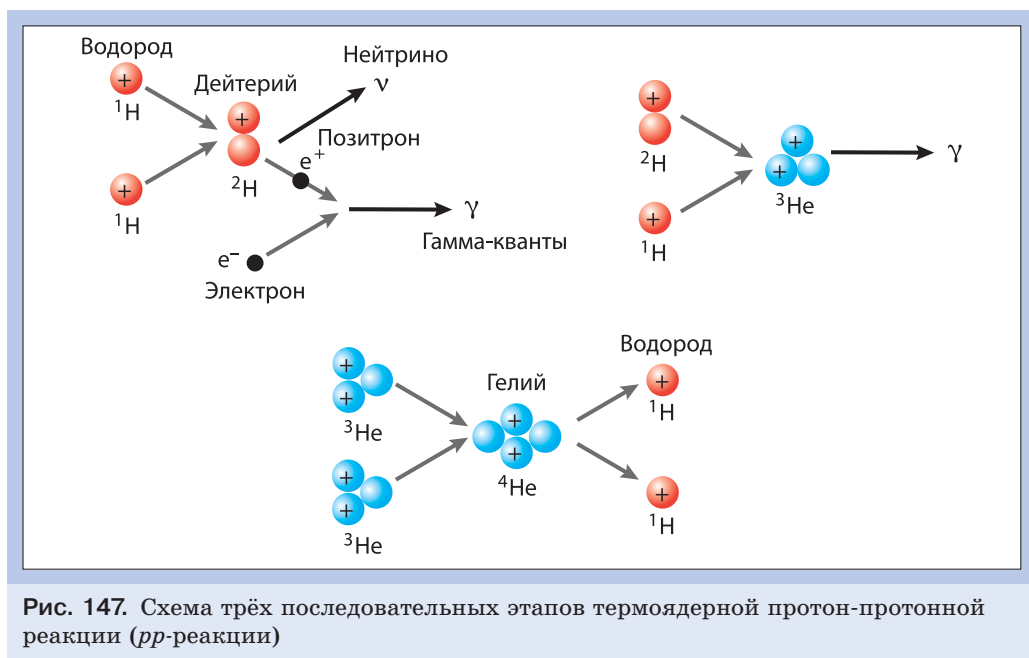


Рис. 147. Схема трёх последовательных этапов термоядерной протон-протонной реакции (*pp*-реакции)

Столкновение и ядерное взаимодействие двух протонов даёт начало довольно сложной цепочке взаимопревращения частиц, в результате чего из четырёх протонов, последовательно вступивших в ядерное взаимодействие, возникает одно ядро гелия. Плюс к этому в данном процессе при образовании каждого ядра гелия рождаются две всепроникающие элементарные частицы — **нейтрино**, способные легко пройти через всю толщу звёздного вещества и выйти наружу из звезды (рис. 147).

Таким образом, непрерывное выделение термоядерной энергии компенсирует затраты энергии на излучение и обеспечивает долгое существование звезды как мощного источника света.

Реакцию превращения водорода в гелий можно в упрощённом виде записать так:



где E — выделившаяся энергия, а число перед названием элемента (в виде верхнего левого индекса) — его атомный вес. Оценить E можно, если воспользоваться известным соотношением между массой m и полной энергией, которая с этой массой связана:

$$E = mc^2,$$

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

Ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов, и его масса равна $6,63 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса одного протона $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Нетрудно убедиться, что суммарная масса четырёх протонов, участвующих в реакции, больше массы одного ядра гелия на

$$4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} - 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 5 \cdot 10^{-29} \text{ кг}.$$

Этому избытку массы соответствует энергия $E = 4,5 \cdot 10^{-12}$ Дж, которая уносится квантами света и (небольшая часть) нейтрино. Поэтому звёзды — источники не только света, но и нейтрино. Звёзды типа Солнца каждую секунду теряют на излучение миллионы тонн своей массы. При этом сотни миллионов тонн водорода на Солнце ежесекундно превращаются в гелий, и это продолжается уже миллиарды лет.

Убедиться в существовании идущих от Солнца нейтрино, как это предсказывает теория термоядерных превращений, оказалось очень сложной задачей. Нейтрино ведёт себя как электрически нейтральная частица исчезающе малого размера и поэтому свободно проходит через любую толщу вещества, например сквозь Землю или даже Солнце, не задерживаясь. От этих частиц невозможно ничем отгородиться.

Солнечные нейтрино приходят к Земле в таком большом количестве (миллиарды нейтрино в секунду проходят через каждый квадратный сантиметр поверхности Земли), что время от времени могут реализовываться маловероятные события взаимодействия нейтрино с обычным веществом, и эти редкие случаи удаётся зафиксировать с помощью специальных установок, называемых **нейтринными детекторами**. На нейтринном детекторе «Супер-Камиоканде» (Япония) в результате долгого накопления событий удалось даже получить размытое изображение Солнца в нейтринных лучах, окончательно доказав тем самым правильность наших представлений о термоядерной реакции в недрах Солнца. Чтобы исключить все возможные источники помех, нейтринный детектор регистрирует только те нейтрино, которые летят «снизу», проходя через толщу Земли. Поэтому приведённое на рисунке 148 светлое пятно — это размытое изображение Солнца, сделанное сквозь Землю.

Если температура в центре звезды достигает 100 млн К, то «включается» термоядерная реакция другого типа, которая в нашу эпоху на Солнце невозможна: *происходит образование углерода при «слиянии» трёх ядер гелия: $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + 1,2 \cdot 10^{-12}$ Дж.*

При этом, как и в реакции превращения водорода в гелий, выделяется энергия, обеспечивающая высокую светимость звезды.

По историческим причинам ядра гелия физики часто называют **альфа-частицами**, поэтому указанная реакция ещё известна как **3 α -процесс**. В центре Солнца температура слишком низкая для такой реакции. Однако

в центре красных гигантов, более старых звёзд, температура достигает 10^8 К, и там именно эта реакция играет основную роль в выработке энергии. Через несколько миллиардов лет Солнце должно сильно измениться, и в его термоядерном ядре температура достигнет требуемых значений для реакции превращения гелия в углерод.

Изображение Солнца, полученное в Японии на нейтринном детекторе «Супер-Камиоканде» в 1998 г. в результате экспозиции, длившейся более 500 сут. Угловой размер кадра — около 90° .

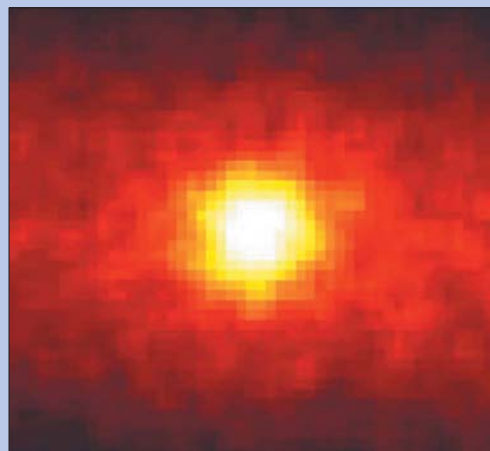


Рис. 148. Изображение Солнца в нейтринных «лучах»

У звёзд, значительно превышающих Солнце по массе, усложнение ядер атомов продолжается и после образования углерода: ядра последовательно присоединяют к себе α -частицы, увеличивая свой атомный вес: углерод превращается в *кислород*, затем последовательно рождаются *неон*, *магний* и *кремний*. У самых массивных звёзд синтез всё более тяжёлых ядер доходит до образования атомов железа и других элементов, близких к нему по атомному весу.

На этом цепочка рождения элементов с выходом энергии останавливается, поскольку последующие утяжеления ядер уже поглощают энергию, а не выделяют её. Более тяжёлые элементы рождаются при других реакциях между атомными ядрами, которые происходят главным образом при взрывах массивных звёзд, называемых **взрывами сверхновых**.

На определённых этапах эволюции свечение звезды может энергетически подпитываться не реакцией между атомными ядрами, а сжатием звезды, при котором *гравитационная энергия* переходит в тепловую энергию газа. Так, в период своего формирования звезда (**протозвезда**) сжимается, и благодаря этому источнику энергии светимость протозвезды может многократно превышать светимость Солнца, несмотря на отсутствие в ней термоядерных реакций.

Правда, гравитационный источник энергии не может «работать» так же долго, как термоядерный. Когда в результате сжатия протозвезды

температура в её центре становится достаточно высокой (около 10 млн K), включается основная реакция, превращающая водород в гелий. В результате недра звезды быстро нагреваются, и возросшее давление газа останавливает сжатие. Наступает **равновесие** между *силами гравитации*, стремящимися сжать термоядерное ядро звезды, и силами давления газа, направленными на его расширение. На этом формирование звезды заканчивается, и, пока ядерного топлива — водорода — у неё много, все изменения, происходящие со звездой, будут очень медленными.

Равновесие звёзд

В отличие от твёрдых или жидких тел звёздные шары не сохраняют постоянного объёма всю свою жизнь. Газ, из которого они состоят, может сжиматься или расширяться с изменением его внутреннего давления.

Из физики мы знаем, что газ во всех случаях стремится занять весь доступный ему объём пространства, потому что он всегда находится под определённым давлением. Почему мы тогда говорим о звёздах как о *стационарных газовых шарах*? Дело здесь исключительно в их **гравитации**. В обычных земных условиях масса любой газовой среды слишком мала, чтобы гравитационное поле газа было заметным. Звезда же имеет большую массу, и её гравитация играет определяющую роль в формировании её структуры.

Газ, из которого состоит звезда, как и любой другой нагретый газ, обладает давлением, и оно стремится расширить звезду. Но расширению противодействует собственное гравитационное поле звезды, которое складывается из сил притяжения всех частиц друг к другу. Внешние слои звезды, притягиваясь к центру, давят своим весом на те слои, которые расположены глубже, и, если бы силы давления газа не препятствовали сжатию, звезда типа нашего Солнца менее чем за час сжалась бы до размеров планеты.

В стационарном состоянии размер звезды и её внутренняя структура устанавливаются такими, чтобы на любой глубине под поверхностью звезды силы давления газа, стремящиеся её расширить, уравновешивались весом вышележащих слоёв, направленных на то, чтобы сжать внутреннюю область (рис. 149). Иными словами, на любом расстоянии от центра звезды устанавливается баланс этих двух противоположно направленных сил: силы газового давления уравновешивают силы гравитационного притяжения.

■ Так как звёзды (за очень редким исключением) в течение долгого времени сохраняют свои размеры, можно считать, что их вещество находится в **равновесии**: на любом расстоянии от центра звезды силы газового давления внутри звезды, направленные наружу, уравниваются силами гравитационного сжатия, направленными внутрь. Чем ближе к центру, тем больше вес вышележащих слоёв газа, но давление этих слоёв уравнивается высоким давлением, действующим «изнутри», со стороны более плотного и горячего газа.

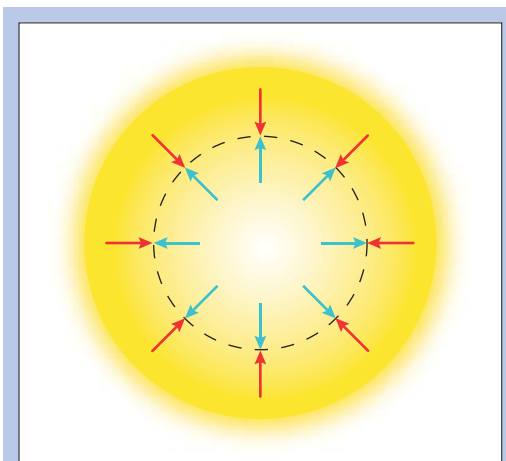


Рис. 149. Схема равновесия внутренних сил в звезде

Равновесие между *силой давления газа* и *силой гравитации* всегда устойчиво, в противном случае ни звёзд, ни Солнца в природе не существовало бы.

Действительно, если равновесие чуть нарушится, например если силы тяжести немного сожмут газ в недрах звезды, то при этом возрастёт его плотность и температура. В результате возросшее давление газа остановит сжатие. Если, наоборот, постепенно начнёт возрастать внутреннее давление газа, внутренняя область звезды начнёт расширяться, и, как следствие, температура уменьшится до равновесного значения.

Каким в результате окажется размер звезды, соответствующий условию баланса сил, будет зависеть от мощности источников энергии, поддерживающих тепловые движения атомов или их ядер. Поэтому звёзды могут значительно менять свои размеры без какого-либо внешнего воздействия. Если в недрах звезды будет выделяться больше энергии, звезда увеличит свой радиус, если меньше — равновесие звезды наступит при меньших размерах.

Отсюда следует важный вывод: при постепенном ослаблении мощности источника внутренней (тепловой) энергии в звезде она должна сокращать свои размеры и увеличивать плотность, а при возрастании мощности источника энергии она должна «распухать». Почти каждая звезда в течение жизни проходит и тот и другой этапы.

Во все времена люди видели на небе одни и те же звёзды. Но очевидно, что звёзды не могут жить вечно. В центральной части звезды, где идут термоядерные реакции, медленно уменьшаются запасы топлива — водорода, превращающегося в гелий и более тяжёлые элементы, — звезда «стареет».

Как «стареются» звёзды

В настоящее время эволюционные изменения светимости и размера для звёзд любой массы, находящихся в равновесном состоянии, можно рассчитать теоретически, поскольку известно, как мощность выделения энергии зависит от температуры и плотности газа и как эта энергия «просачивается» к поверхности.

На рисунке 150 для примера показан эволюционный путь звезды солнечной массы от состояния протозвезды до конечной стадии эволюции — белого карлика. (Цвет и масштаб условны. Временная шкала приблизительно в миллиардах лет.)

Первый по важности вопрос: на сколько времени хватит запасов *звёздного топлива*, то есть **водорода**, находящегося при высокой температуре в ядре звезды?

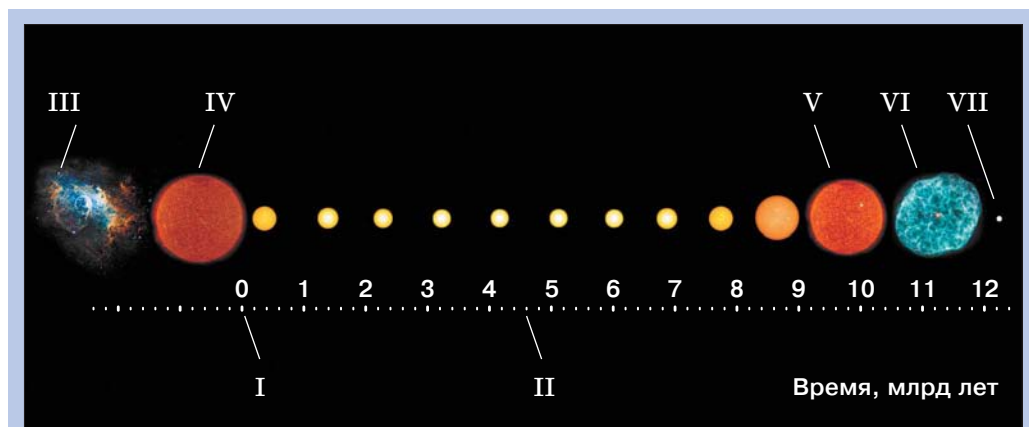


Рис. 150. Эволюция Солнца: I — начало термоядерной реакции; II — настоящее (4,57 млрд лет); III — часть молекулярного облака; IV — протозвезда; V — красный гигант; VI — планетарная туманность; VII — белый карлик

Решим эту задачу на примере Солнца.

Мы знаем, что энергия, излучаемая Солнцем, рождается в его недрах благодаря термоядерной реакции, когда четыре ядра водорода порождают одно ядро гелия, так что сотни миллионов тонн водорода каждую секунду превращаются в гелий. Но поскольку **масса** Солнца очень велика ($2 \cdot 10^{30}$ кг), для существенного уменьшения количества водорода в солнечном ядре требуется около 10 млрд лет. **Возраст** Солнца оценивается примерно в 5 млрд лет, так что оно находится примерно в *середине своего жизненного пути*.

Когда через 5—6 млрд лет в его недрах будет исчерпан водород, структура Солнца начнёт претерпевать большие изменения. Термоядерная сердцевина Солнца, почти исчерпавшая водородное топливо и потому состоящая в основном из гелия, сожмётся, и термоядерные реакции охватят свежие, богатые водородом слои солнечного вещества, более далёкие от центра Солнца. Выход энергии возрастёт, и возросшее благодаря этому давление газа за несколько десятков миллионов лет раздует нашу звезду так, что солнечный шар поглотит *Меркурий* и *Венеру* (не исключено, что и Землю). Никакой жизни на нашей планете в это время уже не останется. Солнце превратится в гигантскую звезду очень низкой плотности — **красный гигант** (рис. 151).

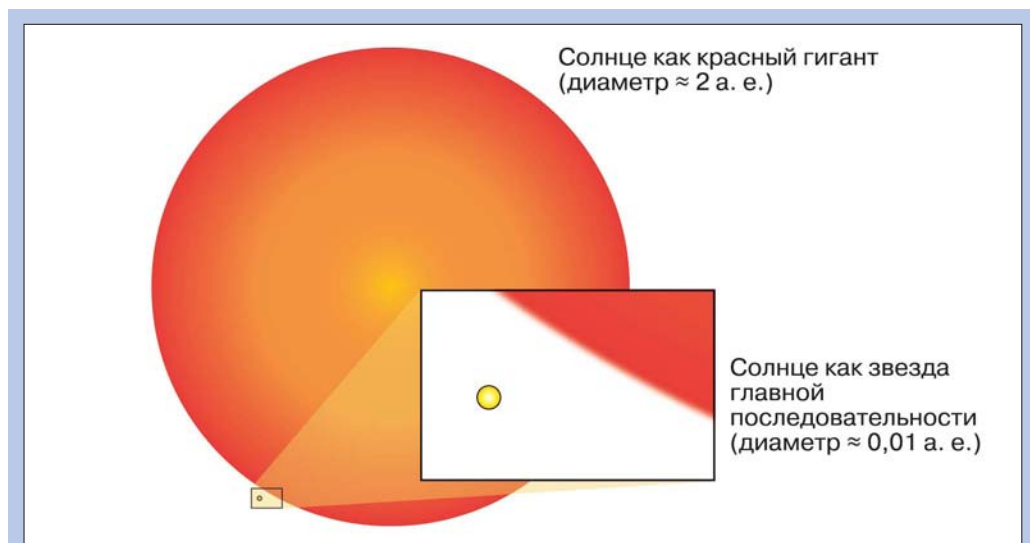


Рис. 151. Солнце на стадии красного гиганта многократно увеличит размер своей фотосферы и, возможно, достигнет орбиты Земли

Когда температура в сжавшемся гелиевом ядре приблизится к 100 млн К, включится реакция превращения гелия в углерод, также сопровождающаяся выделением энергии. Через какое-то время Солнце сбросит газовую оболочку, оголив горячие недра. Медленно сжимаясь, такое незнакомое нам Солнце превратится в горячую звезду с высоким содержанием гелия размером с планету — **белый карлик**. Из-за маленького размера его светимость окажется очень низкой.

Многие миллиарды звёзд Галактики уже прошли этот путь, а сброшенные звёздами оболочки, называемые **планетарными туманностями**, наблюдаются в большом количестве в нашей звёздной системе (рис. 152).

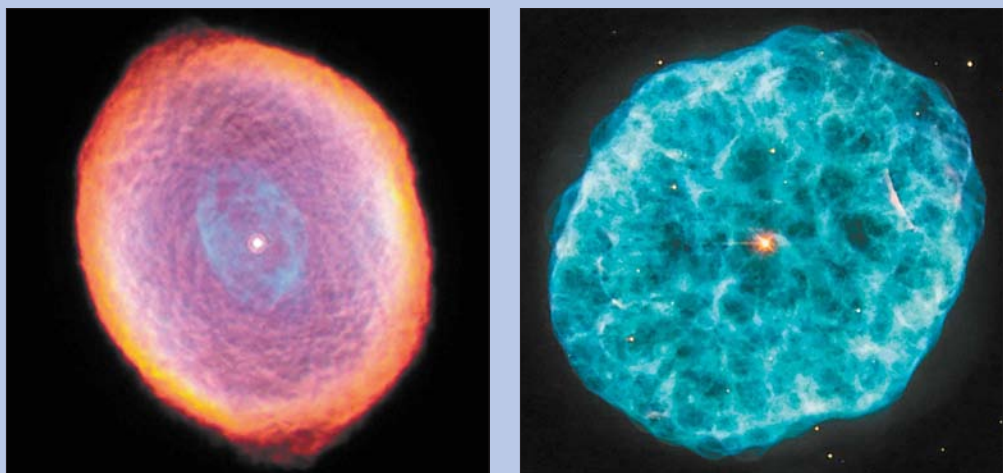


Рис. 152. Слева: планетарная туманность IC 418. Справа: планетарная туманность NGC 1501. IC — Index Catalogue, NGC — New General Catalogue

Планетарная туманность IC 418 возникла несколько тысяч лет назад в результате сброса внешних слоёв звезды — красного гиганта. Узорчатый вид туманности связан со сложным характером движения газа, теряемого звездой. Красноватый оттенок на периферии связан со свечением водорода, голубой (в центральной области) — со свечением кислорода в более горячей среде. Расстояние до туманности — около 2000 св. лет, диаметр — несколько световых месяцев. Фото телескопа «Хаббл» (NASA).

Планетарная туманность NGC 1501 находится на расстоянии около 5000 св. лет, её диаметр — около 1 св. года. Узорчатый вид туманности связан со сложным характером движения газа, сбрасываемого звездой. Фото телескопа «Хаббл» (NASA).

Эволюционный путь звёзд удобно изображать на диаграмме Герцшпрунга — Рассела (рис. 153).

Около 90 % своей жизни каждая звезда проводит на главной последовательности, а в оставшиеся 10 % успевает превратиться в **красный гигант** (для массивных звёзд — в **сверхгигант**), сбросить излишек массы и сжаться в компактный шар, лишённый источников энергии. Это считается концом жизненного пути звезды. Для массивных звёзд возможен также взрыв в конце сжатия.

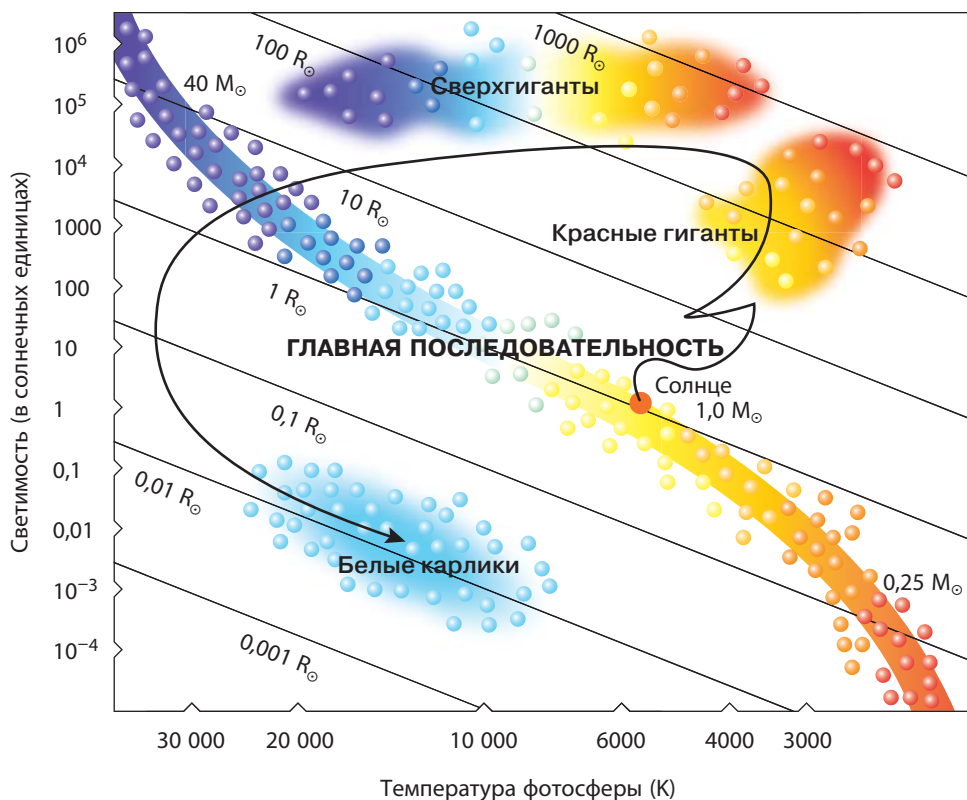


Рис. 153. Эволюционный трек звезды массой 1 $M_{\odot}$

На рисунке 153 по вертикали — светимость (в светимостях Солнца), по горизонтали — температура фотосферы. Наклонные линии соответствуют разным значениям радиуса звезды (в единицах радиуса Солнца). У главной последовательности указана характерная масса звёзд.

Массивные звёзды излучают много энергии и быстрее расходуют ядерное топливо. Поэтому чем больше масса звезды, тем быстрее она эволюционирует и в конце концов быстрее перестаёт быть источником яркого света. Продолжительность жизни наиболее массивных звёзд не превышает нескольких миллионов лет, звёзды с массой, как у Солнца, живут немногим более 10 млрд лет, а у менее массивных, чем Солнце, красных карликов время жизни — десятки и сотни миллиардов лет.

Звёзды различных масс около 90 % своей жизни спокойно «сжигают» водород и почти не меняются. После того как в центральной части звезды остаётся мало главного ядерного «топлива» — водорода, светимость звезды возрастает, а температура поверхности падает. При этом звёзды «распухают», увеличивая свой размер во много раз, и превращаются в звёзды-гиганты, а в случае наиболее массивных звёзд — в сверхгиганты, светимость которых ещё в десятки раз выше, чем у гигантов.

В таких звёздах протекают термоядерные реакции, превращающие гелий в более тяжёлые элементы. На этой стадии звёзды сбрасывают часть своей массы тем большую, чем выше была начальная масса звезды. В дальнейшем стареющие звёзды медленно сжимаются, превращаясь в *необычные плотные объекты*, а если звезда изначально была во много раз массивнее Солнца, она при этом может испытать очень *сильный взрыв*, называемый **взрывом сверхновой звезды**.

Белые карлики и нейтронные звёзды

Даже очень плотный газ в недрах таких звёзд, как Солнце, можно считать идеальным. Однако в XX в. удалось открыть и изучить звёзды, вещество которых настолько сильно сжато, что приобретает свойства, отличные от свойств идеального газа.

Первыми из таких сверхплотных звёзд были открыты *белые карлики*. Самый близкий к нам белый карлик — это звезда-спутник ярчайшей звезды всего неба *Сириуса*. Сама звезда после открытия у неё спутника стала называться *Сириусом А*, а плотный спутник — *Сириусом В*.

С расстояния около 9 св. лет, на котором находятся *Сириус А* и *Сириус В*, Солнце выглядело бы довольно яркой звездой второй звёздной величины. Однако *Сириус В* светит примерно в 500 раз слабее, хотя его

температура выше солнечной — около 10 тыс. К. Низкая светимость говорит о малых размерах звезды: исходя из **закона Стефана — Больцмана**, можно заключить, что её радиус должен быть в десятки раз меньше, чем у Солнца.

Сириус А и *Сириус В* — это две близкие друг к другу звезды, они обращаются вокруг общего центра масс, по их видимому движению, пользуясь третьим законом Кеплера, можно найти массу каждой из них. *Сириус В* по массе мало отличается от Солнца, но из-за маленького размера звезды её **средняя плотность** оказывается гигантской — почти 10^9 кг/м³, или почти в миллион раз больше, чем у воды.

■ **Газ**, из которого состоят **белые карлики**, называется **вырожденным**, а сами белые карлики часто называют *вырожденными звёздами*.

Их необычные свойства описываются только квантовой механикой. В отличие от идеального газа давление вырожденного газа почти не зависит от температуры и определяется только концентрацией свободных электронов в плазме, которая связана с плотностью вырожденного газа. Поэтому **структура** белого карлика отличается от структуры обычной звезды: она не зависит от его температуры. Белые карлики не сжимаются и не расширяются, если сохраняется их масса, причём, в отличие от обычных звёзд, чем больше масса белого карлика, тем меньше его размер.

Белые карлики с массой более $1,4\text{--}1,5 M_{\odot}$ не могут существовать: гравитационная сила, сжимающая их, становится настолько большой, что вырожденный газ не приходит в равновесное состояние. Он не в состоянии удержать сжатие, и вместо образования белого карлика происходит стремительное сжатие, приводящее к выделению огромной энергии (**вспышка сверхновой**), и возникает другое тело — **нейтронная звезда**.

Существование нейтронных звёзд было предсказано теоретически советским физиком-теоретиком Львом Давидовичем Ландау в 1932 г., но открыты они были только в 1960-х гг. Сейчас их известно несколько тысяч.



О физике Л. Д. Ландау см. в энциклопедии «Кругосвет» (<http://www.krugosvet.ru>).



■ **Нейтронные звёзды** — это необычные звёзды, в сотни раз меньшие по размеру, чем белые карлики. Их **диаметр** составляет всего 20—30 км, а **масса** в 1,5—2 раза превышает массу Солнца. **Плотность** вещества в недрах нейтронной звезды примерно равна плотности атомных ядер: она в 10^{13} раз больше плотности воды.

Помимо тонкого внешнего слоя, вещество нейтронных звёзд состоит в основном из тесно «упакованных» нейтронов — *электронейтральных элементарных частиц*, обычно входящих в состав атомных ядер. Отсюда и название этих звёзд — *нейтронные*.

Образование нейтронных звёзд происходит при *быстром сжатии (коллапсе)* внутренних областей массивных звёзд, потерявших устойчивость, которое приводит к взрыву звезды. В процессе быстрого сжатия в веществе достигаются настолько высокие значения плотности и давления, что протоны начинают захватывать электроны, превращаясь в нейтроны. При этом возникает такое большое количество нейтрино, что они уносят основную энергию, выделяющуюся при взрыве.

Вещество внешней части взорвавшейся звезды разлетается, а нейтронная звезда может остаться и жить неопределённо долго.

Нейтронные звёзды уникальны не только по своей плотности, но и по очень сильному гравитационному полю, которое создают вблизи себя благодаря маленькому радиусу и большой массе (вспомним: из **закона всемирного тяготения** следует, что *при данной массе силы гравитации на поверхности шара обратно пропорциональны квадрату его радиуса*).

При падении любого вещества на нейтронную звезду оно разгоняется до скорости 100—200 тыс. км/с. Даже если на нейтронную звезду падает не компактное тело, а просто разреженный газ из окружающего пространства, то такое падение неизбежно приведёт к выделению колоссальной энергии и очень сильному разогреву газа. Это будет происходить, например, если рядом с нейтронной звездой находится звезда обычного типа, теряющая свой газ, который ускоряется в гравитационном поле нейтронной звезды.

Очень маленькая площадь поверхности нейтронной звезды делает её слабым источником света, несмотря на высокую температуру поверхности. Нейтронные звёзды были впервые открыты не по оптическому, а по **радиоизлучению**, которое возникает в их невероятно сильном магнитном поле.

В 1967—1968 гг. случайно были обнаружены радиоисточники с совершенно необычным характером радиоизлучения, наблюдалась непрерывная серия коротких радиоимпульсов, следующих друг за другом со строго постоянной периодичностью — от сотых долей секунды до нескольких секунд. Такие радиоисточники получили название **пульсары** (рис. 154).

Анализ импульсов показал, что их источниками могут быть только очень маленькие и невероятно плотные объекты с очень быстрым вращением, и это подходило под описание нейтронных звёзд. Их импульсное излучение получило простое объяснение: оно рождается движением за-

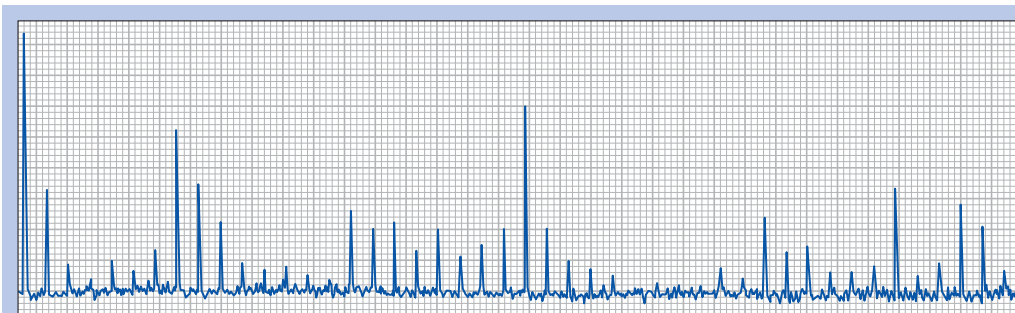


Рис. 154. Запись радиоимпульсов первого пульсара PSR 1919+21 с периодом 1,3373 с на частоте 72,7 МГц

ряженных частиц в магнитном поле нейтронной звезды и поэтому распространяется не равномерно во все стороны, а в основном в пределах узкого конуса (точнее, двух конусов, направленных в диаметрально противоположные стороны), наподобие луча прожектора. Направление конуса не обязательно совпадает с осью вращения.

Поскольку нейтронные звёзды вращаются вокруг оси как быстрые волчки, вместе с ними вращается луч «радиопрожектора», всё время меняя своё направление. Если ось вращения нейтронной звезды оказалась так ориентирована, что в радиолуч периодически попадает Земля, то мы будем регистрировать один радиоимпульс каждый оборот звезды вокруг оси. К примеру, если пульсар делает три оборота в секунду, то частота следования импульсов будет 3 Гц. Сейчас известно несколько тысяч таких **нейтронных звёзд-радиопульсаров**.

Вслед за радиопульсарами нейтронные звёзды были обнаружены и в *рентгеновском диапазоне*. С помощью космических обсерваторий на небе были найдены рентгеновские источники исчезающе малого углового размера. Естественно было связать их со звёздами. И действительно, на месте некоторых рентгеновских источников находятся звёзды высокой светимости. Но для обычных звёзд мощное рентгеновское излучение не свойственно, оно требует температуры в миллионы градусов (вспомните **закон Вина**).

Оказалось, что рентгеновское излучение приходит не от звёзд, а от их *невидимых спутников*, которые образуют с ними *тесные пары*, обращаясь вокруг общего центра масс. Этими спутниками являются нейтронные звёзды, окружённые очень горячим газом.

Если оптическая звезда на определённой стадии эволюции интенсивно истекает газом, то часть этого газа, притягиваясь нейтронной звездой,

падает на неё, разгоняясь при падении до колоссальных скоростей, и, как правило, закручивается вокруг неё, образуя *плотный и очень горячий газовый диск*. Такой диск называется **аккреционным диском** (рис. 155). Потенциальная энергия газа, вливающегося в этот диск, переходит в его кинетическую и тепловую энергию, и газ в аккреционном диске нагревается до гигантской температуры в сотни миллионов кельвинов.

На рисунке 155 показано перетекание вещества с нормальной звезды на нейтронную и сформировавшийся в результате этого аккреционный диск.

Как следствие, такой диск оказывается очень мощным *рентгеновским источником*. Вращаясь вместе с нейтронной звездой, он может периодически заходить за диск оптической звезды, и тогда принимаемое нами рентгеновское излучение прерывается, пока диск не покажется вновь. Подобные «выключения» действительно наблюдаются в рентгеновских источниках такого типа.

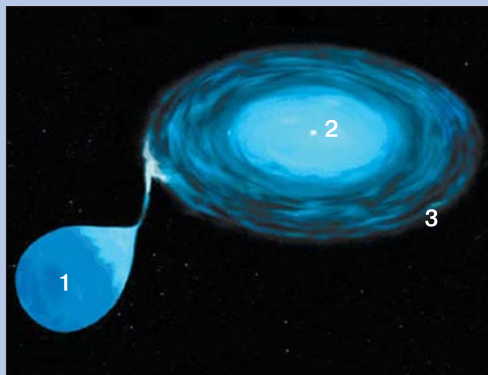


Рис. 155. Обмен веществом между звёздами: 1 — нормальная звезда; 2 — нейтронная звезда; 3 — аккреционный диск

Конечные стадии эволюции звёзд

И *белые карлики*, и *нейтронные звёзды*, свойства которых рассматривались в предыдущих разделах, можно считать **конечными стадиями** звёздной эволюции. Во что и за какое время в конце концов превратится звезда — зависит от того, какая у неё начальная масса и насколько она уменьшилась за время жизни (рис. 156).

Если звезда очень массивная, она, сильно раздувшись на стадии гиганта или сверхгиганта, может потерять существенную долю своей массы. Оболочка, сброшенная звездой, постепенно рассеивается в пространстве. Многие такие расширяющиеся оболочки наблюдаются на небе. Мы уже знаем, что они называются **планетарными туманностями**.

Оболочки звёзд расширяются, а оставшаяся звезда, уже лишённая источников термоядерной энергии, вступает в завершающий этап эволюции. Эволюция плотного звёздного ядра, лишённого водорода, а порой и гелия, продолжается и может происходить разными путями в зависимости от оставшейся массы звезды.

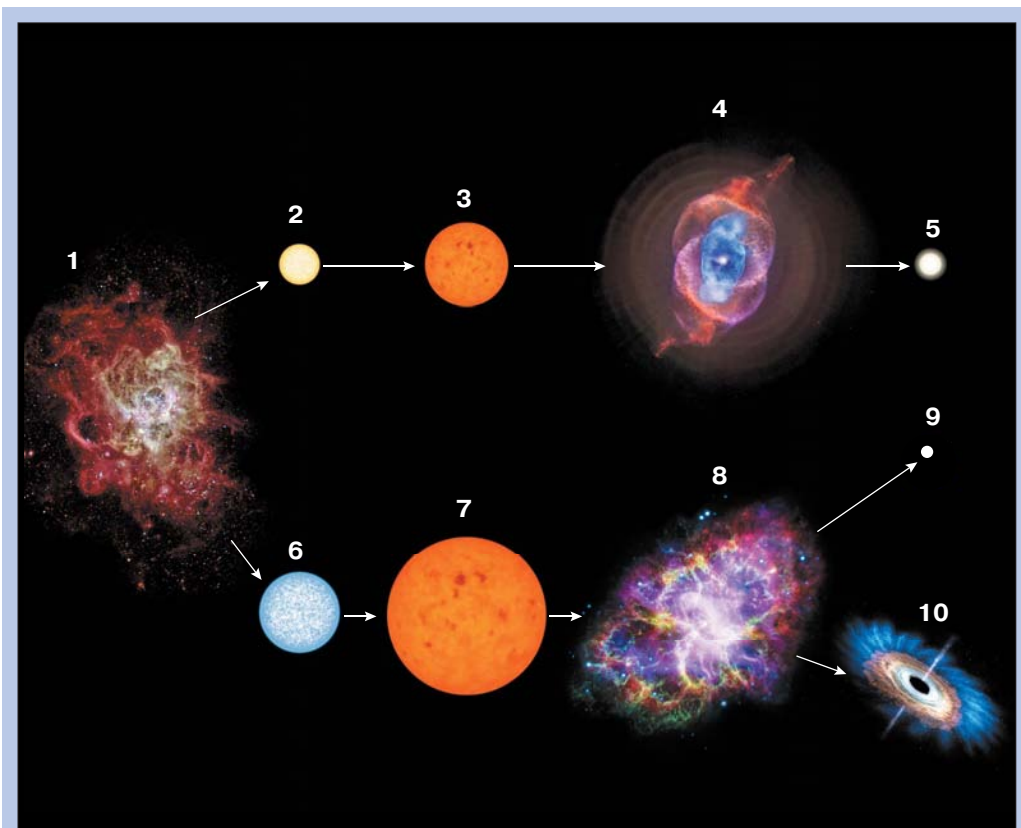


Рис. 156. Эволюция звёзд разной массы: 1 — газОВО-пылевое облако; 2 — звезда солнечной массы; 3 — красный гигант; 4 — планетарная туманность; 5 — белый карлик; 6 — массивная звезда; 7 — красный сверхгигант; 8 — взрыв сверхновой; 9 — нейтронная звезда; 10 — чёрная дыра, окружённая аккреционным диском

■ Звёзды солнечного типа после стадии красного гиганта сжимаются до небольших размеров в тысячи километров и превращаются в горячие и плотные **белые карлики**.

Поскольку белые карлики лишены источников термоядерной энергии, они медленно остывают, однако многие миллиарды лет могут продолжать излучать свет за счёт запасённого тепла, пока не превратятся в холодные **«чёрные карлики»**. Но время существования нашей Галактики слишком мало для того, чтобы хоть один белый карлик успел остыть. Поэтому «чёрных карликов» в природе пока не существует.

■ Очень плотные и холодные шары из вырожденного газа, имеющие размеры, характерные для планет, — такова **конечная стадия** жизни большинства звёзд.

Но если начальная масса звёзд большая (по расчётам — более $10 M_{\odot}$), то даже после сброса вещества остаётся очень массивное и горячее ядро. После исчерпания запасов термоядерного топлива равновесие в нём нарушается, и оно очень быстро сжимается под действием собственной гравитации. Этот процесс заканчивается мощным взрывом **сверхновой**, который приводит к частичному, а в некоторых случаях, возможно, и полному разрушению звезды.

Значительная часть массы звезды при взрыве разлетается во все стороны со скоростью 5—20 тыс. км/с, а сжавшийся остаток массивной звезды превращается в компактную нейтронную звезду, если только его масса не превышает $2\text{—}3 M_{\odot}$.

В случае большей массы его ожидает иная судьба.

Звёздные чёрные дыры

У газовых тел с массой больше $3 M_{\odot}$ при отсутствии внутренних источников энергии нет равновесных состояний. Мощное гравитационное поле такого тела настолько сильно сдавливает газ, что сжатие становится безудержным и не останавливается ни на стадии вырожденного газа, ни на стадии нейтронной звезды. Результатом такого сжатия неизбежно будет возникновение объекта размером несколько километров с необычными свойствами.

У этого объекта не будет поверхности в обычном понимании этого слова, на которую можно было бы упасть, — ни твёрдой, ни жидкой, ни газообразной. На некотором расстоянии R_g от центра объекта, называемом **гравитационным радиусом**, поле тяготения усиливается до значения, предельно допустимого законами природы.

В таком экстремально сильном поле **вторая космическая скорость** (минимальная скорость, необходимая для того, чтобы навсегда покинуть объект), равная $\sqrt{\frac{2GM}{R_g}}$, достигает **скорости света**. Поскольку свет в вакууме имеет максимальную скорость движения, возможную в природе, никакой свет, никакие сигналы не дойдут с расстояния R_g до внешнего наблюдателя. Такие объекты принципиально невидимы. Они получили название **чёрные дыры**.

Чёрные дыры неплохо исследованы теоретически, но очень сложно найти и узнать, что реально происходит вблизи них и как часто они встре-

чаются в природе. Из существующей теории гравитации — **общей теории относительности** — следует, что *вблизи гравитационного радиуса чёрных дыр пространство меняет свои геометрические свойства (искривляется), а темп течения времени, с точки зрения удалённого наблюдателя, замедляется по мере приближения к гравитационному радиусу.*

Если бы мы смогли отслеживать падение какого-нибудь тела на чёрную дыру, то из-за замедления времени мы бы так и не дождались, когда оно пересечёт этот радиус. Такие странные объекты не описываются законами классической физики.

■ Таким образом, наиболее массивные звёзды в конце концов превращаются в необычные объекты, не излучающие никаких сигналов, — в **чёрные дыры**.

Однако чёрная дыра может проявлять себя по гравитационному воздействию на окружающие тела или газ. Она может притягивать газ и звёзды как самое обычное массивное тело. Поток газа, падающий на чёрную дыру от близкой к ней звезды, как и в случае нейтронной звезды, образует вокруг неё (на расстоянии, несколько большем R_g) горячий аккреционный диск, интенсивно излучающий рентгеновские лучи.

Используя **закон всемирного тяготения**, можно по измерениям колебания лучевой скорости оптической звезды измерить массу её невидимого спутника с аккреционным диском. Если окажется, что она превышает $3 M_\odot$, такой объект считается «кандидатом» в чёрные дыры.

Общая теория относительности предсказывает, что ускорения, испытываемые массивными телами (в нашем случае — звёздами в тесных двойных системах), должны сопровождаться излучением особого вида колебаний — так называемых **гравитационных волн**, распространяющихся со скоростью света без каких-либо преград. Поскольку эти волны уносят энергию, вращающиеся звёзды должны терять энергию орбитального движения и сближаться, а период их вращения — уменьшаться, до полного слияния звёзд в одно тело.

В обычных звёздных системах это излучение очень слабое и его невозможно обнаружить. Но если речь идёт о сближении нейтронных звёзд или чёрных дыр, то за доли секунды перед их слиянием мощность излучения гравитационных волн оказывается настолько высокой, что теоретически возможно их зарегистрировать, даже если это событие случилось в какой-нибудь очень далёкой галактике. Неоднократно

делались попытки обнаружить такие гравитационные колебания с помощью очень чувствительных и сложных оптических установок. Они увенчались успехом только в 2015 г., когда с помощью двух идентичных детекторов LIGO в США, расположенных на расстоянии 3000 км друг от друга, одновременно были зарегистрированы короткие всплески дошедших до нас гравитационных волн.

➔ Подробнее об этом см. на сайте «Астронет» (<http://www.astronet.ru/db/msg/1356112>).



Сопоставление результатов измерений с теоретическими моделями привело к выводу о том, что зарегистрированный сигнал возник в результате слияния чёрных дыр массами в несколько десятков масс Солнца, причём гравитационные волны пришли с расстояния несколько миллиардов световых лет. Впоследствии было зафиксировано ещё несколько подобных событий, но отождествить хотя бы одно из них с каким-либо объектом на небе тогда не удалось.

В 2017 г. произошло ещё одно знаменательное событие: на трёх независимых установках — в США и Италии — одновременно был зафиксирован всплеск гравитационных волн, продолжавшийся около 100 с, источником которого могло быть только слияние, но уже не чёрных дыр, а нейтронных звёзд на расстоянии около 130 млн св. лет от Земли. Самое важное — практически одновременно с этим событием был зарегистрирован короткий всплеск гамма-излучения из той же области неба, а через некоторое время появился и оптический источник, что позволило найти ту галактику, где это событие имело место. Она действительно оказалась именно на том расстоянии, какое ожидалось по анализу гравитационных волн. Таким образом, можно говорить о рождении нового направления в науке — гравитационно-волновой астрономии, которое наверняка приведёт ко многим важным открытиям.

➔ Подробнее об этом см. на сайте: http://elementy.ru/kartinka_dnya/431/Zafiksirovano_sliyanie_neytronnykh_zvezd.



Переменными называют звёзды, меняющие свой видимый блеск. Причины для изменения блеска могут быть самыми разнообразными: например, *изменение собственной светимости* звезды (в результате пульсаций, взрывов) или чисто *геометрические факторы* (затмение одной звезды другой, вращение звезды с тёмными пятнами на поверхности и т. п.).

Очень небольшие изменения светимости, которые происходят за дни, месяцы или годы, есть практически у всех звёзд, но если эти изменения не превосходят 1—2 %, то их сложно обнаружить наземным телескопом. Однако встречаются звёзды, у которых изменение видимой яркости достаточно велико, чтобы его можно было заметить, наблюдая за звездой даже глазом, без измерительной аппаратуры.

Ниже мы обсудим несколько наиболее характерных типов переменных звёзд, хотя есть и другие, менее известные, и даже такие, причины переменности блеска которых ещё не до конца понятны.

Затменные переменные звёзды

Звезда β *Персея* от ночи к ночи то увеличивает яркость, то ослабевает. Древние арабы называли её *Эль-Гуль*, что означает «глаз дьявола». В европейские языки она вошла как *Алголь*. Убедиться в переменности этой звезды может каждый внимательный наблюдатель, сравнивая её яркость с ближайшими звёздами несколько ночей подряд. Видимая яркость *Алголя* меняется **строго периодически** с периодом 2 сут 20 ч 49 мин (рис. 157).

В конце XVIII в. английский любитель астрономии Джон Гудрайк правильно объяснил причину её изменения. Он предположил, что звезда периодически затмевается каким-то непрозрачным телом. Впоследствии это полностью подтвердилось.



Дополнительную информацию см. на сайте «Астронет» (<http://www.astronet.ru/db/msg/1219882>).

Эта система действительно представляет собой **двойную звезду**, где обе звезды в процессе своего орбитального движения попеременно затмевают одна другую (см. схему на рис. 157).



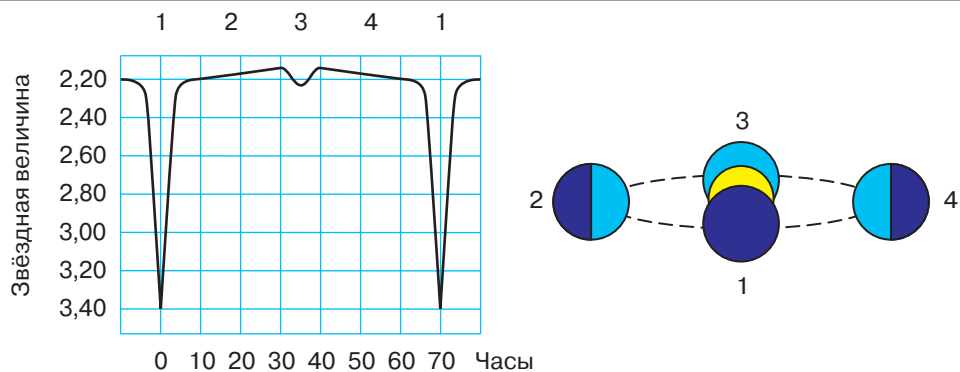


Рис. 157. График изменения яркости Алголя и четыре взаимных положения его компонентов в характерные моменты орбитального цикла

При затмении более яркой звезды (момент 1 на схеме) суммарный блеск звёзд падает сильнее, чем при затмении её компаньона (момент 3). В промежутках между затмениями блеск также немного меняется (эти области орбиты отмечены цифрами 2 и 4), поскольку полушарие тусклой звезды, обращённое к более яркой соседке, освещается и нагревается ею. Это полушарие постепенно поворачивается к наблюдателю между моментами 1 и 3, а затем отворачивается от него (от 3 к 1). Подобное изменение яркости принято называть *эффектом отражения*, хотя точнее было бы называть *эффектом нагрева*.

Такие звёзды, как Алголь, называются **затменными переменными**. Их известно несколько тысяч. Наблюдения затменных переменных открывают возможность подробно исследовать входящие в систему звёзды. С помощью математических моделей по измерениям видимой яркости на различных длинах волн и лучевых скоростей звёзд (по **эффекту Доплера**) можно найти многие характеристики звёзд, например их *массу*, *размер*, *форму* (которая может заметно отличаться от шара), *температуру* и даже *протяжённость звёздных атмосфер*.

Пульсирующие звёзды

У переменных звёзд других типов светимость меняется в силу внутренних причин. Очень важную роль в астрономии сыграли наблюдения переменных звёзд, называемых **цефеидами** по имени первой найденной звезды этого типа — *δ Цефея*. Они тоже регулярно меняют свою яркость с разными периодами — от нескольких часов до нескольких недель, то

разгораясь, то затухая, но, в отличие от затменных переменных звёзд, изменение блеска цефеиды присуще самой звезде.

Причиной периодического изменения блеска является их **пульсация** — они то увеличивают, то уменьшают свои размеры, что приводит к периодическим изменениям их температуры и светимости. Раздуваясь, они уменьшают свою температуру и увеличивают площадь излучающей поверхности. Всё это приводит к регулярным периодическим изменениям их видимой яркости.

■ **Цефеиды** — это звёзды, испытывающие колебания большой амплитуды относительно положения равновесия, которое соответствует балансу между гравитационными силами, стремящимися сжать звезду, и силой давления газа, стремящейся её раздуть.

При этом чем выше средняя плотность звезды, тем сильнее сжимающая сила её гравитационного поля (аналог коэффициента упругости пружины) и поэтому короче её период колебаний.

Для астрономов оказалось очень важным существование тесной связи между периодом колебания яркости цефеид и их средней (за период) светимостью. Это открыло возможность, наблюдая цефеиды, по найденному периоду определять их светимость. А если светимость (абсолютная звёздная величина) известна, то, сопоставляя её значение с видимой яркостью звезды, легко оценить расстояние до неё (см. формулу (6.1) на с. 196).

У цефеид довольно высокая светимость, и с помощью телескопов эти звёзды можно наблюдать на больших расстояниях и определять расстояния там, где метод измерения расстояний по **параллаксу** уже не работает. Цефеиды обнаруживают даже в других галактиках, что даёт возможность оценить или уточнить расстояния до этих звёздных систем.

Новые и сверхновые звёзды

Есть звёзды, переменность которых имеет *не периодический характер*, а наблюдается в виде отдельных нерегулярных вспышек. Такие звёзды могут внезапно многократно увеличить видимую яркость, после чего надолго или даже навсегда их свет затухает. Переменность этих звёзд вызвана взрывами в их поверхностных слоях (**новые**) или глубоко в их недрах (**сверхновые**).

Время от времени наблюдаются вспышки **новых звёзд** (или просто **новых**). Название *новые* связано с тем, что появившуюся на небе звезду там, где её раньше не было, в прошлом принимали за рождение новой звезды.

Новые звёзды вспыхивают внезапно и непредсказуемо. За несколько дней они могут увеличить свою светимость в несколько тысяч или десятков тысяч раз, после чего постепенно — надолго или навсегда — возвращаются в спокойное состояние. В нашей Галактике вспышки новых наблюдаются нечасто: обычно несколько раз в год. В редких случаях вспышки новых бывают видны невооружённым глазом. Например, в 1975 г. вспыхнула новая в *созвездии Лебедь* и несколько дней была хорошо видна как одна из ярчайших звёзд этого созвездия, так что её могли заметить любители астрономии, хорошо знающие звёздное небо.

■ **Новые звёзды** представляют собой тесные двойные системы, одна из звёзд в которых — *белый карлик*, а другая — *обычная звезда* главной последовательности или в *стадии красного гиганта*. В таких системах часто происходит перетекание газа (**аккреция**) с обычной звезды на компактный белый карлик, вокруг которого образуется аккреционный диск, нагретый на десятки тысяч градусов.

Мы не видим каждую из звёзд по отдельности, но можем анализировать спектр излучения, которое складывается из излучения обеих звёзд, аккреционного диска и падающей на него от нормальной звезды горячей газовой струи.

Именно с аккрецией богатого водородом газа на поверхность белого карлика связана **вспышка новой**. Газ может накапливаться там много лет, но, когда масса упавшего водорода достигает некоторой критической величины, газ в основании выпавшего слоя нагревается до такой высокой температуры, при которой происходит термоядерный взрыв накопившегося водорода. Мы этот взрыв видим как вспышку новой.

Сброшенное белым карликом вещество образует быстро расширяющуюся газовую оболочку с необычно широкими спектральными линиями излучения, отражающими быстрое движение газа. Со временем на поверхности белого карлика может накопиться новая порция свежего газа, и вспышка может повториться.

■ Самые мощные вспышки звёзд связаны со взрывами **сверхновых звёзд**, или просто **сверхновых**. В этом случае звезда взрывается как целое, и после взрыва может сохраниться лишь её компактный остаток.

В нашей Галактике такие взрывы наблюдаются очень редко, раз в несколько сотен лет.

■ **Последние вспышки сверхновых** в нашей Галактике наблюдались в 1572 г. в созвездии *Кассиопея* и в 1604 г. в созвездии *Змееносец*.



На сайте «Астронет» (<http://www.astronet.ru>) см. информацию об исторических сверхновых и об открытиях внегалактических сверхновых.

Значительно чаще — сотни раз в год — вспышки сверхновых находят в других галактиках, поскольку за многими из них ведутся регулярные наблюдения.

Взрывы сверхновых можно отнести к наиболее мощным источникам энергии во Вселенной.

Полная энергия взрыва сверхновой может превышать 10^{44} Дж. Поскольку Солнце излучает $4 \cdot 10^{26}$ Дж в секунду, столько энергии оно может излучить только за 10 млрд лет, то есть за всю свою жизнь. Сверхновые, которые наблюдаются в других галактиках, иногда светят ярче, чем совокупность всех звёзд в той галактике, где они видны.

По современным представлениям, существует *два основных типа сверхновых звёзд*, имеющих разную причину и разный характер взрыва.

В одном случае это *термоядерный взрыв белого карлика*, который произошёл из-за того, что в результате мощной аккреции или слияния с другим белым карликом его масса превысила некоторое критическое значение (около полутора масс Солнца), так что звезда потеряла устойчивость и быстро сжалась до состояния нейтронной звезды.

В другом случае взрыв связан с редко встречающимися звёздами очень большой массы, в 10 и более раз выше солнечной. В конце их жизни, когда термоядерные реакции в ядре звезды затухают из-за истощения запасов атомного «топлива», ядро звезды оказывается не в состоянии удержать гигантское давление вышележащих слоёв. Оно резко сжимается (**коллапсирует**) под весом звезды с последующим взрывом, разрушающим звезду. После взрыва может остаться компактный остаток звезды — **нейтронная звезда** (см. пункт 33) или объект размером несколько десятков километров, не излучающий никакого света, — **чёрная дыра**.

Основную энергию при взрыве сверхновых уносят неуловимые нейтрино, но значительная часть энергии переходит в энергию электромагнитных волн, а также в кинетическую энергию расширяющегося газового остатка, который возникает на месте взрыва звезды.

Когда в 1987 г. наблюдалась вспышка сверхновой в соседней галактике *Большое Магелланово Облако*, с расстояния 150 тыс. св. лет её можно было видеть невооружённым глазом как звезду третьей звёздной величины. На фотографиях этой галактики, полученных ранее, взорвав-

шаяся звезда видна до вспышки как **голубой сверхгигант**. Вместе со светом от сверхновой звезды на Земле были зафиксированы нейтрино, возникшие при взрыве.

Взрыв сверхновой звезды приводит к тому, что большое количество газа, входившего в состав звезды, выбрасывается в межзвёздную среду со скоростями тысячи километров в секунду. Этот газ обогащён химическими элементами тяжелее железа и радиоактивными изотопами, образовавшимися в процессе взрыва. Выброшенные в межзвёздное пространство, эти элементы играют большую роль в звёздной и планетной космогонии.

■ Расширяющиеся облака такого газа могут наблюдаться тысячелетия после взрыва. Они называются **остатками сверхновых звёзд**. Высокоэнергетические электроны, образовавшиеся при взрыве или вскоре после него, излучают радиоволны, поэтому остатки сверхновых являются мощными радиоисточниками.

В нашей Галактике остатков сверхновых известно несколько десятков. Механизм их радиоизлучения связан с движением электронов с околосветовой скоростью в магнитном поле расширяющихся облаков. Такой механизм излучения электромагнитных волн называется **синхротронным**, поскольку он знаком физикам по излучению электронов в ускорителях-синхротронах.

Самый молодой из остатков, возникший несколько сотен лет назад при взрыве сверхновой, который не был замечен на Земле, наблюдается в *созвездии Кассиопея* как мощный космический радиоисточник — один из самых ярких радиоисточников на небе.

Наиболее известный и хорошо изученный остаток сверхновой звезды — *Крабовидная туманность в созвездии Телец* (рис. 158).

Почти тысячу лет назад, в 1054 г., в *созвездии Телец* наблюдалось внезапное появление яркой звезды, что было отмечено китайскими и японскими летописцами. Через несколько недель звезда исчезла, а сейчас на этом месте находится быстро расширяющееся газовое облако, которое до сих пор продолжает увеличиваться в размерах почти на 2000 км каждую секунду. Такова скорость движения газа, измеренная по эффекту Доплера. Это остаток вспыхнувшей сверхновой. Расстояние до него довольно большое — около 6500 св. лет, поэтому увеличение размеров Крабовидной туманности кажется нам медленным.

В самом центре туманности находится слабая звёздочка. Долгое время на неё не обращали особого внимания, но эта звёздочка оказа-

лась необычной. Во-первых, в её спектре нет никаких спектральных линий, что уже говорит о нестандартном механизме излучения. Во-вторых, что самое любопытное, она, как оказалось, мигает с частотой около 30 Гц наподобие неоновой лампочки, причём излучение меняется с одинаковой частотой на всех длинах волн — и в радиодиапазоне,

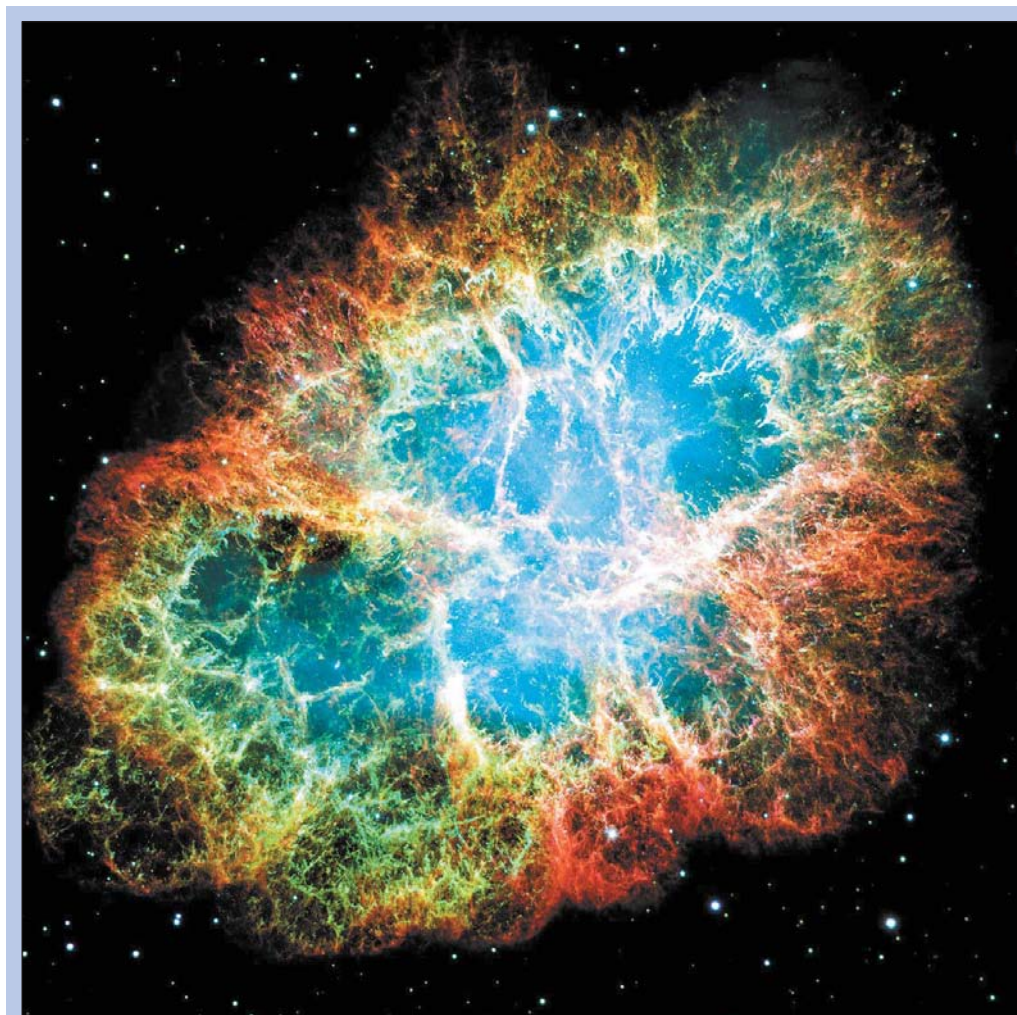


Рис. 158. Крабовидная туманность (оптическое изображение). Голубой цвет (в центре) — синхротронное излучение, остальные цвета — излучение атомов различных газов

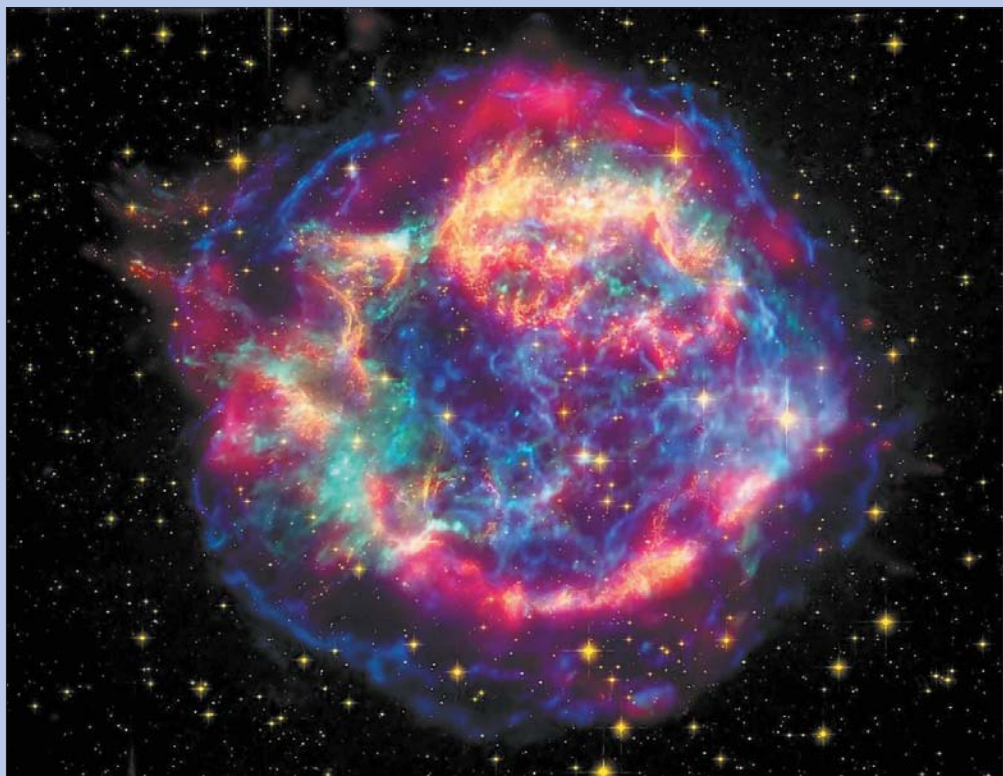


Рис. 159. Остаток сверхновой Кассиопея А. Комбинированное изображение в видимых (оранжевый цвет), инфракрасных (красный) и рентгеновских (голубой и зелёный) лучах. Бирюзовая точка близ центра — остаток ядра взорвавшейся звезды.

и в видимом свете. Это **нейтронная звезда-пульсар**, остаток взорвавшейся звезды.

Есть остатки сверхновых другого типа. Они представляют собой расширяющиеся сравнительно плотные **газовые оболочки**, заполненные горячим разреженным газом с температурой порядка 1 млн К (рис. 159). Благодаря высокой температуре такие объекты излучают рентгеновские лучи.

Изучение сверхновых звёзд, а также их остатков помогло лучше понять, как эволюционируют звёзды, откуда берутся тяжёлые химические элементы и высокоэнергичные электроны, какие мощные источники энергии существуют в природе.

Основные выводы

- **Солнце** по астрономическим меркам находится близко к нам и поэтому позволяет лучше понять, что представляют собой звёзды. Оно состоит преимущественно из водорода и гелия, окружено горячей атмосферой, в которой иногда происходят солнечные вспышки, отражающиеся и на физических процессах на нашей планете.
- Расширяющийся поток солнечного газа, называемый **солнечным ветром**, заполняет всю Солнечную систему.
- Высокая температура Солнца и звёзд, благодаря которой они излучают свет, поддерживается термоядерными реакциями в их горячих центральных областях.
- Когда запасы ядерного топлива иссякают, ядра звёзд начинают сжиматься, а их атмосферы — раздуваться, достигая очень больших размеров. В конце концов внутренние области звезды сжимаются (коллапсируют), превращаясь в слабо светящиеся компактные тела — **звёздные остатки**.
- В зависимости от массы звезды это могут быть **белые карлики**, **нейтронные звёзды** или **чёрные дыры**.
- Многие звёзды по разным физическим причинам меняют свою видимую яркость. Некоторые звёзды меняют яркость периодически (**цефеиды**), некоторые демонстрируют сильные всплески яркости, связанные со взрывами на поверхности (**новые звёзды**) или в глубоких недрах (**сверхновые звёзды**).
- Вспышки сверхновых отличаются фантастически высокой мощностью. Последний раз вспышка сверхновой звезды наблюдалась в нашей Галактике более 400 лет назад.
- На месте взрыва сверхновой звезды возникает расширяющаяся газовая оболочка — *остаток сверхновой* и образуется большое количество высокоэнергичных частиц, излучающих электромагнитные волны при своём движении в магнитных полях.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Перечислите единицы расстояний, используемые в астрономии.
- 2) На каком расстоянии расположены ближайшие к Солнцу звёзды?
- 3) В чём основные различия между звездой и планетой (кроме того, что планеты светят отражённым светом звёзд)?

- 4) Какими физическими особенностями обладает газ, из которого состоят звёзды, по сравнению с газом земной атмосферы?
- 5) Землю можно рассматривать как шар, нагретый до средней температуры 15°C . На какую область спектра приходится максимум её излучения?
- 6) Почему термоядерные реакции могут происходить только в высокотемпературном газе?
- 7) Почему термоядерная реакция образования углерода из ядер атомов гелия не может идти в недрах Солнца?
- 8) Откуда известна температура поверхности звёзд?
- 9) Сравните между собой по основным характеристикам (размер, плотность, температура, состав) белые карлики и нейтронные звёзды.
- 10) Почему массивные звёзды имеют более короткое время жизни?
- 11) Укажите, какими будут конечные стадии эволюции звёзд, если звезда:
а) в 10 раз массивнее Солнца; б) в 2 раза массивнее Солнца; в) по массе равна Солнцу; г) имеет массу, равную половине массы Солнца; д) в 20 раз «легче» Солнца.

2. Решите задачи.

- 1) Если принять масштаб, при котором в 1 см будет 1 млн км, то каким окажется расстояние до звезды, от которой свет доходит за 100 лет?
- 2*) Две одинаковые звезды обращаются по круговым орбитам вокруг общего центра масс с периодом 100 лет, а расстояние между ними — 100 а. е. Найдите массу звёзд. (Указание: сравните звёздную систему с системой «Солнце — Земля».)
- 3) Какую светимость (в единицах светимости Солнца) будет иметь звезда, имеющая размер, равный размеру Земли, а температуру 30 тыс. К? К какому типу звёзд она будет относиться?
- 4*) Светимость звёзд часто характеризуют *абсолютной звёздной величиной* M . Она равна видимой звёздной величине, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10 пк. Абсолютная звёздная величина Солнца приблизительно равна +5. Чему равно значение M для звёзд со светимостью: а) $100 L_{\odot}$; б) $0,1 L_{\odot}$?
- 5) До какого размера надо сжать звезду типа Солнца (средняя плотность близка к плотности воды), чтобы плотность вещества в ней стала примерно такой же, как в нейтронных звёздах?
- 6) Рассчитайте ускорение свободного падения и вторую космическую скорость для звезды с типичными параметрами белого карлика.

- 7) На расстоянии 0,1 а. е. от нейтронной звезды массой $1,5 M_{\odot}$ по круговой орбите движется планета. Какова продолжительность её года?
- 8*) На каком расстоянии от нас должен произойти взрыв сверхновой звезды, чтобы мы видели его таким же ярким, как Солнце? Считать, что в максимуме блеска светимость сверхновой звезды достигает $10^{10} L_{\odot}$.

7

глава

Галактики

35

Наша Галактика —
Млечный Путь

36

Движение звёзд
и вращение Галактики

37

Межзвёздная среда
и формирование звёзд

38

Многообразие
галактик

Практически все звёзды, которые можно увидеть на небе невооружённым глазом и в телескоп, входят в одну систему — **Галактику**. В современную эпоху в Галактике продолжают формироваться звёзды и планеты. В безбрежном космическом пространстве наблюдается очень большое число других, далёких от нас галактик. Вся наблюдаемая Вселенная — это мир галактик.

Только в XX в. удалось надёжно установить, что звёзды и межзвёздный газ образуют во Вселенной гигантские звёздно-газовые системы, получившие название *галактики*. У нашей галактики, в которой мы находимся вместе с Солнцем и всеми видимыми на небе звёздами, есть два названия: **Галактика** (обязательно с прописной буквы) и **Млечный Путь**.

О существовании нашей звёздной галактики догадывались и раньше. В конце XVIII в. английский астроном **Вильям Гершель** на основании своих наблюдений в построенные им самые большие в мире по тому времени телескопы (диаметр зеркального объектива крупнейшего из них был 126 см) пришёл к выводу, что все видимые глазом и в телескоп звёзды образуют сплюснутую систему в форме диска.

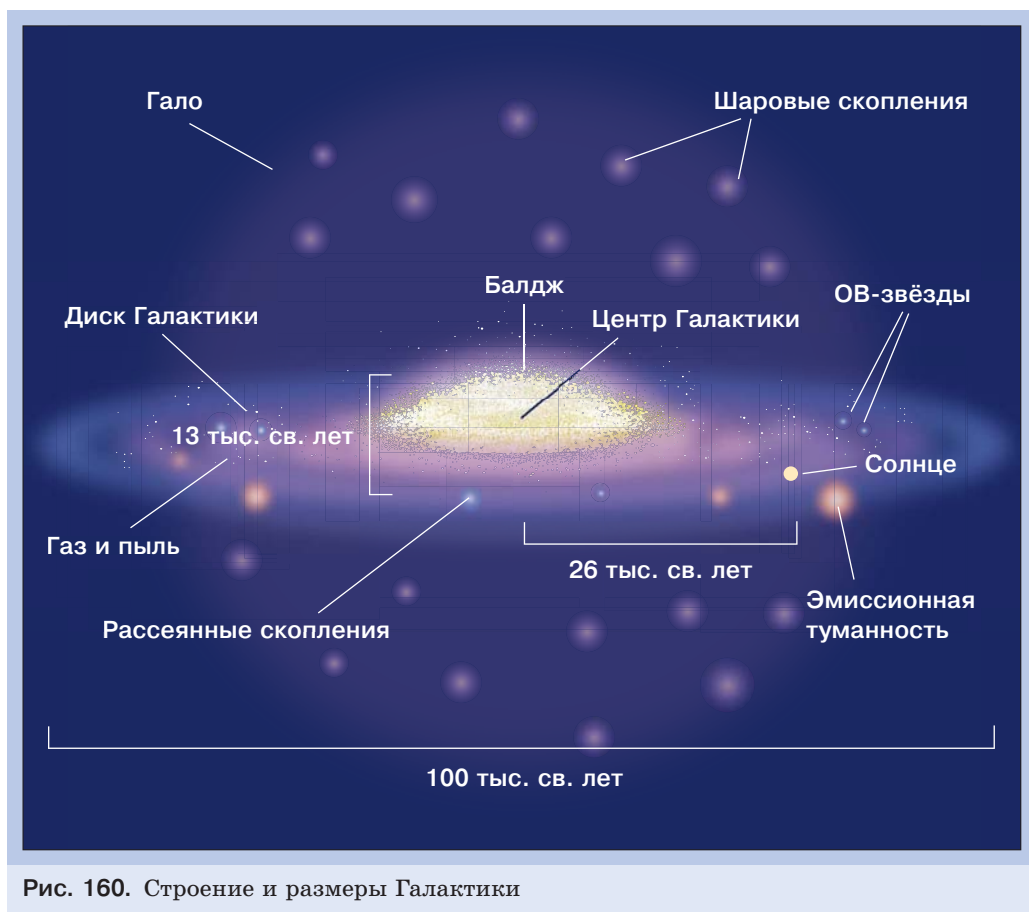
Это оказалось действительно так, хотя размер звёздной системы Гершель не смог правильно оценить. Позднее удалось показать, что толщина звёздного диска составляет несколько тысяч световых лет, а диаметр превышает толщину почти в 30 раз. **Диск** — это главный компонент нашей звёздной системы — Галактики. Размеры Галактики громадны, но всё же конечны, и за её пределами звёзды встречаются редко, они почти все собраны в отдельные галактики. Однако об этом узнали много позже.

Солнце относится к звёздам галактического диска. Вместе с планетами оно находится вблизи его плоскости. Мы наблюдаем Галактику «изнутри», и звёздный диск виден нам как светлая полоса Млечного Пути, опоясывающая всё небо, которую образует совокупное свечение милли-

ардов тусклых и далёких звёзд. Полоса Млечного Пути имеет очень неровные очертания, даже раздваивается на одном участке неба, в созвездии *Лебедь*. Это связано с тем, что к плоскости звёздного диска концентрируется **межзвёздная среда**, состоящая из газа и смешанной с ним пыли. Именно эта пыль, поглощая свет звёзд, делает отдельные участки Млечного Пути практически непрозрачными и поэтому тёмными.

Наиболее плотная центральная часть Галактики наблюдается в созвездии *Стрелец* на расстоянии около 26 тыс. св. лет (разные методы определения расстояний дают немного различные оценки), или примерно $2,5 \cdot 10^{20}$ м от нас. Сквозь газово-пылевые облака в инфракрасных лучах просвечивает изображение *центрального звёздного скопления* Галактики массой более 10 млн масс Солнца ($10^7 M_{\odot}$). А в самом центре нашей и многих других галактик обнаружены компактные и очень массивные объекты, не излучающие видимого света, но притягивающие к себе звёзды и газ в своей окрестности. Их массы, определённые по гравитационному влиянию на звёзды и газ, составляют от десятков тысяч до нескольких миллиардов масс Солнца. Несмотря на это, они невидимы. Это так называемые **сверхмассивные чёрные дыры**. В нашей Галактике масса такой чёрной дыры оценивается в 4 млн $M_{\odot}$.

Структура Галактики типична для многих наблюдаемых галактик (рис. 160). Основная масса звёзд сосредоточена в звёздном диске гигантского размера. Внутри диска наиболее яркие и горячие звёзды и облака газа образуют несколько спиральных ветвей. Помимо звёздного диска, в Галактике выделяют **сферическую звёздную составляющую** (иногда говорят — сфероидальную составляющую, что лучше описывает немного сплюснутую форму этой подсистемы). Она состоит преимущественно из очень старых звёзд, которые концентрируются не к диску, а к центру Галактики. Внутренняя, наиболее плотная область сферической составляющей носит название **балдж** (от англ. *bulge* — вздутие, утолщение), поскольку, если смотреть на диск «с ребра», она выглядит как вздувшаяся центральная часть. И диск, и сферическая подсистема Галактики содержат очень много звёзд. Но диск включает как старые, так и молодые звёзды, в то время как в сферической подсистеме все звёзды, как правило, имеют чрезвычайно большой возраст (10—13 млрд лет), и во многих из них содержание тяжёлых элементов в десятки раз ниже, чем в звёздах диска, в состав которых вошли тяжёлые элементы, выброшенные сверхновыми. Среди ярких звёзд неба лишь немногие уходят в своём движении далеко от плоскости диска (например, *Арктур* в созвездии *Волонас*). Но в основном звёзды сферической составляющей — это тусклые далёкие объекты.



К сферической составляющей относятся также самые массивные образования внутри нашей Галактики — **шаровые звёздные скопления**, состоящие из сотен тысяч звёзд (рис. 161). Их в нашей Галактике известно около двухсот. Это старые звёздные системы возрастом около 10 млрд лет, наиболее яркие звёзды которых — красные гиганты. Звёзды сферической составляющей сформировались очень давно, и в них значительно меньше элементов тяжелее гелия, чем в Солнце или в других звёздах диска.

Помимо звёзд, в Галактике содержится много тел небольшой массы (например, планет) и очень неоднородная по плотности межзвёздная среда (газ, пыль, космические лучи). Несмотря на большую массу, Галактика — очень разреженная система: расстояния между соседними звёзда-

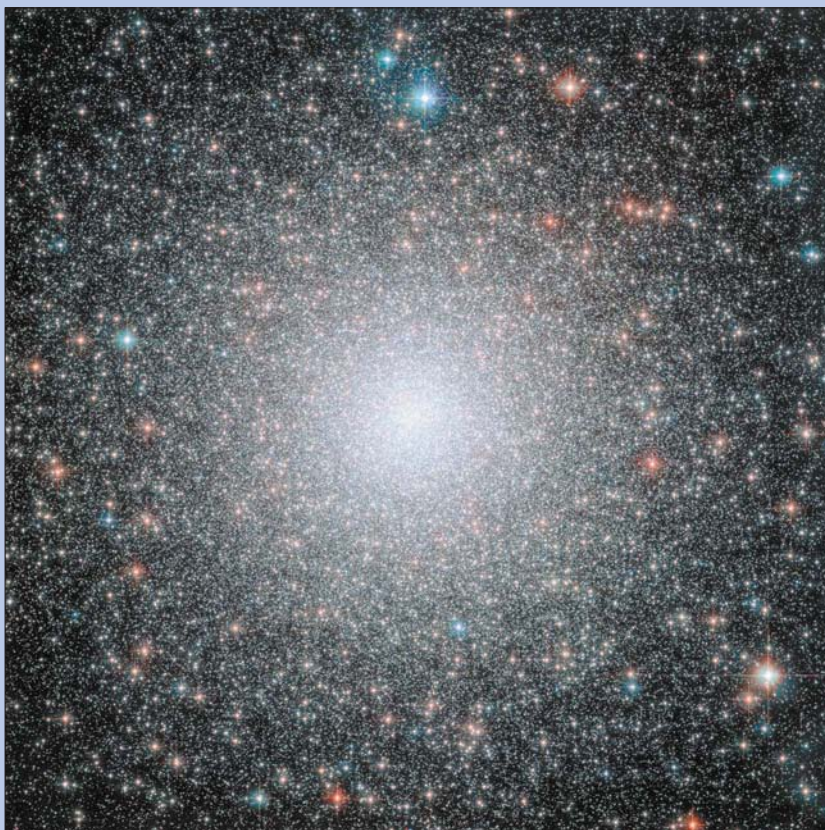


Рис. 161. Шаровое звёздное скопление NGC 6388

ми, как правило, в миллионы раз больше их размеров. В окрестности Солнца среднее расстояние между звёздами составляет несколько световых лет. Но чем дальше от центра Галактики, тем реже расположены звёзды, и на периферии галактик расстояние между ближайшими звёздами в десятки раз больше. Пространство между звёздами заполнено очень разреженной газовой-пылевой средой.

Кроме диска и сферической составляющей, выделяют ещё третий компонент в структуре Галактики (рис. 162) — **тёмное гало**, в которое погружена вся Галактика. Это самый массивный и самый малоисследованный компонент нашей и других галактик. Тёмное гало имеет массу, превышающую суммарную массу всех остальных компонентов Галактики, хотя его влияние на внутреннюю область нашей звёздной системы,

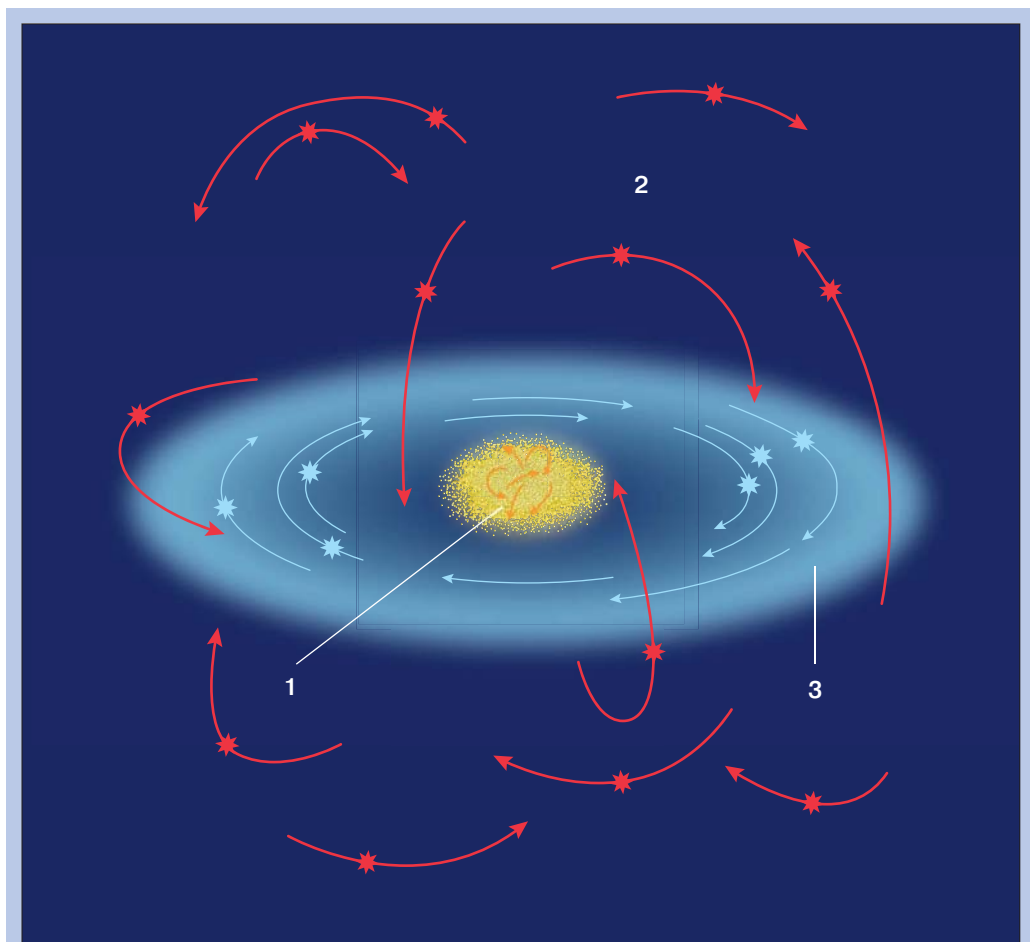


Рис. 162. Движение звёзд в Галактике. Дугами показаны участки орбит звёзд в диске и сферической составляющей: 1 — балдж; 2 — гало; 3 — диск

где находится Солнце, почти не ощутимо. Оно проявляется лишь по гравитационному воздействию на звёзды и газ на больших расстояниях от центра Галактики, но состав и природа тёмного гало остаются неизвестными.

■ Таким образом, **Галактика** — это огромная система, включающая звёзды, газ и тёмную материю гало, со своей внутренней структурой, объединяющая сотни миллиардов звёзд различной массы и возраста.

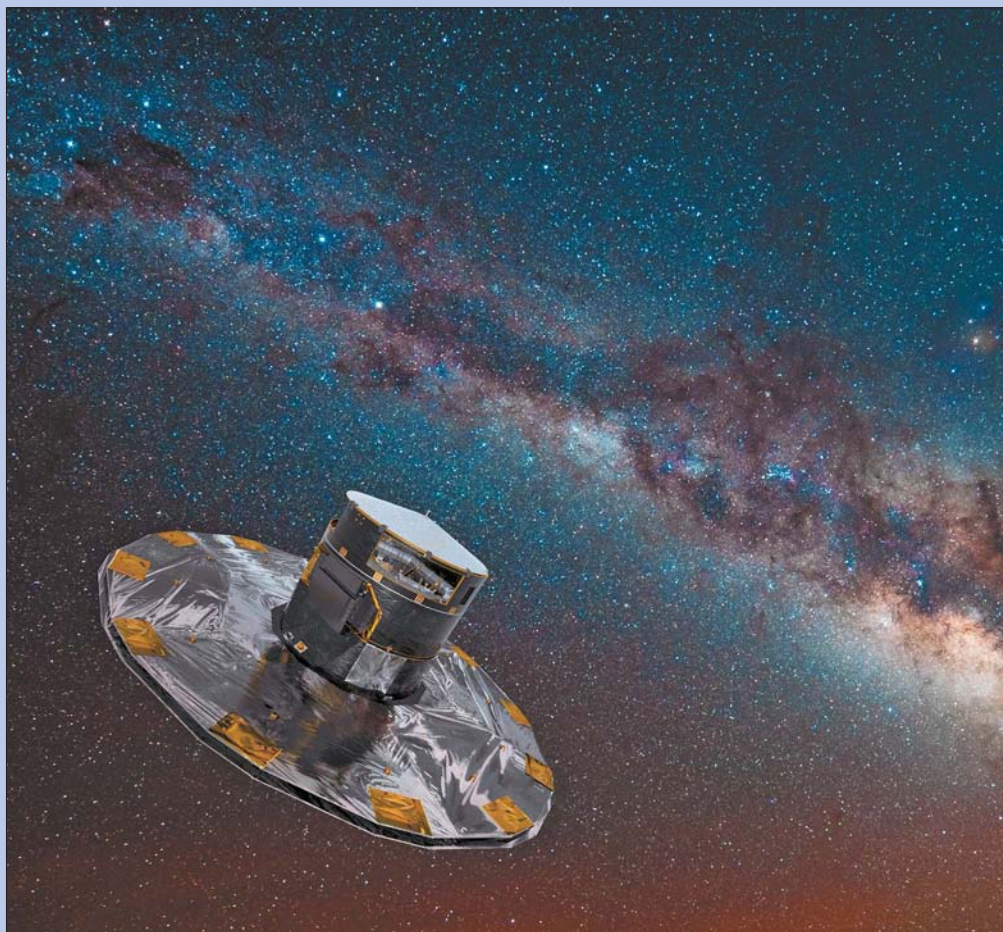


Рис. 163. Космическая астрометрическая обсерватория «Гайя», запущенная Европейским космическим агентством в 2013 г.

Даже с помощью современных телескопов можно непосредственно наблюдать лишь незначительную долю всех звёзд Галактики. Так, современная Европейская космическая астрометрическая обсерватория «Гайя» (рис. 163), главная задача которой — составить подробную *карту распределения звёзд* Галактики, может измерять яркость, точные координаты, параллактические смещения и скорости движения не более чем для 2 млрд звёзд — это меньше 1 % всех звёзд Галактики.

В нашей звёздной системе (как и в других галактиках) все тела находятся в движении. Если бы звёзды вдруг остановились, то они начали бы падать под действием гравитации к центру Галактики и оказались бы там через несколько сотен миллионов лет, разогнавшись при этом до больших скоростей. Здесь уместна аналогия с планетной системой. Планеты притягиваются Солнцем, но не падают на него, поскольку обладают большим орбитальным моментом импульса, что позволяет им обращаться вокруг Солнца, находясь от него примерно на одном и том же расстоянии. Скорости, с которыми движутся звёзды относительно Земли или Солнца, составляют от нескольких десятков до нескольких сотен километров в секунду. Наше Солнце вместе с окружающими его звёздами движется вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с. Скорости звёзд достаточно высоки, чтобы они не падали на центр Галактики, и в то же время не настолько велики, чтобы они навсегда покинули Галактику, улетев в межгалактическое пространство. Поэтому **Галактика — это устойчивая долгоживущая звёздно-газовая система.**

Из-за больших расстояний до звёзд обнаружить их движение в пространстве оказалось непростой задачей. Для измерения скоростей звёзд используются два способа.

Первый способ: наблюдение за видимым медленным перемещением сравнительно близких звёзд по небу относительно очень далёких звёзд, которые из-за большого расстояния можно считать неподвижными. Это угловое перемещение по небу, вызванное движением звезды относительно Солнца, называют **собственным движением**. Но оно отражает не полную скорость движения звезды, а только скорость, с которой она перемещается по небу, то есть проекцию вектора скорости на плоскость, перпендикулярную лучу зрения (рис. 164). Эту составляющую скорости называют **тангенциальной скоростью** (V_t).

Для определения собственного движения какой-нибудь звезды измеряют её положение относительно более тусклых и далёких звёзд, сравнивая изображения одного и того же участка неба, сделанные на одном и том же телескопе с промежутком времени в несколько лет или десятилетий. Скорость такого смещения лишь у нескольких сравнительно близких звёзд превышает 1 угловую секунду в год. При такой скорости звезде понадобится 3600 лет, чтобы сдвинуться на 1° . Однако современная техника позволяет уверенно измерять даже во много раз более медленные собственные движения.

Зная расстояние до звезды, легко по собственному движению выразить её тангенциальную скорость V_t в единицах [м/с] или [км/с]. Пусть, например, звезда, расстояние до которой $r = 1000$ св. лет, или около 10^{19} м, имеет собственное движение $0,1''$ в год, то есть перемещается на угол $\mu = 0,1''$ ежегодно. Тогда путь, который она проходит за год перпендикулярно лучу зрения, равен отрезку длиной $r \cdot \sin \mu$. Чтобы узнать синус малых углов, не нужны таблица синусов или калькулятор: синус малого угла равен значению угла, выраженному в угловых секундах, разделённому на 206 265 (это число угловых секунд в одном радиане), или приближённо

$$\sin \mu = \frac{\mu''}{2 \cdot 10^5}.$$

Тогда получаем, что за год звезда сдвинулась на

$$10^{19} \text{ м} \cdot \frac{0,1''}{2 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}.$$

Учитывая, что в году примерно $3 \cdot 10^7$ с, получаем, что её тангенциальная скорость составляет около $1,7 \cdot 10^5$ м/с, или 170 км/с.

Однако тангенциальная скорость — это не полная скорость звезды, а только компонент скорости, перпендикулярный лучу зрения, ведь звезда может ещё приближаться к нам или удаляться от нас, то есть иметь скорость V_r , направленную вдоль луча зрения и поэтому не меняющую направление на звезду. Её называют **лучевой скоростью** (индекс r от английского *radial*). Эта скорость не приводит к видимому перемещению звезды, но её можно измерить по спектру звезды, используя эффект Доплера (см. пункт 27 гл. 5): $V_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$. Это второй способ измерения скорости звёзд.

Поскольку V_t и V_r перпендикулярны друг другу, полный вектор скорости звезды находим по теореме Пифагора: $V^2 = V_t^2 + V_r^2$.

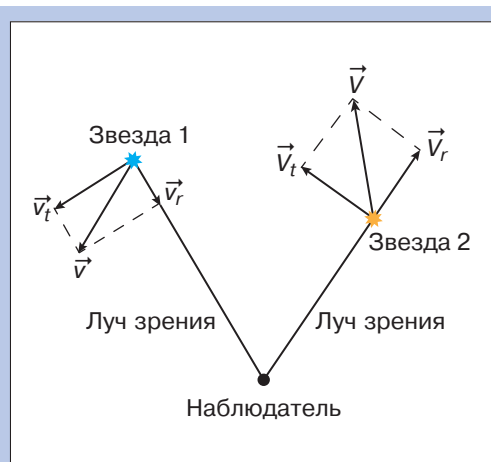


Рис. 164. Пространственная скорость звезды и её компоненты — тангенциальный (V_t) и лучевой (V_r)

Лучевые скорости и собственные движения некоторых ярких звёзд приведены в приложении (табл. 6).

Вокруг центра Галактики движутся не только звёзды, но и облака межзвёздного газа. Для них возможно определение лишь лучевых скоростей. Но этого достаточно, чтобы убедиться, что в галактическом диске они движутся примерно так же, как и звёзды, то есть обращаются по орбитам примерно с теми же скоростями. В окрестности Солнца орбитальные скорости звёзд и газа составляют около 240 км/с. Орбиты, по которым происходит движение звёзд и газа в диске Галактики, в первом приближении можно считать круговыми, хотя в действительности они представляют собой незамкнутые более сложные кривые.

■ Разделив длину окружности, имеющей радиус, равный расстоянию до центра Галактики, на скорость движения по окружности, легко найти, что **полный период обращения Солнца в Галактике составляет примерно 200 млн лет.**

Зная скорость движения V и радиус круговой орбиты R , можно вычислить массу внутренней части Галактики, которая притягивает наше Солнце к центру, используя формулу для *круговой скорости* (см. гл. 3):

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

Радиус орбиты Солнца примерно равен 26 тыс. св. лет, или $2,5 \cdot 10^{20}$ м. Подставляя в формулу известные нам числовые значения: $V = 2,4 \cdot 10^5$ м/с, $R = 2,5 \cdot 10^{20}$ м и $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н · м²/кг², получаем, что $M = 2,1 \cdot 10^{41}$ кг. Если учесть, что масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, то, разделив M на $M_{\odot}$, мы приходим к выводу, что масса Галактики внутри орбиты Солнца составляет около 100 млрд $M_{\odot}$. Это означает, что если бы все звёзды были такими же, как Солнце, то их полное число внутри орбиты Солнца составило бы около 100 млрд. С учётом того, что много звёзд находится дальше от центра Галактики, чем Солнце, полная масса звёзд в Галактике ещё в несколько раз больше.

Звёзды и скопления звёзд, относящиеся к *сферической составляющей*, в отличие от звёзд диска, движутся по орбитам, похожим на эллипсы, которые сильно вытянуты и наклонены под всевозможными углами к плоскости диска (рис. 165). В окрестности Солнца они могут иметь скорости до нескольких сотен километров в секунду.

Движение звёзд в Галактике аналогично движению тел Солнечной системы вокруг Солнца. Действительно, звёзды диска, как планеты, движутся вокруг центра в одну сторону, а их орбиты лежат примерно в од-

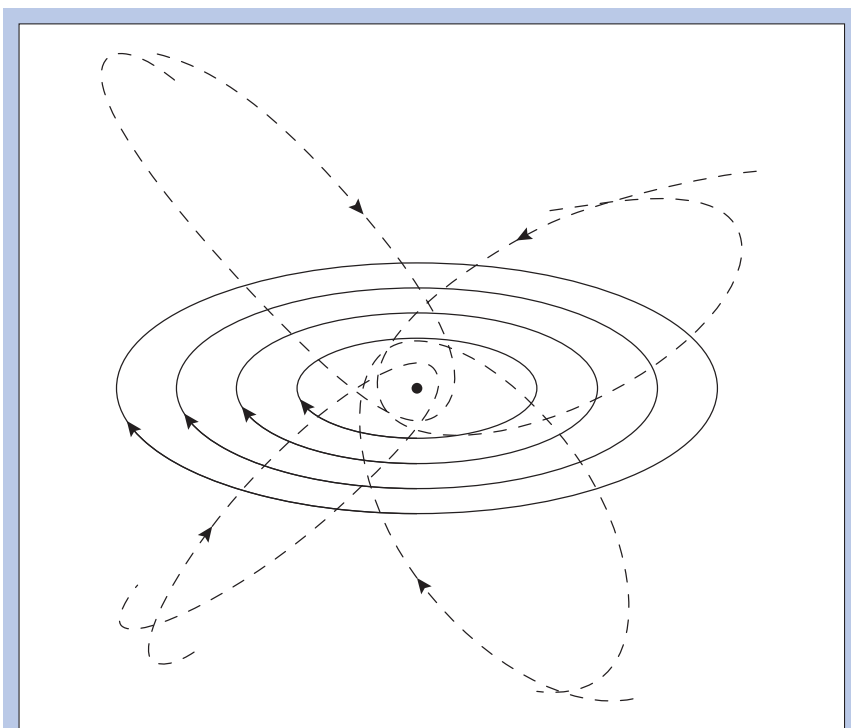


Рис. 165. Траектории звёзд диска (сплошные линии) и сферической составляющей (пунктирные линии)

ной плоскости. В отличие от них звёзды сферической составляющей, как кометы в Солнечной системе, движутся по вытянутым орбитам в различных плоскостях.

37

Межзвёздная среда и формирование звёзд

Межзвёздный газ

Межзвёздный газ заполняет всё пространство между звёздами. Основная часть газа сосредоточена в диске Галактики, где газ концентрируется к плоскости диска, образуя слой толщиной около 1000 св. лет и протяжённостью примерно в 100 раз большей.

Полная масса газа в нашей и подобных ей галактиках составляет 10—30 % от массы звёздного диска. Но этот газ очень разрежен: в среднем вблизи плоскости Галактики один атом газа приходится примерно на 1 см^3 . Для сравнения: у поверхности Земли в 1 см^3 содержится примерно $3 \cdot 10^{19}$ молекул воздуха, и никакой насос не в состоянии откачать воздух до такой низкой плотности, какую имеет межзвёздный газ. По *химическому составу* межзвёздный газ не отличается от звёзд: водород и гелий стоят на первом месте, но присутствуют и более тяжёлые элементы. По температуре газовая среда очень неоднородна: в различных областях значения температуры сильно различаются — от 5 К в наиболее плотных облаках до 10^6 К в областях с особенно низкой плотностью.

В оптическом диапазоне спектра межзвёздный газ наблюдается как светлые газовые **туманности**, в том числе как *планетарные туманности*, о которых шла речь в пункте 27 главы 5. Свечение газа имеет *линейчатый спектр*, и оно возбуждается ультрафиолетовым светом горячих звёзд. Такие туманности называются **эмиссионными**. Самая известная эмиссионная туманность — это *Туманность Ориона* (рис. 166, 167).

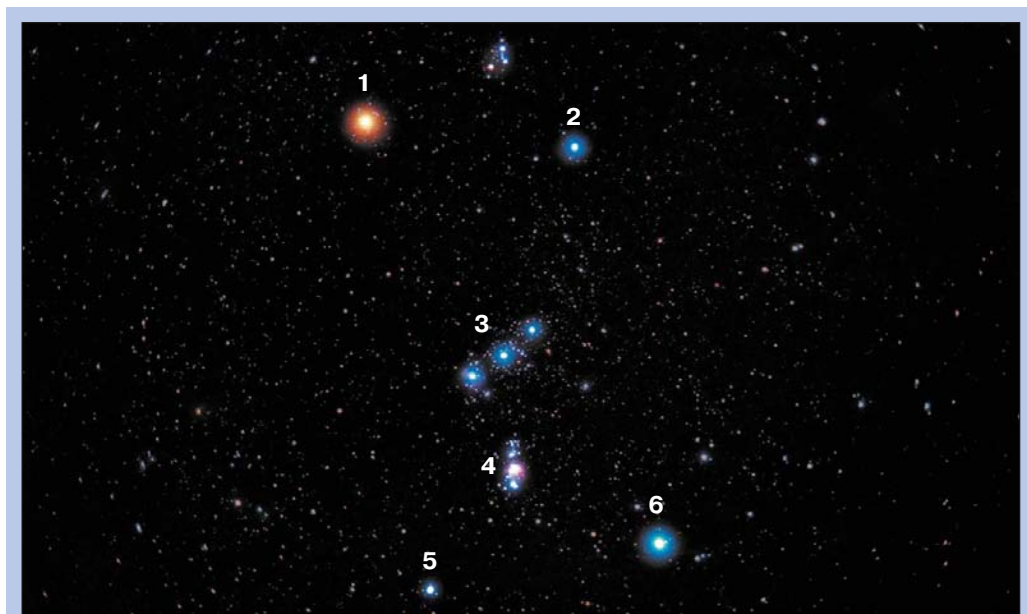


Рис. 166. Положение Туманности Ориона в созвездии Орион: 1 — Бетельгейзе; 2 — Беллатрикс; 3 — Пояс Ориона; 4 — Туманность Ориона; 5 — Саиф; 6 — Ригель



Рис. 167. Фотография Туманности Ориона. Контраст цветов искусственно увеличен. Красный свет связан с излучением водорода в линии H_{α}

Её можно увидеть даже в бинокль как маленькое светлое облачко в созвездии Орион.

Полная масса газа в Туманности Ориона составляет около $1000 M_{\odot}$, температура — около 10 тыс. К. Расстояние до Туманности Ориона, определённое по находящимся в ней звёздам, составляет 1350 св. лет, а размер — около 20 св. лет. Нагрев и свечение газа вызваны *ультрафиолетовым излучением* нескольких горячих молодых звёзд. Подобных туманностей известно много.

Однако большая часть межзвёздного газа в оптических лучах остаётся невидимой по двум причинам: либо из-за низкой температуры газа, либо из-за его очень низкой плотности. Последнее относится к газу, находящемуся далеко от плоскости галактического диска, между звёздами сферической подсистемы. Этот газ представляет собой очень разреженную и горячую плазму.

Холодный газ, концентрирующийся к плоскости Млечного Пути, удалось «увидеть» только в радиодиапазоне. Теоретически, на основе квантовой механики, было показано, что основной энергетический уровень самого распространённого в природе элемента — водорода — раздвоен, то есть представляет собой два близких друг к другу подуровня, между которыми возможны переходы. При переходе атома с верхнего подуровня на нижний должна рождаться электромагнитная волна с частотой 1420 МГц, что эквивалентно длине волны около 21 см.

■ Поиски радиоизлучения из межзвёздного пространства на этой частоте привели к успеху: радиоволны, приходящие от полосы Млечного Пути, где концентрируется газ, были зарегистрированы (1953 г., США), и с тех пор **радиометод** стал основным методом *исследования водорода* в нашей и других галактиках.

Но не весь водород можно наблюдать в радиодиапазоне. Атомы водорода теряют возможность излучать на волне 21 см, если они объединены в молекулы H_2 , а это как раз имеет место в наиболее плотных облаках. Поэтому их называют **молекулярными облаками**. Газ в молекулярных облаках имеет температуру 10—30 К, а концентрация частиц газа в тысячи раз выше, чем в среднем в окружающей их среде. Этот газ обнаруживает себя по излучению в *миллиметровом диапазоне* длин волн, где наблюдаются спектральные линии, принадлежащие двухатомным молекулам CO, которые в качестве небольшой примеси обычно сопровождают молекулярный водород. В молекулярных облаках в *инфракрасной области спектра* найдены и более сложные молекулы, в том числе многоатомные *органические молекулы* (полиароматические углеводороды).

Количество молекулярного водорода в Галактике не намного меньше, чем атомарного, это две взаимосвязанные формы существования межзвёздного водорода. Молекулы водорода образуются при охлаждении атомарного газа в тех областях, где газ сжимается и увеличивает свою плотность. *Молекулярный газ* играет важную роль в Галактике, потому что из него образуются звёзды.

Межзвёздная пыль

Пыль всегда существует как примесь к межзвёздному газу. Хотя по массе пыль составляет не более 1 % от массы газа, она играет очень важную роль в эволюции газовой среды, поглощая свет звёзд. С ростом плотности газа содержащаяся в нём пыль делает среду непрозрачной для света. Поэтому, например, молекулярные облака, проецирующиеся на полосу Млечного Пути или на светлые газовые туманности, кажутся тёмными образованиями. Их называют **тёмными туманностями** (рис. 168, 169). Хотя они выделяются на фотографиях именно благодаря наличию пыли, всё же основная масса вещества в них приходится не на пыль, а на молекулярный газ.

Пыль затрудняет наблюдения звёзд вблизи Млечного Пути. Из-за *поглощения пылью* световой поток в среднем ослабевает вдвое на пути протяжённостью в несколько тысяч световых лет. При этом чем короче длина волны света, тем сильнее поглощение. Поэтому в наибольшей степени пылью поглощаются фиолетовые лучи, а в наименьшей — красные и особенно инфракрасные. Наблюдения в инфракрасных лучах позволяют весьма эффективно видеть сквозь пыль.

Изучение оптических свойств пылинок показало, что их размеры составляют от сотых долей микрометра до нескольких микрометров. Пылин-



Рис. 168. Тёмные газопопылевые туманности на фоне Млечного Пути

ки содержат маленькие ядрышки из тугоплавких элементов (*кремний, графит*), покрытые тонким слоем из намерзших на них молекул водорода и более сложных молекул. За рождение пылинок ответственны сравнительно холодные звёзды. Пылинки образуются главным образом в расширяющихся газовых оболочках этих звёзд, где они конденсируются из охлаждающегося при расширении газа, попадая вместе с ним в межзвёздную среду.

Поглощая световую энергию звёзд и кинетическую энергию частиц газа, пылинки нагреваются и сами становятся источниками излучения в длинноволновой инфракрасной области спектра. Даже невысокая температура пыли достаточна для того, чтобы она светила как любое нагретое тело в инфракрасном диапазоне на длинах волн от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Это излучение уверенно принимают космические *инфракрасные обсерватории* (рис. 170).



Рис. 169. Разрушающаяся тёмная туманность (молекулярное облако)

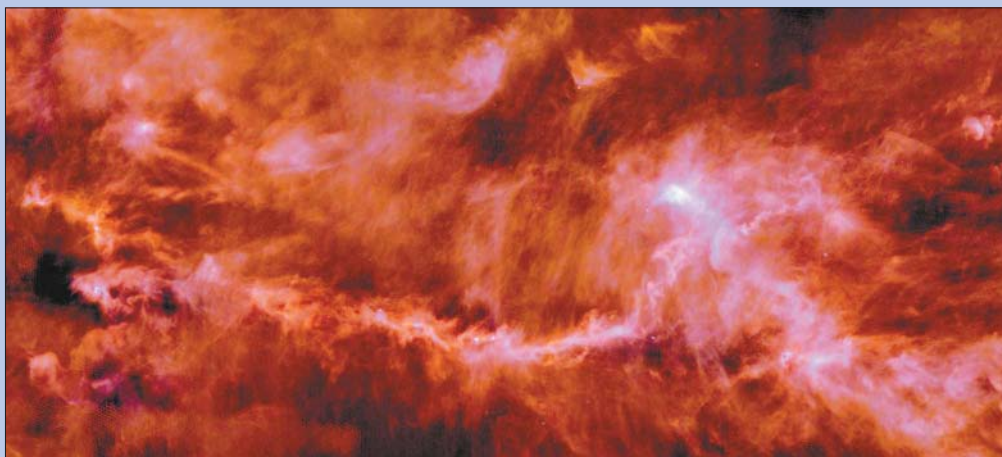


Рис. 170. Молекулярные облака в созвездии Телец. Излучение пыли, нагретой недавно родившимися звёздами, уносит тепловую энергию, охлаждая недра облаков. Фото космической инфракрасной обсерватории «Гершель» (ESA)

Космические лучи и межзвёздное магнитное поле

Космическое пространство как в Солнечной системе, так и за её пределами пронизывается жёсткой **радиацией** — потоками элементарных частиц высокой энергии, летящих практически со скоростью света. Эти быстрые частицы называют **космическими лучами**. В основном это высокоэнергичные *протоны*, *ядра атомов гелия (α-частицы)* и *электроны*. Солнечная система «простреливается» космическими лучами, рождающимися при солнечных вспышках, а из межзвёздной среды в неё проникают более энергичные частицы — **галактические космические лучи** с энергией от 10^{10} до 10^{20} эВ. Для сравнения: шарик от настольного тенниса весом 2,5 г, летящий со скоростью 36 м/с, имеет энергию около 10^{19} эВ. В случае космических лучей такая энергия может принадлежать всего лишь одной элементарной частице. На самом большом в мире ускорителе протонов — *Большом адронном коллайдере* — частицы планируют разгонять до энергии 10^{13} эВ, что в миллионы раз меньше, чем наблюдается у наиболее энергичных космических лучей. Столь энергичные космические лучи, по-видимому, приходят к нам от других галактик, поскольку при той энергии, которой они обладают, ничто не может удержать их в одной галактике.

Частицы галактических космических лучей непрерывно бомбардируют нашу планету. До поверхности Земли долетают не сами космические лучи, а те элементарные частицы, которые возникают при их столкновениях с атомами воздуха. Космические лучи «разбивают» ядра атомов, при этом образуется целый «ливень» вторичных частиц с немного меньшей энергией. Они называются **вторичными космическими лучами**. Вот их-то и детектируют (фиксируют) наземные установки.

Частицы космических лучей, казалось бы, должны лететь в пространстве прямолинейно, поскольку гравитация не влияет заметно на движение тел с околосветовой скоростью, но в межзвёздной среде существует *магнитное поле*, которое искривляет траектории движения заряженных частиц.

Измерения показали, что межзвёздное магнитное поле сильнее всего вблизи плоскости Галактики, хотя и там оно примерно в миллион раз слабее, чем у поверхности Земли. Однако магнитное поле занимает большие объёмы пространства, поэтому оно заключает в себе гигантскую энергию, которая не меньше, чем энергия тепловых движений атомов межзвёздного газа, или энергия, заключённая в космических лучах в том же объёме пространства.

Поскольку частицы космических лучей имеют электрический заряд, магнитное поле действует на них с определённой силой (*силой Лоренца*), и, двигаясь по Галактике, они непрерывно меняют направление полёта. Их траектории оказываются «запутанными», поэтому по направлению движения частицы, достигшей Земли, невозможно узнать направление на источник, где эта частица получила свою энергию. Тем не менее мы знаем, что большая часть космических лучей рождается в результате взрывов сверхновых звёзд.

Электроны, входящие в состав космических лучей, в своём движении в магнитных полях излучают электромагнитные волны (главным образом в радиодиапазоне). Мы уже знаем, что этот нетепловой механизм излучения называется **синхротронным**. Остатки вспышек сверхновых звёзд по этой причине являются мощными *источниками синхротронного радиоизлучения*. Более слабое радиоизлучение синхротронной природы, принимаемое радиотелескопами, рождается во всём объёме галактического диска.

Со временем частицы космических лучей теряют энергию при взаимодействии с атомами межзвёздного газа либо (наиболее энергичные) покидают Галактику. Потери космических лучей компенсируются происходящими время от времени взрывами сверхновых звёзд, при которых в межзвёздное пространство выбрасываются новые высокоэнергичные частицы.

Рождение звёзд и планет

Звёзды (вместе с планетами вокруг них) формируются в облаках межзвёздного газа под действием силы *гравитации*, стремящейся сжать газ до плотного состояния. В нашей Галактике и большинстве других галактик звёзды рождались на всём протяжении их истории, но в современную эпоху темп рождения звёзд в Галактике довольно низкий. Оценки числа наблюдаемых молодых звёзд в Галактике приводят к выводу, что каждый миллион лет в ней рождается несколько миллионов звёзд.

Темпы звездообразования формально определяются как значение массы газа, которая в среднем переходит в звёзды ежегодно. Так, темп звездообразования в нашей Галактике около $\frac{3 M_{\odot}}{\text{год}}$, причём он сильно не менялся за последние несколько миллиардов лет. Масса звёздного диска Галактики оценивается примерно в $10^{11} M_{\odot}$, а его возраст — в 10^{10} лет. Значит, в среднем за историю Галактики темп звездообразования составляет около $\frac{10 M_{\odot}}{\text{год}}$. В настоящее время, как мы видим, он в несколько раз ниже. Наиболее активно звёзды формировались миллиарды лет назад, а затем этот процесс замедлился, очевидно, по причине того, что газа в диске стало меньше, поскольку значительная его часть перешла в звёзды.

Проблема формирования звёзд — одна из наиболее актуальных проблем **астрофизики**. Изучение этого сложного процесса базируется прежде всего на астрономических наблюдениях короткоживущих молодых звёзд (особенно горячих массивных звёзд высокой светимости — *голубых сверхгигантов*) и окружающей их *среды*.

Понять, как происходит рождение звёзд, помогли следующие особенности звездообразования, найденные из наблюдений.

1. *Звёзды образуются не в одиночку, а группами*. Эти группы молодых звёзд называются **молодыми звёздными скоплениями** (рис. 171, 172), они обычно содержат тысячи звёзд, или **звёздными ассоциациями**, которые более разрежены, и число звёзд в них на порядок меньше. Со временем звёзды ассоциаций постепенно расходятся и растворяются в общем звёздном поле Галактики, а скопления могут сохраниться как устойчивые звёздные группировки и существовать миллиарды лет.

2. *Звёзды образуются в Галактике далеко не везде, а только там, где концентрируется холодный молекулярный газ*. Это означает, что



Рис. 171. Два молодых звёздных скопления в созвездии Персей. Возраст звёзд около 100 млн лет. Это в 50 раз меньше возраста Солнца

они рождаются в молекулярных облаках. Масса газа, заключённая в этих «родительских» облаках, значительно превосходит массу образующихся в них звёзд, то есть в звёзды переходит лишь небольшая часть газа.

Рождение звёзд и образование группировок молодых звёзд — процесс не мгновенный, он может длиться сотни тысяч и миллионы лет. Образование массивных звёзд всегда сопровождается появлением *облаков горячего газа*, то есть *эмиссионных туманностей*, которые возникают при облучении газа ультрафиолетовым светом родившихся звёзд (рис. 173). В нашей и других галактиках эти туманности указывают нам те места, где происходит *звездообразование*.

Поскольку газ в нашей и других подобных ей галактиках концентрируется к плоскости *звёздного диска*, именно там наблюдаются молодые звёзды и газовые эмиссионные туманности. В диске Галактики области



Рис. 172. Молодое звёздное скопление «Шкатулка драгоценностей» (NGC 4755). Снимок получен на 8,2-м телескопе VLT ESO

рождения звёзд концентрируются к спиральным ветвям, где плотность газа выше.

Процесс рождения звёзд очень сложен и до конца не изучен. Однако основные его этапы хорошо известны, и построены теоретические модели, описывающие механизм формирования звезды. Силой, которая формирует звёзды, является *гравитация холодного газа* (здесь важен именно холодный газ, поскольку горячий газ сжать значительно труднее). Но сжатию газа противостоит его давление, которое надо преодолеть, и *энергия магнитного поля*, которое сопротивляется уменьшению объёма замагниченной газовой среды. Препятствует сжатию также вращение газовых облаков, поскольку при сжатии любого тела его скорость вращения возрастает. Если бы эти три фактора не действовали, весь газ в Галактике уже давно бы уплотнился и разделился на звёзды. А при нынешних темпах звездообразования его запасов хватит ещё на милли-

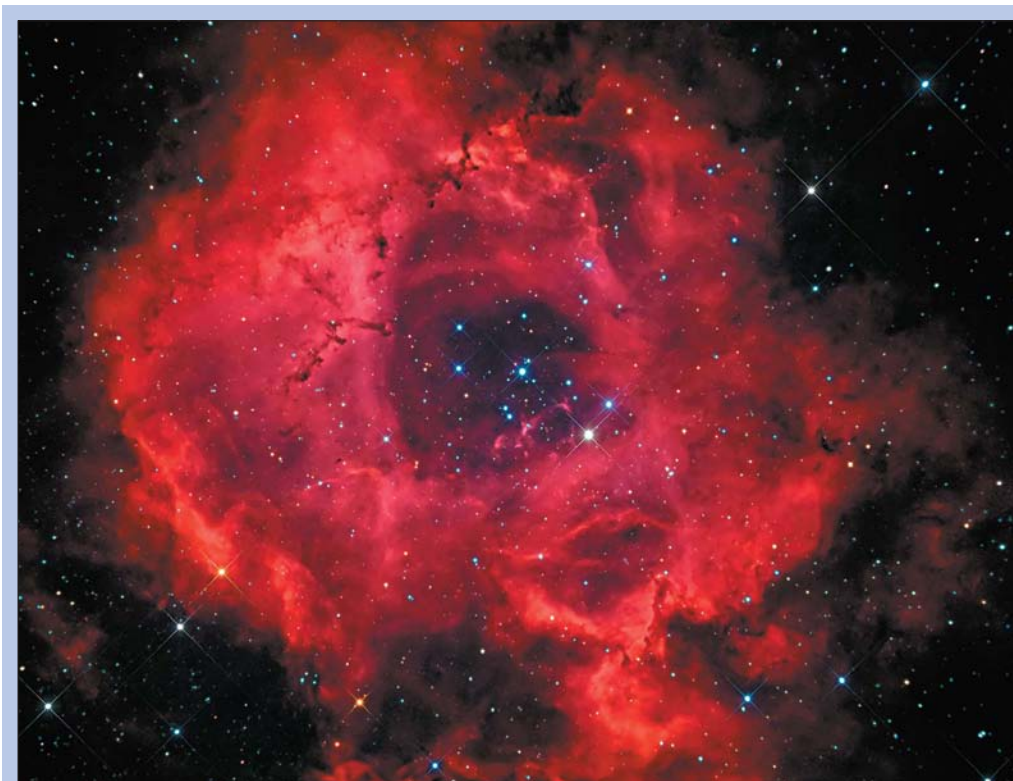


Рис. 173. Эмиссионная туманность Розетка (NGC 2237). Свечение газа вызвано его нагревом горячими звёздами, недавно сформировавшимися в центре облака

арды лет. Но рано или поздно газ иссякнет, и образование звёзд в нашей и других галактиках навсегда прекратится.

Формирование звёзд начинается с образования холодных областей («ядер») внутри молекулярных облаков, в которых постепенно возникают медленно сжимающиеся уплотнения (рис. 174). Большую роль при этом играет пыль, защищающая холодный газ от нагрева излучением близко находящихся звёзд.

Формирование звезды длится сотни тысяч лет. На конечном этапе образуется медленно сжимающийся газовый шар — так называемая **протозвезда**, которая особенно ярко светит в инфракрасном диапазоне за счёт энергии, выделяющейся при сжатии. Когда температура в недрах протозвезды превысит рубеж примерно в 10 млн градусов, начнётся *термоядерная реакция* превращения водорода в гелий, которая вызовет подъ-

ём газового давления и остановит сжатие. Это и будет *началом жизни звезды*.

Ближайшая к нам обширная область, где интенсивно рождаются разнообразные звёзды, находится в созвездии Орион. К ней принадлежит и яркая *Туманность Ориона* (рис. 175), но это лишь небольшая

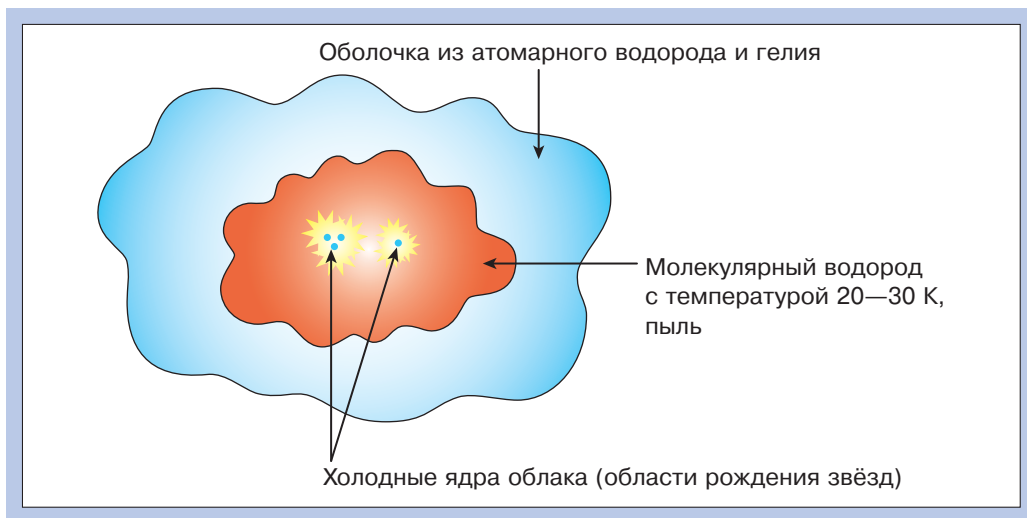


Рис. 174. Схема строения молекулярного облака

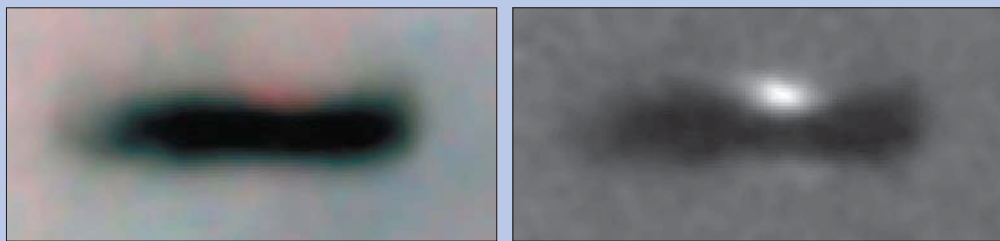


Рис. 175. Формирующиеся звёзды, окружённые непрозрачными газовой-пылевыми (протопланетными) дисками, в области Туманности Ориона

Формирующиеся звёзды, окружённые протопланетными дисками, ориентированными к нам «ребром» и поэтому затмевающих как звезду, так и светлый фон окружающей эмиссионной туманности. Фото телескопа «Хаббл» (NASA).

часть гигантского газово-пылевого комплекса, внутри которого наблюдаются как плотные облака, так и уже родившиеся в них звёзды.

Очень важно, что остатки среды, из которой сформировалась молодая звезда, образуют вокруг неё вращающийся **протопланетный диск** из газа и пыли, в котором постепенно могут сформироваться планеты (рис. 176). В подобном диске, когда-то окружавшем Солнце, возникла и наша *планетная система*.

На рисунке показано изображение протопланетного диска вокруг недавно сформировавшейся звезды, полученное на интерферометре ALMA (ESO и др. обсерватории). Бороздки, видимые на диске, свидетельствуют о том, что в диске происходит формирование планет, «сгребаящих» вещество вдоль своих орбит.

Хотя в общих чертах известно, какие процессы могут происходить в протопланетных дисках, завершённой и общепринятой теории формирования планет пока не создано. Открытие планетных систем у других звёзд, сильно различающихся по структуре, показало, что у различных звёзд формирование планет и последующая эволюция их орбит происходили по-разному. Солнечная планетная система, хотя и не является уникальным образованием, всё же, вероятно, не типична для других звёзд.

Общими положениями любого рассматриваемого сценария формирования планет является наличие *газово-пылевого протопланетного диска* вокруг звезды, в котором вскоре после формирования самой звезды образовалось гигантское количество небольших тел, называемых **планетезималиями**. Считается, что в современную эпоху остатками таких тел в Солнечной системе являются, например, *ядра комет* или *астероиды пояса Койпера*. Механизм формирования таких тел до конца неясен, рассматриваются различные варианты образования, например через постепенное слипание пылинок во всё более крупные конгломераты либо через развитие уплотнений вещества вследствие гравитационной неустойчивости протопланетного диска, если его начальная плотность была достаточно высокой.

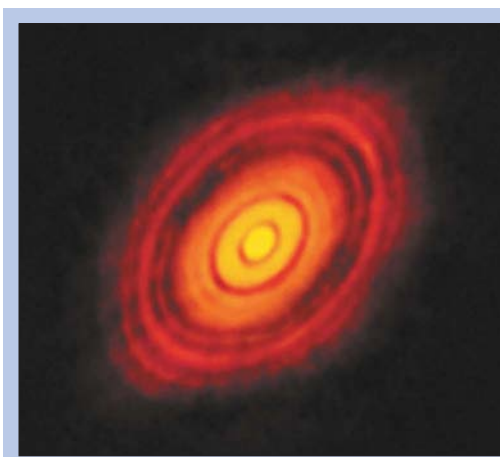


Рис. 176. Протопланетный диск

Вблизи Солнца молекулы лёгких газов (так называемые *летучие вещества*), входившие в состав пылинок протопланетного диска, быстро испарялись, и планеты в этой области могли формироваться только из тугоплавких материалов. Но, начиная с расстояния в несколько *астрономических единиц* от Солнца, температура среды в протопланетном диске долгое время оставалась низкой, льды не испарялись, и плотность вещества в диске была выше, что создавало условия для роста *газовых планет-гигантов*.

Небольшие тела, возникшие в протопланетном диске, пока их было очень много, непрерывно сталкивались между собой, слипались или разрушали друг друга. Наиболее «удачливые» из них быстро увеличивали свою массу, и чем больше она становилась, тем быстрее шёл процесс дальнейшего роста массы, поскольку тела начинали сильнее притягивать к себе окружающее вещество благодаря собственной *гравитации*. Так появились зародыши планет, которые в своём движении «сгребали» вещество протопланетного диска вдоль орбиты. Со временем не вошедшее в состав планет вещество протопланетного диска улетучилось, а родившиеся в диске планеты остались. Большинство *планетезималей*, возникших в диске, вошло в состав растущих планет либо под действием гравитации больших планет было выброшено за пределы планетной системы. Столкновения молодых планет с оставшимися планетезималами в первый миллиард лет жизни Солнечной системы были очень частыми. Они оставили множество *кратеров*, наблюдаемых сейчас на твёрдых поверхностях планет и малых тел.

Первое время после образования Земли её атмосфера и климат на поверхности были совсем непохожими на современные, напоминая скорее условия на Венере: высокая температура, очень плотная, почти бескислородная атмосфера, состоящая преимущественно из углекислого газа. Только через несколько миллиардов лет атмосфера по составу и плотности стала похожей на современную, и появились высокоразвитые живые организмы.

38

Многообразие галактик

Идея о том, что наша Галактика — не единственная в природе, возникла ещё в XVIII в. Астрономы, исследовавшие небо в телескопы, во всё большем количестве стали открывать небольшие, разбросанные по всему небу туманные пятнышки, названные **туманностями**. Только одно из таких пятен в Северном полушарии различимо на небе невооружённым глазом — это туманность в созвездии *Андромеда*, известное как *Туманность Андромеды*.

Ближайшие галактики

В конце XVIII в. французский астроном **Шарль Мессье** составил список примерно из ста *туманных объектов*. До сих пор близкие галактики северного неба сохранили обозначения, которые начинаются с «М», — это галактики из списка Мессье. Например, Туманность Андромеды известна как *галактика М31*, а её близкий эллиптический спутник — *М32*. Примерно через 100 лет после Мессье по данным наблюдений Вильяма Гершеля был создан каталог, содержащий уже более 5000 туманностей. С увеличением размеров телескопов увеличивалось и количество открытых на небе туманностей.

С появлением спектрального анализа удалось показать, что часть этих туманностей — это светящиеся газовые облака, имеющие линейчатый спектр, а остальные, возможно, представляют звёздные системы. Тем не менее отдельных звёзд в них не было видно, поэтому доказать, что они действительно являются самостоятельными звёздными системами за пределами Галактики, долгое время не удавалось.

В конце XIX в. в *наблюдательную астрономию* пришла **фотография**. Благодаря свойству *фотоэмульсии* накапливать действие света стало возможным увидеть на фотопластинке изображения очень тусклых звёзд, которые невозможно заметить в тот же телескоп при наблюдении глазом. И в 1920-х гг. американский астроном **Эдвин Хаббл** (рис. 177), получивший в своё распоряжение незадолго до этого построенный крупнейший в то время в мире **телескоп-рефлектор** с зеркалом диаметром 2,5 м, смог получить изображения наиболее ярких звёзд, в том числе *цефеид*, в нескольких туманностях, включая *Туманность Андромеды* (рис. 178).

Зависимость периода цефеид от светимости в то время уже была открыта, полученные с помощью цефеид оценки расстояний наглядно показали, что перед нами — не объекты Млечного Пути, а далёкие самостоятельные звёздные системы, названные **галактиками**.

Самыми близкими к нашей Галактике считаются *Большое* и *Малое Магеллановы Облака* (рис. 179). В Южном полушарии они хорошо видны невооружённым глазом. Европейцы

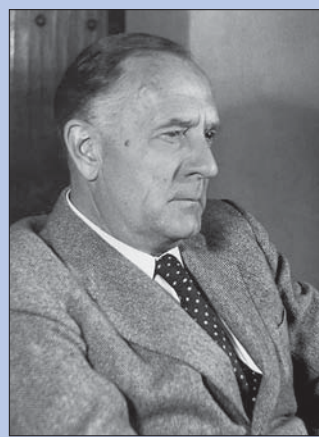


Рис. 177. Эдвин Хаббл (1889—1953)



Рис. 178. Туманность Андромеды

узнали об их существовании от участников первой кругосветной экспедиции Магеллана, поэтому галактики получили такое название.

Межгалактическое пространство прозрачно, поэтому галактики видны с очень больших расстояний. Их невозможно сосчитать, они видны на всех участках неба, и только вблизи полосы Млечного Пути их трудно найти из-за межзвёздного поглощения света. На фотографиях различных областей неба, полученных большими современными телескопами с длинными экспозициями, далёких галактик можно увидеть даже больше, чем отдельных звёзд нашей Галактики.

■ Оказалось, что вся наблюдаемая Вселенная до расстояний в миллиарды световых лет состоит из звёздных островов — галактик.

Галактики редко бывают одиночными. Как правило, они располагаются группами или образуют скопления, насчитывающие много тысяч членов. Наша *Галактика* входит в состав группы примерно из 90 объектов, которая называется **Местной группой**. Большая часть галактик в ней — маленькие (карликовые) звёздные системы, и только две можно отнести к гигантским по размеру и массе: это наша *Галактика* и *Туманность Андромеды*.



Рис. 179. Большое и Малое Магеллановы Облака

Галактики очень разные, и среди массивных наша звёздная система оказалась довольно типичной по своим параметрам. Характерные *размеры* наблюдаемых галактик — десятки тысяч и сотни тысяч световых лет; характерные светимости, примерно соответствующие тому же числу звёзд, — от миллиардов до сотен миллиардов светимостей Солнца. Существует, однако, разновидность галактик, называемых карликами, которые содержат в сотни раз меньше звёзд, чем наша *Галактика* или *Туманность Андромеды*.

Как и в нашей, в других галактиках мы наблюдаем присутствие *звёзд различного возраста*, которые обладают теми же свойствами, что и звёзды в нашей Галактике, и состоят из таких же *химических элементов*. В других галактиках также наблюдаются *горячий ионизованный газ* в эмиссионных облаках и *холодный молекулярный газ*, в облаках которого рождаются звёзды. Хорошо заметна в галактиках и *межзвёздная пыль*, проявляющая себя поглощением света и собственным тепловым инфракрасным излучением. Тем не менее галактики очень не похожи друг на друга, поражая разнообразием своих форм и размеров.

Большую часть наблюдаемых галактик можно разделить на *три типа*:

1) **эллиптические галактики (тип Е, от англ. *elliptical*)**. Это, как правило, чуть сплюснутые звёздные системы с сильной концентрацией звёзд к центру без чёткой внутренней структуры. В них почти никогда не наблюдаются холодный газ и молодые звёзды. Это системы из очень старых звёзд, но размеры и массы у них различны: есть и гигантские, и карликовые Е-галактики (пример карликовых Е-галактик — спутники Туманности Андромеды). Гигантская Е-галактика в скоплении галактик в созвездии *Дева* представлена на рисунке 180;



Рис. 180. Гигантская Е-галактика M87 в скоплении галактик в созвездии Дева. Фото телескопа «Хаббл» (NASA)

2) **спиральные галактики (тип S, от англ. *spiral*)**. К ним относится наша *Галактика*. В спиральных галактиках выделяются два основных элемента структуры: *сферическая составляющая*, образующая звёздный сфероид в центре, похожий на небольшую Е-галактику, и *звёздный диск*, которого в Е-галактиках нет. Как и в случае нашей Галактики, центральная часть сферической составляющей, наблюдаемой у других галактик, называется *балдж*, а далёкие от центра области — *звёздным гало*.

Непременная особенность S-галактик — **спиральные ветви**, протяжённые уплотнения в диске, имеющие вид спиралей или спиралевидных дуг и состоящие из звёзд и межзвёздного газа (рис. 181, 182). *Диск* обычно содержит основную часть звёзд галактики, причём различного возраста — от очень старых до недавно образовавшихся. Ближайшей



Рис. 181. Две галактики, наблюдающиеся рядом: гигантская эллиптическая M60 и спиральная NGC 4647. Фото телескопа «Хаббл» (NASA)

к нам S-галактикой является *Туманность Андромеды*. Если диск галактики ориентирован к нам «ребром», то спирали могут быть не видны, но наличие *звёздного балджа* и *газово-пылевой среды* в плоскости диска говорит нам о том, что данный объект относится к типу спиральных галактик (рис. 183);

3) неправильные галактики (тип Irr, от англ. *irregular* — неправильный, неровный). Это тоже *дисковые системы*, но без спиральных ветвей. Они обычно значительно уступают S-галактикам по размеру и светимости. Сферическая составляющая в них практически отсутствует. Этот тип галактик отличается высоким содержанием холодного газа в диске, из которого формируются звёзды. Поэтому в дисках Irr-галак-



Рис. 182. Спиральная галактика М94 с активно происходящим звездообразованием. Фото телескопа «Хаббл» (NASA)

тик много молодых звёзд. *Магеллановы Облака* — пример *неправильных галактик*.

Хаббл ввёл в созданную им схему классификации галактик ещё один тип — **линзовидные галактики** (обозначаются S0). Он рассматривал их как переходный тип от S к E. Так же как E-галактики, они состоят из старых звёзд и не содержат или содержат очень мало газа. Поэтому их не всегда просто отличить на фотографиях от E-галактик. Но есть одно принципиальное различие между ними: в отличие от E-галактик, они имеют дисковую структуру, такую же, как S-галактики.

По-видимому, в прошлом они были спиральными, но в силу некоторых причин потеряли почти весь холодный газ, оставшийся после формирования диска, а, следовательно, и возможность рождать новые поколения звёзд.



Рис. 183. Спиральная галактика M104, диск которой наблюдается почти «с ребра». Фото телескопа «Хаббл» (NASA)

Основные характеристики галактик

■ Итак, **основные элементы структуры галактик — это сферическая составляющая и диск** (он отсутствует только у Е-галактик).

Но выяснилось, что, по-видимому, у галактик есть ещё один структурный компонент, причём преобладающий по массе над остальными. Это — *тёмное гало* (рис. 184), в которое погружена галактика. Гало не излучает свет, но мы можем судить о его присутствии по тому гравитационному полю, которое оно создаёт. Прямым указанием на существование тёмного гало является быстрое вращение внешних областей галактических дисков: вопреки ожиданиям скорость вращения обычно остаётся высокой и не уменьшается с удалением от центра до очень больших расстояний. В Е-галактиках та же проблема: звёзды вдали от центра движутся быстрее, чем можно было бы ожидать, если бы гравитационное поле галактики создавалось только звёздами.

■ Таким образом, гравитационные силы, создаваемые наблюдаемой в галактиках средой, то есть звёздами и газом, оказываются недостаточными для удержания быстро движущихся звёзд и облаков газа от разлёта, и без дополнительной сдерживающей силы галактики быстро бы рассыпались.

Аналогичный недостаток наблюдаемой массы обнаружился также в группах и скоплениях галактик, где галактики движутся со скоростями в сотни и тысячи километров в секунду. Поэтому был сделан вывод о том, что **галактики должны быть погружены в среду, занимающую объём, в десятки раз больший объёма звёздного тела галактики**, а масса этой среды должна быть существенно больше суммарной массы видимого вещества, то есть звёзд и газа. Эта тёмная масса никак не проявляет себя, кроме как через *гравитацию*. Возможная природа и состав этого *тёмного вещества* (его часто называют также *тёмной материей*) являются предметом активных об-

суждений, ведутся экспериментальные поиски таких элементарных частиц, слабо взаимодействующих с обычным веществом, из которых оно могло бы состоять. Но природа тёмного вещества пока остаётся неизвестной.

Галактики различных типов отличаются друг от друга не только по структуре или по массе, но и по содержанию газа и молодых звёзд.

В *спиральных и неправильных галактиках* содержится относительно много газа, и звёзды продолжают рождаться в газово-пылевом слое в плоскости диска. Наличие горячих молодых звёзд придаёт галактикам более голубой цвет, а большое количество горячих газовых облаков, возникших в областях звездообразования, приводит к тому, что в спектрах галактик присутствуют эмиссионные линии излучения. И голубой цвет, и наличие ярких линий излучения в спектре — это верные признаки активного звездообразования в галактике.

В спиральных галактиках основное количество областей, где рождаются звёзды, сосредоточено в спиральных ветвях. **Ветви** — это круп-

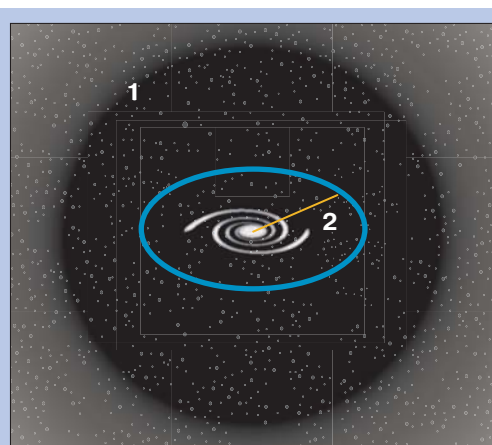


Рис. 184. Схема строения галактики. 1 — массивное гало из тёмного вещества; 2 — оптический диск со спиральной структурой и разреженное звёздное гало (эллипсом показана его условная граница)

номасштабные неоднородности плотности, которые движутся в газово-звёздном диске. В них газ сжимается, уплотняется, и из атомарного газа формируются молекулярные облака, в которых, как и в нашей Галактике, рождаются звёзды. Поэтому спиральные ветви кажутся яркими образованиями на фоне звёздного диска из более старых и тусклых звёзд.

Современный темп звездообразования в галактиках, как правило, не высок и редко превышает $\frac{10 M_{\odot}}{\text{год}}$. Но встречаются галактики, где он в де-

сятки или сотни раз выше. Они называются **галактиками со вспышкой звездообразования**. Как правило, это галактики, содержащие много газа и близко подошедшие друг к другу, или две галактики, сливающиеся в одну систему. Благодаря большому числу молодых горячих звёзд такие галактики особенно ярко излучают в ультрафиолетовом диапазоне спектра.

В *эллиптических галактиках* за редким исключением не наблюдается ни холодного газа, ни молодых звёзд. Эпоха бурного звездообразования для них — в далёком прошлом.

Взаимодействующие галактики

Несколько процентов наблюдаемых галактик относят к **взаимодействующим галактикам**. Обычно это две или более галактики, которые находятся в пространстве рядом друг с другом и при этом в них хорошо заметны искажения формы или следы разрушения, явно связанные с влиянием галактик друг на друга. Взаимодействующие галактики могут выглядеть сильно асимметричными, в некоторых случаях между ними видны *звёздные перемычки* или от них отходят потоки вещества, которые выглядят как длинные хвосты из звёзд и газа. Такие детали называются **приливными структурами**, а искажения формы галактик — **приливными искажениями**, поскольку их появление сходно с появлением приливов на Земле, например в земных океанах. Причина земных приливов — действие на Землю гравитационного поля недалеко расположенной Луны, с разной силой притягивающей разные части земного шара. Приливные искажения галактик также связаны с *гравитационным воздействием* на них, когда разные части галактики получают разные ускорения при действии на них силы притяжения со стороны близкой соседней системы.

В эволюции галактик *взаимодействие* и *приливные явления* играют очень важную роль. Сильно сблизившиеся галактики рано или поздно должны слиться в одну систему. Мы не видим этого процесса в динамике, для нас изображения даже быстро меняющихся галактик — это стоп-кадры (рис. 185, 186). Но известно, что многие галактики, которые



Рис. 185. Пример взаимодействующих галактик, сливающихся в одну систему. Фото телескопа «Хаббл» (NASA)



Рис. 186. Взаимодействующие галактики. Система Arp194. Фото телескопа «Хаббл» (NASA)

сейчас выглядят как одиночные, в прошлом испытали такие слияния. Как показывают модельные расчёты, слияние двух спиральных галактик может привести к образованию одной галактики с большим балджем или даже эллиптической галактики без диска. Гигантские эллиптические галактики, находящиеся, как правило, в центральных областях скоплений галактик, смогли многократно увеличить свою массу за счёт поглощения небольших галактик, пролетавших рядом с ними или сквозь них.

Расчёты показывают, что через 5—6 млрд лет наша Галактика сольётся с *Туманностью Андромеды* в одну систему. Для звёзд и планет этот процесс не катастрофичен: столкновений звёзд он не вызовет, просто из двух галактик образуется одна галактика большего размера, с другой структурой и другим количеством звёзд и газа.

Систематические исследования взаимодействующих галактик впервые начал советский астроном **Борис Александрович Воронцов-Вельяминов**, под руководством которого был создан первый атлас и каталог взаимодействующих галактик и определены параметры многих из них.

Активные ядра галактик

В середине XX в. были обнаружены галактики, в самом центре которых имеется мощный источник энергии, не связанный с излучением звёзд. В этих галактиках наблюдается мощное оптическое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, переменное во времени, исходящее из области исчезающе малого размера. Непрерывный спектр этого излучения не характерен для звёзд, а линии излучения имеют большую ширину, говорящую об истечении газа со скоростями в тысячи километров в секунду. Такие источники энергии незвёздной природы в центре галактик были названы **активными ядрами галактик**.

В общей сложности активными ядрами обладает несколько процентов массивных спиральных и эллиптических галактик. Здесь учёные столкнулись с явлением, которое до сих пор не имеет исчерпывающего объяснения, а полвека назад представлялось вообще загадочным.

Во многих случаях из активных ядер наблюдается направленный плазменный выброс — **джет** (англ. *jet* — струя). Иногда это потоки высокоэнергичных электронов, которые в магнитном поле рожают радиоизлучение и поэтому могут наблюдаться в радиодиапазоне. Галактики, интенсивно излучающие радиоволны, связанные с выбросом частиц из активного ядра, называются **радиогалактиками**. *Галактика M87* (см. рис. 180) — одна из ближайших к нам радиогалактик, хотя расстояние до неё почти 50 млн св. лет. На рис. 187 у радиогалактики видны плазменные джеты длиной в сотни тысяч световых лет.

На оптическое фото, полученное космическим телескопом «Хаббл» (NASA), где сама галактика в центре, наложено радиоизображение этой же области неба, полученное радиоинтерферометром VLA (США) (см. рис. 187).

Мощные *радиоджеты*, образованные потоками высокоэнергичных электронов, иногда выходят далеко за пределы звёздного тела галактики.

Уровень активности галактических ядер и характер их активности в разных галактиках различен. В таких галактиках, как наша или Туманность Андромеды, ядра проявляют низкую активность. Но встречаются и такие, где мощность выделения энергии в ядре превышает мощность излучения всех звёзд галактики, вместе взятых. При этом сама область, занимаемая источником гигантской энергии, по размеру сопоставима с размером Солнечной системы, то есть крошечная, если сравнивать с галактикой или даже отдельным звёздным скоплением.

В некоторых редко встречающихся галактиках светимость ядра настолько велика, что в его свете «тонет» излучение всей галактики, окружающей ядро. С большого расстояния такие объекты видны как одиночные звёздочки. Первые из таких странных «звёздочек» были обнаружены в 1960-х гг. и получили название **квазизвёздные** (то есть похожие на звёзды) **объекты** (КЗО) или **квазары**. Самый близкий квазар имеет обозначение *ЗС 273*. Он наблюдается в созвездии *Дева*. Находясь на расстоянии более 2 млрд св. лет, он выглядит как звёздочка 13^m , которая вполне доступна для наблюдений даже с маленькими телескопами. Светимость этого квазара примерно в 100 раз выше светимости всей нашей Галактики, и при этом она может заметно меняться за несколько недель. Сейчас число известных квазаров составляет сотни тысяч.

Мы уже знаем, что в ядре нашей Галактики находится массивный несветящийся объект массой около 4 млн $M_{\odot}$, по-видимому являющийся сверхмассивной *чёрной дырой*. Его современный уровень активности низкий, хотя в прошлом наверняка были эпизоды высокой активности. Сверхмассивные чёрные дыры были найдены во многих галактиках, и для многих удалось измерить их массу. Например, *квазар ЗС 273* связан с чёрной дырой, масса которой составляет около 1 млрд $M_{\odot}$, а масса чёрной дыры в ядре *радиогалактики М87* — более 6 млрд $M_{\odot}$.



Рис. 187. Радиогалактика Геркулес А (ЗС 348)

Наличие *сверхмассивных чёрных дыр* в центрах галактик вполне может объяснить энергетический выход и наблюдаемые проявления активных ядер галактик, в том числе квазаров, но прямой связи между массой чёрной дыры и активностью ядра нет, поскольку сами чёрные дыры энергии не излучают. При любой массе чёрной дыры активность ядра может быть низкой, но она пробуждается, когда на чёрную дыру падает вещество — облака межзвёздного газа или вещество звезды, которая очень близко подошла к чёрной дыре и была разрушена её приливными силами. Тогда происходит падение части вещества в направлении на чёрную дыру, при котором поток падающего газа разгоняется до *околосветовой скорости*. В окрестности чёрной дыры образуется быстро вращающийся *аккреционный диск*, температура газа в котором достигает сотен миллионов и даже миллиардов кельвинов. Это основной источник энергии активных ядер. Яркое излучение аккреционного диска при такой температуре, несмотря на его малый размер, обеспечивает очень высокую светимость активного ядра в различных спектральных диапазонах. В окрестности чёрной дыры рождаются потоки плазмы и высокоэнергичных частиц, объясняющие наблюдаемые эффекты активных ядер.

Фактически источником энергии *активных ядер галактик* является энергия газа, падающего в гравитационном поле массивной чёрной дыры, которая преобразуется вблизи неё в другие виды энергии.

Основные выводы

- Гигантский звёздный остров — **наша Галактика** — видна нам изнутри как полоска Млечного Пути, так выглядит звёздный диск изнутри. Солнце — одна из звёзд галактического диска.
- Измерения скоростей звёзд показали, что диск Галактики вращается. К плоскости диска концентрируется межзвёздная среда — газ и пыль. В облаках этой среды происходит образование звёзд и планет и когда-то возникла наша Солнечная система.
- Ультрафиолетовое излучение молодых горячих звёзд ионизует межзвёздный газ и заставляет его светиться, образуя эмиссионные газовые облака в областях рождения звёзд.
- Наш **Млечный Путь** — это одна из бесчисленного количества галактик, которые можно наблюдать на различных расстояниях от нас. Их принято разделять на различные типы, но галактики всех типов содержат (в разных пропорциях) звёзды различного возраста, межзвёздную среду (газ и пыль) и тёмное вещество.

- У большинства наблюдаемых галактик заметна спиральная структура. В спиральных ветвях выше плотность газа, там концентрируются области звездообразования.
- У небольшой доли галактик наблюдается мощный источник энергии в центре — активное ядро, светимость которого в некоторых случаях превышает суммарную светимость всех звёзд такой галактики, как наша. Активность ядра связана с падением (аккрецией) газа на сверхмассивные чёрные дыры.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Где надо искать на небе центр Галактики? Виден ли он на той широте, где вы живёте?
- 2) Почему Млечный Путь имеет форму неровной полосы?
- 3) Как измеряют скорости движения звёзд?
- 4) С какой скоростью движется наша Земля относительно центра Галактики? Зависит ли эта скорость от времени года?
- 5) Откуда к нам приходят частицы космических лучей?
- 6) Откуда известно, что звёзды рождаются в современную эпоху?
- 7) Почему планеты, образовавшиеся ближе к Солнцу, имеют твёрдую поверхность, а далёкие планеты — газообразные?
- 8) В каком спектральном диапазоне наблюдают атомарный и молекулярный межзвёздный газ и эмиссионные туманности?
- 9) Где в Галактике происходит образование звёзд?
- 10) Какие галактики можно увидеть на небе в бинокль?
- 11) Почему Магеллановы Облака практически не видны в Северном полушарии?
- 12) Как удалось определить расстояния до галактик?
- 13) Чем различается характер движения звёзд в дисках спиральных галактик и в эллиптических галактиках?
- 14) В чём сходство и различие между спиральными и неправильными галактиками?
- 15) Почему в эллиптических галактиках почти нет молодых звёзд?
- 16) Как выяснилось, что квазары, хотя они выглядят как обычные звёзды, звёздами не являются?

2. Решите задачи.

- 1) Чему равна полная скорость звезды, если она удаляется от нас со скоростью 20 км/с и смещается по небесной сфере на 10^{-2} угловой секунды в год? Годичный параллакс составляет 0,01 угловой секунды.

- 2) Какую скорость относительно Солнца будет иметь звезда, летящая со скоростью 200 км/с по направлению от центра Галактики к Солнцу?
- 3*) На сколько (примерно) звёздных величин межзвёздная пыль ослабляет яркость звезды, находящейся вблизи плоскости Галактики, если яркость в направлении на звезду ослабляется в 2,5 раза на расстоянии 1 кпк, а до звезды расстояние 10 тыс. св. лет?
- 4) Какой диаметр имеет молекулярное облако, если концентрация частиц в нём составляет 10^3 см^{-3} , а масса — $10^4 M_{\odot}$? (Условно считать облако шаром, состоящим из молекул H_2 .)
- 5) Возраст Солнца — около 5 млрд лет. Сколько раз оно успело обойти вокруг центра Галактики?
- 6) Расстояние до ближайшего к нам большого скопления галактик в созвездии Дева составляет 16 Мпк. Выразите его в световых годах.
- 7) Скорость, с которой наша Галактика движется в Местной группе галактик, составляет около 150 км/с. За какое время она проходит путь, равный своему диаметру (около 100 тыс. св. лет)?
- 8*) Светимость квазара составляет 10^{10} светимостей Солнца. Какую видимую звёздную величину имел бы квазар, если бы он находился в ядре ближайшей к нам гигантской галактики Туманность Андромеды? Был бы он виден невооружённым глазом? Считать, что расстояние до Туманности Андромеды равно около 800 тыс. пк, а видимая (с Земли) звёздная величина Солнца равна -27 .

8

глава

Эволюция Вселенной

39

Необратимые изменения
во Вселенной

40

Расширение
Вселенной

41

Модели расширяющейся
Вселенной

42

Фоновое электромагнитное
реликтовое излучение

43

Далёкое прошлое
Вселенной

Далёкие галактики удаляются от нас и друг от друга с большими скоростями. Происходит *расширение Вселенной* — самый грандиозный процесс в природе. Вселенная меняется со временем, в далёком прошлом она была иной, без звёзд и галактик.

В природе нет ничего неизменного, не остаются постоянными во все времена не только земные, но и астрономические объекты. Постепенно за миллиарды лет улетучиваются атмосферы планет, исчерпывается ядерное горючее у звёзд, меняют свою форму галактики. Многие изменения носят *необратимый характер*, если рассматривать их в масштабах всей Вселенной. Например, яркие звёзды в галактиках в конце концов превращаются в белые карлики, нейтронные звёзды или чёрные дыры, а обратно звёздами они не становятся. Уменьшаются запасы газа в галактиках, и звёзды рождаются всё реже. Поэтому рождение новых звёзд не компенсирует их угасание. В межзвёздной среде накапливаются тяжёлые элементы, рождённые в звёздах. Вместе с лёгкими газами они попадают обратно в межзвёздную среду и могут войти в состав звёзд следующих поколений. Следовательно, постепенно изменяется **химический состав звёзд и межзвёздного газа**. Этот процесс также необратим, поскольку тяжёлые элементы не могут превратиться обратно в лёгкие: водород и гелий. Возраст галактик не может измеряться десятками миллиардов лет — в этом случае и спектр их излучения был бы иным, и тяжёлых элементов в звёздах и межзвёздной среде было бы больше, чем есть на самом деле.

Все перечисленные изменения происходят в природе очень медленно, их характерные времена — миллиарды лет, но они говорят нам о том, что миллиарды лет назад окружающая нас Вселенная выглядела по-иному.

Возраст нашей и большинства других галактик определяется по возрасту наиболее старых звёзд и составляет 9—13 млрд лет. Хотя эти оценки возраста не очень точны, заведомо более старых звёздных систем мы

нигде не наблюдаем. Значит, в далёком прошлом была эпоха формирования ныне существующих галактик.

Наблюдения очень далёких и тусклых галактик с помощью современных больших телескопов позволили непосредственно увидеть, какими они были в далёком прошлом, поскольку свет от них шёл к нам миллиарды лет. Наблюдения подтвердили, что раньше действительно было значительно больше галактик с интенсивным *звездообразованием*, с высоким содержанием межзвёздного газа, в котором было мало элементов тяжелее гелия, и с более молодым звёздным составом.

Лучше всего исследован звёздный состав нашей Галактики. В ней наблюдаются звёзды всех возрастов, от очень старых возрастом более 10 млрд лет до недавно образовавшихся. Измерения химического состава звёзд показали, что старые звёзды *сферической составляющей*, по-видимому возникшие в Галактике первыми, отличаются очень низким относительным содержанием элементов тяжелее гелия — в десятки и сотни раз меньше, чем у Солнца. Это объясняется тем, что, когда эти звёзды рождались, в природе было очень мало элементов тяжелее гелия, они не успели ещё образоваться и возникли позднее в недрах массивных звёзд и при взрывах сверхновых. Вещество, сбрасываемое звёздами, смешивалось с межзвёздным газом и входило в состав новых поколений звёзд, содержащих уже больше углерода, кислорода и других более тяжёлых элементов. Звёзды *галактического диска* имеют в большинстве своём примерно «солнечный» химический состав атмосфер.

40

Расширение Вселенной

Изменения, непрерывно происходящие во всей наблюдаемой Вселенной, позволяют считать её нестационарной системой. **Нестационарной** называют такую систему, характеристики которой непрерывно меняются со временем. Но промежутки времени, за которые происходят существенные изменения во Вселенной, оказываются очень большими — миллиарды лет. Наука, занимающаяся изучением строения и эволюции Вселенной, рассматривая её как единое целое, называется **космологией**.

Современная космология развивается на стыке астрономии и теоретической физики. Самые общие, фундаментальные физические представления используются для изучения того, как образовался окружающий

нас мир и как он постепенно эволюционировал до современного наблюдаемого состояния.

В первой половине XX в. был открыт самый масштабный процесс, который существует в природе, — расширение Вселенной.

■ **Расширением Вселенной** называется непрерывное увеличение средних расстояний между далёкими друг от друга объектами — галактиками или их скоплениями, если только эти объекты не связаны друг с другом силами *гравитационного притяжения*, как, например, галактики Местной группы или галактики, относящиеся к какому-либо одному скоплению.

Прямым свидетельством расширения служат наблюдаемые увеличения длин волн линий в *спектрах* далёких галактик на некоторую величину $\Delta\lambda$, разную для разных галактик, по отношению к длине волны λ линий тех же элементов в спектрах лабораторных источников. Смещение линий в сторону более длинных волн называют **красным смещением**. При этом увеличение длины волны $\Delta\lambda$ наблюдается для любого вида излучения — от рентгеновского до радиоизлучения, причём в любом диапазоне спектра относительное увеличение длины волны $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ оказывается всегда одинаковым. Именно так и должно быть, если смещение линий связано с эффектом Доплера при удалении источников. Согласно эффекту Доплера скорость удаления $V = c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)$, где c — скорость света (эта простая формула справедлива только для скоростей V много меньших c).

Отношение $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ рассматривается как количественное значение *красного смещения*. Так, если $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{100}, \frac{1}{10}$ или 1, это означает, что все длины волн источника увеличены соответственно на 1, 10 или 100 % (то есть вдвое).

«Разбегание» галактик было открыто в 1920-х гг., когда американский астроном **Весто Слайфер** по спектральным наблюдениям небольшого числа галактик установил, что большинство из них удаляется от нас, причём более далёкие удаляются быстрее. **Эдвин Хаббл**, первым определив по цефеидам расстояние до небольшого числа галактик, обнаружил линейную зависимость между расстоянием r и *красным смещением* $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ галактик:

$$V = H_0 \cdot r, \text{ или } r = \frac{c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)}{H_0},$$

где H_0 — величина, называемая **постоянной Хаббла**. Если скорость измерять в километрах в секунду, а расстояние в мегапарсеках (1 Мпк $\approx \approx 3$ млн св. лет), то размерность H_0 будет км/(с · Мпк). По современным оценкам, $H_0 \approx 70$ км/(с · Мпк) с точностью до нескольких процентов.

■ Зависимость скорости удаления галактики от расстояния называют **зависимостью Хаббла** (рис. 188), а пропорциональность между V и r — **законом Хаббла**.

Этот эмпирический (то есть установленный опытным путём) закон широко используется в настоящее время для оценки расстояний до галактик по красному смещению линий в их спектрах. Из закона Хаббла

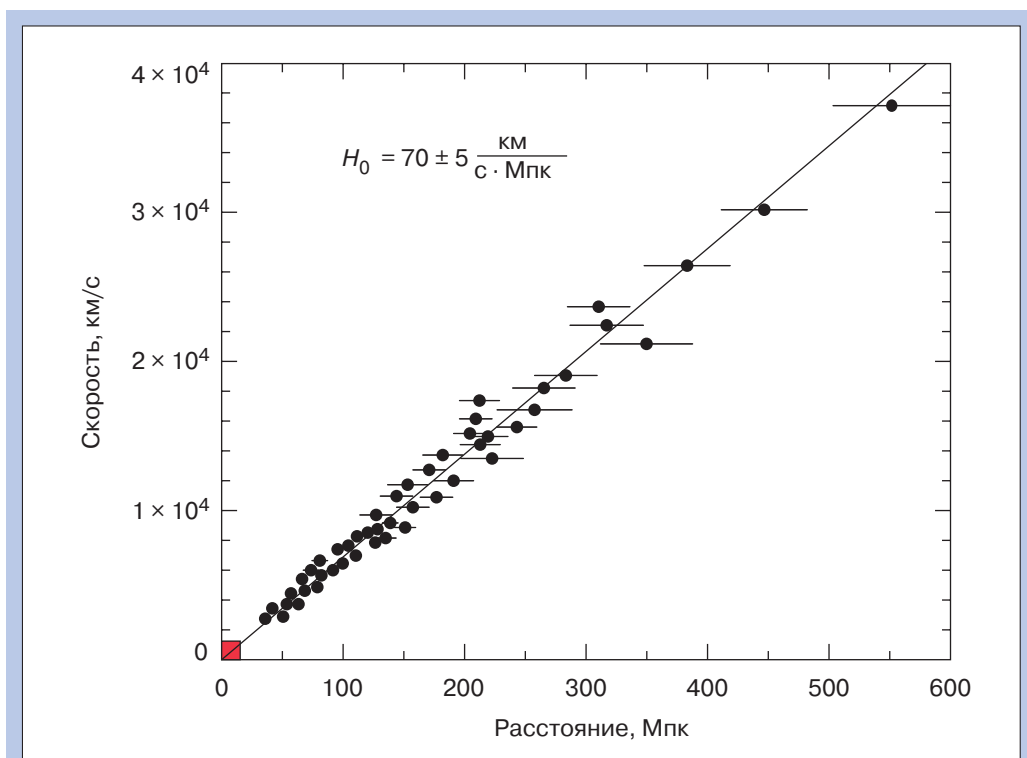


Рис. 188. Диаграмма Хаббла — зависимость скорости удаления галактик от расстояния до них. Маленьким квадратом в нижнем левом углу показана область, использованная самим Э. Хабблом для выведения зависимости, носящей его имя

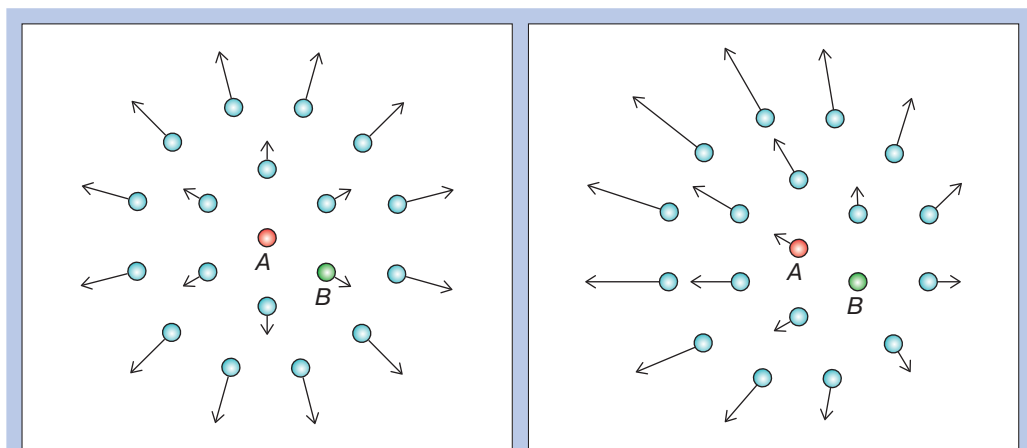


Рис. 189. Скорости галактик для наблюдателей в двух галактиках: *A* и *B*. Картина расширения в обоих случаях одинакова

следует, что **чем дальше галактика, тем она быстрее от нас удаляется**. Для сравнительно близких галактик этот закон выполняется не очень точно, и среди них есть даже галактики, приближающиеся к нам (Туманность Андромеды, например), но на больших расстояниях он всегда выполняется и позволяет надёжно оценивать расстояния до галактик.

Удаление галактик от нас совсем не означает, что мы находимся в каком-то особом положении. Если расстояния увеличиваются между всеми галактиками, и чем они дальше друг от друга, тем с большей скоростью, то все галактики оказываются *равноправными*: наблюдатели в любой галактике будут видеть ту же картину расширения, при которой существует линейная зависимость между скоростью удаления и расстоянием. Поэтому центра расширения у Вселенной нет, она остаётся безграничной на всех этапах расширения, а за центр с равным основанием можно принять любую галактику (рис. 189).

Причина удаления галактик друг от друга заключается в том, что расширялась та среда, из которой они возникли. Считается, что этой средой было *тёмное вещество*, смешанное с обычным веществом, состоящим из самых лёгких газов — водорода и гелия. Сформировавшиеся из этого вещества галактики продолжают удаляться друг от друга по инерции.

Несложно оценить, какое время T назад началось расширение. Для этого расстояние до любой достаточно далёкой галактики надо разделить на её скорость. Поскольку скорость по *закону Хаббла* равна $H_0 \cdot D$, по-

лучаем: $T = \frac{D}{(H_0 \cdot D)} = \frac{1}{H_0}$. Учитывая, что $1 \text{ Мпк} \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ км}$, можно найти $T \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с}$, или немногим более 10 млрд лет. Конечно, это лишь приблизительная оценка: значение H_0 может меняться со временем, чего простая формула не учитывает. Более строгие расчёты приводят к выводу, что *расширение Вселенной* началось 13,5—14,0 млрд лет назад.

41

Модели расширяющейся Вселенной

Любая физическая модель — это упрощённое описание реальности. Новые исследования всегда развивают и дополняют модель, если она в общих чертах правильно описывает поведение системы, либо же отвергают её как вошедшую в противоречие с наблюдениями или экспериментом. Построить модель безграничной Вселенной, пусть упрощённую, которая описывала бы ожидаемое с точки зрения физики поведение вещества, обладающего гравитацией и заполняющего всё пространство, стало возможным только после создания современной теории гравитации (общей теории относительности), основа которой была заложена **Альбертом Эйнштейном**. Первые физически обоснованные космологические модели Вселенной принадлежат российскому (советскому) физику, математику и метеорологу **Александру Александровичу Фридману** (рис. 190).

В моделях Фридмана не рассматривались ни отдельные звёзды, ни галактики, ни какие-либо другие неоднородности, которые в действительности существуют. Поэтому такие модели пригодны для описания поведения материи только на больших масштабах, где нет каких-либо выделенных областей или направлений, и распределение материи в пространстве можно считать более или менее однородным. Эти модели так и называются — **однородные** и **изотропные**. Позднее разрабатывались и более сложные модели, чем модели Фридмана, для описания поведения материи вблизи самого начала расширения.

Самый важный **вывод**, вытекающий из теоретических построений Фридмана, состоит в том, что *из-за существования гравитации,*

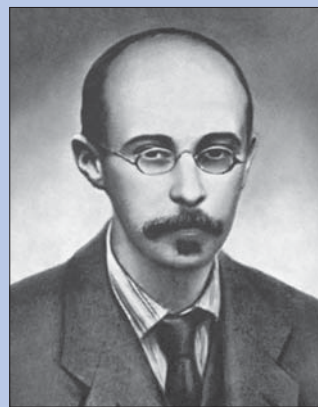


Рис. 190. Александр Александрович Фридман (1888—1925)

присущей любой материи, Вселенная не может находиться в стационарном состоянии. Она должна либо расширяться, либо сжиматься. В то время закон Хаббла ещё не был известен, но его открытие очень хорошо вписалось в представление о расширяющейся Вселенной.

Основными параметрами, определяющими характер эволюции Вселенной, в моделях Фридмана являются *плотность материи и постоянная Хаббла* в любой заданный момент времени. Они определяют и скорости изменения расстояний, и *геометрические свойства пространства* (так называемую кривизну пространства, которая равна нулю для геометрии Евклида). Значения плотности материи и геометрические свойства пространства в реальной Вселенной из теории вывести нельзя, они могут быть оценены только из наблюдений.

По современным оценкам, средняя плотность Вселенной, включая все виды существующей материи, очень низка, всего лишь около 10^{-26} кг/м³. Будь она существенно выше, расширение Вселенной уже миллиарды лет назад сменилось бы сжатием и вместо красного смещения галактик было бы фиолетовое. Кривизна пространства, если его рассматривать в больших масштабах, оказалась нулевой или очень близкой к нулю.

Расширение Вселенной и «разбегание» галактик во многом сходно с разлётом вещества в результате взрыва. Поэтому теорию расширяющейся Вселенной часто называют **теорией Большого взрыва**. Но эта аналогия поверхностная, поскольку на любой стадии расширения у Вселенной не существовало ни границ, за которыми пустота, ни какой-либо особой точки в пространстве, откуда началось расширение.

Любой взрыв подразумевает наличие выделенной точки в пространстве, где он произошёл. Но во Вселенной такой точки не наблюдается, и теоретически она не требуется. Любую галактику с равным правом можно рассматривать в качестве такого центра расширения. К тому же продукты обычного взрыва в пустоте всегда будут распределены неравномерно: то вещество, которое получило более высокую скорость, в любой момент времени будет находиться дальше от центра взрыва, а его средняя плотность по этой причине окажется ниже, чем у вещества с более медленным движением, ближе к центру. В моделях Фридмана для такой картины нет места: в процессе расширения вещество остаётся однородно распределённым. Да и наблюдения свидетельствуют об однородности распределения галактик на больших масштабах: число галактик в единице объёма в различных направлениях от нас на любом расстоянии в среднем более или менее одинаково.

Модели Фридмана позволяют рассчитать, как со временем меняются масштабы расстояний, средняя плотность вещества и излучения (или количество их энергии в единице объёма пространства), а также геометрические свойства пространства. Различные варианты расширения графически представлены на рисунке 191, где показаны возможные зависимости от времени масштабного фактора, пропорционально которому меняются расстояния между галактиками (здесь t_0 — современный возраст Вселенной). Может быть несколько вариантов: расширение, которое со временем сменится сжатием (*кривая 1*), безостановочное расширение с постепенным замедлением (*кривая 2*), расширение с выходом на постоянную скорость (*кривая 3*) и расширение, скорость которого сначала уменьшалась со временем, а ближе к современной эпохе t_0 начала возрастать (*кривая 4*). Эти модели дают различные предсказания для далёкого будущего, но картина того, как происходило расширение в самом начале, для различных моделей почти одинакова.

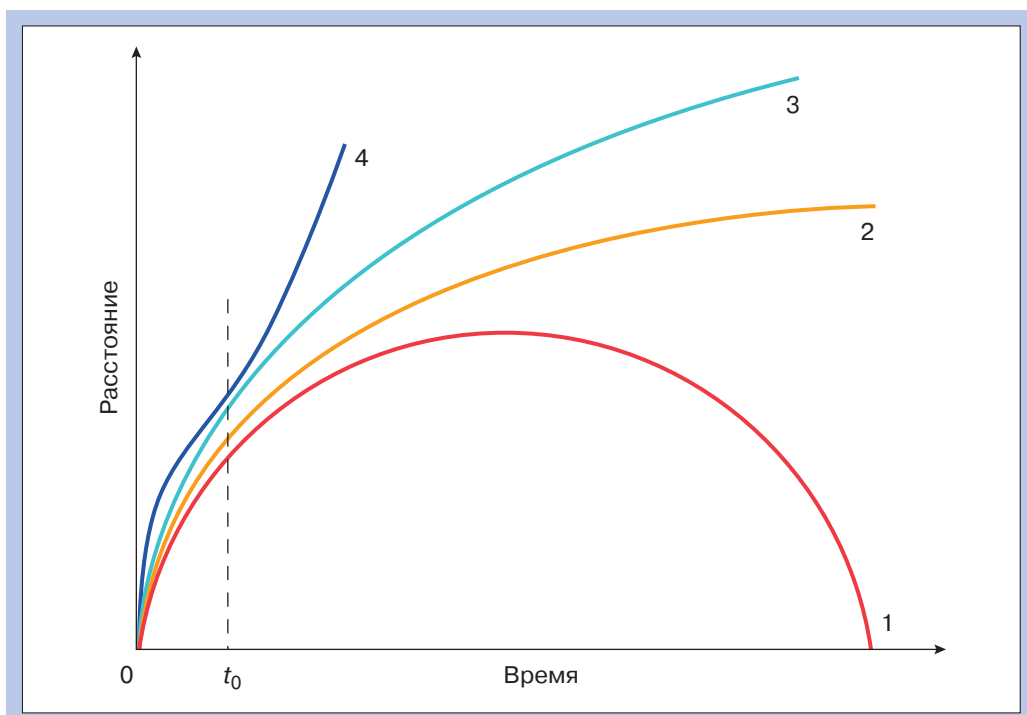


Рис. 191. Характер изменения расстояний между далёкими объектами со временем в различных моделях расширяющейся Вселенной

Современные данные о расширении Вселенной на различных расстояниях от нас всё же заставляют склоняться к варианту убыстряющегося расширения Вселенной (*кривая 4*), которое не остановится никогда. В пользу этого говорят наблюдения очень далёких галактик, предпринятые в последние десятилетия: они показывают, что в современную эпоху расширение Вселенной, по-видимому, действительно ускоряется со временем. Причину этого связывают с вероятным существованием так называемой **тёмной энергии** (формально её присутствие также допустимо в моделях Фридмана). Её иногда интерпретируют как необычную среду очень низкой плотности, которая пронизывает всю Вселенную, но сама не принимает участия в расширении Вселенной. Тёмная энергия проявляет себя в форме *антигравитации*, то есть в стремлении всех тел (например, галактик) оттолкнуться друг от друга. В этом причина постепенного *ускорения расширения*. Однако из-за низкой плотности тёмной энергии её отталкивающее действие ощутимо только на больших масштабах, а внутри галактик и в их ближайших окрестностях она не ощущается. Природа тёмной энергии остаётся пока неясной и является предметом серьёзных научных обсуждений.

Ускорение расширения Вселенной было открыто по измерениям расстояний и красных смещений сверхновых звёзд в галактиках, расположенных дальше миллиарда световых лет от нас. Это открытие, сделанное в самом конце XX в., оказалось неожиданным, хотя оно вполне вписывается в возможные теоретические варианты фридмановских моделей, следующих из общей теории относительности. Физическая интерпретация причин ускорения расширения заключается в теоретически ожидаемых необычных свойствах вакуума, то есть «пустого» пространства: даже в отсутствие обычной материи вакуум может характеризоваться некоторой скрытой в нём энергией крайне низкой плотности. Энергия вакуума получила название тёмная энергия, поскольку не связана с наличием вещества или излучения. Эта тёмная энергия должна действовать в противовес гравитации, стремясь не сближать, а, наоборот, расталкивать все объекты. До Фридмана возможность такой «антигравитации» рассматривал Эйнштейн, хотя впоследствии он отказался от этого варианта. Но плотность тёмной энергии настолько низкая, что в обычной практике её можно считать равной нулю, и только на гигантских масштабах Вселенной она проявляет свою расталкивающую силу и определяет ускоренный характер расширения Вселенной.

Сопоставление разных моделей с наблюдениями привело к выводу, что средняя плотность вещества, которое содержится в галактиках и межгалактическом газе, в действительности может составлять всего несколько процентов средней плотности материи Вселенной. Всё остальное приходится на иные формы материи, никак не проявляющие себя в наблюдениях непосредственно: на *тёмную энергию* и *тёмную материю*. Следует иметь в виду, что представление о тёмной энергии, как и о тёмном веществе, о котором речь шла выше, остаётся пока **гипотезой**, хотя и хорошо теоретически разработанной и согласующейся с наблюдениями. Но всё же существование этих «тёмных сущностей» нуждается в дополнительной проверке и подтверждении.

42

Фоновое электромагнитное реликтовое излучение

■ Важным экспериментальным подтверждением правильности представлений о расширении Вселенной из первоначально плотного и горячего состояния стало открытие так называемого **фонового**, или **реликтового**, **излучения** неба.

В середине XX в. известный физик **Георгий Гамов** (СССР, США) показал, что если представления о начале расширения из очень горячего и плотного состояния правильны, то можно ожидать, что родившееся в горячем газе излучение до сих пор в ослабленном виде приходит к нам с очень больших расстояний и должно восприниматься как фон, слабое свечение неба, как если бы к нам со всех направлений приходило излучение непрозрачной среды, нагретой до нескольких кельвинов. Оно должно нести информацию о состоянии вещества в ту эпоху, когда протоны начали присоединять к себе свободные электроны, превращаясь в нейтральные атомы водорода, которые не препятствуют свободному распространению фотонов. Из-за большого красного смещения, основанная энергия такого фонового излучения неба должна приходиться на миллиметровые и сантиметровые волны.

В то время чувствительность радиоприёмной аппаратуры была недостаточна для проверки этого предсказания. Однако в 1960-е гг. ожидаемое фоновое излучение действительно было обнаружено американскими радиоинженерами, занимавшимися изучением помех при радиосвязи со

спутниками. Авторы открытия — **Арно Пензиас** и **Роберт Вильсон** — впоследствии были удостоены Нобелевской премии. Спектр фонового излучения (рис. 192) совпадает с теоретически рассчитанным спектром теплового излучения, которое соответствует температуре около 2,7 К, поэтому его часто называют *трёхградусным фоном*.

В современную эпоху в природе нет источников необходимой мощности, которые могли бы объяснить наблюдаемый фон. Для нас этот фон является реликтом, оставшимся от далёкого прошлого Вселенной. Поэтому его называют также реликтовым излучением.

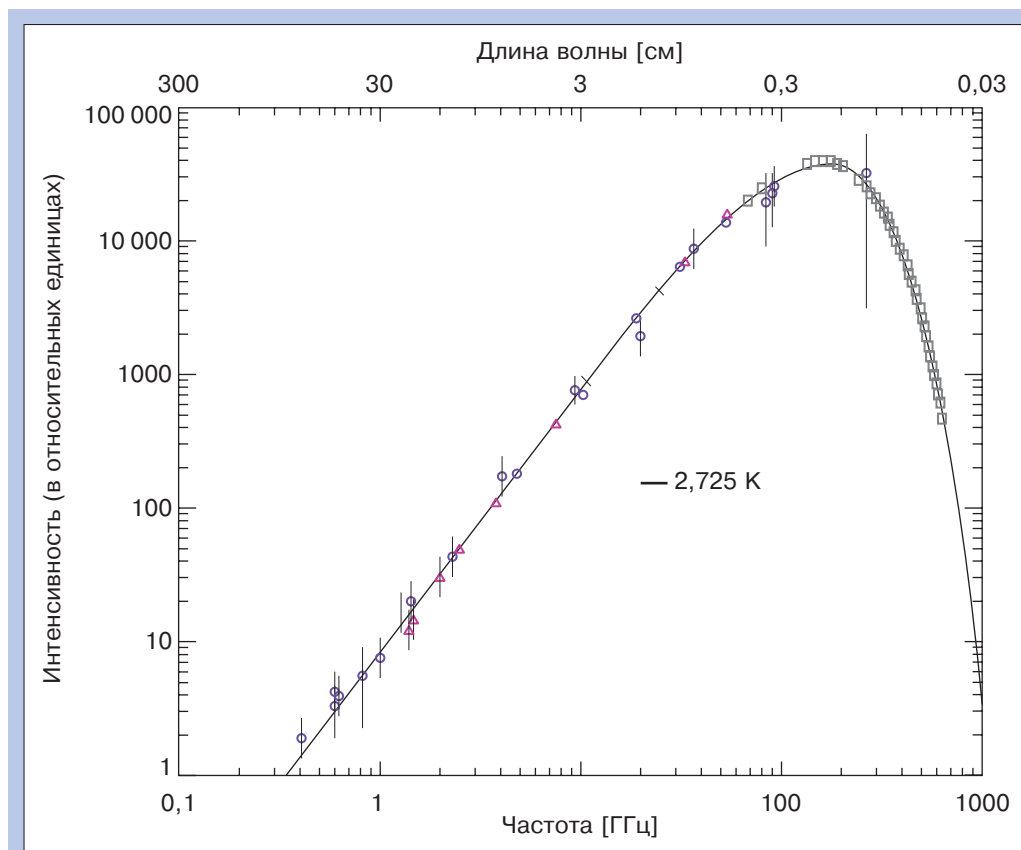


Рис. 192. Спектр фонового реликтового излучения. Различными значками показаны данные измерений (вертикальные отрезки — ошибки измерений). Сплошная линия — теоретическая кривая для спектра теплового излучения с $T = 2,725 \text{ К}$

Согласно теоретическим расчётам принимаемое сейчас реликтовое излучение было испущено примерно 400 тыс. лет спустя *после начала расширения*. В то далёкое время плотность газа, заполнявшего Вселенную, была примерно такой же, как современная плотность межзвёздной среды в диске нашей Галактики. На этой стадии расширения температура среды упала до нескольких тысяч кельвинов. При такой сравнительно низкой температуре протоны стали захватывать электроны, образуя электрически нейтральные атомы. Разреженный атомарный газ почти не взаимодействует с электромагнитным излучением, поэтому заполнявшая Вселенную среда стала прозрачной, и *фотоны* начали свободно распространяться во всех направлениях. Таким образом, реликтовое излучение, которое приходит к нам, путешествовало сквозь прозрачную для него Вселенную более 13 млрд лет.

Хотя Вселенная не имеет границ, область рождения реликтового излучения ограничивает ту часть Вселенной, которая потенциально доступна наблюдениям с использованием электромагнитного излучения (света или радиоволн). Весь мир наблюдаемых галактик лежит в этих пределах: от самых далёких галактик, которые можно видеть, свет шёл к нам около 13 млрд лет. С более далёких расстояний до нас могут прийти только *нейтрино* и *гравитационные волны*.

43

Далёкое прошлое Вселенной

Из-за расширения Вселенной галактики в прошлом были ближе друг к другу, а на ранней стадии расширения плотность вещества была такой, что не могли существовать не только галактики, но и отдельные звёзды. На основании физической теории расширяющейся Вселенной была создана вероятная картина её эволюции, начиная с того состояния, когда всё вещество имело запредельно высокие плотность и температуру. Та среда, которую мы сейчас наблюдаем в виде звёзд и галактик, в начале расширения представляла собой очень горячую *плазму*, состоявшую из непрерывно рождающихся, исчезающих, взаимодействующих друг с другом *элементарных частиц* и пронизывалась по всем направлениям мощным *электромагнитным излучением*. Чем ближе к началу расширения, тем выше была их энергия. Эта первичная очень горячая плазма быстро расширялась и в результате расширения охлаждалась. Как показали расчёты, за первые несколько минут благодаря ядерным реакциям, похожим на

те, что сейчас идут в звёздах, часть протонов объединились с ещё не успевшими распасться к тому моменту свободными нейтронами, образовав *ядра атомов гелия*. При этом плазма стала примерно на четверть (по массе) состоять из гелия и на три четверти из водорода. Более тяжёлые элементы не успели возникнуть в значительном количестве из-за быстрого остывания плазмы. Этот вывод очень хорошо согласуется с измерениями содержания гелия в межзвёздном газе в нашей и других галактиках.

Получается, что два самых лёгких природных газа — водород и гелий — имеют в основном **космологическое происхождение**, то есть образовались уже тогда, когда ещё не существовало звёзд. Именно из этих газов, первоначально смешанных с тёмной материей, присутствующей в расширяющейся Вселенной, через несколько сотен миллионов лет после начала расширения сформировались первые звёзды и галактики как результат гравитационного сжатия возникших газовых уплотнений.

По мере расширения первоначально горячей и постепенно остывающей среды, заполнявшей всё пространство, в ней стали расти изначально ничтожно малые неоднородности плотности вещества. Появились области со сравнительно высокими и низкими плотностями (по отношению к средней плотности), контраст между ними становился всё больше. Под действием *сил тяготения* расширение отдельных уплотнений замедлилось и сменилось сжатием. Постепенно сформировались крупномасштабные уплотнения, содержащие газ и тёмную материю. Не прошло и миллиарда лет после начала расширения, как в наиболее плотных областях образовались «звёздные острова» — *галактики*, а также их системы — *скопления галактик*.

Галактики непрерывно взаимодействовали друг с другом, росли за счёт падающего на них вещества. Небольшие галактики сливались в крупные, которые продолжали расти, поглощая более мелкие. Одновременно образовались обширные области пространства с низкой плотностью вещества, где галактик мало или вообще нет.

Такая картина подтверждается при компьютерном моделировании процессов в расширяющейся Вселенной. Распределение галактик в пространстве получается похожим на трёхмерную сетку с ячейками различных размеров — до нескольких сотен миллионов световых лет в поперечнике. В «узелках» такой сетки находятся массивные *скопления галактик*, а между ними — «пустоты». Подобная крупномасштабная структура хорошо объясняет наблюдаемый характер крупномасштабного распределения галактик в пространстве (рис. 193).

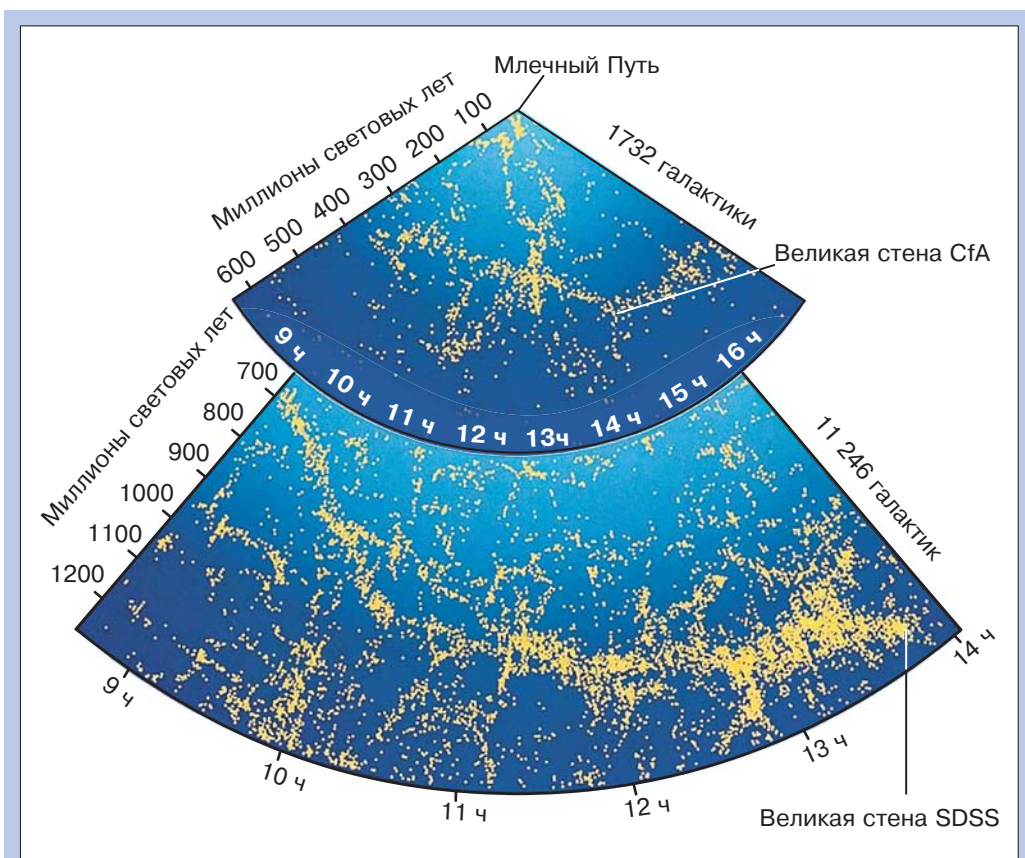


Рис. 193. Крупномасштабное распределение галактик в пространстве в направлении узкого сектора неба по данным обзора SDSS, выполненного в США

На рисунке 193 вдоль дуги сектора указано прямое восхождение. Каждая точка представляет собой отдельную галактику, их полное число на схеме — около 13 тыс. Положение нашей Галактики соответствует геометрическому центру окружности. Расстояние до самых далёких галактик на схеме около 1,25 млрд св. лет. На схеме хорошо видна крупномасштабная структура в распределении галактик. Указаны наиболее протяжённые элементы структуры — «великие стены».

Важнейший вопрос, на который пока нет исчерпывающего ответа, это вопрос о **начале расширения**. Что представляла собой тогда Вселенная и что было до этого? В современной космологии рассматриваются различ-

ные возможности. Простых и наглядных решений проблемы здесь нет. Современные представления о пространстве, времени, материи, как и физические теории, которые прекрасно подходят для объяснения процессов в окружающем нас мире, непригодны для описания материи в состоянии, очень близком к начальному моменту, который часто условно называют *моментом рождения Вселенной* или космологической сингулярностью (от лат. *singularis* — единственный, особенный). Что существовало ещё раньше, была ли это эпоха сжатия Вселенной, которая затем сменилась расширением, или мир просто был с другими свойствами пространства и времени, с другой структурой материи, неизвестной современной науке?

Наша Вселенная обладает такими свойствами, что в ней оказалось возможным существование атомов и молекул, звёзд и планет, в ней хоть изредка должны складываться условия, делающие вероятным существование жизни. Иначе бы мы не существовали. Современная наука рассматривает возможность образования и других «вселенных» с иными свойствами и с иным характером эволюции, которые также начинают своё существование с быстрого расширения.

Чтобы понять состояние материи в мгновения, близкие к началу или предшествовавшие началу наблюдаемого расширения Вселенной, требуется создание более общих физических теорий, объединяющих описание процессов микро- и макромира, то есть мира элементарных частиц и квантовых явлений, с одной стороны, и мира звёзд и галактик — с другой. Это дело будущего.

Основные выводы

- Наблюдения показали, что окружающая нас *Вселенная медленно меняется*.
- Важнейшее проявление этих изменений — **расширение Вселенной**, открытое почти сто лет назад. Условно за «рождение» Вселенной принимается начало расширения, которое удалено от нас в прошлое почти на 14 млрд лет.
- Как подтверждение теории расширяющейся Вселенной рассматривается открытие **фоновое электромагнитное излучение** всего неба — слабого отголоска некогда существовавшей плазмы, заполнявшей всё пространство, когда в природе ещё не существовало ни звёзд, ни галактик.
- Из первоначально почти однородной и очень горячей среды в процессе расширения возникли те уплотнения, из которых сформировались *галактики*.

- Раскрытие механизмов «рождения» наблюдаемой нами Вселенной и её эволюции — дело науки будущего.

Задания и упражнения

1. Ответьте на вопросы.

- 1) Какие необратимые изменения происходят во Вселенной?
- 2) Что называют красным смещением и как оно выражается численно?
- 3) Какую физическую размерность имеет величина, обратная постоянной Хаббла?
- 4) Почему реликтовое излучение не наблюдается оптическими телескопами?
- 5) Как долго шёл к нам свет от самых далёких наблюдаемых галактик?

2. Решите задачи.

- 1) Первые грубые оценки постоянной Хаббла привели к ошибочному значению $H_0 = 530 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$. Как давно должно было начаться расширение Вселенной при таком значении H_0 ?
- 2*) Предполагая, что скорости далёких галактик друг относительно друга мало меняются со временем, найдите, чему будет равно значение постоянной Хаббла H_0 через 2 млрд лет. (Современное значение H_0 принять равным $70 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$.)
- 3*) Во сколько раз (примерно) возросли длины волн реликтового излучения из-за расширения Вселенной, если оно возникло в газе, температура которого была близка к 3000 К ? (Указание: воспользуйтесь законом Вина.)

Таблица 1. Созвездия

Русское название	Латинское название	Краткое обозначение	Площадь на небе, кв. градус	Число звёзд ярче 2,4 ^m	Число звёзд ярче 5,5 ^m
Андромеда	Andromeda	And	722	3	54
Близнецы	Gemini	Gem	514	3	47
Большая Медведица	Ursa Major	UMa	1280	6	71
Большой Пёс	Canis Major	CMa	380	5	56
Весы	Libra	Lib	538	0	35
Водолей	Aquarius	Aqr	980	0	56
Возничий	Auriga	Aur	657	2	47
Волк	Lupus	Lup	334	1	50
Волопас	Bootes	Boo	907	2	53
Волосы Вероники	Coma Berenices	Com	386	0	23
Ворон	Corvus	Crv	184	0	11
Геркулес	Hercules	Her	1225	0	85
Гидра	Hydra	Hyd	1303	1	71
Голубь	Columba	Col	270	0	24
Гончие Псы	Canes Venatici	CVn	465	0	15
Дева	Virgo	Vir	1294	1	58
Дельфин	Delphinus	Del	189	0	11
Дракон	Draco	Dra	1083	1	79
Единорог	Monoceros	Mon	482	0	36
Жертвенник	Ara	Ara	237	0	19

Русское название	Латинское название	Краткое обозна- чение	Площадь на небе, кв. градус	Число звёзд ярче 2,4 ^m	Число звёзд ярче 5,5 ^m
Живописец	Pictor	Pic	247	0	15
Жираф	Camelopardalis	Cam	757	0	45
Журавль	Grus	Gru	366	2	24
Заяц	Lepus	Lep	290	0	28
Змееносец	Ophiuchus	Oph	948	2	55
Змея	Serpens	Ser	637	0	36
Золотая Рыба	Dorado	Dor	179	0	15
Индеец	Indus	Ind	294	0	13
Кассиопея	Cassiopeia	Cas	598	3	51
Кентавр (Центавр)	Centaurus	Cen	1060	6	101
Киль	Carina	Car	494	4	77
Кит	Cetus	Cet	1231	1	58
Козерог	Capricornus	Cap	414	0	31
Компас	Pyxis	Pyx	221	0	12
Корма	Puppis	Pup	673	1	93
Лебедь	Cygnus	Cyg	804	3	79
Лев	Leo	Leo	947	3	52
Летучая Рыба	Volans	Vol	141	0	14
Ли́ра	Lyra	Lyr	286	1	26
Лисичка	Vulpecula	Vul	268	0	29
Малая Медведица	Ursa Minor	UMi	256	2	18
Малый Конь	Equuleus	Equ	72	0	5

Русское название	Латинское название	Краткое обозна- чение	Площадь на небе, кв. градус	Число звёзд ярче 2,4 ^m	Число звёзд ярче 5,5 ^m
Малый Лев	Leo Minor	LMi	232	0	15
Малый Пёс	Canis Minor	CMi	183	1	13
Микроскоп	Microscopium	Mic	210	0	15
Муха	Musca	Mus	138	0	19
Насос	Antlia	Ant	239	0	9
Наугольник	Norma	Nor	165	0	14
Овен	Aries	Ari	441	1	28
Октант	Octans	Oct	291	0	17
Орёл	Aquila	Aql	652	1	47
Орион	Orion	Ori	594	7	77
Павлин	Pavo	Pav	378	1	28
Паруса	Vela	Vel	500	3	76
Пегас	Pegasus	Peg	1121	1	57
Персей	Perseus	Per	615	1	65
Печь	Fornax	For	398	0	12
Райская Птица	Apus	Aps	206	0	10
Рак	Cancer	Cnc	506	0	23
Резец (скульптора)	Caelum	Cae	125	0	4
Рыбы	Pisces	Psc	889	0	50
Рысь	Lynx	Lyn	545	0	31
Северная Корона	Corona Borealis	CrB	179	1	22
Секстант	Sextans	Sex	314	0	5
Сетка	Reticulum	Ret	114	0	11

Русское название	Латинское название	Краткое обозна- чение	Площадь на небе, кв. градус	Число звёзд ярче 2,4 ^m	Число звёзд ярче 5,5 ^m
Скорпион	Scorpius	Sco	497	6	62
Скульптор	Sculptor	ScI	475	0	15
Столовая Гора	Mensa	Men	153	0	8
Стрела	Sagitta	Sge	80	0	8
Стрелец	Sagittarius	Sgr	867	2	65
Телескоп	Telescopium	Tel	252	0	17
Телец	Taurus	Tau	797	2	98
Треугольник	Triangulum	Tri	132	0	12
Тукан	Tucana	Tuc	295	0	15
Феникс	Phoenix	Phe	469	1	27
Хамелеон	Chamaeleon	Cha	132	0	13
Цефей	Cepheus	Cep	588	1	57
Циркуль	Circinus	Cir	93	0	10
Часы	Horologium	Nor	249	0	10
Чаша	Crater	Crt	282	0	11
Щит	Scutum	Sct	109	0	9
Эридан	Eridanus	Eri	1138	1	79
Южная Гидра	Hydrus	Hyi	243	0	14
Южная Корона	Corona Australis	CrA	128	0	21
Южная Рыба	Piscis Austrinus	PsA	245	1	15
Южный Крест	Crux	Cru	68	3	20
Южный Треугольник	Triangulum Australe	TaA	110	1	12
Ящерица	Lacerta	Lac	201	0	23

Таблица 2. Элементы орбит планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, <i>a</i>		Период обращения по орбите, <i>T</i>		Наклонение орбитальной плоскости	Эксцент- риситет орбиты	Средняя скорость орбитального движения
	а. е.	млн км	лет	сут			
Меркурий	0,3871	57,9	0,2409	87,97	7,005°	0,2056	47,9
Венера	0,72333	108,2	0,6152	224,70	3,395°	0,0068	35,0
Земля	1,0000	149,6	1,0000	365,26	0,000°	0,0167	29,8
Марс	1,5236	227,9	1,8808	686,94	1,850°	0,0934	24,1
Юпитер	5,2044	778,6	11,868	4334,6	1,304°	0,0489	13,1
Сатурн	9,5838	1433,7	29,666	10 835	2,486°	0,0569	9,6
Уран	19,1872	2870,4	84,048	30 698	0,772°	0,0463	6,8
Нептун	30,0209	4491,1	164,49	60 079	1,769°	0,0113	5,4

Таблица 3. Физические характеристики планет Солнечной системы

Планета	Масса		Средний экватори- альный радиус		Сплюснутость	Период осевого вращения	Средняя плотность
	10 ²⁴ кг	⊕ = 1	км	⊕ = 1			
Меркурий	0,330	0,0553	2440	0,3825	$R_{\text{ЭКВ}} - R_{\text{ПОЛ}} \over R_{\text{ЭКВ}}$	сут ¹	г/см ³
Венера	4,869	0,815	6052	0,9488	0	58,646	5,43
					0	−243,02	5,24

Земля	5,974	1,000	6378	1,0000	0,0034	0,99727	5,52
Марс	0,642	0,1075	3397	0,5326	0,0065	1,02596	3,94
Юпитер	1898,8	317,83	71 492	11,209	0,0649	0,41354	1,33
Сатурн	568,5	95,16	60 268	9,4491	0,0980	0,44401	0,69
Уран	86,63	14,50	25 559	4,0073	0,0229	-0,71833	1,27
Нептун	02,78	17,20	24764	3,8826	0,0171	0,67125	1,64

¹ Периоды осевого вращения указаны в земных солнечных сутках.
Минус означает вращение в обратном направлении относительно земного.

Таблица 4. Параметры планет-карликов

Планета	Среднее расстояние от Солнца	Период обращения по орбите	Наклонение орбиты	Эксцентри- ситет орбиты	Диаметр	Масса	Плотность
	а. е.	лет	<i>i</i>	<i>e</i>	км	10 ²¹ кг	г/см ³
Церера	2,77	4,6	10,6°	0,08	946	0,94	2,17
Плутон	39,48	248,1	17,1°	0,25	2380	13,1	1,87
Хаумея	43,13	283,3	28,2°	0,20	1240	4,0	3 ± 0,3
Макемаке	45,79	309,1	29,0°	0,16	1430	3	2,3 ± 0,9
Эрида	67,67	558,0	44,2°	0,44	2326	16,7	2,5

Таблица 5. Спутники планет (важнейшие)

Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Диаметр, км	Масса, 10^{18} кг	Плотность, г/см ³
Спутник Земли					
Луна	384,4	27,32166	3475	73 500	3,34
Спутники Марса					
Фобос	9,38	0,318910	26×18	0,0107	1,87
Деймос	23,46	1,262441	16×10	0,0022	2,25
Спутники Юпитера					
Амальтея	181	0,498	250×128	2,1	0,86
Ио	422	1,769	3643	89 300	3,53
Европа	671	3,551	3122	48 000	3,04
Ганимед	1070	7,155	5262	148 200	1,94
Каллисто	1883	16,69	4821	107 600	1,83
Гималия	11 461	250,56	170	6,7	2,6
Спутники Сатурна					
Мимас	185,6	0,942	397	38	1,2
Энцелад	238,1	1,370	500	104	1,6
Тефия	294,7	1,888	1060	618	1,0
Диона	377,4	2,737	1120	1100	1,5
Рея	527,1	4,518	1530	2320	1,2
Титан	1221,9	15,95	5150	134 650	1,9
Гиперион	1464,1	21,28	360×226	11	1,1
Япет	3560,8	79,33	1440	1950	1,3
Феба	12 944,3	-548,21	220	7	1,3

Название	Большая полуось орбиты, тыс. км	Орбитальный период, сут	Диаметр, км	Масса, 10^{18} кг	Плотность, г/см ³
Спутники Урана					
Миранда	129,9	1,413	472	66	1,2
Ариэль	190,9	2,520	1158	1350	1,7
Умбриэль	266,0	4,144	1170	1170	1,4
Титания	436,3	8,706	1578	3520	1,7
Оберон	583,5	13,46	1523	3010	1,6
Спутники Нептуна					
Тритон	354,8	−5,877	2707	21 400	2,1
Нереида	5513,4	360,14	340	30	1,0
Спутник Плутона					
Харон	17,54	−6,387	1212	1586	1,71

Таблица 6. Яркие звезды

Название звезды	Обозначение звезды в созвездии	Взвск, m	Спектр ¹	Параллакс (p), "	Расстояние (r), пк	Светимость ² , $\frac{L}{L_{\odot}}$	Плывчая скорость (V_r), км/с	Собственное движение (μ), "/год
Солнце	—	-26,75	G ГП	—	—	1	—	—
Сириус	α CMa	-1,46	A ГП	0,379	2,6	21	-8	1,324
Канопус	α Car	-0,72	F CG	0,011	95	11 000	+20	0,026
Толиман	α Cen	-0,29	G ГП + K ГП	0,742	1,3	1,9	-23	3,678
Арктур	α Boo	-0,04	K КГ	0,089	11,2	170	-5	2,281
Вега	α Lyr	0,03	A ГП	0,129	7,8	50	-14	0,326
Капелла	α Aur	0,08	G КГ + G КГ	0,077	13,0	134	+30	0,430
Ригель	β Ori	0,13	B CG	0,004	250	120 000	+18	0,001
Процион	α CMi	0,38	F ГП	0,286	3,5	7,3	-3	1,248
Ахернар	α Eri	0,46	B ГП	0,023	43,5	3150	+16	0,108
Бетельгейзе	α Ori	0,50	M CG	0,008	125	100 000	+21	0,028
Хадар	β Cen	0,61	B Г	0,008	120	42 000	+6	0,030
Акрукс	α Cru	0,76	B ГП + B ГП	0,010	100	41 000	-11	0,022
Альтаир	α Aql	0,77	A ГП	0,194	5,2	11	-26	0,662
Альдебаран	α Tau	0,85	K КГ	0,050	20	518	+54	0,200

Антарес	α Sco	0,91	М СГ + В ГП	0,006	170	76 000	-3	0,024
Слика	α Vir	0,98	В Г + В ГП	0,013	77	14 000	+1	0,054
Поллукс	β Gem	1,14	К КГ	0,097	10,3	43	+3	0,629
Фомальгаут	α PsA	1,16	А ГП	0,130	7,7	17	+7	0,373
Мимоза	β Cru	1,25	В Г	0,012	85	34 000	+16	0,027
Денеб	α Cyg	1,25	А СГ	0,001	800	200 000	-5	0,005

¹ Спектральный класс с указанием последовательности на диаграмме Герцшпрунга — Рассела:

ГП — главная последовательность, КГ — красный гигант, Г — гигант, СГ — сверхгигант.

У двойных звёзд сравнимой светимости указан спектр каждого из компонентов.

² Светимость болометрическая, то есть полная мощность излучения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. Астрономия: её задачи и возможности	3
1. Чем занимается астрономия	4
2. Этапы развития астрономии	11
3. Космическая деятельность человечества	16
4. Пространственные масштабы изучаемой Вселенной	26
Основные выводы	32
Задания и упражнения	33
ГЛАВА 2. Видимые движения небесных тел	35
5. Небо дневное и ночное	36
6. Созвездия и астеризмы	38
7. Карта звёздного неба	42
8. Наблюдаемые движения звёзд, Солнца и Луны	46
9. Системы небесных координат	56
10. Время и календарь	62
11. Движение планет	71
12. Затмения Луны и Солнца	75
Основные выводы	79
Задания и упражнения	79
ГЛАВА 3. Движение космических тел под действием сил гравитации	81
13. Геоцентрическая система мира	82
14. Система Коперника	85
15. Движение планет вокруг Солнца. Законы Кеплера	88
16. Закон всемирного тяготения	90
17. Орбиты космических тел	93
18. Небесная механика и орбиты космических аппаратов	96
Основные выводы	101
Задания и упражнения	102
ГЛАВА 4. Солнечная система	103
19. Общий обзор Солнечной системы	104
20. Планеты-карлики и малые тела Солнечной системы	132
21. Метеоры, метеориты и астероидная опасность	142
22. Экзопланеты	148

Основные выводы	155
Задания и упражнения	155
ГЛАВА 5. Методы астрономических исследований	157
23. Типы астрономических измерений	158
24. Телескопы	160
25. Шкала электромагнитных волн	168
26. Внеатмосферные астрономические наблюдения	170
27. Спектральный анализ	172
Основные выводы	175
Задания и упражнения	176
ГЛАВА 6. Солнце и звёзды	177
28. Солнце как звезда	178
29. Атмосфера Солнца и солнечный ветер	183
30. Солнечная активность	189
31. Звёзды как газовые шары	193
32. Строение звёзд	201
33. Эволюция Солнца и звёзд	209
34. Переменные звёзды	222
Основные выводы	230
Задания и упражнения	230
ГЛАВА 7. Галактики	233
35. Наша Галактика — Млечный Путь	234
36. Движение звёзд и вращение Галактики	240
37. Межзвёздная среда и формирование звёзд	243
38. Многообразие галактик	257
Основные выводы	270
Задания и упражнения	271
ГЛАВА 8. Эволюция Вселенной	273
39. Необратимые изменения во Вселенной	274
40. Расширение Вселенной	275
41. Модели расширяющейся Вселенной	279
42. Фоновое электромагнитное реликтовое излучение	283
43. Далёкое прошлое Вселенной	285
Основные выводы	288
Задания и упражнения	289
Приложение	290

В издании использованы материалы:

- Рис. 1. И. В. Чилингарян. Млечный Путь. Фотография печатается с разрешения автора.
- Рис. 2. Д. Мзареулян. Стоунхендж, Великобритания // «Фотобанк Лори».
- Рис. 3. Э. Лебедский (по эскизам К. Раля) «Анаксагор». Фрагмент фрески. 2-я половина XIX в.
- Рис. 6. Я. Матейко. «Коперник. Беседа с богом». 1873 г.
- Рис. 7. Художник неизвестен. Портрет Дж. Бруно // «Фотобанк Лори».
- Рис. 8. Художник неизвестен. Гиппарх Никейский. Изображение с почтовой марки. Греция.
- Рис. 9. Художник неизвестен. Птолемей. Гравюра XIV в.
- Рис. 10. Ю. Сустерсанс. Портрет Галилео Галилея. 1635 г.
- Рис. 11. Мастерская Еноха Симэна Младшего. Портрет Исаака Ньютона. Ок. 1726 г.
- Рис. 13. Ракета «Фау-2». Фотография. Орлов А. С. Секретное оружие третьего рейха. — М. : Наука, 1975. Вклейка, с. 33.
- Рис. 14. Р-7 («Спутник»), ракета конструкции С. П. Королёва, 1957 г. Фотография // Мир техники для детей. 2011. № 4. С. 12.
- Рис. 17. Ю. А. Гагарин. Фотография. Данилкин Л. А. Юрий Гагарин. — М. : Издательский дом Молодая гвардия, 2011.
- Рис. 39. Жюль-Декарт Ферат. Иллюстрация к роману Ж. Верна «Таинственный остров». 2-я половина XIX в.
- Рис. 62. М. М. Лисаков, А. О. Юферев, Е. В. Казаков. Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. Снимок получен на Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН. На горизонте — Эльбрус. Фотография печатается с разрешения авторов.
- Рис. 65. Гелиоцентрическая система мира: Van Gent Robert Andreas Cellarius: Taschen, 2009.
- Рис. 67. Слева: Художник неизвестен. Портрет Н. Коперника. 1854 г. Справа: страница из рукописи книги Н. Коперника «О вращении небесных сфер» (1520—1541).
- Рис. 83. Залив Радуги на Луне. Сторона кадра 360 км. Стрелкой показано положение «Лунохода-1». URL: <http://lroc.sese.asu.edu>.
- Рис. 111. Метеор из потока Леониды. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1165199>. J. W. Young.
- Рис. 114. В. Г. Сурдин. Фрагмент Сихотэ-Алинского метеорита 1947 г. Фото предоставлено автором издания.
- Рис. 121. Малый квадрант Тихо Браге. 1598 г.

Рис. 122. Фотограф неизвестен. Армилярная сфера Пекинской обсерватории // «Фотобанк Лори».

Рис. 124. В. П. Романенко. Большой азимутальный телескоп Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (БТА САО РАН). Фотография печатается с разрешения автора.

Рис. 125, 161, 172, 176. Использованы изображения с электронного ресурса <http://www.eso.org>.

Рис. 129, 132. Космический радиотелескоп «Радиоастрон»; «Астрон». АО «НПО Лавочкина». URL: <http://www.laspase.ru>.

Рис. 137. Julio de la Higuera Rodrigo. Солнечные панели // «Фотобанк Лори».

Рис. 140. LucViator. Хромосфера Солнца. URL: <https://lucnix.be/>.

Рис. 141. М. С. Семёнов, А. А. Олешко, А. О. Юферов. Солнечная корона в момент полного затмения 9 марта 2016 г. Фотография печатается с разрешения авторов.

Рис. 163, 170. Использованы изображения с электронного ресурса <http://www.esa.int>.

Рис. 177. Фотограф неизвестен. Портрет Эдвина Хаббла // «Фотобанк Лори».

Рис. 183. Спиральная галактика М104, диск которой наблюдается почти «с ребра». Фото телескопа «Хаббл» (NASA). URL: <https://imgsrc.hubblesite.org>.

Рис. 190. Фотограф неизвестен. Фридман Александр Александрович // Чернин А. Д. Физика времени. — М. : ТЕРРА—Книжный клуб, 2008. — 320 с. : ил. — (Мир вокруг нас).

На обложке; рис. 12, 15, 16, 18—21, 43, 81, 82, 84, 85, 87—89, 91—95, 97—110, 112, 113, 115, 116, 120, 126—128, 131, 133, 134, 136, 139, 142, 144, 145, 148, 152, 155, 156, 158, 159, 166, 167, 169, 171, 173, 175, 178—182, 185—187 использованы изображения с электронного ресурса <https://www.nasa.gov>.

Учебное издание

**Засов Анатолий Владимирович,
Сурдин Владимир Георгиевич**

Астрономия

10–11 классы

Учебник

Центр развития углублённого и профильного образования,
функциональной грамотности

Ответственный за выпуск *С. В. Бахтина*

Редактор *И. К. Лапина*

Художественный редактор *Е. В. Согонова*

Внешнее оформление: *В. А. Андрианов*

Макет *Е. В. Согоновой*

Художники *М. В. Воронцова, Н. П. Майстер, А. Н. Прокофьева, Т. Р. Тэлль*

Подписано в печать 22.11.2021. Формат 70×90/16

Гарнитура SchoolBookSanPin. Печать офсетная

Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 22,23. Тираж экз. Заказ №

Акционерное общество «Издательство «Просвещение»

Российская Федерация, 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16,
стр. 3, этаж 4, помещение I.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — **vopros@prosv.ru.**