



Е. П. Левитан

АСТРОНОМИЯ

11

БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ



Е. П. Левитан

АСТРОНОМИЯ

11

класс

Базовый уровень

Учебник

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное

Москва «Просвещение» 2022

УДК 373.167.1:52+52(075.3)
ББК 22.6я721
ЛЗ6

На учебник получены **положительные** заключения
научной (заключение РАО № 1441 от 12.01.2017 г.),
педагогической (заключение РАО № 1455 от 12.01.2017 г.) и
общественной (заключение РКС № 657-ОЭ от 13.01.2017 г.)
экспертиз.

Издание выходит в pdf-формате.

Левитан, Ефрем Павлович.

ЛЗ6 **Астрономия : 11-й класс : базовый уровень: учебник : издание в pdf-формате / Е. П. Левитан. — 4-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 240 с. : ил.**

ISBN 978-5-09-101647-5 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-092114-5 (печ. изд.).

В учебнике, написанном известным автором, который более полувека посвятил работе в области астрономического образования, рассматриваются вопросы классической астрономии, строение, природа и эволюция таких астрономических объектов, как звёзды, звёздные системы, галактики и Вселенная в целом. Курс астрономии обобщает естественно-научные знания, полученные учащимися за время обучения в школе, и дополняет физическую картину мира.

В основу курса положены научные факты, законы и теории. Приводятся также гипотезы, связанные с новыми проблемами, которые решает современная астрономия.

Учебный материал ориентирован на активное изучение и содержит задания, позволяющие обеспечить достижение личностных, метапредметных и предметных результатов образования.

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

ISBN 978-5-09-101647-5 (электр. изд.) © АО «Издательство «Просвещение», 2019
ISBN 978-5-09-092114-5 (печ. изд.) © Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2019
Все права защищены

КАК РАБОТАТЬ С УЧЕБНИКОМ

Вы начинаете изучать интереснейший учебный предмет — астрономию. Курс астрономии решает важные задачи: обобщает знания, полученные при изучении основ естественных наук, и дополняет ваше физико-математическое и философское образование.

Изучая основы науки о Вселенной, вы познакомитесь с природой планет и звёзд, со строением Солнечной системы и звёздных систем, научитесь правильно объяснять многие наблюдаемые астрономические явления, узнаете, как астрономы определяют расстояния до небесных тел, их размеры, массу, температуру, химический состав, а также то, как на основе достижений современной физики формируется представление об астрономической картине мира.

В основу данного курса астрономии положены факты, законы и теории. Вы познакомитесь также и с некоторыми предположениями и гипотезами, которые связаны с увлекательными, но пока ещё не решёнными научными проблемами.

Чтобы усвоить учебный материал, недостаточно просто прочитав текст параграфа и научиться решать включённые в него задачи, нужно его проработать, обратив прежде всего внимание на вводимые новые понятия, а также на углубление тех, с которыми вы знакомы из курсов окружающего мира, географии, физики и истории. Необходимо разобраться в каждом астрономическом явлении и процессе, понять основные особенности различных типов небесных тел. А для этого нужно уяснить их основные внешние признаки, получить представление о методах исследования, проникнуть в сущность наблюдаемого (видимая картина далеко не всегда совпадает с истинной!), познакомиться с философским, научным и практическим значением исследования тех или иных космических явлений и объектов.

Учебник ориентирован на активное изучение материала, и поэтому очень часто вам придётся не только самостоятельно делать дополнительные чертежи или схемы, но и формулировать некоторые определения и выводы, к которым вас подведёт текст или включённые в него вопросы

и задания, завершающие каждый параграф. Они представляют собой логическое продолжение содержания текстового материала. Лишь некоторые из них требуют простого воспроизведения каких-либо определений или формулировок. В основном же они предлагают вам творчески осмыслить изучаемый материал, а именно:

- систематизировать новые сведения, опираясь на знания, полученные при изучении других учебных предметов;
- сделать необходимые мировоззренческие выводы;
- самостоятельно выполнить астрономические наблюдения.

В ряде параграфов при изложении учебного материала соответствующие вычисления не приводятся, но объясняется, как они могут быть выполнены. Опираясь на эти указания, вы сами сможете сделать необходимые расчёты.

Вопросы, задания и разделы текста, отмеченные звёздочкой, адресованы учащимся, интересующимся астрономией и принимающим участие в олимпиадах.

Каждая из пяти глав завершается перечнем того, что вам полезно знать и уметь после изучения данной темы. Проверьте, всё ли вы усвоили, поняли, и, если затрудняетесь в ответе, вернитесь к соответствующему тексту и ещё раз внимательно прочитайте его.

Эти особенности учебника помогут вам более глубоко усвоить материал, приобрести полезные навыки работы с книгой, а также заставят интересующихся астрономией обратиться к научно-популярной литературе по астрономии (список рекомендуемых книг и научно-популярных журналов вы найдёте в приложениях в конце учебника).

Наблюдения — важнейшая часть курса астрономии. Поэтому постарайтесь проводить самостоятельные наблюдения. Для этого приобретите «Школьный астрономический календарь» (ШАК) на текущий учебный год, смонтируйте подвижную карту звёздного неба (ПКЗН), внимательно изучив инструкцию в Приложении IV. Если в вашем распоряжении окажется бинокль или школьный телескоп, то наблюдения станут более полезными и увлекательными. По возможности посетите планетарий в городе, где вы живёте, или в других городах.

Желаем вам больших успехов!

§ 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

1. Что изучает астрономия. Астрономия — наука о Вселенной. Слово «астрономия» происходит от двух греческих слов: *астрон* — звезда и *номос* — закон.

Астрономия изучает движение небесных тел, их природу, происхождение и развитие. Во Вселенной небесные тела образуют системы различной сложности. Например, Солнце и движущиеся вокруг него небесные тела составляют Солнечную систему. Земля — одна из её планет. Вы знаете, что планеты светят отражённым солнечным светом. В отличие от них Солнце — самосветящееся небесное тело, оно представляет собой единственную звезду в Солнечной системе.

Звёзды, видимые невооружённым глазом, составляют ничтожную долю звёзд, входящих в нашу Галактику. Кроме нашей, существует множество других галактик. Свет от ближайших галактик идёт к нам миллионы лет.

Небесные тела находятся в непрерывном движении, изменении, развитии. Планеты, звёзды и галактики имеют свою историю, нередко исчисляемую миллиардами лет.

Астрономия — одна из самых увлекательных и прекрасных наук о природе — исследует не только настоящее, но и далёкое прошлое окружающего нас мегамира, а также позволяет нарисовать научную картину будущего Вселенной.

2. Роль наблюдений в астрономии. *Наблюдения — основной источник информации о небесных телах, процессах и явлениях, происходящих во Вселенной.* Для про-

ведения наблюдений во многих странах созданы специальные научно-исследовательские учреждения — астрономические обсерватории. Наиболее известные в нашей стране: Главная астрономическая обсерватория Российской Академии наук (РАН) — Пулковская (в Санкт-Петербурге), Специальная астрофизическая обсерватория РАН (на Северном Кавказе), Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (в Москве).

Современные обсерватории оснащены крупными оптическими телескопами, представляющими собой очень большие, сложные и в значительной степени автоматизированные инструменты.

Телескоп увеличивает угол зрения, под которым видны небесные тела, и *собирает во много раз больше света*, проходящего от небесного светила, чем глаз наблюдателя. Благодаря этому в телескоп можно рассматривать не видимые невооружённым глазом детали поверхности ближайших к Земле небесных тел и увидеть множество слабых звёзд.

В астрономии расстояние между объектами на небе измеряют углом, образованным лучами, идущими из точки наблюдения к объектам. Такое расстояние называется *угловым*, и выражается оно в градусах и долях градуса. Невооружённым глазом две звезды видны раздельно, если они отстоят на небе друг от друга на угловом расстоянии не менее $1\text{--}2'$. В крупные телескопы удаётся наблюдать раздельно звёзды, угловое расстояние между которыми составляет сотые или даже тысячные доли секунды (под углом $1''$ «видна» спичечная коробка примерно с расстояния 10 км).

Существует несколько типов оптических телескопов. В телескопах-рефракторах (рис. 1), где используется преломление света, лучи от небесных светил собирает

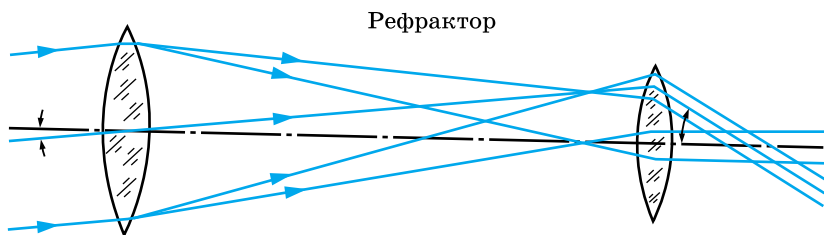


Рис. 1. Ход лучей в телескопах-рефракторах

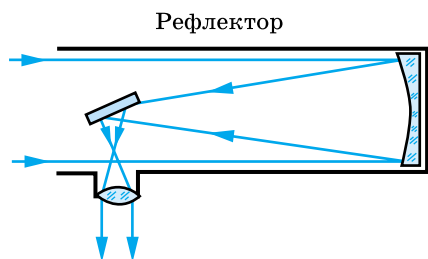


Рис. 2. Ход лучей в телескопах-рефлекторах

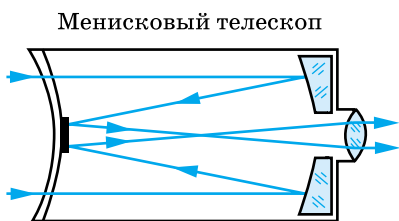


Рис. 3. Ход лучей в зеркально-линзовых телескопах

линза (или система линз). В телескопах-рефлекторах (рис. 2) — вогнутое зеркало, способное фокусировать отражённые лучи. В зеркально-линзовых телескопах (рис. 3) — комбинация зеркал и линз. Изображение в телескопе получается перевернутым.

С помощью телескопов проводят не только *визуальные* и *фотографические наблюдения*, но преимущественно высокоточные *фотоэлектрические* и *спектральные наблюдения*. Телескопы, приспособленные для фотографирования небесных объектов, называются астрографами. Фотографические наблюдения имеют ряд преимуществ перед визуальными. К основным преимуществам относятся: документальность — способность фиксировать происходящие явления и процессы и долгое время сохранять полученную информацию; моментальность — способность регистрировать кратковременные явления, происходящие в данный момент; панорамность — способность запечатлеть на фотопластинке одновременно несколько объектов и их взаимное расположение; интегральность — способность накапливать свет от слабых источников; детальность получаемого изображения.

Сведения о температуре, химическом составе, магнитных полях небесных тел, а также об их движении получают из *спектральных наблюдений*. Спектральный анализ, основы которого изучаются в курсе физики, имеет исключительно важное значение для астрономии.

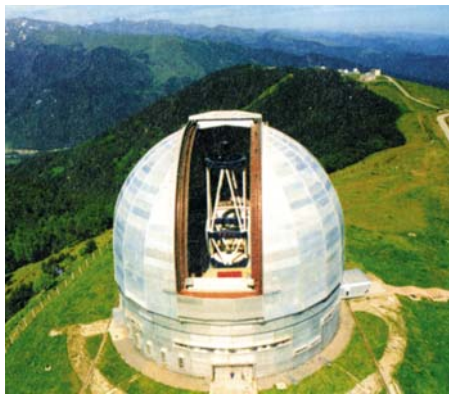
Кроме света, небесные тела излучают электромагнитные волны большей длины волны, чем свет (*инфракрасное излучение, радиоволны*), или меньшей (*ультрафиолетовое, рентгеновское излучения и гамма-лучи*).



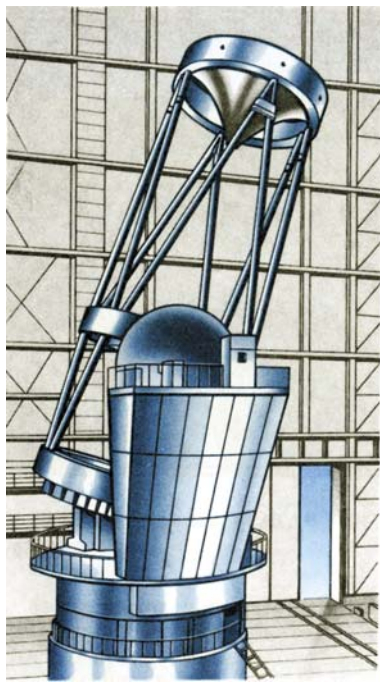
Рис. 4. Радиотелескоп «РАТАН-600» Специальной астрофизической обсерватории РАН на Северном Кавказе

Многие открытия при изучении Солнечной системы, нашей и других галактик были сделаны с помощью радиотелескопов, предназначенных для исследования небесных тел в радиодиапазоне. Один из крупнейших радиотелескопов — «РАТАН-600» — установлен в Специальной

Рис. 5. Телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 6 м Специальной астрофизической обсерватории РАН: а) здание обсерватории; б) общий вид телескопа



а)



б)

ной астрофизической обсерватории на Северном Кавказе. Его антенна состоит из подвижных элементов (щитов), расположенных по окружности диаметром 600 м (рис. 4). Там же находится и 6-метровый телескоп-рефлектор (рис. 5). В последние годы вступили в строй 8-, 10- и 11-метровые телескопы-рефлекторы (обсерватории в Чили, в Южной Африке, на Гавайских и Канарских островах).

Значительная часть невидимого излучения небесных тел поглощается земной атмосферой и не доходит до поверхности Земли. Поэтому *наземные наблюдения* приходится дополнять *внеатмосферными*, которые стали возможны благодаря успешным запускам искусственных спутников Земли (ИСЗ), автоматических межпланетных станций (АМС) и орбитальных научных станций. Бортовые астрономические приборы способны исследовать небесные тела во *всех* диапазонах длин волн. Важные научные результаты получены с помощью отечественных и зарубежных орбитальных обсерваторий — «Астрон», «Гранат», «Интеграл», «Космический телескоп им. Хаббла» и др. Таким образом, *астрономия из оптической превратилась во всеволновую*.

В школе вы можете выполнять только простейшие астрономические наблюдения. Но они необходимы. Подобно тому как без демонстрационных опытов и лабораторных работ по физике нельзя глубоко понять и прочно усвоить сущность физических явлений и законов, без школьных астрономических наблюдений нельзя успешно овладеть основами астрономии.

3. Связь астрономии с другими науками. Значение астрономии. Современная астрономия — фундаментальная физико-математическая наука, развитие которой неразрывно связано с научно-техническим прогрессом. Это наглядно можно показать на примере ведущего раздела астрономии, а с т р о ф и з и к и, изучающего природу небесных тел. До появления в XIX веке фотографии и спектрального анализа было очень мало известно о природе небесных тел. Бурный расцвет астрофизика переживает в наши дни, когда наземные и внеатмосферные наблюдения дополняются экспериментами в околоземном космическом пространстве, на Луне, Венере и Марсе, вблизи планет-гигантов, их спутников, а также при полётах к некоторым астеро-

идам и кометам. Полученные данные обрабатываются на электронно-вычислительных машинах и подвергаются анализу с учётом новейших достижений физики, математики, химии и других наук. *Осмысление наблюдаемых во Вселенной объектов, явлений и процессов необходимо для правильного понимания сложной взаимосвязи микромира и мегамира, построения современной астрономической картины мира.*

Однако астрономия не только опирается на данные других наук, но и способствует развитию последних. Например, астрофизика обогащает земную физику ценными сведениями о состоянии вещества, находящегося в условиях очень высоких и очень низких температур, давлений, плотностей, а также различных магнитных полей. Вселенная словно становится грандиозной физической лабораторией, где сама природа даёт возможность изучать поведение вещества в условиях, резко отличающихся от земных.

Решение задач небесной механики (раздела астрономии, изучающего законы движения небесных тел) способствовало появлению и совершенствованию важнейших областей математики. Законы небесной механики лежат в основе теории движения космических аппаратов. При расчётах космических траекторий учитываются силы тяготения Земли, Солнца и других небесных тел, вблизи которых предстоит пролететь кораблю, а также данные о физических условиях (ускорение свободного падения, состав атмосферы и её температура) на Луне или планете, к которой направляется корабль. Ориентирами в полётах служат Солнце, яркие звёзды, Земля и другие планеты.

Наконец, данные астрономии о строении и эволюции Вселенной, о месте в ней человека составляют неотъемлемую часть научного мировоззрения.

Астрономия — одна из древнейших наук. Она возникла из практических потребностей человека раньше всех других наук. Примерно шесть тысяч лет назад египтяне уже смогли согласовать свой календарь с астрономическим явлением. Они заметили, что начало разлива Нила совпадает с появлением над горизонтом перед самым восходом Солнца звезды Сириус (по-египетски — Сотис). Это

наблюдение и было положено в основу египетского календаря.

С давних пор в далёких путешествиях люди ориентировались ночью по звёздам, а днём — по Солнцу. Астрономические наблюдения и сейчас используются для решения важных проблем народного хозяйства. К их числу относятся: измерение времени, составление точных географических карт, выполнение разнообразных геодезических работ, ориентировка по небесным светилам на море, в воздухе и в космическом пространстве.

Однако этим далеко не исчерпывается в настоящее время значение астрономии. Изучение Луны и планет Солнечной системы позволяет лучше узнать нашу Землю. В сферу деятельности людей уже включаются околоземное космическое пространство и ближайшие небесные тела. В будущем освоение космоса позволит расширить среду обитания людей, что, в частности, может облегчить решение экологических проблем. Уже сегодня искусственные спутники Земли стали совершенно необходимы для решения навигационных задач (в том числе для индивидуальных пользователей), предсказания погоды, изучения природных ресурсов Земли, исследования дрейфа континентов, космической связи и т. д. Новые требования к астрономии предъявляет *космонавтика*. Нужно уметь с большой точностью определять расстояния до небесных тел Солнечной системы, выбирать подходящее для межпланетных перелётов время, рассчитывать оптимальные траектории космических аппаратов, знать расположение наиболее опасных участков орбит искусственных спутников.

Таким образом, астрономия является наукой, необходимой всем людям. Более подробно и глубоко вопросы астрономии придётся изучать тем, кто станет специализироваться в области геодезии и картографии, посвятит себя мореплаванию, авиации, космическим исследованиям. А общее представление о строении и эволюции Вселенной сейчас должен иметь каждый человек.

В связи с важностью этой науки для человечества и 400-летием со времени первых телескопических наблюдений Организация Объединённых Наций (ООН) объявляла 2009 год **Международным годом астрономии**.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Вспомните, какие сведения по астрономии вы получили из курсов окружающего мира, физики, истории. 2. В чём специфика астрономии (по объектам и методам исследования) по сравнению с другими науками о природе, которые вы уже изучали? 3. Какие важнейшие типы небесных тел вам известны? 4. Какова роль наблюдений в астрономии, с помощью каких инструментов они выполняются? 5. Какова роль космонавтики в исследовании Вселенной? 6*. Начертите схему, поясняющую взаимосвязь астрономии и других наук. 7*. Начертите схему, показывающую философское, научное и практическое значение астрономии. 8. Смонтируйте имеющуюся в «Школьном астрономическом календаре» подвижную карту звёздного неба, руководствуясь инструкцией (см. Приложение IV).

§ 2. ЗВЁЗДНОЕ НЕБО

1. **Что такое созвездие.** В безоблачную и безлунную ночь вдали от городского освещения взору открывается величественная картина звёздного неба. На первый взгляд кажется, что невозможно разобраться в звёздной россыпи. А научиться этому хотят многие. Знать звёздное небо интересно и полезно. Оно издавна привлекало к себе внимание людей. Тысячи лет назад люди мысленно соединили наиболее яркие звёзды в разнообразные фигуры (созвездия) и дали им имена персонажей древних мифов и легенд, животных или названия предметов. Разные народы имели свои мифы и легенды о созвездиях, свои названия, причём число созвездий у разных народов было неодинаково.

В настоящее время всё небо условно разделено на 88 участков, имеющих строго определённые границы. Эти участки и называются созвездиями, причём к *данному созвездию относятся все звёзды, находящиеся внутри его границ*. Например, к созвездию Большой Медведицы относятся не только звёзды всем известного ковша, но и много слабых звёзд и различных других объектов (например, галактик).

Принадлежность звёзд к тому или иному созвездию определяется лишь тем, что наблюдатель, находящийся на Земле, видит эти звёзды по соседству. На самом деле это «соседство» только кажущееся, так как в пространстве звёзды находятся на огромном расстоянии друг от друга.

Звёзды каждого созвездия обозначаются буквами греческого алфавита (см. Приложение III). Первой из них,

α (альфа) обозначают чаще всего самую яркую звезду, а затем следуют β (бета), γ (гамма), δ (дельта), ϵ (эпсилон) и т. д. Самые яркие звёзды имеют собственные имена: Вега (α Лиры), Сириус (α Большого Пса) и т. д. (см. Приложение XI).

2*. Основные созвездия. Мы не ставим перед собой задачу изучить все созвездия, видимые в средних географических широтах, а ограничимся лишь некоторыми. Мы будем пользоваться рисунком 6 и картой звёздного неба (см. Приложение IV). Прежде всего по звёздам β и α *Большой Медведицы* найдём α *Малой Медведицы* (рис. 6). Это Полярная звезда, ею заканчивается ручка ковша Малой Медведицы. Под Полярной звездой на горизонте находится точка севера. Зная это, легко ориентироваться на местности, находить страны света (север, юг, восток, запад). Если продолжить прямую, проходящую от ϵ Большой Медведицы к Полярной звезде, то мы найдём созвездие, яркие звёзды которого расположены в виде перевёрнутой буквы М. Это *Кассиопея* (см. рис. 6). В средних широтах Большая Медведица, Малая Медведица и Кассиопея видны на небе над горизонтом на протяжении всего года. Поэтому с поиска этих созвездий мы и начали знакомство со звёздным небом. Большинство других интересующих нас созвездий лучше всего наблюдать в определённое время года. Так, одними из первых на летнем и осеннем вечернем небе появляются яркие звёзды Вега (α *Лиры*), Денеб (α *Лебедя*), Альтаир (α *Орла*), образующие треугольник (это *летний*, или *летне-осенний*, *треугольник*; см. рис. 6). Около Веги (самой яркой звезды северного неба) четыре звезды созвездия Лиры образуют параллелограмм. Наиболее яркие звёзды созвездия Лебедя расположены в виде креста, в одной из вершин которого находится Денеб.

Осень — удобное время для наблюдения созвездий *Пегаса* и *Андромеды*. Отыскать их на небе поможет созвездие Кассиопеи (см. рис. 6). Яркие звёзды Пегаса и Андромеды расположены в виде ковша с ручкой, значительно превосходящего созвездие Большой Медведицы. Ковш составлен тремя звёздами Пегаса (α , β , γ) и звездой α Андромеды.

Зимнее вечернее небо украшает группа созвездий, из которых наиболее отчётливо выделяется очень красивое созвездие *Ориона*. Над «поясом» Ориона (звёзды δ , ϵ , ζ)

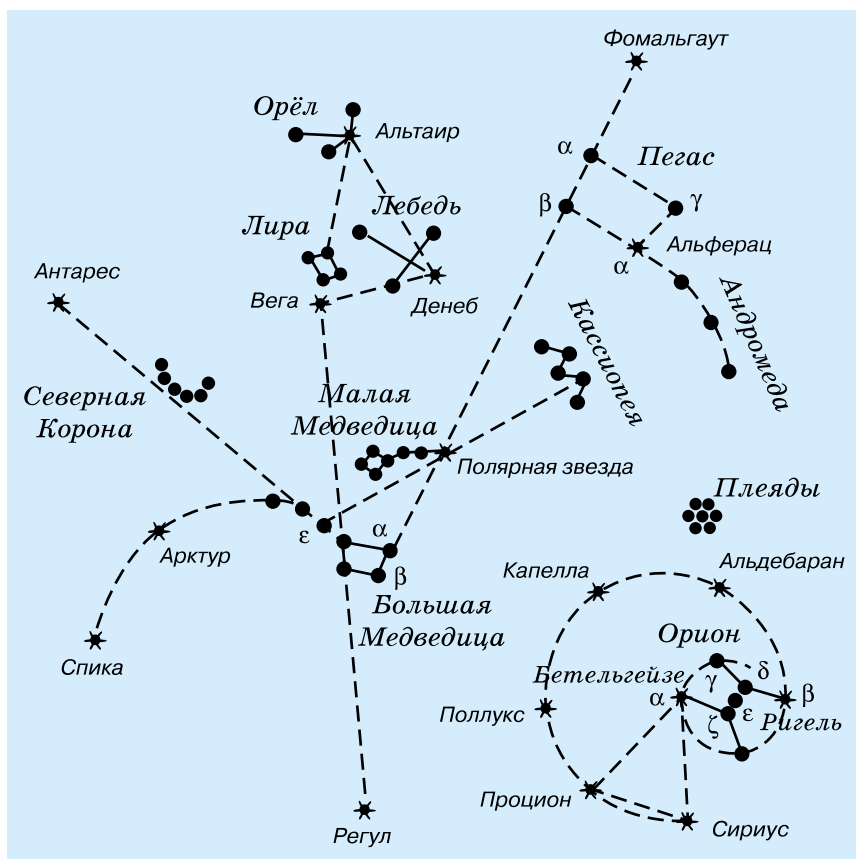


Рис. 6. Схема взаимного расположения основных созвездий и ярких звёзд

блестит Бетельгейзе (α Ориона), а ниже «пояса» — Ригель (β Ориона). Представим себе спиральную линию, начинающуюся от звезды δ Ориона и проходящую через звёзды γ , α , β . Мысленно продолжая эту линию (см. рис. 6), мы будем последовательно встречать следующие яркие звёзды: Альдебаран (α Тельца), Капеллу (α Возничего), Поллукс (β Близнецов), Прочион (α Малого Пса) и, наконец, самую яркую звезду неба — Сириус (α Большого Пса). Бетельгейзе, Прочион и Сириус составляют зимний треугольник.

Весной, кроме уже знакомых созвездий, можно наблюдать созвездия *Волоса, Девы, Льва*. Направление на яр-

кие звёзды первых двух созвездий указывает ручка ковша Большой Медведицы (см. рис. 6), на продолжении которой мы найдём Арктур (α *Волпаса*) и Спикку (α *Девы*). Созвездие Льва легко найти на небе, запомнив, что его яркие звёзды образуют большую трапецию (см. звёздную карту, Приложение IV). Западная южная (правая нижняя) звезда трапеции — Регул (α *Льва*), а нижняя левая — Денебола. Три звезды — Арктур, Спика, Денебола — образуют *весенний треугольник*.

Таким образом, если вы хотите изучить звёздное небо, то заниматься этим нужно на протяжении всего года. Подвижная карта звёздного неба (ПКЗН) поможет вам быстро определить, какие созвездия и яркие звёзды видны в данный вечер. Их вы и будете находить на небе. Такие наблюдения не потребуют больших затрат времени и дадут возможность созерцать совершенную красоту природы.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое созвездие? 2. Какие созвездия находятся сегодня вечером над горизонтом вашей местности? 3. Как называются яркие звёзды этих созвездий? 4*. Как, пользуясь ПКЗН, обнаружить, что вид небосвода изменяется в течение суток?

§ 3. ИЗМЕНЕНИЕ ВИДА ЗВЁЗДНОГО НЕБА В ТЕЧЕНИЕ СУТОК

1. Небесная сфера и её вращение. На рисунке 7 показана область звёздного неба вблизи Полярной звезды, сфотографированная неподвижным фотоаппаратом. Каждая звезда оставила след — светлую дугу. Вблизи общего центра всех дуг выделяется след, оставленный Полярной звездой. Чем продолжительнее экспозиция, тем большую дугу прочерчивает каждая звезда. Любая из дуг составляет одну и ту же часть своей окружности. Например, при фотографировании с двухчасовой экспозицией длина дуги равна $\frac{1}{12}$ окружности. Значит, за 2 ч небосвод поворачивается на $360^\circ : 12 = 30^\circ$, а полный оборот он совершает за сутки. При суточном вращении небосвода взаимное расположение звёзд не меняется, и нам кажется, что звёзды находятся на внутренней стороне огромной шаровой по-



Рис. 7. Фотография околополярной области неба, сделанная неподвижным фотоаппаратом

совмещают с той или иной точкой пространства. В частности, о видимой нами небесной сфере можно сказать, что это *воображаемая сфера сколь угодно большого радиуса, в центре которой находится глаз наблюдателя*. На такую сферу и проецируют звёзды, Солнце, Луну, планеты и т. д., отвлекаясь от действительных расстояний до светил и рассматривая лишь угловые расстояния между ними.

Наблюдаемое суточное вращение небесной сферы (оно происходит с востока на запад) — кажущееся явление, отражающее действительное вращение земного шара вокруг оси (с запада на восток). Ось видимого вращения небесной сферы называется осью мира. Мы не сделаем большой ошибки, если, основываясь на определении небесной сферы, будем считать, что ось мира совпадает с земной осью. Более строго: ось мира параллельна земной оси. Ось мира пересекает небесную сферу в двух точках P и P_1 — полюсах мира (рис. 8). Вблизи северного полюса мира в настоящее время находится α Малой Медведицы — Полярная звезда.

2. Горизонтальная система координат. Чтобы получить возможность практически применять небесную сферу, дополним чертёж (см. рис. 8) рядом линий и точек (рис. 9). Находящийся на Земле наблюдатель всегда может с помощью отвеса определить направление отвесной (вертикальной) линии. Эта линия пересекает небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках —

верхности (сфере). В действительности это, конечно, не так: звёзды движутся в пространстве и расстояния до них различны, но для изучения *видимого* расположения светил и явлений, которые можно наблюдать на небе в течение суток или многих месяцев, астрономы применяют понятие «небесная сфера». Небесная сфера — это воображаемая сфера произвольного радиуса. Центр её в зависимости от решаемой задачи сов-

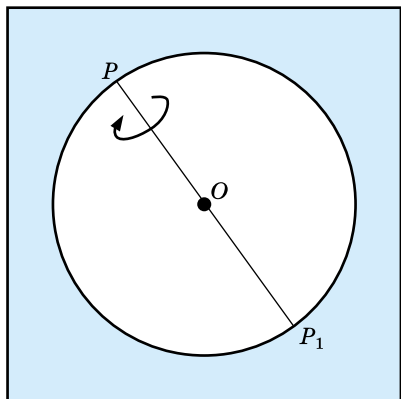


Рис. 8. Небесная сфера и ось мира

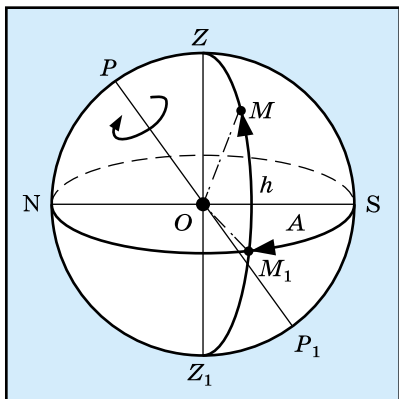


Рис. 9. Горизонтальная система координат

в зените Z и надире Z_1 . Плоскость, проходящая через центр небесной сферы и проведённая перпендикулярно отвесной линии, пересекает небесную сферу по большому кругу. Он называется истинным горизонтом (в отличие от известного из географии видимого горизонта). Через три точки Z , O и P можно провести единственную плоскость, которая пересечёт небесную сферу по большому кругу, называемому небесным меридианом. Плоскости небесного горизонта и меридиана пересекаются по прямой NS (точки N и S — соответственно точки севера и юга). Её называют полуденной линией (в этом направлении отбрасывают тень предметы, освещаемые Солнцем, в полдень). Наконец, через зенит Z , надир Z_1 и точку, в которой в данный момент находится светило M , можно провести большой полукруг небесной сферы, который называется кругом высоты или вертикалом. Мгновенное положение светила M относительно горизонта и небесного меридиана определяется двумя координатами: высотой (h) и азимутом (A), которые называются горизонтальными.

Высота светила — это угловое расстояние светила от горизонта (дуга вертикала от точки его пересечения с линией горизонта до светила M_1M , или центральный угол MOM_1). Высота измеряется в градусах, минутах и секундах (от 0 до 90°). Часто h заменяют равноценной ей

координатой z (зенитное расстояние), показывающей угловое расстояние светила от зенита. Очевидно, что

$$z = 90^\circ - h. \quad (1)$$

Вторая координата в горизонтальной системе A — *угловое расстояние вертикала светила от точки юга* (дуга истинного горизонта SM_1 , или центральный угол SOM_1). В астрономии азимуты отсчитываются от точки юга в направлении суточного движения светила, т. е. от S по ходу часовой стрелки (к западу). Измеряется азимут в градусах, минутах и секундах (в интервале от 0 до 360°).

3. Изменение горизонтальных координат. Кульминации светил. Участвуя во вращении небесной сферы, светило M_1 в течение суток опишет суточную параллель — малый круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира (рис. 10). В какой-то момент времени оно взойдёт в восточной части горизонта (M_2). В этот момент его горизонтальные координаты будут $h = 0^\circ$, $A = \widetilde{SNM}_2$. Затем светило начнёт подниматься над горизонтом и наибольшей высоты достигнет в момент прохождения через небесный меридиан. Это будет верхняя кульминация светила. Светило окажется в точке M_3 (над точкой S). Его азимут будет $A = 0^\circ$, а высота $h = \widetilde{SM}_3$.

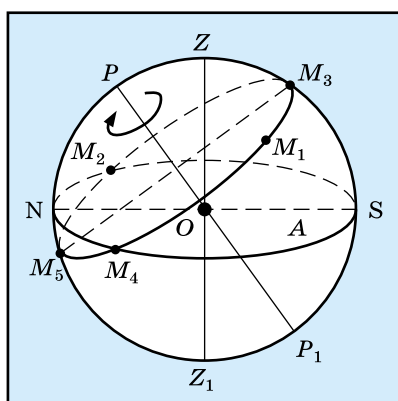


Рис. 10. Изменение горизонтальных координат светила M_1

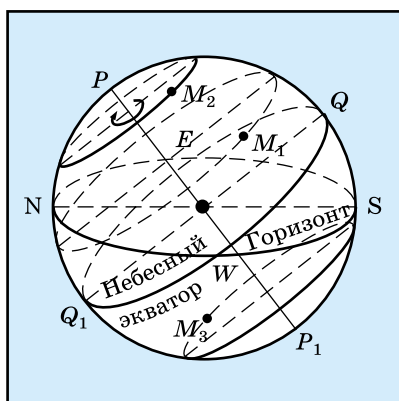


Рис. 11. Суточные параллели светил: восходящего и заходящего (M_1), незаходящего (M_2), невосходящего (M_3)

Далее высота светила будет уменьшаться и достигнет 0° в момент захода светила в западной части горизонта (точка M_4 , $A = SM_4$). Свой дальнейший путь выбранное нами светило будет совершать под горизонтом. В точке M_5 оно снова пересечёт небесный меридиан. Это будет нижняя кульминация светила (светило находится под горизонтом, следовательно, наблюдатель его не видит; $A = 180^\circ$). Последний участок своего пути светило проходит от точки нижней кульминации до точки восхода. Таким образом, мы, во-первых, убедились в том, что горизонтальные координаты светила в течение суток непрерывно изменяются. Во-вторых, мы рассмотрели движение светила, у которого только верхняя кульминация происходит над горизонтом. Такие светила называются восходящими и заходящими. Но, очевидно, в отличие от них светила могут быть незаходящими или невосходящими (их суточные параллели показаны на рисунке 11).

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое небесная сфера? 2. Какие линии и точки небесной сферы вы знаете? 3. Какие наблюдения убеждают нас в суточном вращении небесной сферы? 4. Можно ли рассматривать суточное вращение небесной сферы как доказательство вращения Земли вокруг оси? 5. Две звезды (A и B) видны в одном направлении, хотя звезда A в два раза ближе к нам, чем звезда B . Что можно сказать об угловом расстоянии этих звёзд от какой-нибудь третьей звезды? (Сделайте чертёж.) 6. Можно ли использовать горизонтальные координаты для создания карты звёздного неба? Ответ обоснуйте. 7. Что такое верхняя и нижняя кульминации светила? 8. Исходя из понятия «кульминация светила», дайте определения восходящим и заходящим, незаходящим и невосходящим светилам. 9. Выясните с помощью ПКЗН: а) Какие яркие звёзды будут кульминировать сегодня между 20 и 21 ч? б) Какие созвездия никогда не заходят в вашей местности?

§ 4. ИЗМЕНЕНИЕ ВИДА ЗВЁЗДНОГО НЕБА В ТЕЧЕНИЕ ГОДА

1. Экваториальная система координат. Подобно тому, как положение любого пункта на земной поверхности однозначно фиксируется географическими координатами (φ и λ — географической широтой и географической долготой), положение светил на небесной сфере определя-

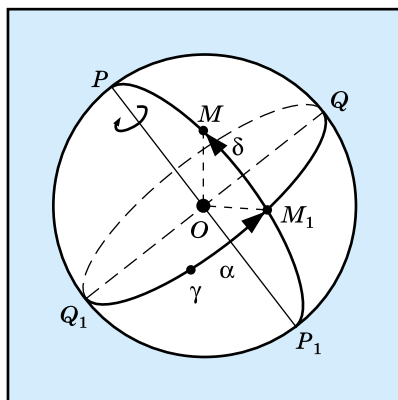


Рис. 12. Экваториальная система координат

Ясно, что все суточные параллели расположены параллельно небесному экватору (см. рис. 11).

Большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и наблюдаемое светило, называется кругом склонения светила (рис. 12).

Угловое расстояние светила от плоскости небесного экватора, измеренное вдоль круга склонения (см. рис. 12), называется склонением светила (δ). Склонение выражается в градусах, минутах и секундах. Небесный экватор делит небесную сферу на северное и южное полушария. Склонения звёзд северного полушария могут быть от 0 до 90° , а склонения звёзд южного полушария — от 0 до -90° . Очевидно, δ аналогично φ .

Вторая координата в экваториальной системе — прямое восхождение (α). Она аналогична λ . Отсчёт долгот на земном шаре ведут, как вы знаете, от начального меридиана. Отсчёт прямых восхождений ведут от точки весеннего равноденствия (γ). В этой точке небесного экватора бывает центр Солнца в день весеннего равноденствия (21 марта). Прямое восхождение отсчитывается вдоль небесного экватора в сторону, противоположную суточному вращению небесной сферы (см. рис. 12). Прямое восхождение α (как и λ) выражается либо в градусах, минутах и секундах дуги, либо в часах, минутах и секундах времени. Обычно используется часовая мера (от 0 до 24 ч). Так как полный оборот (360°) небесная сфера совершает за 24 ч,

ется экваториальными координатами. Прежде чем познакомиться с ними, введём понятия «небесный экватор» и «круг склонения».

Плоскость, проходящая через центр небесной сферы и проведённая перпендикулярно оси мира, пересекает небесную сферу по большому кругу QWQ_1E — небесному экватору (см. рис. 11). Небесный экватор пересекается с горизонтом в точках востока (E) и запада (W).

то 1 ч (1^h — такое обозначение принято в астрономии) соответствует 15° , 1 мин (1^m) — $15'$, 1 с (1^s) — $15''$ дуги.

При суточном вращении небесной сферы положение звёзд по отношению к небесному экватору не изменяется. Поэтому экваториальные координаты (как и географические) используются для создания карт, атласов, каталогов (списков звёзд).

На своей звёздной карте вы найдёте северный полюс мира (центр карты), небесный экватор, точку весеннего равноденствия, начала отсчётов склонений и прямых восхождений. Следовательно, пользуясь этой картой, можно приближённо определять экваториальные координаты звёзд или, наоборот, по заданным значениям α и δ наносить положения звёзд и других светил на карту.

2. Видимое годичное движение Солнца. В отличие от звёзд, экваториальные координаты которых остаются неизменными на протяжении многих месяцев и даже лет, есть светила, α и δ которых быстро изменяются. К числу таких светил, которые не только участвуют (как звёзды) в суточном движении, но и совершают собственные перемещения на небесной сфере, относится Солнце. В день весеннего равноденствия оно, как вы знаете, находится в точке весеннего равноденствия (Υ). Значит, 21 марта его координаты $\delta = 0^\circ$, $\alpha = 0^h$. Как показывают наблюдения, в течение года эти координаты непрерывно изменяются. 22 июня (день летнего солнцестояния) они будут: $\delta_\odot = +23^\circ 27'$, $\alpha_\odot = 6^h$, а в день осеннего равноденствия (23 сентября) $\delta_\odot = 0^\circ$, $\alpha_\odot = 12^h$. И наконец, 22 декабря (день зимнего солнцестояния) $\delta_\odot = -23^\circ 27'$, $\alpha_\odot = 18^h$, а 21 марта снова $\delta_\odot = 0^\circ$, $\alpha_\odot = 0^h$. Уже из этих данных следует, что в течение года Солнце движется по большому кругу небесной сферы, который наклонён к плоскости небесного экватора под углом $23^\circ 27'$ (рис. 13). Этот боль-

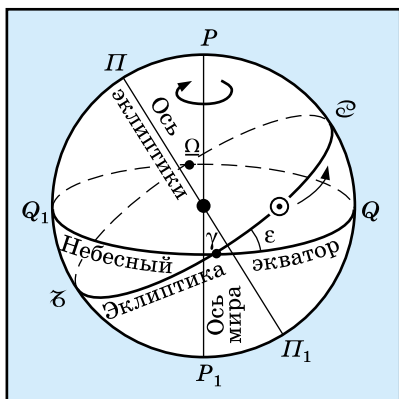


Рис. 13. Взаимное расположение небесного экватора и эклиптики

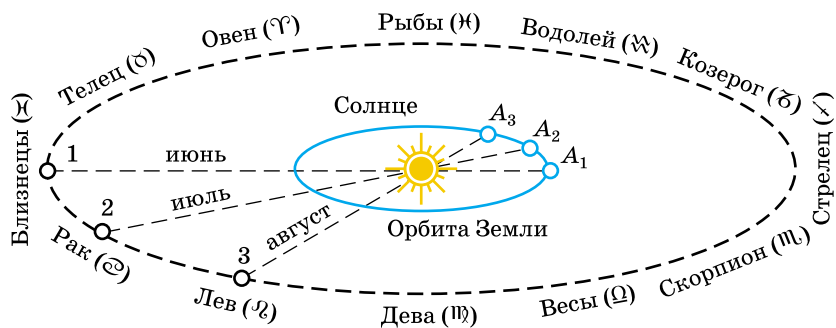


Рис. 14. Движение Земли вокруг Солнца и кажущееся годичное движение Солнца по эклипке

шой круг называется эклипкой. Эклиптика и экватор пересекаются в точке весеннего равноденствия ♈ (знак созвездия Овна) и в точке осеннего равноденствия ♎ (знак созвездия Весов). Всю эклиптику Солнце проходит ровно за год, т. е. перемещается по ней в сутки (в среднем) примерно на 1° . Созвездия, через которые проходит эклиптика, называются зодиакальными (рис. 14); их число соответствует числу месяцев в году (созвездие Змееносца к зодиакальным не относится).

О том, что Солнце имеет годовое движение, знали ещё древние астрономы. Но правильное объяснение этому наблюдаемому явлению было дано лишь тогда, когда выяснилось, что Земля обращается вокруг Солнца. *Видимое движение Солнца по эклипке — отражение действительного движения Земли вокруг Солнца* (см. рис. 14).

3. Годичное движение Солнца и вид звёздного неба. Поскольку положение звёзд на небесной сфере однозначно определяется парой экваториальных координат, практически не изменяющихся на протяжении длительных промежутков времени, вид звёздного неба в данный момент суток в данном месте Земли должен быть, казалось бы, одним и тем же. Однако это не так. Воспользовавшись ПКЗН, каждый из вас может обнаружить, что в течение года вид звёздного неба непрерывно изменяется. Например, в разные дни вблизи небесного меридиана в полночь проходят, сменяя друг друга, различные созвездия. Подобные наблюдения как раз и привели к выводу об изменении прямого восхождения Солнца. Действительно, в полночь,

когда Солнце находится в нижней кульминации под горизонтом, его прямое восхождение на 12^h отличается от прямого восхождения звёзд, находящихся в это время в верхней кульминации. Но так как в разные дни года в полночь кульминируют разные звёзды, то из этого непосредственно следует, что прямое восхождение Солнца ($\alpha_{\odot}$) непрерывно изменяется в течение года.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. В связи с чем появилась необходимость введения экваториальных координат светил? 2. Выясните с помощью ПКЗН: а) До какого склонения нанесены звёзды на эту карту? б) Каковы экваториальные координаты звёзд Денеб, Капелла и Спика? (Результаты сравните с данными Приложения X.) в) Экваториальные координаты двух звёзд: $\alpha = 14,2^h$; $\delta = +20^\circ$ и $\alpha = 4,5^h$; $\delta = +16,3^\circ$. Что это за звёзды? г) В каких зодиакальных созвездиях Солнце бывает летом, осенью, зимой и весной? д)* Сравните суточные пути Солнца (определив точки восхода и захода Солнца, а также оценив по карте его полуденные высоты) в вашей местности в дни равноденствий и солнцестояний.
3. Чем замечательны дни равноденствий и солнцестояний? 4. Можно ли рассматривать годовое движение Солнца по эклиптике как доказательство обращения Земли вокруг Солнца? 5. Совпадают ли в пространстве плоскость эклиптики и плоскость, в которой Земля движется вокруг Солнца? 6. Под каким углом плоскость экватора Земли наклонена к плоскости эклиптики?

§ 5. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ

1. Высота полюса мира и географическая широта места наблюдения. В одно и то же время вид звёздного неба на различных географических широтах неодинаков. Так, например, в Москве высота Полярной звезды около 56° , в Мурманске — 68° , во Владивостоке — 43° . Поскольку Полярная звезда отстоит от северного полюса мира примерно на 1° (её склонение $\delta \sim 89^\circ 16'$), то и высота полюса мира на разных широтах будет различной. Докажем, что всюду высота полюса мира (h_p) равна географической широте места наблюдения (φ). Для этого рассмотрим рисунок 15.

В точке O на поверхности Земли находится наблюдатель, $\angle AO_1O = \varphi$ — географическая широта места наблюдения (O). Продолжив радиус Земли OO_1 , получим направление отвесной линии OZ . Плоскость горизонта, как вы

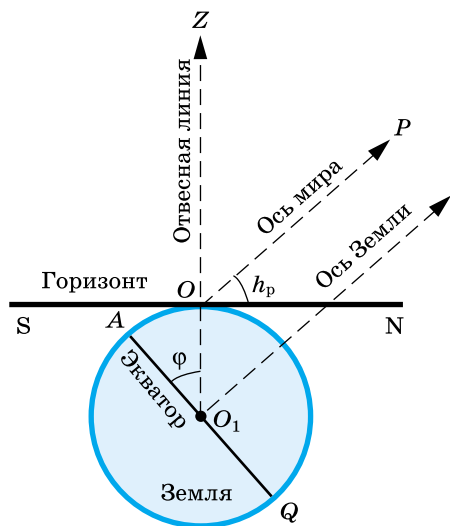


Рис. 15. Высота полюса мира равна географической широте

знаете, перпендикулярна отвесной линии и проходит через точку, в которой находится наблюдатель. Следовательно, касательная SN — полуденная линия. Наблюдатель видит северный полюс мира в направлении OP (ось мира параллельна оси Земли), $\angle PON$ — высота полюса мира (h_p). Легко видеть, что $\angle PON = \angle AO_1O$ (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами). Следовательно,

$$h_p = \varphi, \quad (2)$$

т. е. *высота полюса мира равна географической широте места наблюдения*. Поэтому приближённо географическую широту места наблюдения можно определить, измерив высоту Полярной звезды.

2. Суточное движение звёзд на разных широтах. Мы знаем (см. § 3.3), как происходит суточное вращение звёзд на средних широтах ($0^\circ < \varphi < 90^\circ$). Теперь нам предстоит узнать, каким увидит это явление наблюдатель, находящийся на Северном полюсе Земли или на земном экваторе.

Географическая широта Северного полюса Земли $\varphi = 90^\circ$. Значит, там северный полюс мира находится в зените ($h_p = 90^\circ$), небесный экватор совпадает с горизонтом, а звёзды описывают свои суточные пути над горизонтом, двигаясь параллельно ему, и не заходят. Полярную звезду наблюдатель будет видеть у себя над головой.

Географическая широта точек земного экватора $\varphi = 0^\circ$. Полярная звезда видна там вблизи горизонта ($h_p = 0^\circ$). Плоскость небесного экватора перпендикулярна к плоскости горизонта. Все звёзды на земном экваторе восходят и заходят, а их суточные пути расположены отвесно по отношению к горизонту. Следовательно, уже по расположению суточных параллелей по отношению к горизонту можно получить представление о географической широте места.

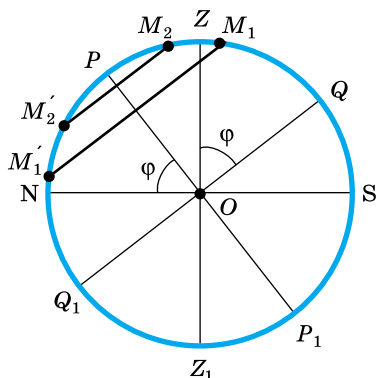


Рис. 16. Небесная сфера в проекции на плоскость меридиана

3*. Связь между δ , z (или h) и φ . Некоторые важные для практических целей соотношения легко получить, проецируя сферу на плоскость небесного меридиана (рис. 16). В точке M_1 находится светило, верхняя кульминация которого происходит к югу от зенита (склонение светила δ_1 , а зенитное расстояние z_1). $Z\tilde{Q} = \varphi$, так как $Z\tilde{Q} = P\tilde{N} = h_p$, $Z\tilde{M}_1 = z_1$, а $Q\tilde{M}_1 = \delta_1$. Поскольку $Z\tilde{Q} = Q\tilde{M}_1 + Z\tilde{M}_1$, то

$$\varphi = \delta_1 + z_1. \quad (3)$$

Учитывая, что $z = 90^\circ - h$ (1), равенство (3) можно представить в виде

$$\varphi = \delta_1 + (90^\circ - h_1). \quad (3')$$

Теперь рассмотрим светило, верхняя кульминация которого происходит к северу от зенита (например, в точке M_2).

Находим, что $z_2 = Z\tilde{M}_2$, а $\delta_2 = Q\tilde{M}_2$. Так как $Q\tilde{M}_2 - Z\tilde{M}_2 = Z\tilde{Q} = \varphi$, то

$$\varphi = \delta_2 - z_2, \quad (4)$$

или с учётом зависимости (1)

$$\varphi = \delta_2 - (90^\circ - h_2). \quad (4')$$

Из формул (3') и (4') следует, что, измерив в момент верхней кульминации высоту (зенитное расстояние) светила и взяв из каталога склонение этого светила, можно

вычислить географическую широту места наблюдения. Формулы (3) и (4) легко объединить в одну:

$$\varphi = \delta \pm z. \quad (5)$$

Если же географическая широта известна, то легко вычислить *высоту светила в верхней кульминации*:

$$h_1 = 90^\circ - \varphi + \delta_1 \quad (3'')$$

(для светила, кульминирующего к югу от зенита);

$$h_2 = 90^\circ + \varphi - \delta_2 \quad (4'')$$

(для светила, кульминирующего к северу от зенита).

Пример 1. Какой наибольшей высоты достигает звезда Вега ($\delta = +38^\circ 47'$) в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$)?

Дано:

$$\delta = +38^\circ 47'$$

$$\varphi = 55^\circ 45'$$

h — ?

Решение:

Сделав чертёж небесной сферы в проекции на плоскость меридиана, убеждаемся, что нужно воспользоваться формулой (3'')

$$\begin{aligned} h &= 90^\circ - \varphi + \delta = \\ &= 90^\circ - 55^\circ 45' + 38^\circ 47' = 73^\circ 02', \end{aligned}$$

т. е. в момент верхней кульминации Вега будет находиться над точкой юга на высоте $73^\circ 02'$.

Ответ: $h = 73^\circ 02'$.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как приближённо определить географическую широту места из наблюдения Полярной звезды? 2. Сделайте чертежи, показывающие, как происходит суточное движение звёзд на разных широтах. 3*. Пользуясь рисунком 16, докажите, что географическую широту места наблюдения можно вычислить по формуле

$$\varphi = 180^\circ - (z + \delta), \quad (6)$$

где δ и z соответственно склонение и зенитное расстояние звезды в момент нижней кульминации. 4*. Кульминируют ли светила на Северном полюсе Земли? 5. Звезда Капелла в момент верхней кульминации видна на высоте $79^\circ 17'$. Найдите географическую широту места наблюдения. 6. Незаходящая звезда наблюдается в верхней кульминации на высоте $50^\circ 46'$, а в нижней — на высоте $35^\circ 54'$. На какой географической широте находится наблюдатель? Каково склонение этой звезды? 7. Как найти страны света (стороны горизонта), ориентируясь по Солнцу? 8. По какой из известных вам формул следует вычислять полуденную высоту Солнца?

§ 6. ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

1. Введение. Периодические явления, сопровождающие суточное вращение небесной сферы и видимое годовое движение Солнца по эклиптике, лежат в основе различных систем счёта коротких и длинных промежутков времени. С некоторыми из этих систем мы и познакомимся.

2. Связь времени с географической долготой. Системы счёта времени. Момент верхней кульминации центра Солнца называется истинным полднем, а нижней — полночью. Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями центра Солнца называется истинными солнечными сутками. Их продолжительность не остаётся одинаковой на протяжении года (из-за неравномерного движения Солнца по эклиптике и её наклона к небесному экватору). Поэтому в повседневной жизни используются не истинные, а средние солнечные сутки, продолжительность которых принята постоянной.

Кульминация любой точки небесной сферы (точки весеннего равноденствия, центра Солнца, «среднего Солнца», звезды и т. д.) происходит в разное время на разных меридианах земного шара. Причём тем раньше, чем восточнее расположен пункт наблюдения. Из этого следует, что в данном месте Земли время связано с географической долготой. Пусть в данный момент на нулевом (гринвичском) меридиане среднее время T_0 (это среднее время по Гринвичу GMT; оно практически совпадает со всемирным временем UTC, от которого отсчитывается время часовых поясов); тогда в местности с географической долготой λ местное время будет T_λ , причём T_λ отличается от T_0 на число часов, минут и секунд, равное λ :

$$T_\lambda = T_0 + \lambda. \quad (7)$$

Запишем эту формулу для двух пунктов земной поверхности, расположенных на географических долготах λ_1 и λ_2 :

$$T_{\lambda_1} = T_0 + \lambda_1,$$

$$T_{\lambda_2} = T_0 + \lambda_2.$$

Отсюда следует важное соотношение, позволяющее определять географическую долготу места наблюдения:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (8)$$

Действительно, узнав разность времени в двух пунктах, долгота одного из которых известна, можно определить долготу другого пункта.

Строго говоря, время всюду своё и различно не только в пределах области, но даже большого города. Отсюда, как вы знаете из курса географии, возникла необходимость введения поясного счёта времени (в нашей стране поясное время введено 1 июля 1919 г.). Каждый часовой пояс простирается по долготе на 15° , или 1^h . Всего, следовательно, 24 часовых пояса. По территории России проходит 11 часовых поясов (от II до XII включительно). Нулевой пояс — гринвичский. Внутри каждого пояса используется время его центрального меридиана, а границы поясов проведены либо по государственным и административным границам, либо по естественным рубежам (реки, горные хребты).

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

$$T_n = T_0 + n. \quad (9)$$

Из формул (7) и (9) следует, что

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda. \quad (10)$$

На территории Российской Федерации порядок исчисления времени регулируется федеральным законом, в который вносятся поправки по мере необходимости.

К поясному времени у нас практически везде прибавляется 1 час; так получается местное время:

$$T_m = T_n + 1^h. \quad (11)$$

Московское время — это местное время в столице России. Оно обозначается МСК или MSK. Московское время отличается от всемирного на 3 часа:

$$T_M = T_0 + 3^h. \quad (11')$$

На большей части территории страны местное время отличается от московского, но всегда это отличие кратно целым числам и хорошо известно жителям региона.

В течение многих лет в нашей стране ежегодно в марте стрелки часов переводились ночью на 1 час вперёд, а в октябре — на 1 час назад. Таким образом происходил переход соответственно на летнее и зимнее (обычное) время. В 2011 г. эти переходы в России были отменены.

Во многих странах мира в целях экономии энергетических ресурсов такая система действует и в настоящее время.

В эпоху современного научно-технического прогресса измерение времени приобрело особое значение и требует самых современных методов, обеспечивающих точность времени до миллиардной доли секунды в сутки. Современная *Служба времени* оснащена *молекулярными* и *атомными часами*, дающими необходимую точность. Единица времени (секунда) включена в число основных единиц Международной системы СИ.

Пример 2. 25 мая в Москве ($n_1 = 2$) часы показывают $10^{\text{ч}}45^{\text{м}}$. Какое среднее, поясное и местное время в этот момент в Новосибирске ($n_2 = 6$, $\lambda_2 = 5^{\text{ч}}31^{\text{м}}$)?

Дано:

$$T_{\text{м}_1} = 10^{\text{ч}}45^{\text{м}}$$

$$n_1 = 2$$

$$n_2 = 6$$

$$\lambda_2 = 5^{\text{ч}}31^{\text{м}}$$

$$T_{\lambda_2} — ?$$

$$T_{n_2} — ?$$

$$T_{\text{м}_2} — ?$$

Решение:

Зная московское время $T_{\text{м}_1}$, найдём T_0 — всемирное время:

$$T_0 = T_{\text{м}_1} - n_1 - 1^{\text{ч}};$$

$$T_0 = 10^{\text{ч}}45^{\text{м}} - 2^{\text{ч}} - 1^{\text{ч}} = 7^{\text{ч}}45^{\text{м}}.$$

В этот момент в Новосибирске:

$$T_{\lambda_2} = T_0 + \lambda_2 = 7^{\text{ч}}45^{\text{м}} + 5^{\text{ч}}31^{\text{м}} = 13^{\text{ч}}16^{\text{м}};$$

$$T_{n_2} = T_0 + n_2 = 7^{\text{ч}}45^{\text{м}} + 6^{\text{ч}} = 13^{\text{ч}}45^{\text{м}};$$

$$T_{\text{м}_2} = T_{n_2} + 1^{\text{ч}} = 14^{\text{ч}}45^{\text{м}}.$$

3*. Понятие о летосчислении. Из многочисленных наблюдений известно, что промежуток времени между двумя последовательными прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия (☿) составляет 365 суток 5 часов 48 минут 46 секунд (365,2422 суток). Это тропический год. Он положен в основу солнечного календаря, т. е. счёта длительных промежутков времени, связанных со сменой сезонов года. Составление календаря затруднено тем, что *продолжительность тропического года несоизмерима с продолжительностью суток*. Чтобы начало весны приходилось примерно на один и тот же день года, календарный год должен содержать целое число суток с общей продолжительностью, близкой к продолжительности тропического года.

В юлианском календаре (*старый стиль*, введённый в 46 г. до н. э. Юлием Цезарем) средняя продолжи-

тельность года составляла 365,25 суток: три года содержали по 365 суток, а четвёртый (високосный) — 366. Мы видим, что год юлианского календаря длиннее тропического. Легко подсчитать, что за каждые 400 лет различие достигает 3 суток (и, например, весеннее равноденствие будет наступать по этому календарю на 3 дня раньше). Накопившееся расхождение было ликвидировано, когда в 1582 г. папа римский Григорий XIII ввёл *новый стиль* (григорианский календарь). В результате проведённой реформы календаря, во-первых, 5 октября 1582 г. объявили 15 октября. Во-вторых, такие годы, как 1700, 1800, 1900, 2100 (в них число сотен *не делится* на 4), решили считать *простыми*, а не високосными. Исключая годы этого типа, все остальные, номера которых делятся без остатка на 4, считаются високосными. Ошибка в одни сутки накапливается в григорианском календаре (в котором продолжительность года составляет 365,2425 суток) за 3300 лет.

В нашей стране новый стиль был введён в 1918 г. Расхождение юлианского календаря со счётом времени тогда достигло 13 суток, и день 1 февраля декретом Совнаркома предписывалось считать 14 февраля. Расхождение в 13 дней сохранится до 2100 г. (лишь после 28 февраля 2100 г. оно достигнет 14 дней).

В настоящее время обсуждается проблема создания такого календаря, в котором год более равномерно разделялся бы на полугодия, кварталы и т. д., а каждой дате соответствовал бы постоянный день недели.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1*. Вы познакомились с истинным солнечным временем, средним, местным, поясным и летним временем. Означает ли это, что реально существует много «разных времён»? 2. По какому времени мы живём? 3. Пусть во Владивостоке ($n = 9$) сейчас 15 мая 6^h50^m вечера. Какое в этот момент среднее, поясное и местное время в Омске ($\lambda = 4^{\circ}54'$, $n = 5$)? 4*. Самолёт вылетел 10 ноября из Екатеринбурга ($n = 4$) в 11^h20^m и прибыл точно по расписанию в Иркутск ($n = 7$) в 17^h45^m. Сколько времени он летел? (Моменты вылета и прибытия указаны в расписании по местному времени этих городов.) 5*. Почему нельзя раз и навсегда создать абсолютно точный календарь? 6*. М. В. Ломоносов родился 8 ноября 1711 г. Какого числа отмечалось 300-летие великого русского учёного? 7. Когда наступил XXI век (и третье тысячелетие)?



Что полезно знать, изучив тему «Введение в астрономию»

1. Астрономия изучает небесные тела (звёзды, планеты и т. д.), их системы, явления и процессы, происходящие во Вселенной.
2. Астрономия — одна из фундаментальных наук о природе, тесно связанная с физикой, математикой, науками о Земле, философией, космонавтикой.
3. Современная физика использует Вселенную как гигантскую и уникальную космическую лабораторию.
4. Астрономия необходима для развития геодезии, картографии, мореплавания, авиации, космических исследований.
5. Астрономия имеет большое значение для формирования научного мировоззрения.
6. В основу астрономии положены наблюдения, выполняемые с помощью современных наземных и космических радио- и оптических телескопов.
7. Созвездие — это участок неба, включающий в себя звёзды и другие постоянно находящиеся в нём астрономические объекты, в пределах строго определённых границ.
8. Небесная сфера — это воображаемая сфера, в центре которой находится наблюдатель. На небесной сфере возможны только угловые измерения.
9. Суточное вращение небесной сферы — следствие вращения Земли вокруг своей оси.
10. Изменение вида неба в течение года (и годичное движение Солнца по эклиптике) — результат обращения Земли вокруг Солнца.
11. Видимое суточное вращение небесной сферы и годичное движение Солнца по эклиптике убеждают нас в том, что наблюдаемые явления природы надо тщательно изучать, чтобы понять их истинную причину.
12. В основу составления каталогов, построения звёздных карт и атласов положены экваториальные координаты звёзд α и δ .
13. Введение различных систем счёта времени (местное, поясное, летнее) вызвано потребностями жизни и производственной деятельности людей.

14. Календарь представляет собой систему счёта длительных промежутков времени. Мы живём по григорианскому календарю (по новому стилю).



**Что желательно уметь, изучив тему
«Введение в астрономию»**

1. Пользоваться ПКЗН и по ней узнавать, какие созвездия видны в данный момент времени; определять α и δ звёзд и Солнца, а также по заданным координатам этих светил находить их место на карте.
- 2*. По формулам (3'') и (4'') вычислять высоты светил в верхней кульминации.
- 3*. По формулам (5) и (8) вычислять географические координаты φ и λ .
4. По формулам (9) — (11) осуществлять переход к разным системам счёта времени.
5. Находить страны света (стороны горизонта) по Полярной звезде и полуденному Солнцу.
6. Отыскивать на небе следующие созвездия и наиболее яркие звёзды в них: Большая Медведица, Малая Медведица (с Полярной звездой), Кассиопея, Лира (с Вегой), Орёл (с Альтаиром), Лебедь (с Денебом), Лев (с Регулom), Орион (с Бетельгейзе).

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

глава II.

§ 7. ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

1. Петлеобразное движение планет. Общее представление о строении Солнечной системы (рис. 17) вы получили ещё в курсе окружающего мира. Теперь вам предстоит более глубоко изучить строение Солнечной системы. Начнём с описания и анализа наблюдаемого движения планет.

Невооружённым глазом на небе можно увидеть пять планет — *Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн*. Планету по внешнему виду нелегко отличить от звезды, тем более что не всегда планета бывает значительно ярче. Планеты относятся к числу тех светил, которые не только участвуют в суточном вращении небесной сферы, но ещё и перемещаются (иногда незаметно) на фоне зодиакальных

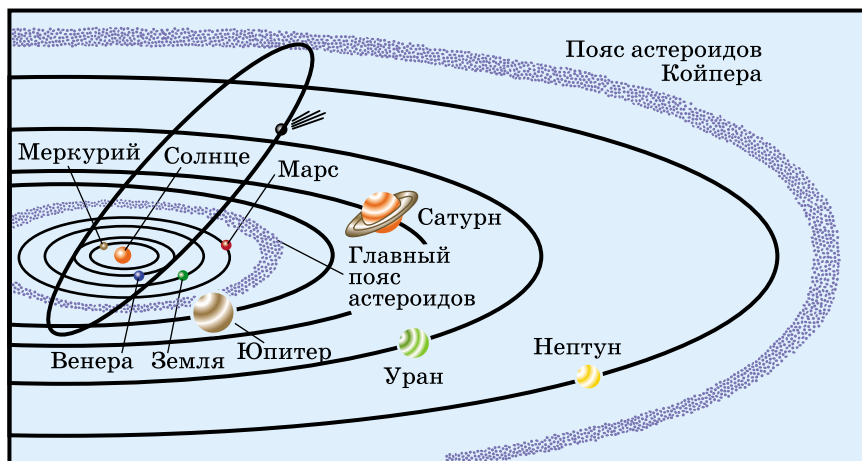


Рис. 17. Строение Солнечной системы

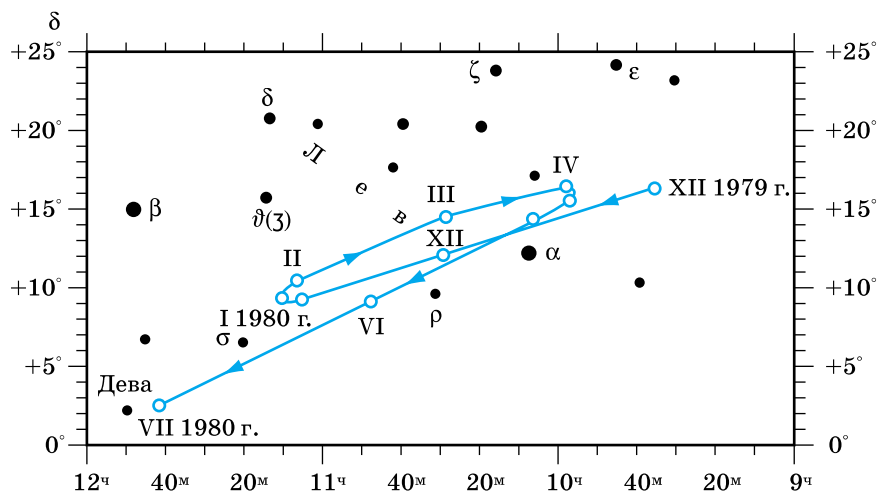


Рис. 18. Видимое движение планеты. Такую петлю описал на фоне звёздного неба Марс с ноября 1979 г. по июль 1980 г. (римские цифры означают первые числа месяцев)

созвездий. С этой особенностью планет связано само слово «планета», которым древние греки называли «блуждающие» светила. Чем лучше вы будете знать звёздное небо, тем скорее обнаружите на нём планеты как «лишние» светила в созвездиях. В восьмикратный бинокль (а лучше телескоп!) можно заметить, что Венера, Юпитер, Сатурн имеют диски в отличие от звёзд, которые в оптические инструменты видны как точечные объекты.

Если проследить за перемещением какой-нибудь планеты, например Марса, ежемесячно отмечая его положение на звёздной карте, то может выявиться главная особенность видимого движения планеты: планета описывает на фоне звёздного неба петлю (рис. 18).

Петлеобразное движение планет долгое время оставалось загадочным и, как вы скоро узнаете, нашло простое объяснение в учении Коперника.

2*. Конфигурации планет. Планеты, орбиты которых расположены внутри земной орбиты, называются нижними, а планеты, орбиты которых расположены вне земной орбиты, — верхними. Характерные взаимные расположения планет относительно Солнца и Земли называются конфигурациями планет. Конфигурации

нижних и верхних планет различны (рис. 19). У нижних планет это соединения (*верхнее и нижнее*) и элонгации (*восточная и западная*; это наибольшие угловые удаления планеты от Солнца). У верхних планет — квадратуры (*восточная и западная*; слово «квадратура» означает «четверть круга»), соединение и противостояние.

Видимое движение нижних планет напоминает колебательное движение около Солнца. Нижние планеты лучше всего наблюдать вблизи элонгаций (наибольшая элонгация Меркурия — 28° , Венеры — 48°). С Земли в это время видно не всё освещённое Солнцем полушарие планеты, а лишь часть его (фаза планеты). При восточной элонгации планета видна на западе вскоре после захода Солнца, при западной — на востоке незадолго перед восходом Солнца.

Верхние планеты лучше всего видны вблизи противостояний, когда к Земле обращено всё освещённое Солнцем полушарие планеты.



Рис. 19. Конфигурации планет

3*. Сидерические (звёздные) и синодические периоды обращений планет. Промежуток времени, в течение которого планета совершает полный оборот вокруг Солнца по орбите, называется сидерическим (или звёздным) периодом обращения (T), а промежуток времени между двумя одинаковыми конфигурациями планеты — синодическим периодом (S).

Планеты движутся вокруг Солнца в одном направлении, и каждая из них через промежуток времени, равный её сидерическому периоду, совершит один полный оборот вокруг Солнца. Через промежуток времени, равный, например, сидерическому периоду Земли ($T_{\oplus}$), нижняя планета обгонит Землю, а верхняя отстанет от неё, т. е. первоначальная конфигурация планет не восстановится. Следовательно, синодический период не равен сидерическому. Между обоими периодами существует зависимость, её легко установить. Для этого сравним дуги, на которые в течение суток сместятся по орбите какая-нибудь планета $\left(\frac{360^\circ}{T}\right)$ и Земля $\left(\frac{360^\circ}{T_{\oplus}}\right)$. Разность этих средних перемещений есть наблюдаемое суточное смещение планеты $\left(\frac{360^\circ}{S}\right)$. Значит, для нижней планеты, которая движется по орбите быстрее Земли, можно написать:

$$\frac{360^\circ}{S} = \frac{360^\circ}{T} - \frac{360^\circ}{T_{\oplus}}$$

или

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}}, \quad (12)$$

а для верхней, которая движется медленнее, чем Земля, —

$$\frac{360^\circ}{S} = \frac{360^\circ}{T_{\oplus}} - \frac{360^\circ}{T}$$

или

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) называются *уравнениями синодического движения*. В них $T_{\oplus} = 1$ году (или 365,26 сут.).

Пример 3. Как часто повторяются противостояния Марса, сидерический период которого 1,9 года?

Дано:

$$T_{\oplus} = 1 \text{ год}$$

$$T = 1,9 \text{ года}$$

$$S = ?$$

Решение:

Очевидно, нужно найти синодический период этой (верхней) планеты. Для этого воспользуемся формулой (13):

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}; \quad \frac{1}{S} = \frac{T - T_{\oplus}}{T_{\oplus} T};$$

$$S = \frac{T_{\oplus} T}{T - T_{\oplus}} = \frac{1,9}{0,9} \approx 2,1 \text{ (года)}.$$

Ответ: $S = 2,1$ года.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Почему на звёздных картах не указывают положение планет?
2. Пользуясь «Школьным астрономическим календарём», выясните, в какие месяцы данного года (и в каких созвездиях) можно наблюдать Марс, Юпитер, Сатурн.
3. Какие планеты относятся к нижним, а какие — к верхним?
4. Рассмотрите, каким бывает взаимное расположение планет во время соединений, элонгаций, противостояний и квадратур (см. рис. 19), и дайте определение каждой конфигурации.
5. Почему соединения не считают удобными конфигурациями для наблюдения нижних и верхних планет?
6. Во время каких конфигураций хорошо видны верхние планеты и во время каких — нижние планеты?
7. Какие планеты могут пройти на фоне диска Солнца, а какие не могут?
8. Нижние соединения Венеры повторяются каждые 1,6 года. За сколько земных суток эта планета делает полный оборот вокруг Солнца?
9. Зная, что Юпитер совершает один оборот вокруг Солнца за 12 лет, найдите промежуток времени между его противостояниями.

§ 8. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

1. Астрономия в древности. Трудно точно сказать, когда именно зародилась астрономия: до нас почти не дошли сведения, относящиеся к доисторическим временам. В ту отдалённую эпоху, когда люди были совершенно бессильны перед природой, возникла вера в могущественные сверхъестественные силы, которые будто бы создали мир и управляют им. На протяжении многих веков обожествлялись Луна, Солнце, планеты. Об этом мы знаем из *мифов* всех народов мира.

Первые представления о мироздании были очень наивными, они тесно переплетались с религиозными верованиями, в основу которых было положено разделение мира на две части — земную и небесную. Если сейчас каждый школьник знает, что Земля сама является небесным телом, то раньше «земное» противопоставлялось «небесному». Думали, что существует «твёрдь небесная», к которой прикреплены звёзды, а Землю принимали за неподвижный центр мироздания.

2. Геоцентрические системы мира. Представление о центральном положении Земли во Вселенной впоследствии было положено учёными Древней Греции в основу геоцентрических систем мира. Так, крупнейший греческий философ и учёный-энциклопедист *Аристотель* (384—322 гг. до н. э.), уже знавший (из наблюдений *лунных затмений*) о шарообразности Земли, считал, что Земля неподвижна. Он отмечал, что если бы Земля двигалась, то это движение можно было бы обнаружить по изменению положений звёзд на небе. На самом деле такие кажущиеся (или *параллактические*) смещения звёзд происходят, но из-за огромной удалённости звёзд эти смещения ничтожно малы и были впервые обнаружены лишь в XIX в.

Достижения античной астрономии во II в. н. э. обобщил александрийский астроном *Клавдий Птолемей* (ок. 87—165). Он разработал геоцентрическую систему мира, согласно которой вокруг неподвижной Земли движутся Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн и «сфера неподвижных звёзд». На протяжении многих веков церковь поддерживала геоцентрическую систему мира, в которой, как и в самом церковном учении, Земле отводилось положение центра Вселенной.

Несмотря на то что система мира Птолемея основывалась на совершенно ошибочных представлениях о строении Вселенной, она всё же объясняла многие особенности видимого движения небесных светил, и в частности петлеобразное движение планет. Этого Птолемей добился, рассматривая движение каждой планеты как комбинацию нескольких равномерных движений. Например, считалось, что планета не просто движется вокруг Земли, а движется около точки, которая сама обращается вокруг Земли. Таблицы, составленные Птолемеем, позволяли определить заранее положение

ние планет на небе. Но с течением времени астрономы обнаружили расхождение наблюдаемых положений планет с предвычисленными. На протяжении веков думали, что система мира Птолемея просто недостаточно совершенна, и, пытаясь усовершенствовать её, вводили для каждой планеты новые и новые комбинации круговых движений.



Николай Коперник
(1473—1543)

3. Гелиоцентрическая система мира. Свою систему мира великий польский астроном *Николай Коперник* (1473—1543) изложил в книге «О вращении небесных сфер», вышедшей в год его смерти. Согласно его учению в центре мира находится не Земля, а Солнце. Вокруг Земли движется лишь Луна. Сама же Земля является третьей по удалённости от Солнца (после Меркурия и Венеры) планетой. Она обращается вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси. За орбитой Земли расположены орбиты Марса, Юпитера и Сатурна. На очень большом расстоянии от Солнца Коперник поместил «сферу неподвижных звёзд».

Система мира, предложенная Коперником, называется гелиоцентрической. Он просто и естественно объяс-

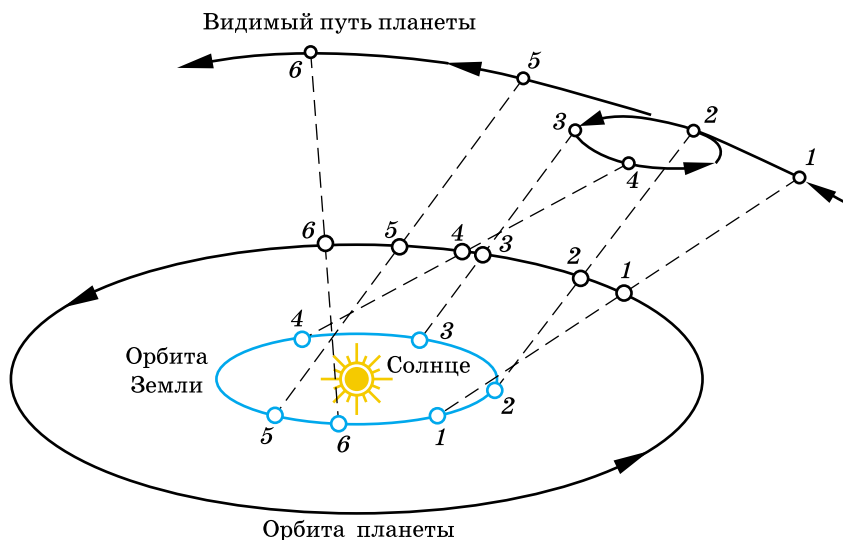


Рис. 20. Объяснение петлеобразного движения планет

нил петлеобразное движение планет тем, что мы наблюдаем обращающиеся вокруг Солнца планеты не с неподвижной Земли, а с Земли, движущейся тоже вокруг Солнца (рис. 20). Коперник впервые в астрономии не только дал правильную схему строения Солнечной системы, но и определил относительные расстояния (в единицах расстояния Земли от Солнца) планет от Солнца и вычислил период их обращения вокруг него.

Учение Коперника нанесло сокрушительный удар геоцентрической системе мира. Оно далеко вышло за рамки астрономической науки, став мощным толчком для развития всего естествознания.

4. Становление гелиоцентрического мировоззрения. Учение Коперника было признано не сразу. Вы знаете, например, что по приговору инквизиции в 1600 г. был сожжён в Риме выдающийся итальянский философ, последователь Коперника *Джордано Бруно* (1548—1600). Бруно, развивая учение Коперника, утверждал, что во Вселенной нет и не может быть центра, что Солнце — это только центр Солнечной системы. Он высказал гениальную догадку о том, что звёзды — такие же солнца, как наше, причём вокруг бесчисленных звёзд движутся планеты, на многих из которых существует разумная жизнь. Ни пытки, ни костёр инквизиции не сломили волю Джордано Бруно, не заставили его отказаться от выступлений против «отцов» католической церкви и отречься от нового учения.

В 1609 г. *Галилео Галилей* (1564—1642) собрал и впервые направил на небо телескоп, сделав открытия, наглядно подтверждающие учение Коперника. На Луне он увидел *горы*. Значит, поверхность Луны в какой-то степени сходна с земной и не существует принципиального различия между «земным» и «небесным». Галилей открыл *четыре спутника Юпитера*. Их движение вокруг Юпитера опровергало ошибочное представление о том, что только Земля может быть центром движения небесных тел. Галилей обнаружил, что Венера, подобно Луне,



Галилео Галилей
(1564—1642)

меняет свои *фазы*. Следовательно, Венера — шарообразное тело, которое светит отражённым солнечным светом. Изучая особенности изменения вида Венеры, Галилей сделал правильный вывод о том, что она движется не вокруг Земли, а вокруг Солнца. На Солнце, олицетворявшем «небесную чистоту», Галилей открыл *пятна* и, наблюдая за ними, установил, что Солнце вращается вокруг своей оси. Значит, различным небесным телам, например Солнцу, присуще осевое вращение. Наконец, он обнаружил, что *Млечный Путь* — это множество слабых звёзд, не различимых невооружённым глазом. Следовательно, Вселенная значительно грандиознее, чем думали раньше, и крайне наивно было предполагать, что она за сутки совершает полный оборот вокруг маленькой Земли.

Открытия Галилея умножили число сторонников гелиоцентрической системы мира и одновременно заставили церковь усилить преследования коперниканцев. В 1616 г. книга Коперника «О вращении небесных сфер» была внесена в список запрещённых книг, а изложенное в ней учение объявлено противоречащим Священному Писанию. Галилею запретили пропагандировать учение Коперника. Однако в 1632 г. ему всё-таки удалось опубликовать книгу «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», в которой он сумел убедительно показать истинность гелиоцентрической системы, чем и навлёк на себя гнев католической церкви. В 1633 г. Галилей предстал перед судом инквизиции. Престарелого учёного заставили подписать «отречение» от своих взглядов и до конца жизни держали под надзором инквизиции. Лишь в 1992 г. церковь окончательно оправдала Галилея.

Казнь Бруно, официальный запрет учения Коперника, суд над Галилеем не смогли остановить распространения коперниканства. В Австрии *Иоганн*



Иоганн Кеплер
(1571—1630)



Исаак Ньютон
(1643—1727)



Михаил Васильевич
Ломоносов
(1711—1765)

Кеплер (1571—1630) развил учение Коперника, открыв законы движения планет. В Англии *Исаак Ньютон* (1643—1727) опубликовал свой знаменитый закон всемирного тяготения. В России учение Коперника смело поддерживал *М. В. Ломоносов* (1711—1765), который открыл атмосферу на Венере, защищал идею о множественности обитаемых миров и в остроумных стихах высмеивал сторонников геоцентризма.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. В чём сущность и значение открытия Коперника? 2. Какое обоснование и развитие получили идеи гелиоцентризма в трудах Бруно, Галилея и Ломоносова? 3. Каково значение открытий Галилея и почему спустя века церковь была вынуждена оправдать великого учёного? Попробуйте обосновать свой ответ.

§ 9. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА — ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

С древнейших времён считалось, что небесные тела движутся по «идеальным кривым» — окружностям. В теории Коперника круговое движение также не подвергалось сомнению. Однако в XVII в. выяснилось, что на самом деле орбиты небесных тел отличаются от окружностей. Это важное открытие принадлежит Иоганну Кеплеру.

Кеплер не сомневался в правильности основных положений учения Коперника, но он знал, что существуют расхождения между предвычисленными и наблюдаемыми положениями планет. Чтобы ликвидировать это несоответствие, пришлось отказаться от кругового и равномерного движения планет. Для определения гелиоцентрических орбит планет Кеплер использовал результаты наблюдений датского астронома *Тихо Браге* (1546—1601). Особенно тщательно Кеплер изучал движение Марса. Итог его многолетних работ — открытие трёх основных законов движения планет. Эти законы носят имя Кеплера.

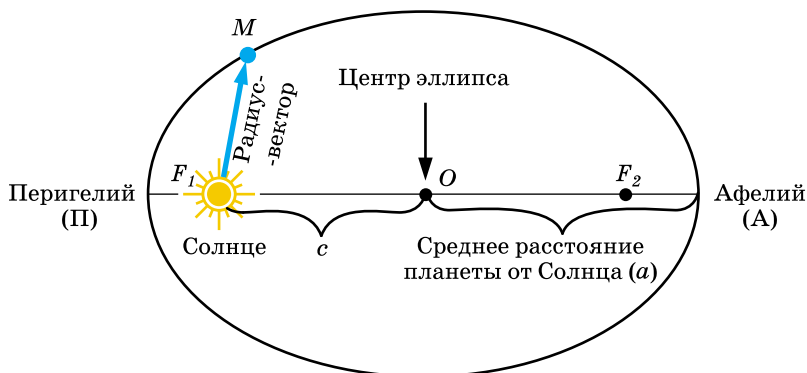


Рис. 21. Орбита планеты — эллипс

1. Первый закон Кеплера. Орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов (F_1) которого находится Солнце (рис. 21).

Форму эллипса, степень его отличия от окружности характеризует отношение

$$e = \frac{c}{a}, \quad (14)$$

где c — расстояние от центра эллипса до его фокуса; a — большая полуось. Величина e называется эксцентриситетом эллипса. Чем больше e , тем больше эллипс отличается от окружности. Если $c = 0$ (фокусы совпадают с центром), то $e = 0$ и эллипс превращается в окружность радиусом a .

Орбиты Венеры и Земли близки к окружностям (эксцентриситет орбиты Венеры — 0,0068, Земли — 0,0167). Орбиты большинства других планет более вытянуты.

Ближайшую к Солнцу точку орбиты (П) называют перигелием (греч. *peri* — возле, около; *Гелиос* — Солнце), а наиболее удалённую (А) — афелием (греч. *apo* — вдали). Нетрудно убедиться, что большая полуось орбиты планеты — это её среднее расстояние от Солнца. Среднее расстояние Земли от Солнца принято в астрономии за единицу расстояния и называется астрономической единицей (а. е.):

$$1 \text{ а. е.} = 149\,600\,000 \text{ км.}$$

По эллипсам движутся не только планеты, но и их естественные и искусственные спутники. Ближайшая к Земле точка орбиты Луны или какого-нибудь искусственного спутника Земли называется перигеем (греч. *Гей*, или *Ге*, — Земля), а наиболее удалённая — апогеем. У орбит

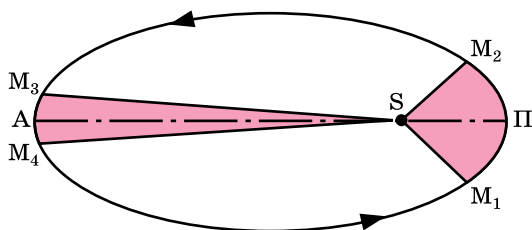


Рис. 22. Второй закон Кеплера

искусственных спутников Луны соответствующие точки получили названия периселений (греч. *Селена* — Луна) и апоселений.

2. Второй закон Кеплера. *Радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равные площади.*

Площади M_1SM_2 и M_3SM_4 (рис. 22) равны. Отрезки орбиты M_1M_2 и M_3M_4 планета проходит за одинаковые промежутки времени. Но $M_1M_2 > M_3M_4$. Значит, планета движется вокруг Солнца (S) неравномерно: линейная скорость планеты вблизи перигелия больше, чем вблизи афелия.

3. Третий закон Кеплера. *Квадраты сидерических периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.*

Если большие полуоси орбит двух планет, обращающихся вокруг Солнца, будут a_1 и a_2 , а периоды обращений T_1 и T_2 , то третий закон Кеплера можно записать в виде

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (15)$$

Как и первые два, третий закон Кеплера применим не только к движению планет, но и к движению их естественных и искусственных спутников.

Пример 4. За какое время Марс, находящийся от Солнца примерно в полтора раза дальше, чем Земля, совершает полный оборот вокруг Солнца?

Дано:

$$a_1 = 1,5 \text{ а. е.}$$

$$a_{\oplus} = 1 \text{ а. е.}$$

$$T_{\oplus} = 1 \text{ год}$$

$$T_1 = ?$$

Решение:

$$\frac{T_1^2}{T_{\oplus}^2} = \frac{a_1^3}{a_{\oplus}^3}; \quad T_1 = \sqrt{\frac{T_{\oplus}^2 a_1^3}{a_{\oplus}^3}};$$

$$T_1 = \frac{T_{\oplus} a_1}{a_{\oplus}} \sqrt{\frac{a_1}{a_{\oplus}}}; \quad T_1 = 1,5\sqrt{1,5} \text{ года} \approx 1,9 \text{ года.}$$

Ответ: $T_1 \approx 1,9$ года.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Почему большую полуось орбиты планеты отождествляют с её средним расстоянием от Солнца? 2. За 84 земных года Уран совершает один оборот вокруг Солнца. Во сколько раз он дальше от Солнца, чем Земля?

§ 10. ОБОБЩЕНИЕ И УТОЧНЕНИЕ НЬЮТОНОМ ЗАКОНОВ КЕПЛЕРА

1. Закон всемирного тяготения. Напомним известную из курса физики формулировку закона всемирного тяготения: *все тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.*

Закон всемирного тяготения записывается в виде

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (16)$$

где m_1 и m_2 — массы тел; r — расстояние между их центрами; G — постоянная всемирного тяготения (в СИ $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$).

Из физики вы знаете, что гравитация — общее свойство всех тел в природе. Исключительно важную роль она играет в мире небесных тел; ею объясняются не только почти все движения, но и многие процессы, связанные с образованием и развитием небесных тел. Если законы Кеплера отвечают на вопрос, по каким траекториям движутся небесные тела, то закон всемирного тяготения отвечает на вопрос, какая сила удерживает планеты около Солнца, спутники около планет и т. д.

Раздел астрономии, исследующий движения небесных тел под действием их взаимного притяжения, называется небесной механикой. Законы Кеплера и закон всемирного тяготения — основные законы небесной механики.

2. Возмущения. Открытие Нептуна. Строго эллиптическое движение происходит под действием притяжения одного тела. Но любая планета испытывает притяжение со стороны других планет, своих спутников и т. д. В результате возникают отклонения от эллиптической траектории, которые называются в небесной механике возмущениями.

Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн были известны людям с глубокой древности. Мысль о том, что наша Земля — тоже планета Солнечной системы, впервые была научно обоснована Н. Коперником. Планету, находящуюся за орбитой Сатурна и не видимую невооружённым глазом, открыл в 1781 г. с помощью телескопа английский астроном (профессиональный музыкант, который начал заниматься астрономией как любитель) *Уильям Гершель* (1738—1822). Она была названа *Ураном*. Основываясь на законах небесной механики, астрономы вычислили орбиту Урана, но довольно скоро выяснилось, что в движении новой планеты заметны отклонения от кеплеровской орбиты. Наблюдаемые отклонения могли означать либо то, что действие закона всемирного тяготения ограничено лишь близкими планетами, либо то, что за Ураном есть ещё какая-нибудь планета, возмущающая его движение. Сделав именно это, второе предположение, астрономы решили попытаться открыть новую планету, вычислив её положение в пространстве. Независимо друг от друга такую задачу удалось решить двум молодым математикам — англичанину *Джону Адамсу* (1819—1892) и французу *Урбену Леверье* (1811—1877). Астроном Берлинской обсерватории *Иоганн Галле* (1812—1910), получив телеграмму от Леверье с просьбой поискать планету в указанном месте, 23 сентября 1846 г. обнаружил в созвездии Водолея светило, которого не было на звёздной карте. Так была открыта восьмая планета Солнечной системы, названная *Нептуном*. Это был триумф небесной механики, торжество гелиоцентрической системы.

3. Законы Кеплера в формулировке Ньютона. Как вы уже знаете, Кеплер открыл свои законы эмпирическим путём. Ньютон вывел законы Кеплера из закона всемирного тяготения. Он доказал, что *под действием силы тяготения одно небесное тело может двигаться по отношению к другому по окружности, эллипсу, параболе и гиперболе*. В этом заключается первый обобщённый Ньютоном закон Кеплера. Он имеет универсальный характер и справедлив для любых тел, между которыми действует взаимное тяготение. Ему подчиняется и движение искусственных небесных тел.

Напомним, что форма орбиты зависит от модуля и направления начальной скорости (рис. 23).

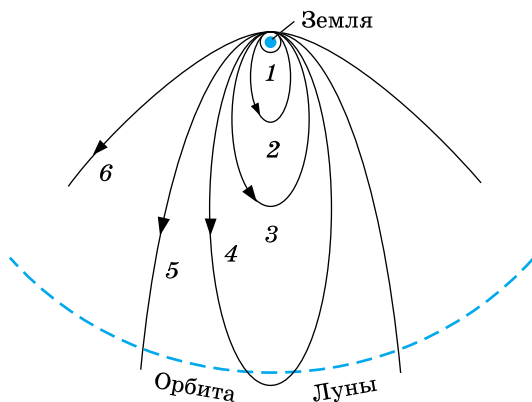


Рис. 23. Зависимость формы орбиты искусственного небесного тела от начальной скорости v_0 (векторы скоростей во всех случаях направлены горизонтально, т. е. перпендикулярно радиусу Земли):

1 — круговая ($v_0 = 7,9$ км/с); 2, 3, 4 — эллиптические (при v_0 соответственно равных 10,0 км/с; 11,0 км/с; 11,1 км/с); 5 — параболическая ($v_0 \approx 11,2$ км/с); 6 — гиперболическая ($v_0 \approx 12,0$ км/с)

Формулировка второго закона Кеплера не потребовала обобщения.

Для определения масс небесных тел важное значение имело обобщение Ньютоном третьего закона Кеплера на любые системы обращающихся тел. Если, в частности, массивным (центральным) телом является Солнце, то для него и двух движущихся вокруг него планет третий закон Кеплера будет иметь вид

$$\frac{T_1^2(M_\odot + m_1)}{T_2^2(M_\odot + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (17)$$

т. е. *квадраты сидерических периодов планет (T_1^2 и T_2^2), умноженные на сумму масс Солнца и планеты ($M_\odot + m_1$ и $M_\odot + m_2$), относятся как кубы больших полуосей орбит планет (a_1^3 и a_2^3).*

Можно применить третий закон Кеплера и к другим системам, например к движению планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты. Обозначим массы Солнца, планеты и её спутника соответственно через $M_\odot$, m и m_1 , периоды обращения планеты вокруг Солнца и спутника

вокруг планеты — через T и T_1 , и, наконец, средние расстояния планеты от Солнца и спутника от планеты — через a и a_1 . Тогда третий закон Кеплера можно записать в виде

$$\frac{T^2(M_{\odot} + m)}{T_1^2(m + m_1)} = \frac{a^3}{a_1^3}.$$

Масса Солнца во много раз больше массы любой из планет, т. е. $M_{\odot} \gg m$. Масса планеты обычно также очень велика по сравнению с массой спутника (исключение составляют Земля и Луна, а также карликовая планета Плутон с её наибольшим спутником Хароном), т. е. $m \gg m_2$. Поэтому с достаточной степенью точности можно вычислить отношение массы Солнца к массе планеты по формуле

$$\frac{M_{\odot}}{m} = \left(\frac{T_1}{T}\right)^2 \left(\frac{a}{a_1}\right)^3. \quad (18)$$

Формула (18) была получена при рассмотрении движения планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты. Аналогичный вид будет иметь формула для определения массы планеты (имеющей спутник!), если эту систему небесных тел сравнить с другой планетой и её спутником:

$$\frac{m'}{m_1} = \left(\frac{T'_1}{T'}\right)^2 \left(\frac{a'}{a'_1}\right)^3, \quad (18')$$

где m' и m'_1 соответственно массы сравниваемых планет; T' и T'_1 — периоды обращения спутников планет; a' и a'_1 — средние расстояния между спутниками планет и планетами.

Пример 5. Вычислите массу Юпитера, зная, что один из его спутников (Ио) совершает оборот вокруг планеты за 1,77 сут. на расстоянии 422 тыс. км от Юпитера.

Для решения задачи сравним обращение Ио вокруг Юпитера с обращением Луны вокруг Земли. Массу Земли $M_{\oplus}$ примем за единицу (т. е. $m'_1 = M_{\oplus} = 1$), период обращения Луны 27,32 сут. ($T'_1 = 27,32^{\text{д}}$ — такое обозначение для суток принято в астрономии), а среднее расстояние Луны от Земли $a'_1 = 384$ тыс. км.

Дано:

$$m'_1 = M_{\oplus} = 1$$

$$T'_1 = 27,32^{\text{д}}$$

$$a'_1 = 3,84 \cdot 10^5 \text{ км}$$

$$T' = 1,77^{\text{д}}$$

$$a' = 4,22 \cdot 10^5 \text{ км}$$

$$m' \text{ — ?}$$

Решение:

$$m' = \left(\frac{T'_1}{T'} \right)^2 \left(\frac{a'}{a'_1} \right)^3 m'_1;$$

$$m' = \frac{(27,32)^2 \cdot (4,22 \cdot 10^5)^3}{(1,77)^2 \cdot (3,84 \cdot 10^5)^3} m'_1 \approx 317 m'_1.$$

$$\text{О т в е т: } m' \approx 317 M_{\oplus}.$$

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Сформулируйте законы, лежащие в основе небесной механики.
2. На чём основывались открытые Кеплером законы? 3. В чём заключается обобщение Ньютоном законов Кеплера? 4. Докажите, что формула (15), полученная Кеплером из анализа данных наблюдений, есть частный случай формулы (17).
- 5*. Почему иногда говорят, что Нептун был открыт «на кончике пера»?
6. Какую важную физическую величину можно вычислить из обобщённого Ньютоном третьего закона Кеплера? 7*. Сравните массу Урана с массой Земли, зная, что один из спутников Урана (Титания) обращается вокруг планеты с периодом 8 сут. 17 ч на расстоянии 438 тыс. км.
- 8*. За какое время Земля совершала бы оборот вокруг Солнца, если бы масса Солнца была вдвое больше нынешней, при том же расстоянии Земли от Солнца?

§ 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И РАЗМЕРОВ ЭТИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

1. Определение расстояний по параллаксам светил.

Допустим, что из точки A нужно определить расстояние до недоступной точки C (рис. 24). Для этого прежде всего тщательно измеряется расстояние до какой-нибудь доступной точки B . Отрезок AB называется **базисом**. Далее из точек A и B угломерным геодезическим инструментом измеряют $\angle CAB$ и $\angle ABC$. Таким образом, в треугольнике ABC известны углы и сторона $AB = c$. Остальные элементы треугольника ABC можно вычислить по формулам тригонометрии.

Угол ACB , под которым из недоступного места виден базис, называется **параллаксом**. При данном расстоянии до предмета параллакс тем больше, чем больше базис.

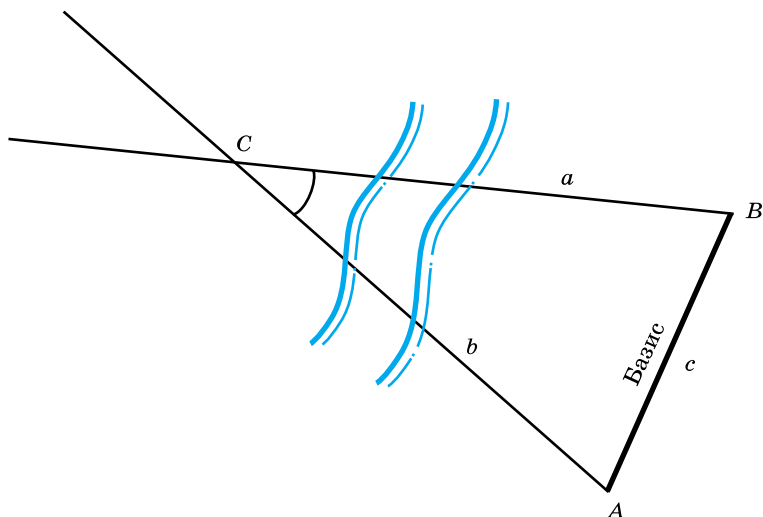


Рис. 24. Определение расстояния до недоступного предмета

В пределах Солнечной системы в качестве базиса используют экваториальный радиус Земли. Рассмотрим прямоугольный треугольник (рис. 25), вершинами которого являются центр светила O_1 , центр Земли O и точка, изображающая местоположение наблюдателя K . Как следует из чертежа, наблюдатель видит светило на горизонте. Угол p_0 , под которым со светила, находящегося на горизонте, был бы виден экваториальный радиус Земли, называется горизонтальным экваториальным параллаксом светила. Конечно, со светила никто не наблюдает радиус Земли, а горизонтальный параллакс определяют по измерениям высоты светила в момент верхней кульминации из двух точек земной поверхности, находящихся на одном географическом меридиане и имеющих известные географические широты.

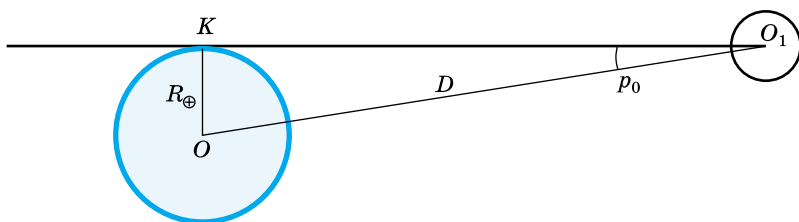


Рис. 25. Горизонтальный параллакс светила

Если горизонтальный параллакс (p_0) найден, то расстояние до светила вычисляется по формуле

$$D = \frac{R_{\oplus}}{\sin p_0}, \quad (19)$$

где D — расстояние от центра Земли до центра какого-нибудь тела Солнечной системы; $R_{\oplus}$ — экваториальный радиус Земли (сущность способа определения радиуса Земли будет изложена в § 12); p_0 — горизонтальный параллакс светила.

Наибольший горизонтальный параллакс имеет ближайшее к Земле небесное тело — Луна ($p_{\zeta} = 57'02''$). Параллаксы планет и Солнца составляют всего лишь несколько секунд дуги ($p_{\odot} = 8,79''$). Поскольку углы p_0 малы, то их синусы можно заменить самими углами, т. е. $\sin p_0 \approx p_0$, если значение угла выражено в радианах. Но p_0 обычно выражено в секундах дуги, поэтому $\sin p_0 \approx \frac{p_0}{206\,265''}$, так как

1 рад = $57,3^\circ = 3438' = 206\,265''$. Учитывая это, формулу (19) можно записать в виде

$$D = \frac{206\,265''}{p_0} R_{\oplus}, \quad (20)$$

здесь p_0 выражено в секундах дуги, а D в зависимости от $R_{\oplus}$ — либо в километрах (если $R_{\oplus}$ — в километрах), либо в радиусах Земли.

Пример 6. Зная горизонтальный параллакс Луны ($57'02''$) и экваториальный радиус Земли (6378 км), найдите расстояние от Земли до Луны.

Дано:

$$p_{\zeta} = 57'02''$$

$$R_{\oplus} = 6378 \text{ км}$$

$$D_{\zeta} = ?$$

Решение:

$$D = \frac{206\,265''}{p_0} R_{\oplus};$$

$$D_{\zeta} = \frac{206\,265'' \cdot 6378 \text{ км}}{3422''} \approx 384\,400 \text{ км.}$$

О т в е т: $D_{\zeta} = 384\,400 \text{ км.}$

2. Радиолокационный метод. Он заключается в том, что на небесное тело посылают мощный кратковременный импульс, а затем принимают отражённый сигнал. Скорость распространения радиоволн равна скорости света в вакууме: $c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$. Поэтому если точно измерить вре-

мя, которое потребовалось сигналу, чтобы дойти до небесного тела и возвратиться обратно, то легко вычислить искомое расстояние. Идея непосредственного метода определения расстояния до небесных тел (в частности, расстояния между Землёй и Луной) была обоснована отечественными физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

Радиолокационные наблюдения позволяют с большой точностью определять расстояния до небесных тел Солнечной системы. Этот метод позволил уточнить расстояния до Луны, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера.

Для космических полётов необходимо с большой точностью определять значение астрономической единицы. Ещё сравнительно недавно астрономическая единица была известна с точностью до нескольких десятков тысяч километров. Из радиолокационных наблюдений Венеры получено следующее значение астрономической единицы:

$$1 \text{ а. е.} = (149\,597\,868 \pm 0,7) \text{ км.}$$

Округлённому значению астрономической единицы (149 600 000 км) соответствует параллакс Солнца $p_{\odot} = 8,7940''$.

3*. Лазерная локация Луны. Вскоре после изобретения мощных источников светового излучения — оптических квантовых генераторов (лазеров) — стали проводиться опыты по лазерной локации Луны. Метод лазерной локации аналогичен радиолокации, однако точность измерения значительно выше. Оптическая локация даёт возможность определить расстояние между выбранными точками лунной и земной поверхности с точностью до сантиметров. Такая высокая точность нужна для решения ряда задач космической геодезии, выяснения вопросов о движении земных континентов, дальнейшего развития космических исследований.

4. Определение размеров тел Солнечной системы. Прежде всего познакомимся с методом определения радиуса Земли. Принимая Землю за шар радиуса $R_{\oplus}$, измеряют линейное (l , например, в километрах) и угловое (n , например, в градусах) расстояния между двумя пунктами земной поверхности, расположенными на одном географическом меридиане (рис. 26). Затем вычисляют длину дуги, соответствующую 1° этого меридиана, а потом и радиус Земли.

Пусть l — длина дуги AB , а центральный угол, опирающийся на эту дугу и равный разности географических широт точек A и B , $\angle AOB = n$ (O — центр Земли), тогда длина дуги 1° меридиана будет равна $\frac{l}{n} = \frac{2\pi R_\oplus}{360^\circ}$, а значит,

$$R_\oplus = \frac{180^\circ l}{\pi n}. \quad (21)$$

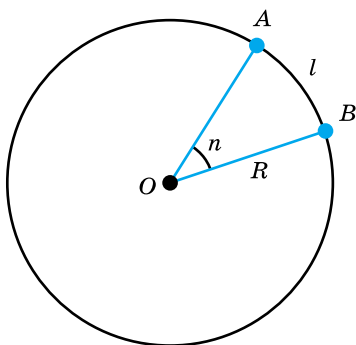


Рис. 26. Вычисление радиуса Земли

При наблюдениях небесных тел Солнечной системы можно измерить угол, под которым они видны земному наблюдателю. Зная этот угловой радиус светила ρ и расстояние до светила D , можно вычислить линейный радиус R (рис. 27):

$$R = D \sin \rho. \quad (22)$$

Учитывая формулу (19), получим

$$R = \frac{\sin \rho}{\sin p_0} R_\oplus. \quad (22')$$

А так как углы ρ и p_0 малы, то

$$R = \frac{\rho}{p_0} R_\oplus. \quad (23)$$

Пример 7. Во сколько раз линейный радиус Солнца превышает радиус Земли, если угловой радиус Солнца $16'$?

Дано:

$$\rho_\odot = 16'$$

$$p_\odot = 8,8''$$

$R_\odot$ — ?

Решение:

$$R_\odot = \frac{\rho_\odot}{p_\odot} R_\oplus;$$

$$R_\odot = \frac{16 \cdot 60''}{8,8''} R_\oplus \approx 109 R_\oplus;$$

$$\text{О т в е т: } R_\odot = 109 R_\oplus.$$

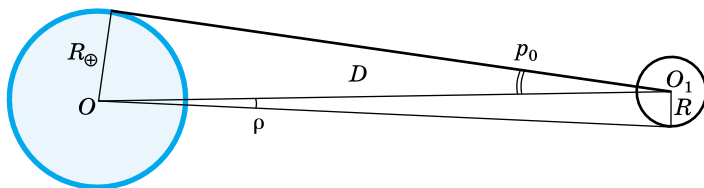


Рис. 27. Определение линейных размеров тел Солнечной системы

? Вопросы и задания для самоконтроля

1*. Зная угловое удаление Венеры от Солнца в элонгации и принимая орбиты Венеры и Земли за окружности, определите (как это сделал Коперник) расстояние до Венеры в единицах радиуса земной орбиты. 2. Что нужно знать для вычисления радиуса Земли? 3. Что нужно знать, чтобы вычислить расстояние до какого-нибудь тела Солнечной системы? 4. Что нужно знать, чтобы вычислить размеры какого-нибудь тела Солнечной системы? 5*. Каким оказалось расстояние между отражателем, установленным на Луне, и телескопом, расположенным на Земле, если лазерные импульсы возвратились через $2,4354567$ с? 6. Близкий к наибольшему горизонтальный параллакс Марса $23''$. Каково при этом наименьшее расстояние от Земли до Марса? Сравните с расстоянием $55,8 \cdot 10^6$ км, на котором находился Марс от Земли во время последнего великого противостояния 28 августа 2003 г.

! Что полезно знать, изучив тему «Строение Солнечной системы»

1. На протяжении многих веков господствовала геоцентрическая система мира.
2. В XVI в. Николай Коперник обосновал гелиоцентрическую систему мира, которая правильно отражает строение Солнечной системы (в центре — Солнце; планеты, включая Землю, движутся вокруг Солнца).
3. Видимое петлеобразное движение планет объясняется тем, что мы наблюдаем их движение с обращающейся вокруг Солнца Земли.
4. Меркурий и Венера — нижние планеты, остальные — верхние.
5. Наиболее удобно наблюдать нижние планеты вблизи элонгации, а верхние — вблизи противостояний.
6. Законы Кеплера (их три, и нужно знать их формулировки) уточняют учение Коперника, в котором орбиты небесных тел считались окружностями.
7. Ньютон аналитически вывел законы Кеплера из закона всемирного тяготения.
8. Закон всемирного тяготения и законы Кеплера — основа небесной механики; по этим же законам происходит движение искусственных небесных тел.
9. Нептун был открыт в результате учёта возмущений в движении Урана.

10. Существуют различные способы определения расстояний до небесных тел Солнечной системы (по горизонтальному параллаксу, методом радиолокации и др.).
11. Астрономическая единица — основная единица расстояний в Солнечной системе — равна среднему расстоянию Земли от Солнца (1 а. е. = 149,6 млн км).



Что желательно уметь, изучив тему «Строение Солнечной системы»

1. Определять по «Школьному астрономическому календарю» и ПКЗН, какие планеты и в каких созвездиях видны на небе в данное время.
2. Находить планеты на небе, отличая их от звёзд.
3. По формулам (12) и (13) вычислять повторяемость заданных конфигураций нижних и верхних планет.
4. По формуле (15) определять сидерические периоды обращений планет по известным большим полуосям их орбит (и решать обратную задачу).
- 5*. Вычислять массу планеты, имеющей спутники.
6. По формуле (20) вычислять расстояние до небесного тела Солнечной системы (по известному горизонтальному параллаксу).
7. По формуле (23) вычислять линейные размеры небесных тел Солнечной системы, зная их угловые размеры и горизонтальный параллакс.



глава III.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Эту тему мы начинаем с изучения природы небесных тел, движущихся вокруг Солнца, а Солнце будем изучать в неразрывной связи с другими звёздами (см. гл. IV). Сравнение природы Земли с природой других планет и Луны позволит нам выявить общность физических свойств (а затем эволюции и происхождения!) этих небесных тел и вместе с тем получить представление об индивидуальных особенностях планет, относящихся как к разным группам (планеты типа Земли и планеты-гиганты), так и входящих в одну и ту же группу. Надо иметь в виду, что в результате наземных оптических и радиоастрономических наблюдений был накоплен ценный материал о природе планет и Луны. В последние десятилетия благодаря успешному освоению околоземного космического пространства, Луны и планет удалось получить уникальную информацию. Большой вклад в исследование небесных тел Солнечной системы внесли отечественные учёные. Россия — родина теоретической и практической космонавтики — по праву гордится тем, что в историю освоения космоса навсегда вошли полёты наших космонавтов, начиная с исторического полёта *Ю. А. Гагарина* (12 апреля 1961 г.); запуски искусственных спутников Земли (ИСЗ), начиная с первого ИСЗ, открывшего космическую эру (4 октября 1957 г.); полёты автоматических межпланетных станций (АМС) к Луне, Венере и Марсу; долговременные орбитальные научные станции, на борту которых работали наши космонавты и их зарубежные коллеги. Эти и некоторые другие даты основных вех освоения космоса приведены в Приложении II.

В России космическими исследованиями руководит Роскосмос, в США — Национальное агентство по аэронавтике

и исследованию космического пространства (NASA), в Европе — Европейское космическое агентство (ESA), в Китае — Китайское национальное космическое управление (CNSA). История изучения Луны с помощью космических аппаратов началась в 1958 г. За первые 50 лет по отечественной и американской лунным программам осуществлено соответственно 54 и 43 запуска, в том числе 20 и 25 успешных. К Венере запущено 37 АМС, из них полностью выполнили программы 16 советских, 5 американских и европейская станция. К Марсу стартовало 40 АМС, из них 20 отечественных (самыми удачными считаются лишь 3), 18 американских (13 из них выполнили задачи полёта), успешно работает на орбите ИСМ (искусственного спутника Марса) европейская станция; японская АМС не выполнила программу полёта. К кометам и астероидам совершили полёты 15 АМС. К планетам-гигантам стартовали 6 американских АМС, к Меркурию — 2, к Плутону — 1. За первые полвека космической эры в космосе побывало около 500 космонавтов и астронавтов из 35 стран. В основном они работали на борту космических станций. Сейчас на орбите действует Международная космическая станция (МКС). Несколько американских экспедиций с астронавтами достигли поверхности Луны, а до других небесных тел земляне пока не добрались. Скорее всего, это произойдёт в ближайшие десятилетия, когда станут возможными пилотируемые полёты на Марс.

§ 12. СИСТЕМА «ЗЕМЛЯ — ЛУНА»

1. Основные движения Земли. Земля — третья по удалённости от Солнца планета. Она движется со скоростью около 30 км/с вокруг Солнца по эллиптической орбите, мало отличающейся от окружности. Одно из доказательств обращения Земли вокруг Солнца — кажущееся параллактическое смещение на небесной сфере ближайших к нам звёзд. Впервые такие смещения удалось обнаружить лишь в 30-х гг. XIX в.

Второе основное движение Земли — *вращение вокруг собственной оси*, наклонённой к плоскости орбиты под углом $66^{\circ}34'$.

При движении Земли вокруг Солнца *ось её остаётся параллельной самой себе*. Из курсов природоведения или окружающего мира вы знаете, что *смена времён года* на Земле как раз и является следствием указанных трёх причин: обращения Земли вокруг Солнца, наклона земной оси к плоскости орбиты и сохранения направления оси в пространстве.

Кроме того, Земля движется в пространстве вместе со всей Солнечной системой и участвует во многих других движениях.

2. Форма Земли. Лишь в грубом приближении к действительности можно считать, что Земля — это шар, радиус которого определяется по формуле (21) методом, описанным в § 11.4. Однако *геодезические измерения* показали, что длина дуги в 1° меридиана около экватора равна 110,6 км, а вблизи полюсов — 111,7 км, следовательно, Земля не шар, её экваториальный радиус больше полярного.

Объясняется это тем, что Земля вследствие своего вращения вокруг оси сжата у полюсов и по форме близка к эллипсоиду вращения. Сжатие эллипсоида может быть вычислено по формуле

$$\varepsilon = \frac{a - b}{a}, \quad (24)$$

где ε — сжатие Земли; a — большая полуось земного эллипсоида; b — его малая полуось. Данные, основанные на наблюдениях движения искусственных спутников Земли, позволили уточнить результаты наземных геодезических измерений сжатия Земли.

Поскольку различие в экваториальном (6378,140 км) и полярном (6356,755 км) радиусах Земли небольшое (21,385 км), то при решении многих астрономических задач Землю можно считать шаром со средним радиусом, равным 6371 км.

Зная средний радиус Земли и её массу (как найти массу Земли, вы знаете из курса физики), легко вычислить среднюю плотность нашей планеты ($5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

3. Луна — спутник Земли. *Луна — ближайшее к Земле небесное тело.* Радиус Луны примерно в 4 раза, а масса в 81 раз меньше соответственно радиуса и массы Земли.

По этим физическим характеристикам естественный спутник нашей планеты нельзя считать маленьким по сравнению с Землёй. Строго говоря, по эллиптической орбите вокруг Солнца движется общий центр масс системы «Земля—Луна», находящийся внутри Земли. Систему «Земля—Луна» часто называют «двойной планетой».

Луна — не самосветящееся тело; она светит отражённым солнечным светом. В зависимости от положения, которое Луна занимает по отношению к Земле и Солнцу, мы видим то полную Луну (полнолуние), то половину видимого диска (первая или последняя четверть), то совсем не видим Луны (новолуние).

Наблюдаемая с Земли освещённая часть лунного диска называется фазой Луны. Проследить смену лунных фаз можно по рисунку 28. В новолунии Луна бывает в то время, когда она располагается между Землёй и Солнцем; в полнолунии Луна находится за Землёй. После новолуния Луна растёт от узкого серпа (направленного выпуклостью вправо) до полудиска (первая четверть) и далее до полного диска (полнолуние). После полнолуния Луна убывает до полудиска (выпуклость направлена влево, наступает последняя четверть), затем становится узким серпом и перестаёт быть видимой в новолунии. Полный цикл смен лунных фаз (синодический месяц) составляет примерно 29,5 сут. (29,5^л).

Угловой диаметр Луны на небесной сфере около $0,5^\circ$ ($\approx 30'$). Но он не остаётся постоянным, а изменяется из-за эллиптичности орбиты (примерно $33'$ в перигее и $29'$

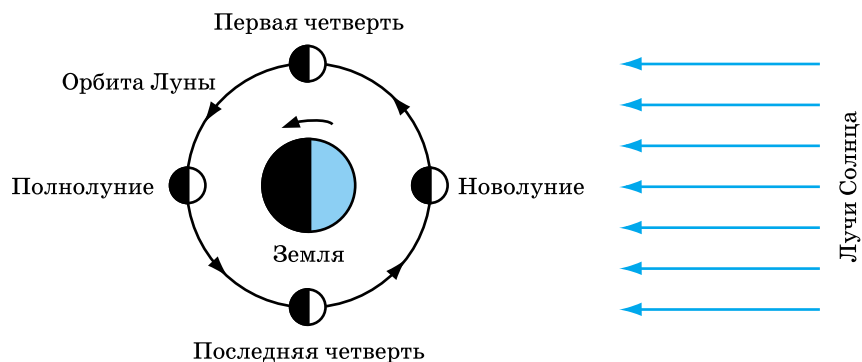


Рис. 28. Фазы Луны

в апогее). Эксцентриситет лунной орбиты $e = 0,05$, а её большая полуось $a = 384\,400$ км (среднее расстояние Луны от Земли).

Полный оборот *вокруг Земли* Луна совершает за 27,3 сут. (27,3^д, сидерический месяц). За это же время Луна делает оборот *вокруг своей оси*, поэтому к *Земле всегда обращено одно и то же полушарие Луны*.

Как и все другие небесные тела, Луна участвует в суточном вращении небесной сферы. Но в отличие от планет и Солнца, более удалённых от Земли, Луна быстро перемещается на фоне звёздного неба (13° за сутки) с запада на восток, т. е. в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы. Этим объясняется явление, которое вы сами можете обнаружить. Каждый вечер, отмечая по часам моменты верхней кульминации Луны, вы убедитесь, что Луна приходит к небесному меридиану с опозданием примерно на 50 мин (т. е. кульминирует сегодня на 50 мин позже, чем вчера).

4. Солнечные и лунные затмения. Когда Луна при своём движении вокруг Земли полностью или частично заслоняет Солнце, происходят **солнечные затмения**. Во время полного солнечного затмения (рис. 29) Луна закрывает весь диск Солнца (это возможно благодаря тому, что видимые диаметры Луны и Солнца почти одинаковы). Полное солнечное затмение можно наблюдать лишь из тех точек земной поверхности, где проходит полоса полной фазы. Так называется полоса, которую как бы прочерчивает по земной поверхности сходящийся конус лунной тени (см. рис. 29).

По обе стороны полосы полной фазы происходит **частное затмение Солнца**, во время которого Луна заслоняет

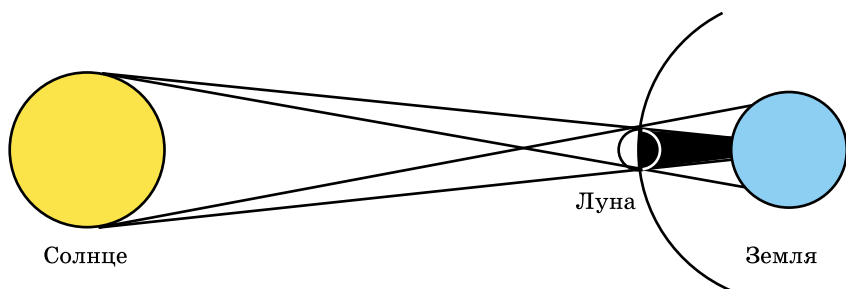


Рис. 29. Схема полного затмения Солнца

не весь солнечный диск, а лишь часть его. Наблюдается *частное солнечное затмение* из тех мест земной поверхности, которые охватывает расходящийся конус лунной *полутени* (см. рис. 29).

Ширина полосы полной фазы солнечного затмения и его продолжительность зависят от взаимных расстояний Солнца, Земли и Луны. Вследствие изменения расстояний видимый угловой диаметр Луны тоже изменяется. Когда он чуть больше солнечного, полное затмение Солнца может длиться до 7,5 мин; когда равен, то одно мгновение; если же он меньше, то Луна вообще не закрывает Солнце полностью. В последнем случае происходит *кольцеобразное затмение*: вокруг тёмного лунного диска видно узкое яркое солнечное кольцо.

Полное солнечное затмение очень красивое явление. Во время затмения Солнце имеет вид чёрного диска, окружённого нежным сиянием (*короной*). Дневной свет настолько ослабевает, что иногда можно видеть на небе яркие звёзды и планеты.

Когда при движении вокруг Земли Луна попадает в конус земной тени, которую отбрасывает освещаемый Солнцем земной шар, происходит полное лунное затмение (рис. 30). Если же в тень Земли погружается лишь часть Луны, то происходит *частное затмение Луны*.

Полное лунное затмение может длиться примерно 1,5—2 ч (столько времени, сколько требуется Луне, чтобы пересечь конус земной тени). Его можно наблюдать со всего ночного полушария Земли, где Луна в момент затмения находится над горизонтом. Поэтому в данной местности полные лунные затмения удаётся наблюдать значительно чаще солнечных.

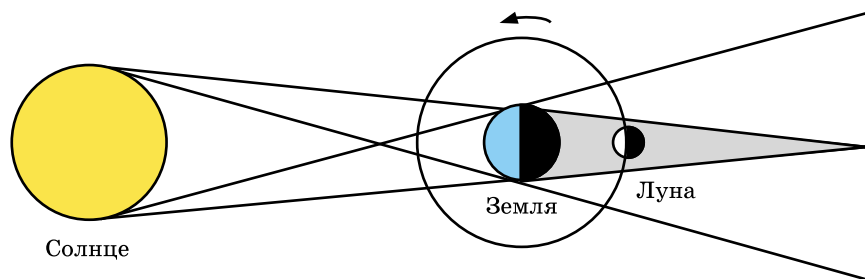


Рис. 30. Схема полного затмения Луны

Во время полного лунного затмения диск Луны остаётся видимым, но приобретает обычно тёмно-красный оттенок. Это явление объясняется преломлением солнечных лучей в земной атмосфере. Проходя через земную атмосферу, солнечные лучи рассеиваются и преломляются. Причём рассеивается в основном коротковолновое излучение (соответствующее синему и голубому участкам спектра, чем и обусловлен голубой цвет нашего дневного неба), а преломляется длинноволновое (соответствующее красному участку спектра). Преломляясь в земной атмосфере, длинноволновое солнечное излучение попадает в конус земной тени и освещает Луну.

Легко сообразить, что *солнечное затмение происходит, когда Луна бывает в новолунии, а лунное — когда в полнолунии*. Однако далеко не в каждое новолуние и полнолуние происходят затмения. Дело в том, что плоскость, в которой Луна движется вокруг Земли, наклонена к плоскости эклиптики под углом примерно 5° . Чаще всего в году бывает только 2 солнечных и 2 лунных затмения. В 1982 г. было 7 затмений: 4 частных солнечных и 3 полных лунных (это максимально возможное число затмений в год).

Ещё древние астрономы заметили, что через определённый промежуток времени лунные и солнечные затмения повторяются в определённом порядке. Этот промежуток времени был назван сáросом (в переводе с египетского — повторение). Существование сароса объясняется закономерностями, наблюдаемыми в движении Луны. Сарос составляет 6585,32 сут. (≈ 18 лет 11 дней). В течение каждого сароса происходит 70 затмений, из них 42 солнечных и 28 лунных. Однако в любом выбранном месте Земли лунные затмения наблюдаются чаще, чем солнечные, так как лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли. Полные солнечные затмения в данной точке земной поверхности видны не чаще одного раза в 200—300 лет.

Зная продолжительность сароса, можно приближённо предсказывать время наступления затмений. В настоящее время разработаны очень точные методы предсказания солнечных и лунных затмений. Астрономы неоднократно помогали историкам уточнять даты исторических событий, которые, по свидетельству летописей, совпадали с затмениями. В Москве очередное полное солнечное затмение

будет наблюдаться 16 октября 2126 г. В европейской части России последнее полное лунное затмение зафиксировано 28 сентября 2015 г., а полное солнечное затмение — в восточных регионах России 1 августа 2008 г. (Информацию о предстоящих затмениях можно найти в ШАК.)

В прошлом необычный вид Луны и Солнца во время затмений приводил людей в ужас. Жрецы, зная о повторяемости этих явлений, использовали их для подчинения и устрашения людей, приписывая затмения сверхъестественным силам. Давно уже перестала быть тайной причина затмений. Наблюдения затмений позволяют учёным получать важные сведения об атмосферах Земли и Солнца, а также о движении Луны. Во время полных затмений Солнца создаются условия, благоприятные для наблюдения отклонения луча света звезды в поле тяготения Солнца. Это позволяет получить одно из важнейших доказательств теории тяготения Эйнштейна (общей теории относительности).

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие вы знаете движения Земли? 2. Пусть наблюдатель, двигаясь с Землёй вокруг Солнца, следит на протяжении года за какой-нибудь звездой, при этом он может заметить самые незначительные её перемещения на небесной сфере. Попробуйте на чертеже изобразить наблюдаемую картину и скажите, почему параллактическое смещение звёзд доказывает обращение Земли вокруг Солнца. 3*. Вычислите сжатие Земли, зная, что, по данным, полученным геодезистами Ф. Н. Красовским и А. А. Изотовым, малая полуось земного эллипсоида равна 6356,863 км, а большая — 6378,245 км. 4. Зная эксцентриситет и большую полуось орбиты Луны, вычислите наибольшее и наименьшее расстояния до Луны. 5. Докажите, что общий центр масс системы «Земля—Луна» находится внутри Земли. 6. Опровергните мнение о том, что если к Земле всегда обращена одна сторона Луны, то Луна не вращается вокруг своей оси.

§ 13. ПРИРОДА ЛУНЫ

1. **Физические условия на Луне.** Луна лишена атмосферы. Если допустить, что в прошлом у Луны была атмосфера, то легко понять, почему её нет сейчас. Дело в том, что сравнительно небольшие (по массе) небесные тела (подобные Луне) не могут длительное время удерживать атмосфе-



Рис. 31. Земля на небе Луны

ру. Уже при скорости 2,38 км/с (вторая космическая скорость для Луны) молекулы газа способны покинуть Луну.

На поверхности Луны нет воды. Испарение воды привело бы к образованию вокруг Луны газовой оболочки, которая быстро бы рассеялась. Однако в конце 90-х гг. в результате полётов АМС «Клементина» было сделано предположение о том, что под поверхностным слоем пород некоторых кратеров существуют немалые запасы льда.

На небе Луны видны те же самые созвездия, что и на небе Земли. Из-за отсутствия атмосферы яркие звёзды и планеты видны на Луне и днём. Поэтому космонавты могут ориентироваться на Луне по звёздам и днём и ночью. Ориентировка по звёздам приобретает на Луне особое значение, так как там магнитный компас бесполезен. (Луна не имеет магнитного поля, подобного земному.)

Меркурий и Венеру можно наблюдать с Луны даже в непосредственной близости от Солнца. Эффектное украшение неба Луны — наша Земля (рис. 31). Диск Земли примерно в 3,5 раза больше солнечного диска.

На протяжении лунного дня, длящегося около двух земных недель, поверхность Луны сильно нагревается, а затем охлаждается в ночное время (ночь на Луне тоже длится почти две земные недели). Отсутствие атмосферы

на Луне приводит к резким колебаниям температуры в течение лунных суток. В районе «подсолнечной» точки, т. е. там, где Солнце днём находится в зените, температура превышает 400 К (+130 °С). На противоположной стороне Луны вблизи «антисолнечной» точки поверхность Луны охлаждается почти до 100 К (–170 °С). Значит, на протяжении одних лунных суток (29,5 земных суток) температура изменяется в пределах 300 К. Резкие колебания температуры, происходящие на Луне, относятся только к её поверхности. Уже на глубине в несколько десятков сантиметров температура в течение лунных суток практически не изменяется. Это объясняется плохой теплопроводностью лунного грунта, который не успевает ни прогреться днём, ни охладиться ночью.

Вы знаете, что Луна сейчас обращена к Земле одной стороной. Так было не всегда. Миллиарды лет назад Луна была ближе к Земле, чем сейчас, а периоды вращения Земли и обращения вокруг неё Луны составляли лишь несколько часов. На нынешнем этапе эволюции системы «Земля—Луна» период вращения Луны совпал с периодом её обращения. Это привело к двум важным следствиям. Во-первых, продолжительность солнечных суток на Луне равна синодическому месяцу (день и ночь на Луне длятся почти по две земные недели). Во-вторых, к Земле Луна всегда обращена одним полушарием (мы с Земли видим всегда одну и ту же сторону Луны).

2. Поверхность Луны. Даже невооружённым глазом на Луне видны обширные тёмные участки (моря) и светлые (материки). Более подробно их можно рассмотреть в бинокль или школьный телескоп (рис. 32). Несмотря на то что в лунных морях нет ни капли воды, в науке сохранилась прежняя система наименований, предложенная ещё в XVII в. В отличие от морей (сравнительно ровных участков лунной поверхности, покрытых тёмным веществом) материки представляют собой гористые районы.

На обращённой к Земле стороне Луны материки занимают около 70 %, а моря — 30 % территории (рис. 33).

Характерная особенность лунного рельефа — кольцевые структуры, или кратеры (рис. 34). Только на видимой стороне Луны кратеров диаметром более 1 км примерно 300 000. Среди них есть такие, диаметры которых пре-



Рис. 32. Видимая с Земли сторона Луны (вид в телескоп)

вышают 200 км. Большинство крупных лунных кратеров имеет ровное дно, в центре которого возвышается горка.

Многие лунные моря окаймлены протяжёнными горными хребтами. Хребты получили названия земных горных цепей (*Кавказ, Альпы, Пиренеи* и т. д.).

В полнолуние в небольшой телескоп (призмальный бинокль) хорошо видны *Океан Бурь, Море Дождей, Море Ясности*, а также кратеры *Тихо, Коперник, Кеплер*, от которых расходятся протяжённые лучевые системы. Когда Луна находится в других фазах, то вблизи границы освещённой и неосвещённой частей поверхности Луны (такая граница называется *терминатором*) кратеры выделяются особенно рельефно (рис. 35).

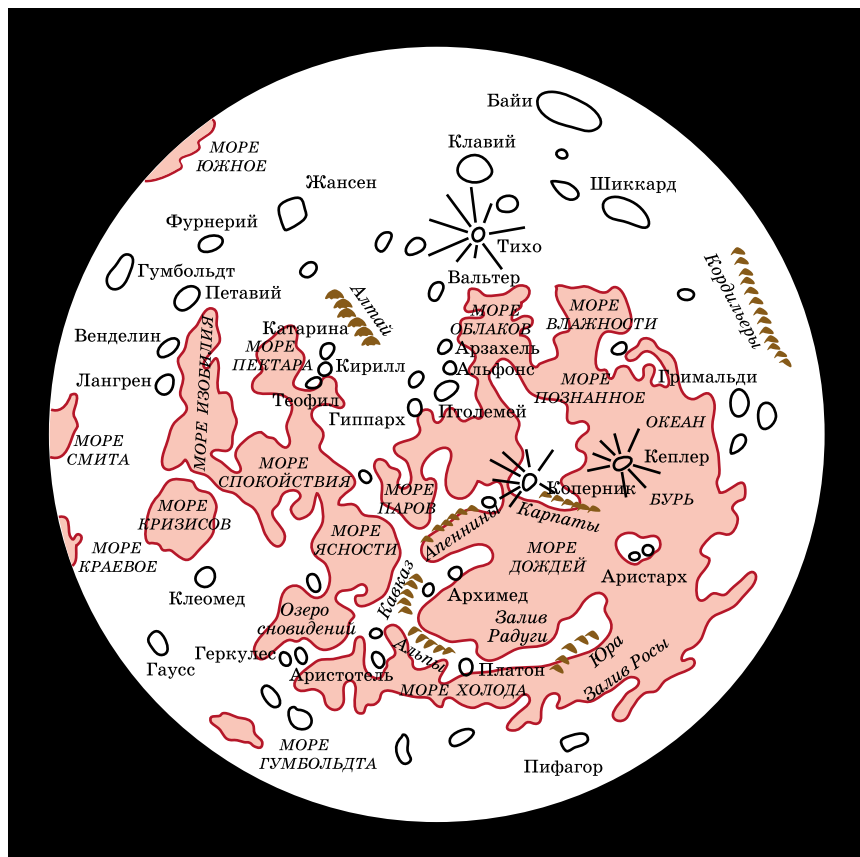


Рис. 33. Карта-схема крупнейших деталей видимого с Земли полушария Луны (см. также Приложение VII, рис. 123)



Рис. 34. Кратеры на поверхности Луны



Рис. 35. Луна в последней четверти (вид в телескоп)

В отличие от телескопических исследований видимой стороны Луны, продолжающихся уже четыре столетия, исследование *обратной* её стороны началось, когда впервые в истории науки обратная сторона Луны была сфотографирована советской автоматической станцией «Луна-3» (7 октября 1959 г.). Примерно 6 лет спустя (в июле 1965 г.) другая наша автоматическая межпланетная станция «Зонд-3» передала новые фотографии.

На этот раз удалось сфотографировать почти все области обратной стороны Луны, которые не попали в поле зрения фототелевизионных устройств «Луны-3». Полученные снимки позволили составить первые карты и атласы обратной стороны Луны, лунные глобусы и полные карты, охватывающие почти всю поверхность Луны.

На невидимом с Земли полушарии Луны преобладают материки (рис. 36). Средний диаметр крупного моря — *Моря Москвы* — достигает 460 км. Много на обратной стороне Луны и кратеров (им присвоены имена выдающихся деятелей науки — *Ломоносова, Джордано Бруно, Циол-*



Рис. 36. Участок поверхности обратной стороны Луны (см. также Приложение VII, рис. 124)

ковского, Жюлио Кюри и др.); нередко кратеры образуют длинные цепочки, тянущиеся на сотни километров. Там находится и самый большой лунный кратер Герцшпрунг, его диаметр 591 км.

Большинство мелких и средних лунных кратеров образовалось в результате падения метеоритов, которые, достигая поверхности Луны, обладают такой кинетической энергией, что при ударе происходит взрыв. Метеорит разрушается, дробится; лунный грунт разлетается в разные стороны от места взрыва. Так образуются первичные кратеры. Чем их больше на данном участке лунной поверхности, тем больше возраст этого участка. Выброшенные при образовании первичных кратеров большие камни могут, падая на поверхность Луны, создавать вторичные кратеры. Возможно, что из таких вторичных кратеров состоят лучевые системы, которые хорошо видны в полнолуние у некоторых крупных молодых кратеров. Образование крупных кратеров, вероятно, связано и с бурной вулканической деятельностью, характерной для далёкого прошлого Луны.

3. Лунные породы. Благодаря мягким посадкам автоматических станций на Луну, а затем и полётам на Луну американских *астронавтов* (см. Приложение II) стали известны механические свойства лунного грунта и его химический состав. На Луне не оказалось толстого слоя пыли, которого когда-то опасались многие конструкторы лунников, но пыль на Луне есть. Она тёмно-серого цвета и по виду напоминает цемент.

Образцы лунных пород внешне похожи на земные изверженные базальты. В состав их входят хорошо известные на Земле химические элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg и др.). Но в лунных породах больше, чем в земных, содержится тугоплавких элементов (Ti, Zr, Cr и др.) и меньше — легкоплавких (Pb, K, Na и др.). Химический состав различных участков поверхности Луны неодинаков.

В поверхностном слое Луны (реголите) содержатся осколки магматических пород, шлакообразные частички с оплавленными гранями. Многие образцы словно обработаны песком. Их вид свидетельствует о том, что они длительное время подвергались своеобразной эрозии (ударам мелких метеоритов и обработке потоками частиц, непрерывно исходящими от Солнца).

Из-за отсутствия воды минералов на Луне значительно меньше, чем на Земле. Микроорганизмов на Луне не обнаружено.

Лунные породы относятся к очень древним — их возраст составляет примерно 4 млрд лет, причём самыми молодыми (несколько более 3 млрд лет) оказались образцы, доставленные из морских районов.

На Луне давно завершилась эпоха активного вулканизма. С течением времени уменьшалась и интенсивность метеоритной бомбардировки лунной поверхности. Благодаря этому на протяжении последних 2—3 млрд лет вид Луны практически не менялся. А на Земле, как вы знаете из курса географии, под воздействием воды и воздуха древний рельеф не мог сохраниться. Сравнение лунного и современного земного рельефа помогает воссоздать условия, при которых на Земле формировались запасы полезных ископаемых. Это необходимо знать для разработки научных основ поиска полезных ископаемых.

Ещё и сейчас происходят лунотрясения (напоминающие слабые землетрясения). Они зарегистрированы сейсмографами, установленными на Луне астронавтами. Данные этих приборов позволили исследовать внутреннее строение Луны, выделив кору (толщиной около 60 км), мантию (до 1000 км) и ядро (его радиус около 750 км).

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличаются физические условия на Луне от привычных нам земных? 2. Ось вращения Луны практически перпендикулярна плоскости её орбиты. Будет ли на небе Луны α Малой Медведицы играть роль Полярной звезды? 3*. Назовите основные детали лунного рельефа. 4. Используя бинокль (школьный телескоп) и карту Луны, найдите большие моря и кратеры на поверхности Луны. (Постарайтесь провести наблюдения Луны при разных фазах!)

§ 14. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

По своим физическим характеристикам планеты делятся на две группы — *планеты земной группы* и *планеты-гиганты*. Мы сделаем обзор главных особенностей обеих групп планет, на основе чего вы сумеете дать описание каждой планеты.



Рис. 37. Часть поверхности Меркурия (один из снимков, переданных АМС «Мессенджер», 2008 г.)

1. Общая характеристика планет земной группы. Планеты, относящиеся к земной группе, — **Меркурий** (рис. 37), **Венера** (рис. 38), **Земля** (рис. 39), **Марс** (рис. 40) — имеют относительно *небольшие размеры и массы* (см. Приложение IX); *средняя плотность* этих планет в несколько раз превосходит плотность воды; они *медленно вращаются* вокруг своих осей; у них *мало спутников* (у Меркурия и Венеры их вообще нет, у Земли — один, у Марса — два крохотных).

Сходство планет земной группы не исключает и значительного различия. Например, **Венера**, в отличие от дру-

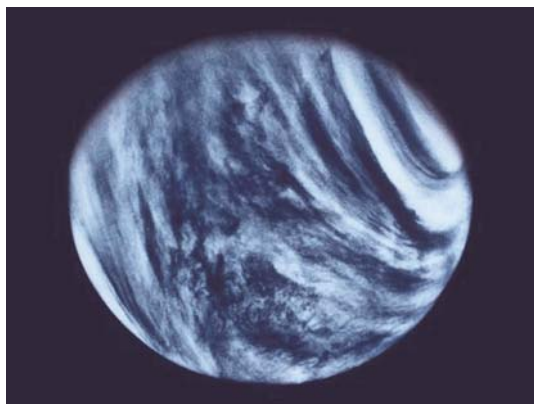


Рис. 38. Венера (один из снимков, переданных АМС)



Рис. 39. Земля (снимок из космоса)

гих планет, вращается в направлении, *обратном* её движению вокруг Солнца, причём в 243 раза медленнее Земли (сравните с продолжительностью года на Венере). Период обращения **Меркурия** вокруг Солнца (т. е. год этой планеты) только на $\frac{1}{3}$ больше периода его вращения вокруг своей оси (по отношению к звёздам). *Углы наклона осей* к плоскостям их орбит у **Земли** и **Марса** примерно одинаковы, но совсем иные, чем у **Меркурия** и **Венеры**. А вы знаете, что это один из параметров, определяющих харак-

Рис. 40. Марс (одна из фотографий, сделанных космическим телескопом им. Хаббла). Отчётливо видны полярные ледяные шапки



тер смены времён года. Следовательно, на Марсе времена года такие же, как на Земле (только каждое время года почти в 2 раза продолжительнее).

До недавнего времени девятой планетой Солнечной системы, по ряду физических характеристик родственной планетам земной группы, считали далёкий *Плутон*. Теперь его относят к числу карликовых планет, которые открыты в *поясе астероидов Койпера*. Средний диаметр Плутона около 2260 км. У Плутона обнаружено уже пять спутников. Наибольший из них — Харон — лишь вдвое меньше самой планеты (их сначала даже считали двойной планетой). В 2015 г. к Плутону приблизилась АМС «Новые горизонты» (США), которая выполнила его картографирование, собрала данные об атмосфере и до 2020 г. изучала астероиды пояса Койпера.

2. Атмосферы. Черты сходства и различия обнаруживаются также при изучении атмосфер планет земной группы. В отличие от **Меркурия**, который, как и Луна, практически лишён атмосферы, **Венера** и **Марс** обладают ею. Современные данные об атмосферах Венеры и Марса получены в результате полётов советских и американских АМС. Сравнивая атмосферы Венеры и Марса с земной (см. Приложение X), мы видим, что, в отличие от азотно-кислородной земной атмосферы, **Венера** и **Марс** имеют атмосферы,

в основном состоящие из углекислого газа. Давление у поверхности Венеры примерно в 90 раз больше, а на Марсе почти в 150 раз меньше, чем у поверхности Земли.

Температура у поверхности **Венеры** очень высокая (около 500 °C) и остаётся почти постоянной. С чем это связано? На первый взгляд кажется, с тем, что Венера ближе к Солнцу, чем Земля. Но, как показывают наблюдения, отражательная способность у Венеры больше, чем у Земли, а потому Солнце примерно одинаково нагревает обе планеты. Высокая температура поверхности Венеры обусловлена *парниковым эффектом*. Он заключается в следующем: атмосфера Венеры пропускает лучи Солнца, которые нагревают поверхность. Нагретая поверхность становится источником инфракрасного излучения, которое не может покинуть планету, так как его задерживают содержащиеся в атмосфере Венеры углекислый газ и водяной пар, а также облачный покров планеты. В результате этого равновесие между притоком энергии и её излучением в космическое пространство устанавливается при более высокой температуре, чем та, которая была бы у планеты, свободно пропускающей инфракрасное излучение.

Мы привыкли к земным облакам, состоящим из мелких капель воды или ледяных кристалликов. Состав облаков Венеры иной: они содержат капельки серной и, возможно, соляной кислот. Облачный слой сильно ослабляет солнечный свет, но, как показали измерения, выполненные на АМС «Венера-11» и «Венера-12», освещённость у поверхности Венеры примерно такая же, как у поверхности Земли в облачный день. Исследования, выполненные в 1982 г. АМС «Венера-13» и «Венера-14», показали, что небо Венеры и её ландшафт имеют оранжевый цвет. Объясняется это особенностью рассеивания света в атмосфере этой планеты.

Газ в атмосферах планет земной группы находится в непрерывном движении. Нередко во время пылевых бурь на **Марсе**, которые длятся по нескольку месяцев, огромное количество пыли поднимается в атмосферу. Ураганные ветры зафиксированы в атмосфере **Венеры** на высотах, где расположен облачный слой (от 50 до 70 км над поверхностью планеты), но вблизи поверхности этой планеты скорость ветра достигает всего лишь нескольких метров в секунду.

Таким образом, несмотря на некоторое сходство, в целом атмосферы ближайших к Земле планет (Венеры и Марса) резко отличаются от атмосферы нашей планеты. Это пример открытия, которое невозможно было предсказать. Здравый смысл подсказывал, что планеты со сходными физическими характеристиками (например, Землю и Венеру иногда называют «планетами-близнецами») и удалённые от Солнца на расстояния одного порядка, должны иметь очень похожие атмосферы. На самом деле причина наблюдаемого различия связана с особенностями эволюции атмосфер каждой из планет.

Исследование атмосфер планет земной группы не только позволяет лучше понять свойства и историю происхождения земной атмосферы, но и имеет значение для решения экологической проблемы. Например, туманы-смоги, образующиеся в земной атмосфере в результате загрязнения воздуха, по своему составу очень похожи на венерианские облака. Эти облака, как и пылевые бури на Марсе, напоминают нам о том, что необходимо ограничивать выброс пыли и разного рода промышленных отходов в атмосферу нашей планеты. Пылевые бури, во время которых на протяжении нескольких месяцев в атмосфере Марса удерживаются и распространяются над громадными территориями тучи пыли (мощные бури наблюдались, например, осенью 1971 и 2001 гг.), заставляют задуматься над возможными экологическими последствиями ядерной войны и некоторыми изменениями климата на Земле.

3. Поверхности. Планеты земной группы, подобно Земле и Луне, имеют *твёрдые поверхности*. Наземные оптические наблюдения позволяют получить о них немного сведений, так как, например, Меркурий трудно рассмотреть в телескоп даже во время элонгации; поверхность Венеры скрыта от нас облаками; на Марсе даже во время *великих противостояний* (когда расстояние между Землёй и Марсом минимальное — около 55 млн км), происходящих один раз в 15—17 лет, в крупные телескопы удаётся рассмотреть детали размером около 300 км. И всё-таки в последние десятилетия удалось многое узнать о деталях поверхностей Меркурия и Марса, а также получить представление о ещё недавно совершенно загадочной поверхности Венеры. Это стало возможным благодаря радиолокационным наблюде-

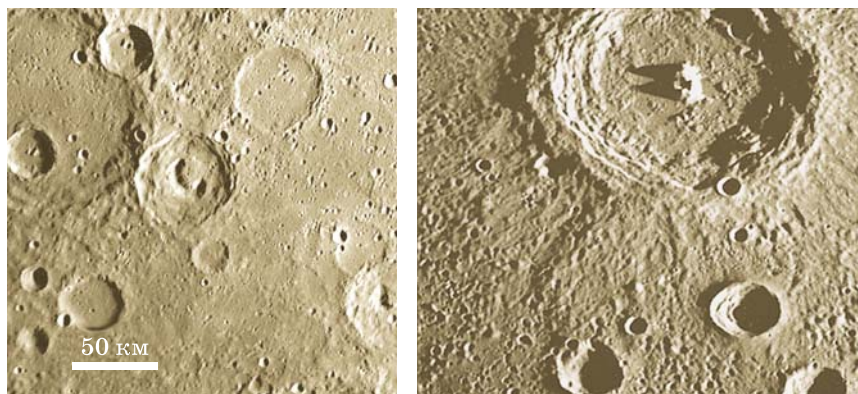


Рис. 41. Участки поверхности Меркурия (АМС «Мессенджер», 2008 г.)

ниям и успешным полётам автоматических межпланетных станций типа «Венера», «Марс», «Викинг», «Маринер», «Магеллан» и др., пролетавших вблизи планет или совершивших посадки на поверхности Венеры и Марса.

Поверхность **Меркурия** (см. рис. 37, 41), изобилующая кратерами, очень напоминает лунную. «Морей» там меньше, чем на Луне, причём они небольшие. Диаметр меркурианского *Моря Зноя* 1300 км, как и Моря Дождей на Луне. На десятки и сотни километров тянутся крутые уступы, вероятно порождённые былой тектонической активностью Меркурия, когда смещались и надвигались поверхностные слои планеты. Как и на Луне, большинство кратеров образовалось в результате падений метеоритов. Там, где кратеров немного, видны сравнительно молодые участки поверхности. Старые, разрушенные кратеры заметно отличаются от более молодых кратеров, хорошо сохранившихся.

Современный этап изучения поверхности Меркурия начался в 1974—1975 гг., когда с американской АМС «Маринер-10» на Землю были переданы первые фотографии планеты. В 2007—2015 гг. с борта АМС «Мессенджер» были проведены исследования поверхности Меркурия и ряда физических характеристик этой планеты. АМС была запущена с Земли в 2004 г., в 2011 г. вышла на меркурианскую орбиту, в течение трёх лет успешно работала и в 2015 г. завершила своё существование, упав на поверхность планеты. За это время фотосъёмкой была охва-

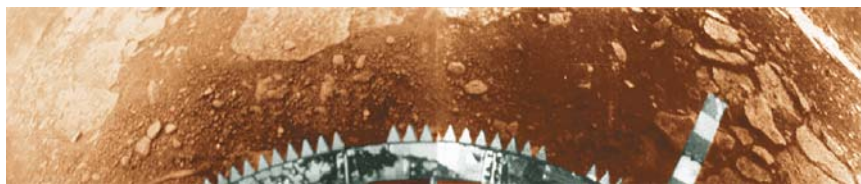


Рис. 42. Фрагмент первой панорамы поверхности Венеры, переданной на Землю АМС «Венера-13» (1982)

чена бо́льшая часть поверхности планеты. На фотографиях, переданных «Мессенджером», астрономы увидели ранее не исследованные её участки (см. рис. 41). Особенно интересны для изучения были приполярные области Меркурия, где в глубоких кратерах может сохраняться водяной лёд, внутренняя структура и взаимодействие магнитного поля планеты с солнечным ветром.

Каменистая пустыня и множество отдельных камней видны на первых фототелевизионных панорамах, переданных с поверхности **Венеры** советскими автоматическими станциями серии «Венера» (рис. 42). Радиолокационные наземные наблюдения обнаружили на этой планете множество неглубоких кратеров, диаметры которых от 30 до 700 км.

В 1983—1984 гг. со станций «Венера-15» и «Венера-16» проводились радиолокационные исследования, позволившие создать карту и атлас поверхности планеты (размеры деталей поверхности 1—2 км). Новый шаг в исследовании поверхности Венеры связан с применением более совершенной радиолокационной системы, установленной на борту американской АМС «Магеллан». Этот космический аппарат достиг окрестностей Венеры в августе 1990 г. и вышел на вытянутую эллиптическую орбиту. На Землю были переданы отчётливые изображения, на некоторых из них хорошо различимы детали размером до 120 м (рис. 43—47). Съёмкой было охвачено более 98 % поверхности планеты. Продолжавшийся четыре года космический эксперимент включал не только фотографирование Венеры, но и проведение других исследований (гравитационного поля, атмосферы и др.).

В целом эта планета оказалась наиболее гладкой из всех планет земной группы, хотя и на ней есть большие горные массивы и протяжённые возвышенности, вдвое пре-

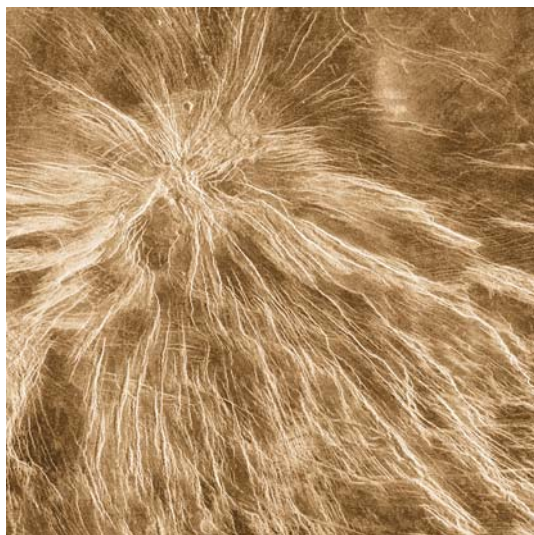


Рис. 43. Изображение радиальной сети грабенов в Области Темис, полученное АМС «Магеллан» (1991). На Венере обнаружено около 50 таких образований. Протяжённость этого участка 250 км



Рис. 44. Некоторые детали ландшафта Венеры (АМС «Магеллан», 1991 г.) — семь куполообразных холмов в среднем по 25 км в диаметре и до 750 м высотой. Это могут быть застывшие потоки очень густой, вязкой лавы. Трещины на вершине куполов говорят о том, что при выходе лавы должно было быть сильное охлаждение поверхности

Рис. 45. Часть восточного края области Альфа на Венере. Лепёшкообразные холмы такой же природы, как и на рисунке 44 (компьютерная обработка радиолокационного изображения)

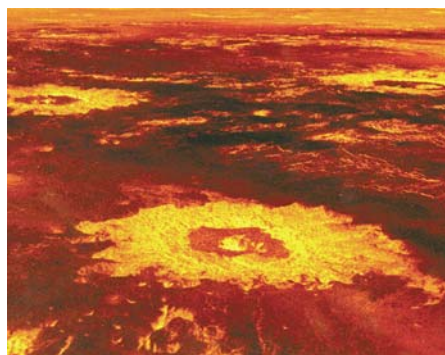
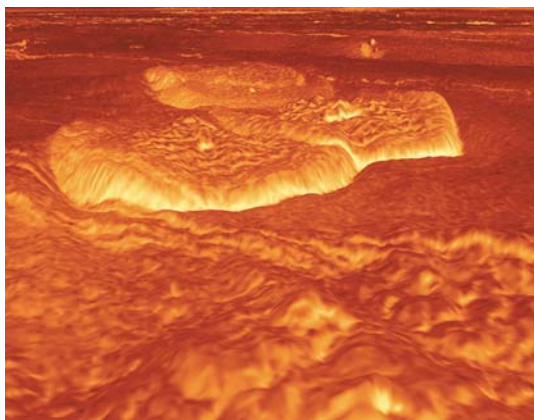
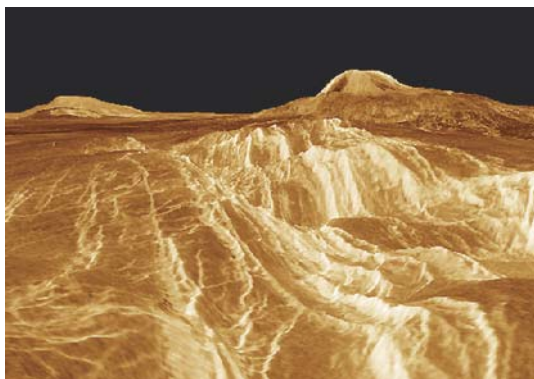


Рис. 46. «Кратерная ферма» на поверхности Венеры (компьютерная обработка изображения; вертикальный масштаб увеличен)

Рис. 47. Область Западная Эйтла на Венере. На переднем плане виден край Рифтовой долины, образовавшейся из-за опускания коры планеты. Долина тянется вплоть до основания горы Гула (справа) — вулкана высотой 3,2 км, который находится на расстоянии 720 км от горы Сиф (слева) высотой 2 км (компьютерная обработка радиолокационного изображения; вертикальный масштаб в 20 раз больше горизонтального)



вышающие по размерам земной Тибет. Поверхностный слой (кора) очень тонок; ослабленный высокой температурой, он даёт много возможностей лаве вырываться наружу. Горные районы Венеры называют материками (земля *Иштар*, области *Альфа* и *Бета*, земля *Афродиты*). Земля Афродиты — крупнейший материк Венеры, расположенный в её южном полушарии. Интересен северный приполярный район Венеры, большую часть которого занимает обширный материк Иштар — высокогорная область. Грандиозен расположенный там потухший вулкан *Максвелл*: его высота 12 км (в полтора раза больше Джомолунгмы), поперечник подошвы 1000 км, диаметр кратера на вершине 100 км. Очень велики (хоть и меньше Максвелла) вулканические конусы *Гаусс* и *Герц*. Но в сумме площадь материков Венеры не превышает 8% всей поверхности этой планеты.

Подобно рифтовым ущельям, тянущимся по дну земных океанов, обнаруженные на Венере рифтовые зоны (см. рис. 47) свидетельствуют о том, что и на этой планете когда-то происходили (а может быть, происходят и сейчас!) активные процессы (например, вулканическая деятельность).

Изобилует кратерами поверхность **Марса** (рис. 48, 49). Особенно много их в южном полушарии планеты. Тёмные области, занимающие значительную часть поверхности планеты, получили название морей (*Эллада*, *Аргир* и др.).

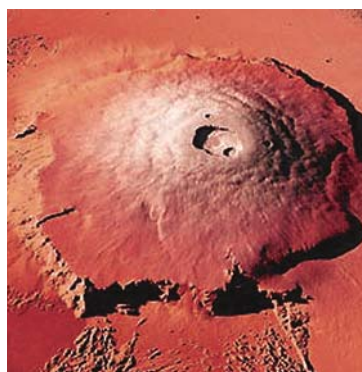
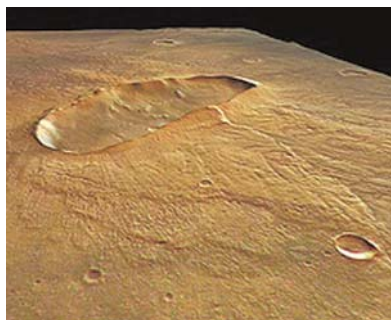


Рис. 48. Вулканический конус Олимп (высота 25 км, диаметр основания 500 км)

Диаметры некоторых морей превышают 2000 км. Возвышенности, напоминающие земные континенты и представляющие собой светлые поля оранжево-красного цвета, названы материками (*Фарсида*, *Элисиум*). Как и на Венере, здесь есть огромные вулканические конусы. Высота наибольшего из них — *Олимпа* (рис. 48) — превышает 25 км, диаметр кратера 90 км. Диаметр основания этой гигантской конусообразной горы более 500 км.



а)



б)



в)



г)

Рис. 49. Кратеры на поверхности Марса: а) один из многочисленных кратеров; б) Эллипсовидный кратер (размеры 45×10 км); в) кратер Галле — его называют Улыбающийся кратер или Счастливая Ржица (его диаметр около 230 км); г) кратер Виктория (диаметром около 800 м) на плато Меридиана

О том, что миллионы лет назад на Марсе происходили мощные вулканические извержения и смещались поверхностные пласты, свидетельствуют остатки лавовых потоков, огромные разломы поверхности (один из них — *Маринер* — тянется на 4000 км), многочисленные ущелья

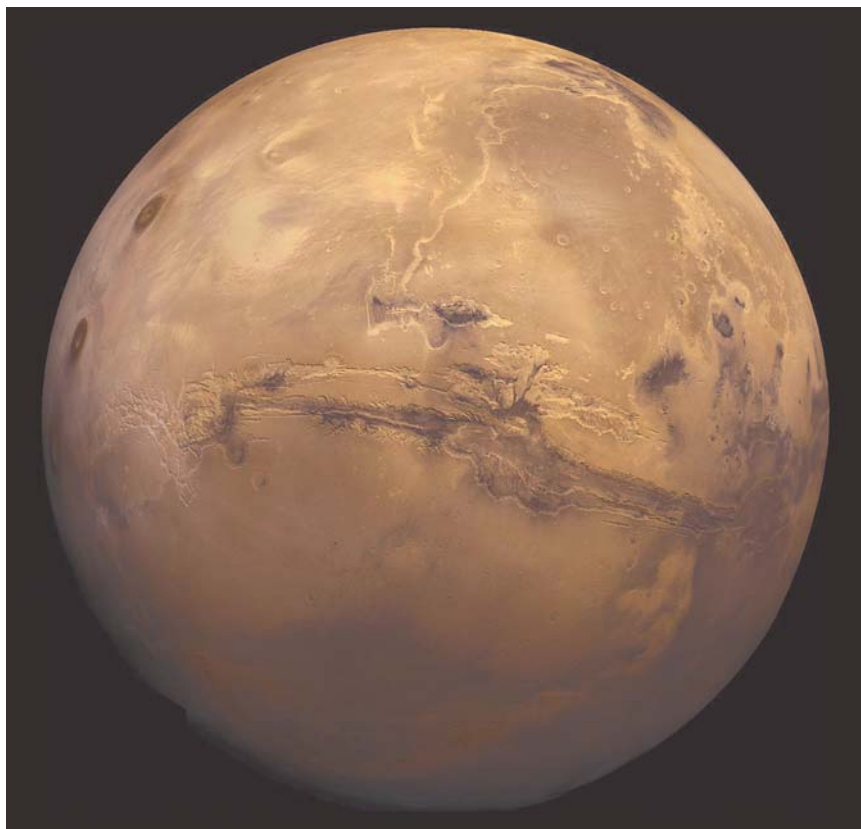


Рис. 50. Изображение Марса, составленное по данным фотографирования планеты с борта АМС «Викинг-1». Хорошо виден каньон Маринер протяжённостью до 4000 км и глубиной до 6 км

и каньоны (рис. 50). Возможно, что именно некоторые из этих образований (например, цепочки кратеров или протяжённые ущелья) исследователи планеты ещё 100 лет назад приняли за «каналы», созданные разумными обитателями Марса.

Перестал быть загадкой красноватый цвет Марса. Он объясняется тем, что грунт этой планеты содержит много глин, богатых железом.

Вы знаете, что почти $\frac{2}{3}$ поверхности Земли занимают океаны. На поверхности Венеры и Меркурия воды нет. Открытые водоёмы не обнаружены пока и на Марсе. Но вода на Марсе есть в виде льда, образующего *полярные*



Рис. 51. Южная полярная шапка Марса

шапки (рис. 51), и в виде небольшого количества водяного пара в атмосфере.

Полярные шапки — белые пятна на глобусе Марса и в буквальном, и в переносном смысле слова. Это очень заметные детали даже с Земли, меняющие свои очертания в зависимости от времени года на Марсе: то разрастающиеся, то почти исчезающие. Северная остаточная шапка Марса в настоящее время гораздо крупнее (около 1000 км в поперечнике) своего южного аналога (около 300 км). Полярные шапки Марса состоят из двух слоёв: нижний образован водяным льдом с пылью и сохраняется и в летний период (*слой вечной мерзлоты*), верхний содержит твёрдую углекислоту («сухой лёд») и обеспечивает наблюдаемые сезонные изменения полярных шапок. Толщина ледяного покрова в районе южного полюса Марса достигает 3,7 км. Это означает, что в полярных шапках Марса сосредоточены большие запасы воды. Кроме того, водяной лёд есть и в других областях планеты. Учёные подсчитали, что если бы весь лёд на Марсе растаял, то поверхность планеты покрылась бы 11-метровым слоем воды. Это утверждение требует дополнительных доказательств, поисками которых заняты учёные.

В 2012 г. на Марс был доставлен марсоход уже третьего поколения, шестиколёсный ровер Кьюриосити. Результаты двухлетних исследований позволяют говорить о двухслойности марсианского грунта: у самой поверхности лежит сухой слой толщиной 20—40 см, под ним, на глубине до метра, находится грунт с относительно высоким (до 4 %) содержанием воды.



а)



б)

Рис. 52. Спутники Марса: а) Фобос; б) Деймос. Их максимальный размер в 200 раз меньше диаметра Луны

Радиационный фон на Марсе в десятки раз выше, чем на Земле. За год пребывания на Марсе организм человека может поглотить около 15 рентген ионизирующего излучения, что в 300 раз больше предельной годовой дозы для работников атомной промышленности на Земле. Эта информация важна для подготовки полёта человека на Марс.

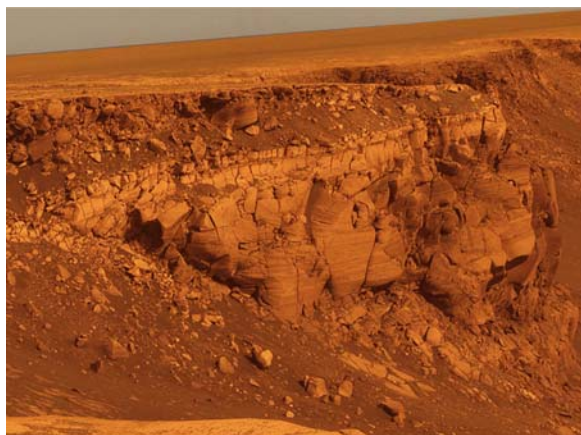
За всё время космических исследований различными АМС с относительно близкого расстояния неоднократно фотографировались небольшие спутники Марса (рис. 52) и передавались панорамы поверхности Красной планеты (рис. 53).

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какая из планет земной группы больше (меньше) других по размерам, по массе, по средней плотности?
2. Какие нужно знать физические характеристики планеты, чтобы вычислить её среднюю плотность?
3. Происходила бы на Земле смена времён года, если бы ось Земли была перпендикулярна к плоскости орбиты нашей планеты?
4. В чём сходство и различие атмосфер планет земной группы?
5. В чём сходство и различие поверхностей планет земной группы?
- 6*. Изобразите в выбранном вами масштабе Джомолунгму, Максвелл и Олимп.
- 7*. Обоснуйте вывод о том, что нельзя считать Луну и планеты земной группы небесными телами, эволюция которых уже завершена.
8. В своё время кратеры образовались на всех планетах зем-



а)



б)

Рис. 53. На поверхности Марса: а) панорама Западной долины (Домашнее плато, камни, холмы, дюны); б) у края кратера Виктория — самого крупного из исследованных марсоходами

ной группы и на Луне. Где и почему они лучше (хуже) всего сохранились к настоящему времени? **9.** Какое научное и практическое значение имеет изучение планет земной группы? **10.** Проанализировав совокупность современных данных о Меркурии, Венере и Марсе, сделайте вывод о возможности существования жизни на этих планетах.

§ 15. ПЛАНЕТЫ–ГИГАНТЫ

1. **Общая характеристика планет-гигантов.** Продолжая работу с данными, включёнными в Приложение IX, вы сумеете выяснить отличие планет-гигантов от планет земной группы и найти черты сходства и различия у планет, относящихся к гигантам: **Юпитер** (рис. 54), **Сатурн** (рис. 55), **Уран** (рис. 56), **Нептун** (рис. 57). У всех этих планет (особенно у Юпитера!) *большие размеры и массы.*

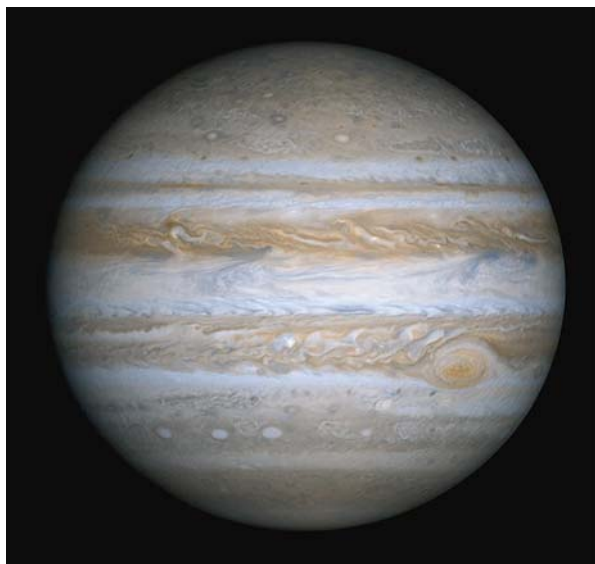


Рис. 54. Юпитер



Рис. 55. Сатурн

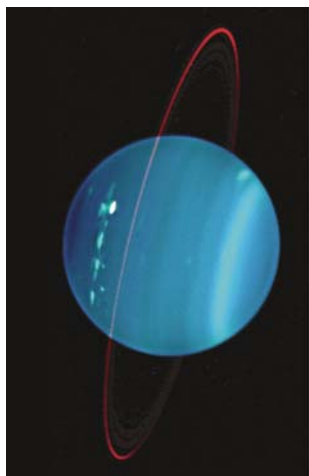


Рис. 56. Уран

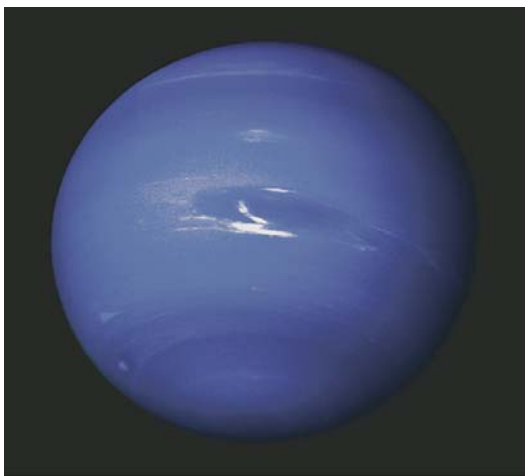


Рис. 57. Нептун

Например, по объёму Юпитер превосходит Землю почти в 1320 раз, а по массе — в 318 раз. Обратите внимание на низкую среднюю плотность этих планет (наименьшая она у Сатурна — $0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Планеты-гиганты очень *быстро вращаются вокруг своих осей*; менее 10 ч требуется огромному **Юпитеру**, чтобы совершить один оборот. Причём, как выяснилось в результате наземных оптических наблюдений, экваториальные зоны планет-гигантов вращаются быстрее, чем полярные, т. е. там, где максимальны линейные скорости точек в их движении вокруг оси, максимальны и угловые скорости. Результат быстрого вращения — большое *сжатие* планет-гигантов (заметное при визуальных наблюдениях). Вы знаете, что разность экваториального и полярного радиусов Земли составляет 21 км, а у Юпитера она равна 4400 км.

Планеты-гиганты находятся далеко от Солнца, и независимо от характера смены времён года на них всегда господствуют низкие температуры. На **Юпитере** вообще нет смены времён года, поскольку ось этой планеты почти перпендикулярна к плоскости её орбиты. Своеобразно происходит смена времён года на планете **Уран**, так как ось этой планеты наклонена к плоскости орбиты под углом 8° .

Планеты-гиганты отличаются *большим числом спутников*: у Юпитера их обнаружено к настоящему времени 63,

у Сатурна — 60, у Урана — 27 и у Нептуна — 13 спутников. Замечательная особенность планет-гигантов — *кольца*, которые открыты не только у Сатурна, но и у Юпитера, Урана и Нептуна. Из планет-гигантов лучше других исследованы Юпитер и Сатурн и их спутники. Большую роль в этом сыграли экспедиции американских АМС «Пионер», «Вояджер», «Кассини».

2. Особенности строения. Важнейшая особенность строения планет-гигантов заключается в том, что, например, **Юпитер** и **Сатурн** не имеют твёрдых поверхностей. Такое представление хорошо согласуется с малыми средними плотностями планет-гигантов, их химическим составом (они состоят в основном из лёгких элементов — водорода и гелия), быстрым зональным вращением и некоторыми другими данными. Всё, что удаётся рассмотреть на Юпитере и Сатурне, происходит в протяжённых атмосферах этих планет. На **Юпитере** даже в небольшие телескопы заметны полосы, вытянутые вдоль экватора. В верхних слоях водородно-гелиевой атмосферы **Юпитера** в виде примесей встречаются метан и аммиак, углеводороды (этан, ацетилен), а также различные соединения (в том числе содержащие фосфор и серу), окрашивающие детали атмосферы в красно-коричневые и жёлтые цвета. Таким образом, по своему химическому составу планеты-гиганты и их атмосферы резко отличаются от планет земной группы. Это отличие связано с процессом образования планетной системы (см. § 32).

На фотографиях, переданных с борта АМС «Пионер» и «Вояджер», отчётливо видно, что газ в атмосфере **Юпитера** участвует в сложном движении, которое сопровождается образованием и распадом вихрей. Предполагается, что наблюдаемое на Юпитере около 300 лет *Большое Красное Пятно* (овал с полуосями 15 и 5 тыс. км) тоже представляет собой огромный и очень устойчивый вихрь (рис. 58).

Потоки движущегося газа и устойчивые пятна видны и на снимках **Сатурна**, переданных автоматическими межпланетными станциями. «Вояджер-2» дал возможность рассмотреть и детали атмосферы Нептуна.

Вещество, находящееся под облачным слоем планет-гигантов, недоступно непосредственному наблюдению. О его свойствах можно судить по некоторым дополнительным



Рис. 58. Большое Красное Пятно на Юпитере

данным. Например, предполагают, что в недрах планет-гигантов вещество должно иметь высокую температуру. Как же такой вывод был сделан? Во-первых, зная расстояние Юпитера от Солнца, вычислили количество теплоты, которое **Юпитер** от него получает. Во-вторых, определили отражательную способность атмосферы, что позволило узнать, сколько солнечной энергии планета отражает в космическое пространство. Наконец, вычислили температуру, которую должна иметь планета, находящаяся на известном расстоянии от Солнца. Она оказалась близкой к -160°C . Но температуру планеты можно определить и непосредственно, исследуя её инфракрасное излучение с помощью наземной аппаратуры или приборов, установленных на борту АМС. Такие измерения показали, что температура **Юпитера** близка к -130°C , т. е. выше расчётной. Следовательно, **Юпитер** излучает энергии почти в 2 раза больше, чем получает от Солнца. Это и позволило сделать вывод о том, что планета обладает собственным источником энергии.

Совокупность всех имеющихся сведений о планетах-гигантах даёт возможность построить *модели внутреннего строения* этих небесных тел, т. е. рассчитать, каковы *плотность, давление и температура* в их недрах. Например, температура вблизи центра **Юпитера** достигает $20\,000\text{ К}$.

В отличие от планет земной группы, обладающих корой, мантией и ядром, на **Юпитере** газообразный водород, входящий в состав атмосферы, переходит в жидкую, а затем и в твёрдую (металлическую) фазу. Появление таких необычных агрегатных состояний водорода (в последнем

случае он становится проводником электричества) связано с резким увеличением давления по мере погружения в глубину. Так, на глубине, несколько большей 0,9 радиуса планеты, давление достигает 40 млн атм ($4 \cdot 10^{12}$ Па).

Возможно, что с быстрым вращением проводящего ток вещества, находящегося в центральных областях планет-гигантов, связано существование значительных *магнитных полей* этих планет. Особенно велико магнитное поле **Юпитера**. Оно во много раз превосходит магнитное поле Земли, причём полярность его обратна земной (как вы знаете, у Земли вблизи северного географического полюса расположен южный магнитный). Магнитное поле планеты улавливает летящие от Солнца заряженные частицы (ионы, протоны, электроны и др.), которые образуют вокруг планеты пояса частиц высоких энергий, называемые *радиационными поясами*. Такие пояса из всех планет земной группы есть только у нашей планеты. Радиационный пояс **Юпитера** простирается на расстояние до 2,5 млн км. Он в десятки тысяч раз интенсивнее земного. Электрически заряженные частицы, движущиеся в радиационном поясе Юпитера, излучают радиоволны в диапазоне дециметровых ($\sim 10^{-1}$ м) и декаметровых ($\sim 10^1$ м) волн. Как и на Земле, на **Юпитере** наблюдаются *полярные сияния*, связанные с прорывом заряженных частиц из радиационных поясов в атмосферу, а также *грозы*.

3. Спутники. Система **спутников Юпитера** напоминает Солнечную систему в миниатюре. Четыре спутника, открытые Галилеем, называют *галилеевыми спутниками*. Это *Ио*, *Европа*, *Ганимед* и *Каллисто*. Самый большой из них — *Ганимед* — имеет диаметр 5260 км и превосходит по размерам Меркурий (но вдвое уступает этой планете по массе). Пролетая вблизи спутников Юпитера (а потом Сатурна), американские автоматические межпланетные станции «Пионер», «Вояджер», «Галилео» и «Кассини» передали на Землю фотографии с изображением их поверхностей, которые напоминают поверхности Луны и планет земной группы. Особенно похож на Луну *Ганимед* (рис. 59). Кроме кратеров, на *Ганимеди* много длинных хребтов и полос, образующих своеобразные ветвящиеся пучки. Уникальна поверхность *Ио* (рис. 60), на которой открыты действующие *вулканы*, и она буквально вся залита продуктами их

Рис. 59. Участок поверхности спутника Юпитера — Ганимеда

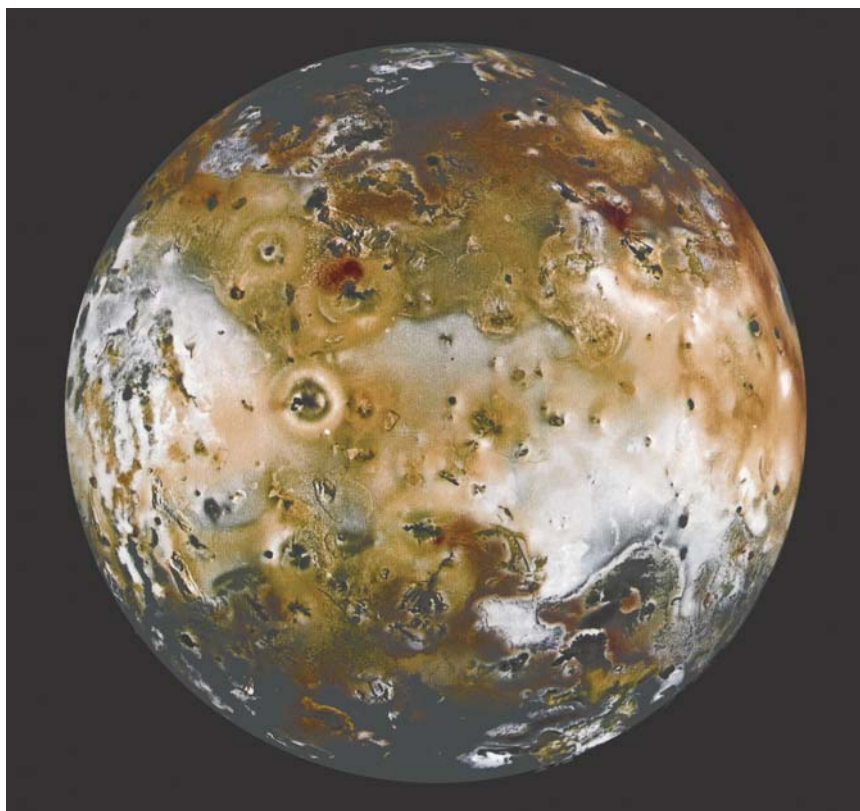
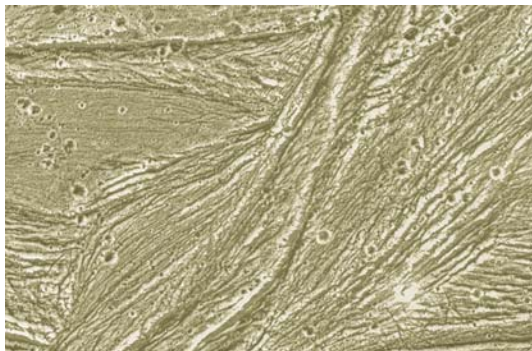


Рис. 60. Спутник Юпитера — Ио.

На его поверхности обнаружено множество действующих вулканов, в том числе 20 крупных, извергающих султаны (выбросы) на высоту до 300 км; основной выбрасываемый ими газ — диоксид серы. Оранжевый цвет поверхности Ио объясняется наличием отложений серы и сконденсировавшегося сернистого газа



Рис. 61. Спутник Юпитера — Каллисто

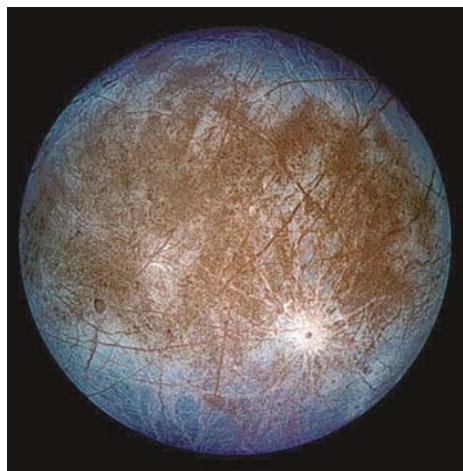


Рис. 62. Спутник Юпитера — Европа ►

извержения. Очень много кратеров на *Каллисто*. На фотографиях этого спутника видна многокольцевая структура («Бычий глаз») диаметром 600 км с системой концентрических колец (до 2600 км в диаметре), вероятно порождённая ударом метеорита (рис. 61). Поверхность *Европы* (рис. 62) испещрена тянущимися на несколько тысяч километров тёмными и светлыми трещинами (шириной 20—40 км). Совсем недавно было сообщено об открытии обширного подлёдного океана воды на этом спутнике Юпитера. Самый близкий к Юпитеру спутник *Амальтея*, а также все далёкие спутники, находящиеся за пределами орбит галилеевых спутников, имеют неправильную форму и этим напоминают малые планеты Солнечной системы (астероиды).

Сфотографированы с относительно близкого расстояния и некоторые спутники *Сатурна* (рис. 63). На поверхности этих небесных тел тоже обнаружено много кратеров; некоторые из них очень велики: диаметр кратера на спутнике *Тетия* около 400 км, а на спутнике *Мимас* (рис. 64) — около 130 км. Особый интерес представляет *Титан*, который обладает атмосферой. Она почти целиком состоит из азота, причём плотность и давление атмосферы у поверхности Титана превосходят соответствующие параметры атмосферы Земли. Плотный слой газовой оболочки скрывает поверхность Титана, которая практически не видна на снимках «Вояджеров». Масса Титана почти в 2 раза, а диаметр (около 5150 км) в 1,5 раза больше соответственно массы

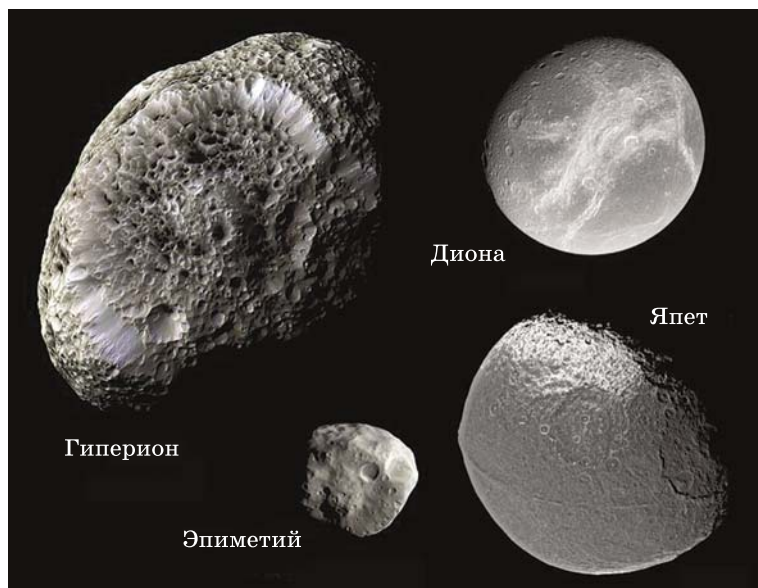


Рис. 63. Некоторые спутники Сатурна (коллаж)



Рис. 64. Спутник Сатурна — Мимас (диаметр кратера 130 км)

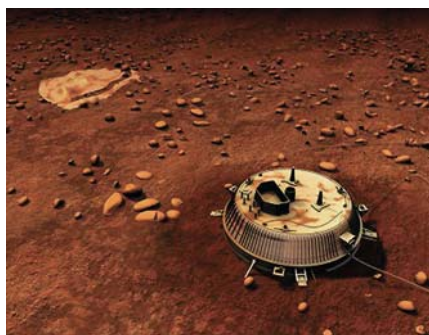


Рис. 65. Зонд «Гюйгенс» на поверхности Титана

и диаметра Луны. Важным этапом в исследовании природы Титана стала посадка на его поверхность в январе 2005 г. зонда «Гюйгенс» (рис. 65) в рамках АМС «Кассини».

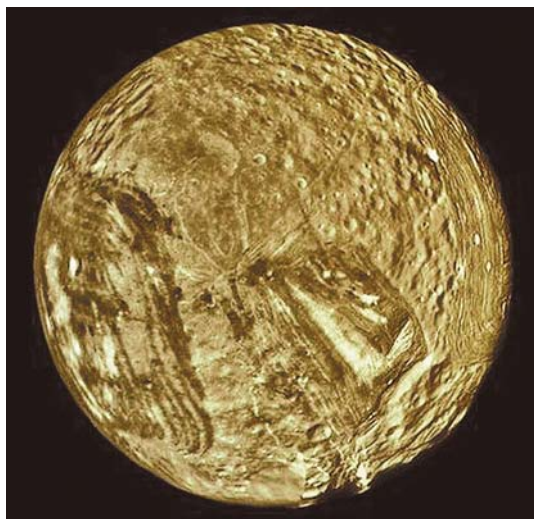


Рис. 66. Спутник Урана — Миранда



Рис. 67. Крупнейший спутник Нептуна — Тритон. Полярная шапка состоит из замёрзшего азота

Один из интереснейших спутников Урана — *Миранда* (рис. 66). Замечателен и *Тритон* (рис. 67) — самый большой спутник Нептуна. Диаметр *Тритона* 2705 км. На *Тритоне* тоже есть атмосфера, состоящая в основном из азота. Как и многие другие спутники планет-гигантов, *Тритон* — силикатно-ледяное небесное тело. На нём обнаружены кратеры, полярные шапки и даже газовые гейзеры.

4. **Кольца.** Первыми были открыты кольца *Сатурна* (XVII в., Галилей, Гюйгенс). Ещё в XIX в. английский физик *Дж. Максвелл* (1831—1879), изучавший устойчивость движения колец Сатурна, а также русские математик *С. Ковалевская* (1850—1891) и астрофизик *А. А. Белопольский* (1854—1934) разными методами доказали, что кольца

Сатурна не могут быть сплошными. С Земли в лучшие телескопы видно несколько колец, разделённых промежутками, а на фотографиях, переданных с АМС, — множество колец (рис. 68). Кольца очень широкие: они простираются над облачным слоем планеты на 60 000 км. Каждое состоит из частиц и глыб, движущихся по своим орбитам вокруг Сатурна. Толщина же колец не более 1 км. Поэтому, когда Земля при своём движении вокруг Солнца оказывается в плоскости колец Сатурна (это случается через 14—15 лет), кольца перестают быть видимыми: нам кажется, что они исчезают. Не исключено, что вещество, из которого состоят кольца, не вошло в состав планет и их больших спутников во время формирования этих небесных тел.

В 1977 г. были открыты *кольца у Урана*, в 1979 г. — у **Юпитера**, в 1989 г. — у **Нептуна**. На возможность существования колец у всех планет-гигантов ещё в 1960 г. указывал советский астроном *С. К. Всехсвятский* (1905—1984).



Рис. 68. Тонкая структура колец Сатурна. Цвета условные — они подчёркивают различие минерального состава колец

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличаются по своим основным физическим характеристикам планеты-гиганты от планет земной группы? 2. Какова особенность вращения планет-гигантов вокруг своей оси? 3*. Зная углы наклона осей планет-гигантов к плоскостям их орбит и периоды обращения этих планет вокруг Солнца, проанализируйте, как происходит смена времён года на Сатурне, Уране и Нептуне. 4. Каковы особенности строения планет-гигантов? 5*. Изобразите в одинаковом масштабе Ганимед, Титан и Тритон, а также Луну, Меркурий. Сравните их размеры и сделайте выводы. 6. Что представляют собой кольца планет? 7. Почему иногда даже в крупные телескопы не видны кольца Сатурна? 8. Что вы знаете о Юпитере и Сатурне? 9. Виден ли сейчас по вечерам Юпитер? При первой возможности рассмотрите эту планету в школьный телескоп. Заметно ли сжатие Юпитера? Как были расположены в момент наблюдения галилеевы спутники по отношению к Юпитеру? 10*. Используя ШАК, выясните, каковы условия видимости колец Сатурна, и, если это возможно, постарайтесь увидеть их в школьный телескоп.

§ 16. АСТЕРОИДЫ И МЕТЕОРИТЫ

1*. Закономерность в расстояниях планет от Солнца и пояс астероидов. Ещё в XVIII в. астрономы пытались найти планету, орбита которой проходит в пространстве между орбитами Марса и Юпитера. Уже в то время было известно соотношение, позволяющее приближённо вычислять в астрономических единицах расстояния планет от Солнца. Это соотношение (*правило Тициуса—Боде*) может быть записано в виде

$$r = 0,3 \cdot 2^n + 0,4, \quad (25)$$

где r — среднее расстояние планеты от Солнца (в а. е.). Для вычислений по формуле (25) нужно принять среднее расстояние Меркурия от Солнца равным 0,4 а. е. ($n = \infty$), а расстояния других планет получатся, если подставить в формулу различные значения n (0 — для Венеры, 1 — для Земли, 2 — для Марса, 3 — для предполагаемой планеты, 4 — для Юпитера и т. д.).

Вы сами можете убедиться, что для всех планет, включая Уран, формула (25) даёт удовлетворительные значения, а для Нептуна она непригодна. Но в XVIII в. планет, более далёких от Солнца, чем Уран, ещё не знали и формулу считали точной. Поэтому естественно было, руковод-

ствуясь формулой (25), искать планету, для которой $n = 3$ и $r = 2,8$ а. е. Такой планеты в Солнечной системе не существует. Однако в самом начале XIX в. итальянский астроном *Пиаци* (1746—1826) случайно открыл первую малую планету (астероид). Она была названа *Церерой*. В дальнейшем было открыто много других малых планет, образующих **Главный пояс астероидов** между орбитами Марса и Юпитера. Церера (её диаметр около 1000 км) относится теперь к карликовым планетам.

2. Движение астероидов. На фотографиях звёздного неба, снятых с большими экспозициями, астероиды получаются в виде светлых чёрточек. Зарегистрированы тысячи малых планет. Общее число астероидов должно быть в десятки раз больше. Астероиды, орбиты которых установлены, получают обозначения (порядковые номера) и названия. Некоторые новые астероиды названы в честь великих людей (1379 Ломоносов), государств (1541 Эстония, 1554 Югославия), обсерваторий (1373 Цинциннати) и т. д.

Астероиды движутся вокруг Солнца в ту же сторону, что и большие планеты. Их орбиты имеют большие эксцентриситеты (в среднем 0,15), чем орбиты больших планет. Некоторые из них в афелии удаляются за орбиту Сатурна, другие в перигелии приближаются к Марсу и Земле. Например, астероид *Гермес* в октябре 1937 г. прошёл от Земли на расстоянии 580 тыс. км (всего лишь в полтора раза дальше Луны). В марте 1989 г. астероид размером около 300 м пролетел на расстоянии менее 650 тыс. км от Земли. Подобное событие произошло в январе 2008 г. Астероид *Икар* попадает даже внутрь орбиты Меркурия и каждые 19 лет сближается с Землёй. Не исключено, что столкновение крупного астероида с Землёй привело 65 млн лет назад к гибели динозавров. Всё это заставило учёных приступить к разработке эффективных методов своевременного обнаружения и, если понадобится, уничтожения опасных астероидов.

В конце XX в. открыт ещё один пояс астероидов — **пояс Койпера**, расположенный за орбитой Нептуна и простирающийся от 30 до 55 а. е. от Солнца. Кроме множества астероидов в этой области космоса обнаружено несколько карликовых планет, крупнейшими из которых являются Плутон и Эрида.

3. Физические характеристики астероидов. Астероиды недоступны для наблюдения невооружённым глазом. Большинство астероидов — бесформенные глыбы длиной от нескольких километров до нескольких десятков километров. Массы астероидов хоть и различны, но слишком малы, чтобы эти небесные тела могли удерживать атмосферу. Общая масса астероидов Главного пояса примерно в 20 раз меньше массы Луны. Из всех этих астероидов получилась бы одна планета диаметром меньше 1500 км. В последние годы удалось открыть спутники (!) у некоторых астероидов.

Впервые астероид был запечатлён на фото в октябре 1991 г. с борта американского космического корабля «Галилео», запущенного в 1982 г. для исследования Юпитера. Пересекая Главный пояс астероидов, «Галилео» с расстояния всего 16 тыс. км сфотографировал малую планету 951, которую назвали *Гаспра* (рис. 69). Это типичный астероид. Большая полуось его орбиты 2,21 а. е. Он имеет неправильную форму и, возможно, образовался в результате столкновения более крупных тел в поясе астероидов. На снимках видны кратеры диаметром 1—2 км (освещённая часть астероида 16×12 км) и удаётся различить детали поверхности размером 60—100 м.



Рис. 69. Астероид Гаспра (его размеры $20 \times 12 \times 11$ км)

Спустя 10 лет (в феврале 2001 г.) космический аппарат впервые совершил мягкую посадку на поверхность астероида Эрос.

4. Метеориты. Под действием притяжения планет орбиты астероидов изменяются и могут пересекаться друг с другом. В результате возможны столкновения астероидов и их дробление. Большинство упавших на поверхность Земли *каменных и железных метеоритов* — обломки астероидов. При движении таких обломков в земной атмосфере возникает мощная *ударная волна*, в которой температура сжатого воздуха достигает десятков и сотен тысяч кельвинов. В результате диссоциации молекул воздуха и последующей многократной ионизации воздух приобретает свойства плазмы. При столкновении с землёй происходит взрыв.

Как вы уже знаете, в местах падения крупных метеоритов образуются кратеры. Кратеры обнаружены на всех планетах земной группы и на многих спутниках планет. Один из самых больших метеоритных кратеров на Земле находится в штате Аризона (США). Диаметр этого кругового кратера свыше 1200 м, а масса образовавшего его метеорита оценивается примерно в 200 000 т. Сейчас известны десятки больших метеоритных кратеров. Для их поисков в настоящее время применяют аэрофотосъёмку.

30 июня 1908 г. в тайге Центральной Сибири произошло явление, известное как падение *Тунгусского метеорита*. Взрыв, которым завершился полёт космического тела, повалил лес на площади более 2000 км², а также вызвал лесной пожар, многочисленные оптические, акустические и сейсмические явления. Взрывная волна обогнула земной шар. На громадной территории до 3—4 июля наблюдались исключительно светлые ночи, во время которых можно было читать мелкий шрифт. Однако ни сам метеорит, ни кратер от его падения обнаружить не удалось.

12 февраля 1947 г. в виде множества железных осколков (метеоритный дождь) упал *Сихотэ-Алинский метеорит*. Удалось собрать несколько десятков тонн метеоритного вещества (рис. 70).

В настоящее время в распоряжении учёных много метеоритов. Их химический состав тщательно изучен. *Железные метеориты* состоят в основном из железа (91 %)



**Рис. 70. Осколки
Сихотэ-Алинского
метеорита**

и никеля (8,5%). *Каменные метеориты*, как и земные горные породы, содержат кислород и кремний, но в них больше, чем в земной коре, таких металлов, как магний, железо и никель. В некоторых каменных метеоритах имеется углерод. Такие метеориты содержат не только уголь и графит, но и углеводороды, а также примеси более сложных органических соединений, включая аминокислоты. Эти сложные вещества могли образоваться в метеоритах из более простых на ранних стадиях развития Солнечной системы. Данные о химическом составе метеоритов позволяют судить о распространённости различных химических элементов в Солнечной системе.

Прежде чем упасть на Землю, метеориты долгое время путешествуют в межпланетном пространстве. Исследование вещества метеоритов и определение их возраста имеют важное значение для определения возраста планет и изучения условий, которые существовали в самый ранний период истории Солнечной системы. Поэтому метеориты представляют большую ценность для науки. Особен-

но интересны метеориты с Марса и Луны, десятки которых найдены в последние годы во льдах Антарктиды и песках африканских пустынь.

Ушло в прошлое то время, когда «небесным камням» поклонялись как «дарам неба», когда наука категорически отказывалась признавать (до начала XIX в.), что камни могут «падать с неба».

? Вопросы и задания для самоконтроля

1*. По формуле (25) вычислите приближённые средние расстояния планет от Солнца и сравните их с данными из Приложения IX. 2. Каковы периоды обращений астероидов, большие полуоси орбит которых 2,2 а. е., 3,6 а. е.? 3. Найдите эксцентриситет орбиты Икара, зная его расстояния от Солнца в перигелии и афелии (0,18 и 1,97 а. е.). 4. Существует ли связь между астероидами и метеоритами? 5. Используя ШАК и ПКЗН, выясните, какие созвездия будут видны сегодня вечером и будут ли в каких-нибудь из них находиться планеты.

§ 17. КОМЕТЫ И МЕТЕОРЫ

1. Вид, строение и открытие комет. Кроме больших и малых планет, вокруг Солнца движутся кометы (рис. 71, 72). Яркие кометы (хвостатые звёзды) своим необычным видом издавна привлекали внимание людей, внушая суеверный ужас.

От других тел Солнечной системы кометы резко отличаются не только своим *видом*, но и *формой орбит*, большими *размерами*, а также сравнительно быстрым, иногда бурным *развитием*. Вид комет меняется по мере приближения к Солнцу. Вдали от Солнца комета видна как слабое туманное пятнышко, которое перемещается на фоне звёздного неба. Постепенно у кометы развивается хвост, почти всегда направленный от Солнца.

Ежегодно обнаруживают в среднем 6—8 комет. Некоторые из них — это периодические кометы, которые в очередной раз возвратились к Солнцу. Только самые яркие кометы можно наблюдать невооружённым глазом. Часто кометы открывают любители астрономии, регулярно обзорающие звёздное небо в небольшие телескопы.

Основные части кометы: голова, ядро (центральное сгущение) и хвост. Ядра комет по размерам близки не-



Рис. 71. Комета Хейла—Боппа — одна из красивейших комет XX в. (1997)

большим астероидам. Диаметр головы кометы иногда достигает сотен тысяч километров, а хвосты простираются на десятки и сотни миллионов километров. После прохождения перигелия своей орбиты комета начинает постепенно «угасать» и перестаёт быть видимой даже в самые большие телескопы.

2. Орбиты комет. Чтобы рассчитать по формулам небесной механики орбиту кометы, достаточно определить из наблюдений её экваториальные координаты по крайней мере для трёх моментов времени. Первоначально вычисленную орбиту, по которой комета приближается к Солнцу, в дальнейшем уточняют на основе новых наблюдений, так как притяжение планет изменяет орбиту. В настоящее время для вычисления орбит комет применяют быстродействующие ЭВМ.

Орбиты большинства комет — сильно вытянутые эллипсы, плоскости которых под разными углами наклонены к плоскости эклиптики. Двигаясь по таким орбитам, кометы в перигелии близко подходят к Солнцу (и к Земле), а в афелии удаляются от него на сотни и тысячи астрономических единиц, уходя далеко за пределы Солнечной системы.



Рис. 72. Комета Галлея (1986)

Кометы, эксцентриситеты орбит которых не очень велики, имеют сравнительно небольшие периоды обращения вокруг Солнца. Самый короткий период — у кометы *Энке* (3,3 года), за которой уже ведутся наблюдения на протяжении полутора веков. Неоднократно приближалась к Солнцу комета *Галлея* (см. рис. 72), период обращения которой около 76 лет. По-



Рис. 73. Ядро кометы Галлея

оследнее прохождение этой кометы через перигелий (на расстоянии менее 0,6 а. е. от Солнца) было 9 февраля 1986 г. Комету Галлея удалось хорошо исследовать не только с Земли, но и с помощью нескольких специально запущенных космических аппаратов. На снимках, переданных с борта АМС «Вега-1», хорошо видно ядро кометы (рис. 73). Оно имеет неправильную форму (с размерами осей 14 и 7 км). От шарообразной отличаются формы и других малых тел Солнечной системы (некоторых спутников планет-гигантов, небольших астероидов).

3. Природа комет. Массу кометы можно оценить, наблюдая за возмущениями, которые появляются в её дви-

жении при сближении с планетами. Например, при сближении кометы с Юпитером период её обращения может сильно измениться, а период обращения массивного Юпитера практически остаётся прежним. Значит, масса кометы во много раз меньше массы Юпитера. Сближения комет с Землёй позволили уточнить верхний предел массы комет (10^{-4} массы Земли).

Вещество кометы сосредоточено в основном в её ядре, которое состоит из смеси замёрзших воды и газов (среди которых есть аммиак, метан, углекислый газ, азот, циан и др.), пылинок, металлических и каменных частиц разных размеров. Основные сведения о химическом составе ядер получены из анализа спектров газов, окружающих ядра комет, а также при сближении космических аппаратов с кометами.

Когда комета приближается к Солнцу, ядро постепенно прогревается, из него выделяются газы и пыль, которые окутывают ядро и образуют голову и хвост кометы. Хвост кометы состоит из очень разреженного вещества, сквозь которое даже просвечивают звёзды.

Ядро кометы и пыль, входящая в состав головы и хвоста, светят отражённым и рассеянным солнечным светом. Холодное свечение газа (*флуоресценция*) происходит под воздействием солнечного излучения. При сближении космических аппаратов с ядром кометы Галлея удалось определить по инфракрасному излучению его температуру (100°C). Учёные сравнивают ядро этой кометы с мартовским сугробом (лёд с примесью тугоплавких частиц). Из ядра кометы Галлея постоянно высвобождается много пыли, водяного пара, диоксида углерода, атомарного водорода и кислорода. Поверхностный слой кометы обновляется примерно за сутки.

Чем ближе комета подлетает к Солнцу, тем больше прогревается её ядро, а следовательно, возрастает выделение газов и пыли, но одновременно усиливается и световое давление на неё. Поэтому хвост кометы увеличивается и становится всё более заметным.

Кроме давления света, на хвосты комет действуют потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем (*солнечный ветер*). Магнитные поля этих потоков могут сообщать большие ускорения ионам, входящим в состав кометных

хвостов и возникающим в них под действием солнечного излучения. От соотношения сил тяготения (притяжение к Солнцу) и отталкивания зависит траектория движения частиц, а значит, и форма кометных хвостов. У массивных частиц силы притяжения преобладают над силами отталкивания. Если силы отталкивания в сотни раз больше сил притяжения, то хвост будет почти точно направлен от Солнца (I тип, по классификации выдающегося русского астрофизика *Ф. А. Бредихина* (1831—1904)). Небольшая изогнутость кометного хвоста указывает на то, что силы отталкивания лишь в десятки раз превосходят силы притяжения (II тип). Очень изогнутые хвосты (III тип) образуются, когда

силы отталкивания примерно равны силам притяжения. Когда силы притяжения больше сил отталкивания (очень крупные пылевые частицы), появляются аномальные хвосты, направленные к Солнцу. Схематически различные типы кометных хвостов изображены на рисунке 74.

В настоящее время кометы играют роль своеобразных «зондов» межпланетного пространства: они позволяют получить ценные сведения о свойствах космического пространства на различных расстояниях от Солнца.

Столкновение Земли с ядром кометы, а тем более прохождение Земли через хвост кометы, как это было в 1910 г., не может привести нашу планету к гибели. Но, согласно одной из гипотез, Тунгусский метеорит как раз и был ядром небольшой кометы, взорвавшимся над земной поверхностью. А в июле 1994 г. произошло столкновение одной из комет с Юпитером (комета Шумейкеров—Леви 9). Поэтому астероидно-кометную опасность игнорировать недопустимо, и учёные сейчас разрабатывают программы предупреждения опасных сближений и защиты от них.

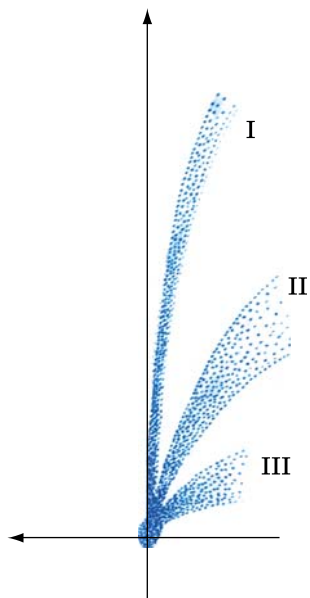


Рис. 74. Основные типы кометных хвостов

4. Метеоры и болиды. «Падающие звёзды», или метеоры, часто привлекают наше внимание в ясные безлунные ночи. Природа метеоров веками оставалась неразгаданной, хотя уже давно было ясно, что метеоры ничего общего со звёздами не имеют.

Если из двух пунктов, разделённых десятками километров, одновременно сфотографировать метеор или при визуальных наблюдениях нанести его путь на звёздную карту, то окажется, что вследствие параллактического смещения наблюдатели зафиксируют метеор на фоне разных звёзд. Зная параллактическое смещение и расстояние между пунктами наблюдения, легко найти высоту метеора. Установив перед фотоаппаратом равномерно вращающийся сектор, периодически закрывающий объектив, получают на фотографии прерывистый след, по которому можно определить скорость движущегося метеорного тела. *Метеор — это явление вспышки небольшого* (размером с горошину) *метеорного тела*, вторгшегося со скоростью от 11 до 73 км/с в земную атмосферу. Высота возгорания (от 120 до 80 км) зависит от массы и скорости метеорного тела. Чем больше масса и скорость метеорного тела, тем ярче метеор.

Вторжение массивных метеорных тел вызывает очень яркие метеоры (болиды), нередко имеющие вид огненных шаров со светящимися хвостами. Некоторые болиды можно видеть даже днём.

Что же происходит при движении метеорного тела в атмосфере Земли? Взаимодействуя с молекулами воздуха, метеорное тело теряет свою скорость, нагревается, начинает испаряться, иногда дробится. Вокруг него образуется облачко из раскалённых газов. В результате этих процессов масса метеорного тела непрерывно уменьшается; почти все метеорные частицы распыляются, не долетев до Земли. Пролетая в земной атмосфере, метеорное тело ионизирует молекулы воздуха, оставляя за собой светящийся след. От ионизованных метеорных следов хорошо отражаются радиоволны. Благодаря этому метеоры можно наблюдать не только визуальным и фотографическим, но и радиолокационным методом.

5. Метеорные потоки. Ежегодно в одни и те же ночи (например, 12 августа) можно наблюдать особенно много

метеоров. Если в это время нанести видимые пути метеоров на звёздную карту, то легко найти небольшой участок неба — радиант, из которого, как нам кажется, вылетают метеоры. Так, радиант августовских метеоров находится в созвездии *Персея* (*метеорный поток Персеиды*). С давних времён известны метеорные дожди *Леониды* (радиант метеорного потока в созвездии *Льва*). Леониды бывают ежегодно в ноябре, но наиболее интенсивные потоки повторяются через 33 года. Таким, например, был дождь в 1833 г. Очевидцы сравнивали его со снежной метелью. Обильный дождь Леонид в соответствии с предсказаниями астрономов наблюдался в ноябре 1966 г.

Метеорные потоки (а их известно сейчас более 30) наблюдаются в тех случаях, когда Земля встречается с *роем метеорных тел*, которые движутся приблизительно по одной орбите. Наблюдения показывают, что метеорные рои движутся по орбитам старых, уже разрушившихся комет. Следовательно, кометы, разрушаясь, порождают метеорные рои. Так, например, метеорный поток *Ориониды*, наблюдающийся с 16 по 26 октября, порождён уже немолодой кометой Галлея.

Кометы связаны не только с метеорами, но и с астероидами. В последнее время удалось доказать, что некоторые астероиды представляют собой ядра бывших короткопериодических комет.

Наблюдениями метеоров успешно занимаются юные любители астрономии. Члены школьных астрономических кружков и обществ наносят пути метеоров на звёздные карты, фотографируют метеоры, определяют их высоты и скорости, производят подсчёт метеоров в потоках, фотографируют спектры метеоров, исследуют их физические свойства. Решением этих и некоторых других задач любители астрономии помогают учёным исследовать распределение метеорной материи в пространстве и движение воздуха в атмосфере Земли.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Каков примерно период обращения кометы, которая в афелии отстоит от Солнца на 4000 а. е.?
2. В чём сходство и различие комет и других известных вам небесных тел Солнечной системы?
3. Какова связь комет с метеорами и астероидами?
4. Охарактеризуйте

физический смысл понятий «метеор», «метеорит», «болид». 5. Опровергните представление о метеорах как «падающих звёздах». 6. Почему иногда происходят метеорные дожди? 7. Как вы поняли, что такое радиант метеорного потока? 8. К каким небесным телам Солнечной системы уже приближались космические аппараты?



Что желательно знать, изучив тему «Физическая природа тел Солнечной системы»

1. Планетная система представляет собой комплекс небесных тел, объединённых не только упорядоченностью движения, но и общностью физических свойств. Сравнительное изучение Земли и планет обогащает наши знания о планете, на которой мы живём.
2. Полезно знать, по каким именно характеристикам планеты делятся на две основные группы, что представляют собой их атмосферы, что известно об их поверхностях и внутреннем строении, какие сведения о планетах и их спутниках были получены с помощью космической техники.
3. Луна — спутник Земли и ближайшее к Земле небесное тело. По своей природе Луна, как и другие спутники планет, близка к планетам земной группы. Выясните для себя причины сходства и различия физической природы Земли и Луны, а также основные особенности системы «Земля — Луна».
4. Астероиды, кометы, метеорные тела и метеориты образуют комплекс малых тел Солнечной системы. Нужно знать, какова природа этих небесных тел, в чём они сходны и чем отличаются от планет и их спутников.



Что желательно уметь, изучив тему «Физическая природа тел Солнечной системы»

1. Объяснять: а) смену времён года на Земле и других планетах; б) смену фаз Луны; в) почему с Земли видна одна сторона Луны; г) как происходят солнечные и лунные затмения.
2. Рассчитывать средние плотности планет, зная их массы и размеры.

3. Работать с таблицами, содержащими важнейшие сведения о Земле, Луне и планетах.
4. Пользоваться школьным телескопом при наблюдении Луны и планет.
- 5*. Находить на Луне Океан Бурь, Море Дождей, кратеры Тихо и Коперник.
6. На основе анализа многообразия условий на планетах делать вывод о возможности существования жизни в пределах Солнечной системы.
7. Опровергать на основе научных данных суеверия, связанные с Луной, затмениями, появлением комет и метеоров.
8. Используя материал темы, приводить примеры взаимосвязи явлений природы и познаваемости окружающего нас мира.

§ 18. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЦЕ

1. Введение. Солнце играет исключительную роль в жизни Земли. Весь органический мир нашей планеты обязан Солнцу своим существованием. Солнце — не только источник света и тепла, но и первоначальный источник многих других видов энергии (нефти, угля, воды, ветра).

Издавна у разных народов Солнце было объектом поклонения. Его считали самым могущественным божеством. Культ непобедимого Солнца был одним из самых распространённых (Гелиос — греческий бог Солнца, Аполлон — бог Солнца у римлян, Митра — у персов, Ярило — у славян и т. д.). В честь Солнца воздвигали храмы, слагали гимны, ему приносили жертвы. Давно ушло в прошлое поклонение дневному светилу. Сейчас учёные исследуют природу Солнца, выясняют его влияние на Землю, работают над проблемой применения практически неиссякаемой солнечной энергии.

Солнце — это наша звезда. Изучая Солнце, мы узнаём о многих явлениях и процессах, происходящих на других звёздах и недоступных непосредственному наблюдению из-за огромных расстояний, которые отделяют нас от звёзд.

2. Вид Солнца в телескоп (рис. 75). Наблюдения Солнца требуют большой осторожности. *Нельзя смотреть на Солнце, не защитив глаза очень плотным (тёмным) светофильтром! Но даже со светофильтром не рекомендуется смотреть на Солнце в школьный телескоп.* Лучше установить на окулярном конце телескопа экран с листом белой бумаги и рассматривать изображение Солнца на экране. Это позволит увидеть на Солнце тёмные пятна (сол-

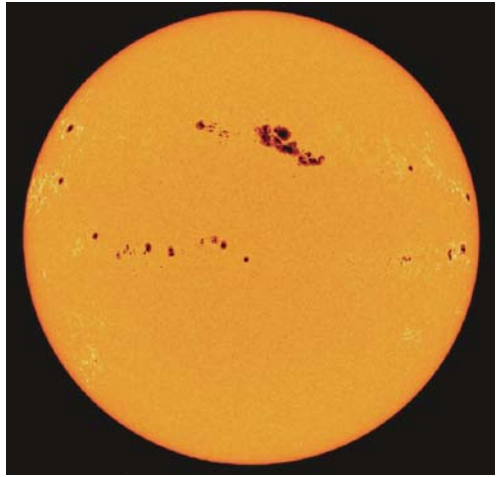


Рис. 75. Вид Солнца с большим числом пятен (29 марта 2001 г.)

нечные пятна) и светлые участки (факелы), которые заметнее вокруг пятен вблизи края солнечного диска. На современных обсерваториях для наблюдения Солнца применяют телескопы специальных конструкций — солнечные телескопы. Таким телескопом оснащена, например, Крымская астрофизическая обсерватория (рис. 76).



Рис. 76. Солнечный телескоп Крымской астрофизической обсерватории

3. Вращение Солнца. Если сравнить несколько последовательных фотографий Солнца, то можно заметить, как меняется положение всех пятен на диске. Это происходит из-за вращения Солнца. *Солнце вращается не как твёрдое тело.* Пятна, находящиеся вблизи экватора Солнца, опережают пятна, расположенные в средних широтах. Следовательно, скорости вращения разных слоёв Солнца различны. Экваториальные области делают один оборот вокруг оси Солнца за 25 земных суток, а области вблизи полюсов Солнца — примерно за 30 суток. Линейная скорость вращения на экваторе Солнца составляет 2 км/с. Наблюдения показывают, что все пятна перемещаются от восточного края к западному. Следовательно, *Солнце вращается вокруг своей оси в направлении движения планет вокруг него.*

4. Размеры, масса и светимость Солнца. Радиус Солнца в 109 раз, а объём примерно в 1 300 000 раз больше соответственно радиуса и объёма Земли. Велика и масса Солнца. Она примерно в 330 000 раз больше массы Земли и почти в 750 раз больше суммарной массы движущихся вокруг него планет.

Энергия, получаемая Землёй от Солнца, характеризуется солнечной постоянной. *Солнечной постоянной называется величина, определяемая полной энергией, которая падает в 1 с на площадку 1 м², расположенную перпендикулярно солнечным лучам вне земной атмосферы на среднем расстоянии Земли от Солнца.*

Для измерения солнечной постоянной на высокоточных станциях определяют количество теплоты, которое получает вода, налитая в специальные сосуды, от зачернённого металлического диска, нагреваемого солнечными лучами. В результате тщательных измерений, выполненных с учётом поглощения видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучений в земной атмосфере, нашли, что солнечная постоянная равна 1400 Вт/м² (более точное значение несколько меньше).

Измерения солнечной постоянной проводились на протяжении многих лет. Оказалось, что значение солнечной постоянной практически не меняется. Значит, полная энергия, излучаемая Солнцем в единицу времени, постоянна. Если умножить солнечную постоянную на площадь

сферы, радиус которой равен среднему расстоянию Земли от Солнца, то получится общая энергия, излучаемая Солнцем в единицу времени ($L_{\odot}$). $L_{\odot}$ — это светимость Солнца (или мощность его излучения):

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

5. Температура Солнца и состояние вещества на Солнце. Чтобы выяснить, в каком состоянии находится вещество на Солнце, необходимо прежде всего знать температуру Солнца. Существуют различные способы определения температуры Солнца, все они основаны на физических законах, *открытых на Земле и действующих во всей доступной наблюдениям части Вселенной*. Один из способов определения температуры Солнца заключается в следующем. Мы знаем светимость Солнца $L_{\odot}$. Известен и радиус Солнца $R_{\odot}$, а следовательно, и площадь видимой поверхности Солнца $4\pi R_{\odot}^2$. Зная это, вычислим энергию ε , излучаемую единицей площади поверхности Солнца в единицу времени. Очевидно, что

$$\varepsilon = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2}. \quad (26)$$

С другой стороны, энергия, излучаемая в единицу времени с единицы поверхности, пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры:

$$\varepsilon = \sigma T^4 \quad (27)$$

(закон Стефана—Больцмана), где σ — коэффициент пропорциональности, равный $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Из формул (26) и (27) следует, что

$$\sigma T^4 = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2}, \quad (28)$$

тогда

$$T = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma}}. \quad (28')$$

Подставляя числовые значения входящих в формулу (28') величин, находим $T \approx 6000 \text{ К}$. Полученную таким методом температуру называют эффективной температурой.

Мы применили закон Стефана—Больцмана, считая, что Солнце излучает как некоторое идеальное (его назы-

вают чёрным) тело, хотя на самом деле это не совсем так. Абсолютно чёрное тело — это идеальный поглотитель излучения (оно полностью поглощает весь падающий на него поток излучения) и идеальный излучатель (оно излучает в диапазоне всех длин волн). Все реальные тела, излучающие энергию, включая Солнце и другие звёзды, лишь с определённой степенью точности можно принимать за абсолютно чёрные тела. Исследование свойств вещества, из которого состоят видимые наружные слои Солнца, показывает, что это вещество действительно очень хорошо поглощает излучение, чем и оправдывается применение формулы (27). На рисунке 77 показана зависимость энергии, излучаемой Солнцем и другими источниками излучения, от длины волны. Из рисунка видно, что чем выше температура, тем меньше длина волны ($\lambda_{\max}$), соответству-

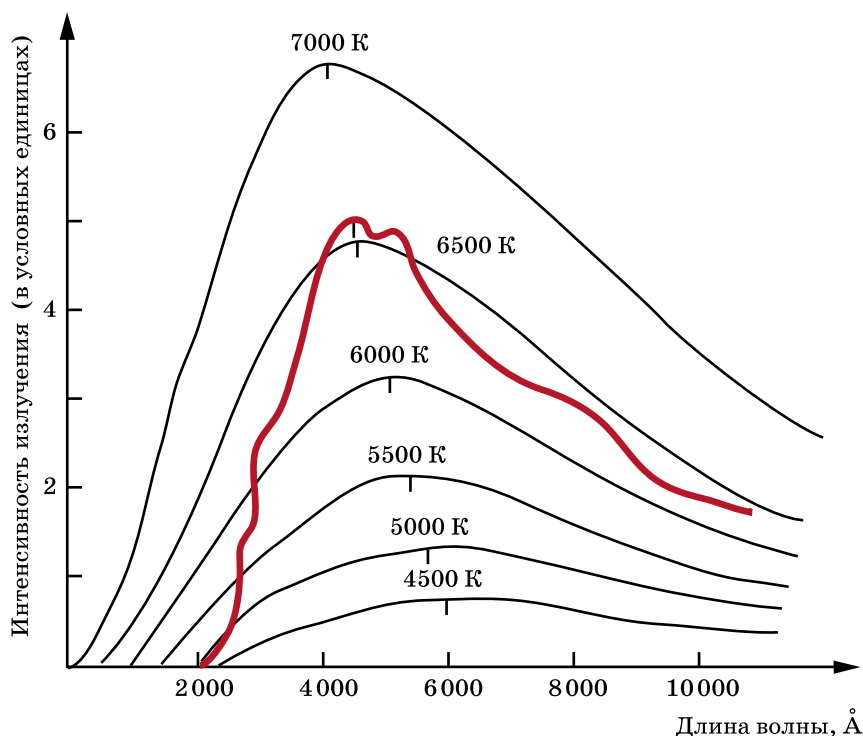


Рис. 77. Распределение энергии в спектре Солнца (красная линия) и абсолютно чёрных тел с различной температурой

ющая максимуму излучаемой энергии. Более точно эта зависимость выражается *законом Вина*:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0029}{T}, \quad (29)$$

где λ — длина волны в метрах; T — абсолютная температура в кельвинах. Максимум излучения Солнца приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 4,7 \cdot 10^{-7}$ м (отсюда жёлтый цвет Солнца).

При температуре 6000 К вещество находится на Солнце в газообразном состоянии, причём атомы некоторых химических элементов ионизованы. С глубиной температура растёт, достигая в центре Солнца $1,5 \cdot 10^7$ К, а вместе с тем увеличивается число ионизованных атомов. Поэтому основное состояние, в котором находится вещество на Солнце, — это плазма, а *Солнце — это раскалённый плазменный шар*.

6. Химический состав Солнца. Даже в прошлом веке некоторые учёные считали, что мы никогда не узнаем, из чего состоит Солнце. Однако применение спектрального анализа к исследованию Солнца опровергло такое мнение. Спектр Солнца — это непрерывный спектр, пересечённый множеством узких тёмных линий поглощения (называемых *фраунгоферовыми* линиями, по имени немецкого оптика *Й. Фраунгофера* (1787—1826), впервые наблюдавшего и зарисовавшего их в 1814 г.).

Отождествление линий в спектре Солнца с линиями в спектрах химических элементов, изучаемых в лабораторных условиях, позволяет определить состав атмосферы Солнца. На Солнце обнаружено *более 70 химических элементов*. Никаких «неземных» элементов Солнце не содержит. Самые распространённые элементы на Солнце — водород (около 70 % всей массы Солнца) и гелий (более 28 %). Гелий («солнечный газ») был впервые открыт на Солнце и только почти через 30 лет — на Земле.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Во сколько раз Солнце больше Земли по диаметру? по массе?
2. Вычислите среднюю плотность Солнца и полученный результат сравните с табличным (см. Приложение VIII), а также со средней плотностью Земли и Юпитера.
3. Сравните (по размерам и массе)

Солнце, Юпитер и Землю, изобразив эти небесные тела в выбранном вами масштабе. 4. Какова особенность вращения Солнца вокруг оси? 5*. Пятна, появляющиеся вблизи экватора Солнца, совершают полный оборот (по отношению к земному наблюдателю) за 27 сут., т. е. за время, на 2 сут. большее периода вращения экваториальной области Солнца. Как объяснить это явление? 6. Какие химические элементы в основном входят в состав Солнца? 7. Опираясь на знания, полученные из курсов физики и химии, вспомните, какую роль сыграл гелий в физике низких температур, в изучении строения атома, а также где сейчас используется гелий. 8. Что такое солнечная постоянная? 9*. Чему равна эффективная температура Солнца и как её можно определить? 10. В каком физическом состоянии находится вещество на Солнце? Что вам известно о распространённости и свойствах такого состояния вещества?

§ 19. АТМОСФЕРА СОЛНЦА

Условно в атмосфере Солнца выделяют три основных слоя: фотосферу (самый нижний слой), хромосферу и корону.

1. Фотосфера. Доступная непосредственному наблюдению светящаяся «поверхность» Солнца называется фотосферой. Никакой «поверхности» в обычном смысле этого слова у Солнца, конечно, нет. На самом деле фотосфера представляет собой нижний слой солнечной атмосферы, толщина которого 300—400 км. Именно она излучает практически всю приходящую к нам солнечную энергию, так как из-за непрозрачности вещества фотосферы солнечное излучение из более глубоких слоёв Солнца к нам уже не доходит и их увидеть невозможно. Плотность фотосферы не превышает порядка 10^{-4} кг/м³, а число атомов преобладающего в фотосфере водорода — порядка 10^{17} в объёме 1 см³. Температура в фотосфере растёт с глубиной, в среднем она близка к 6000 К.

На рисунке 78 показан участок фотосферы. На нём видно крупное солнечное пятно и множество зёрен (гранул). Гранулы ярче и, значит, *горячее*, чем окружающие его участки фотосферы. Размеры гранул неодинаковы и составляют в среднем несколько сотен километров. Время существования отдельных гранул около 8 мин. Непрерывно появляющиеся и исчезающие гранулы свидетельствуют о том, что вещество, из которого состоит фотосфера, нахо-

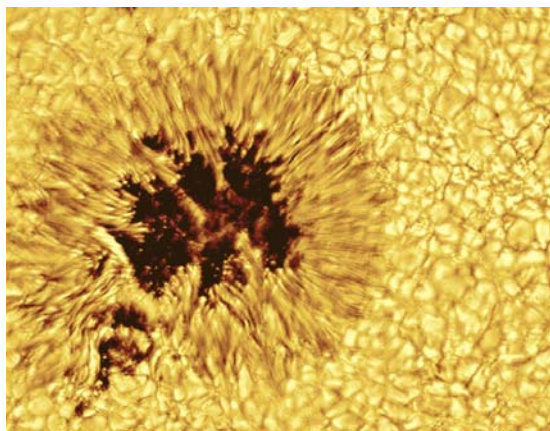


Рис. 78. Участок фотосферы Солнца

дится в движении. Один из видов движения в фотосфере и подфотосферных слоях — вертикальный подъём и опускание вещества. Такое колебательное движение связано с *конвекцией*: начиная с некоторой глубины (примерно 0,3 радиуса Солнца) вещество на Солнце перемешивается, подобно воде в сосуде, подогреваемой снизу. Гранулы — это вершины конвективных потоков, проникающих в фотосферу. Гранулы всегда наблюдаются на всей поверхности Солнца, которую иногда сравнивают с кипящей рисовой кашей. Другие детали фотосферы (пятна, факелы) появляются лишь время от времени.

Ещё задолго до изобретения телескопа люди замечали на неярком заходящем Солнце или на Солнце, видимом сквозь лёгкие облака, *тёмные пятна*. Но тогда не только не знали, что представляют собой пятна, но и не допускали мысли о том, что пятна находятся на Солнце. Лишь теперь, спустя четыре столетия с тех пор, как Галилей доказал, что пятна — это реальные образования на поверхности Солнца, выясняется их физическая природа.

Солнечные пятна значительно крупнее гранул. Диаметры наибольших пятен достигают десятков тысяч километров. Пятна — непостоянные, изменчивые детали фотосферы, существующие от нескольких дней до нескольких месяцев. Иногда на Солнце не бывает пятен совсем, а иногда одновременно наблюдаются десятки крупных пятен. Многолетние наблюдения пятнообразовательной деятельности Солнца показали, что имеются циклические колеба-

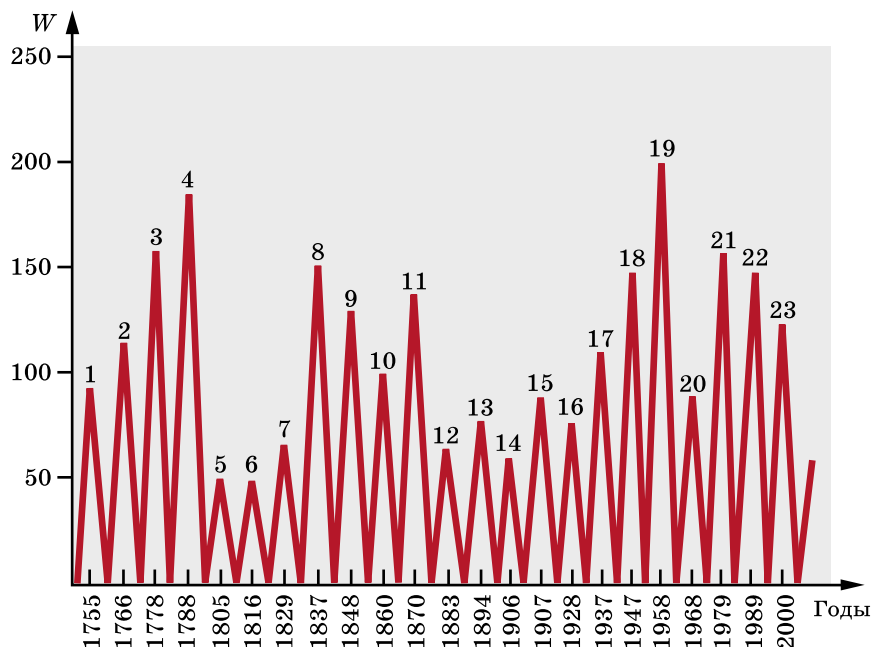


Рис. 79. Цикличность появления наблюдаемых на Солнце пятен. 24-й цикл солнечной активности начался в 2008 г. Его двойной максимум пришёлся на 2012—2014 гг. и оказался самым слабым за последние 100 лет (W — относительное число солнечных пятен: $W = 10g + f$, где g — число групп пятен, f — число пятен)

ния числа пятен. *Средняя продолжительность цикла составляет примерно 11 лет (рис. 79).*

Центральная часть пятна — ядро (или тень) — окружена волокнистой полутенью (см. рис. 78). Вблизи края солнечного диска круглое пятно видно как эллиптическое, а совсем близко от края диска — как узкая полоска полутени. Это можно объяснить тем, что пятно представляет собой коническую воронку, глубина которой примерно 300—400 км. Пятна кажутся тёмными лишь по контрасту с фотосферой. На самом деле температура ядра (самой холодной части пятна) около 4300 К, т. е. выше температуры электрической дуги, на которую, как известно, нельзя смотреть без защитных очков. Линии в спектре пятен заметно расщеплены. Это явление объясняется тем, что вещество пятен подвержено действию сильных магнитных полей. Обычно пятна наблюдаются группами (рис. 80).

Пятно в группе, которое располагается первым по направлению вращения Солнца, называется **головным**, последнее пятно в группе — **хвостовым**. Головные и хвостовые пятна имеют противоположную полярность, например головные — северный магнитный полюс, а хвостовые — южный, т. е. в целом группа пятен напоминает гигантский магнит. Магнитное поле пятен в тысячи раз превосходит общее магнитное поле Солнца. Поэтому солнечные пятна подобны «магнитным островам» в фотосфере Солнца. Замечательно, что в соседних 11-летних циклах группы пятен изменяют свою полярность. Например, если в данном 11-летнем цикле все головные пятна групп в северном полушарии Солнца имели северный магнитный полюс, то в следующем цикле северный магнитный полюс будет у хвостовых пятен.

Магнитное поле пятен — одна из наиболее важных их характеристик. Именно с магнитным полем связана и причина появления солнечных пятен. Дело в том, что сильное магнитное поле способно замедлить конвекцию плазмы. В местах, где конвекция замедлена, на поверхность поступает меньше энергии, там образуются более холодные и тёмные участки фотосферы — солнечные пятна.

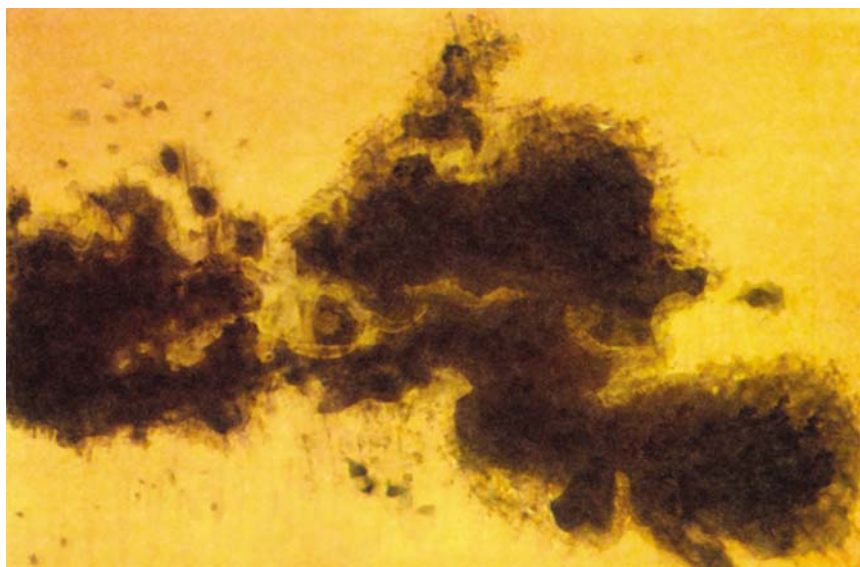


Рис. 80. Большая группа солнечных пятен

Фотосферные факелы — детали более светлые (а значит, и более горячие), чем фотосфера. Если группа пятен находится вблизи края солнечного диска, то вокруг неё обычно видно множество факелов — *факельное поле*. Факелы возникают незадолго до появления солнечных пятен и существуют в среднем в три раза дольше пятен. В местах, где наблюдаются факелы, на поверхность Солнца выносится более горячее вещество, чем в других участках фотосферы. Это связано с местным усилением конвекции в подфотосферных слоях.

2. Хромосфера. В моменты полных солнечных затмений хорошо видны внешние области атмосферы Солнца — хромосфера (розового цвета) и серебристо-жемчужная корона. Яркость хромосферы и короны во много раз меньше яркости фотосферы. Из-за рассеяния солнечного света в земной атмосфере эти слабосветящиеся внешние оболочки не удаётся видеть вне затмения без специальных приспособлений.

Хромосфера простирается до высоты 10—14 тыс. км. В её самых нижних слоях температура около 5000 К, а затем, по мере подъёма над фотосферой, она начинает постепенно расти, достигая в верхних слоях ($2 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^4$) К.

Вне затмения хромосферу можно наблюдать, если выделить очень узкий участок спектра и получить изображение Солнца в *монохроматическом свете*, длина волны которого соответствует какой-нибудь одной спектральной линии, например водородной линии H_{α} . Тогда можно увидеть, что

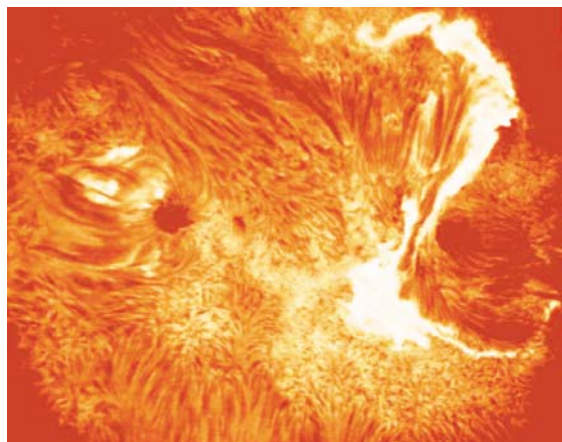


Рис. 81. Солнечная вспышка

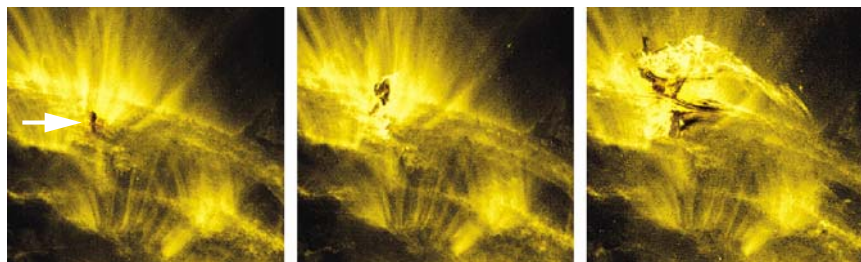


Рис. 82. Развитие солнечной вспышки

хромосфера состоит из тёмных и светлых узелков, образующих сетку. Размеры ячеек хромосферной сетки значительно превосходят размеры гранул фотосферы, достигая 30—50 тыс. км. Яркость хромосферы неодинакова. Наиболее яркие её участки (*хромосферные факелы*) расположены над фотосферными факелами и пятнами.

В хромосфере наблюдаются самые мощные и быстро развивающиеся процессы, называемые *солнечными вспышками* (рис. 81). В ходе развития вспышки сначала увеличивается яркость небольшого участка хромосферы, но затем становится яркой область, охватывающая десятки миллиардов квадратных километров (рис. 82). Слабые вспышки исчезают через 5—10 мин, а самые мощные продолжаются несколько часов. Небольшие вспышки происходят на Солнце по нескольку раз в сутки, мощные наблюдаются значительно реже. Обычно вспышки появляются над пятнами, особенно над теми, которые быстро изменяются. По характеру явления (стремительность развития, огромное энерговыделение — до 10^{25} — 10^{26} Дж) вспышки представляют собой *взрывные процессы*, при которых высвобождается огромная энергия. Вспышки сопровождаются мощным *ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоизлучением*. В межпланетное пространство выбрасываются электрически заряженные частицы (*корпускулы*).

На краю солнечного диска хорошо видны *протуберанцы* (рис. 83) — гигантские яркие выступы или арки, «опирающиеся» на хромосферу и врывающиеся в солнечную корону. Спокойные протуберанцы существуют несколько недель и даже месяцев. Вещество протуберанцев поглощает и рассеивает идущее снизу излучение, а потому, проецируясь на яркий диск Солнца, протуберанцы вы-

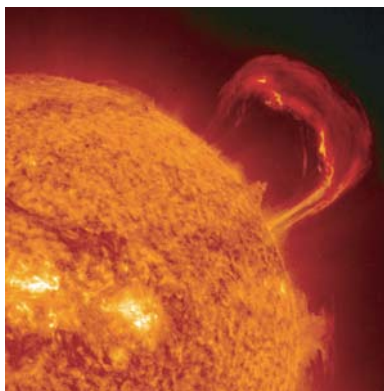


Рис. 83. Протуберанец



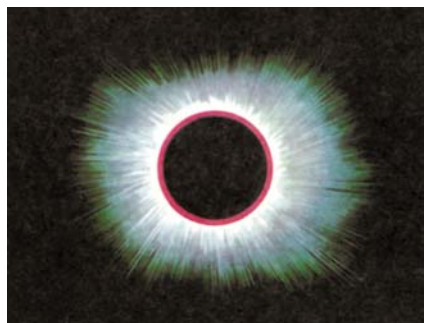
Рис. 84. Вид Солнца во время полного затмения

глядят как тёмные волокна. В отличие от *спокойных* протуберанцев часто наблюдаются протуберанцы, для которых характерны очень быстрые движения и выбросы вещества в корону.

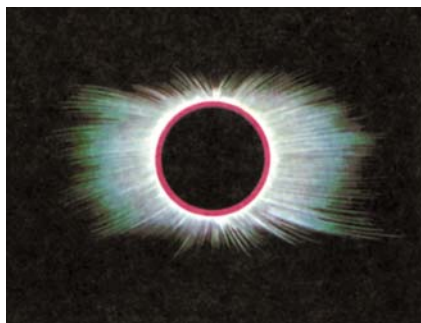
3. Солнечная корона. Внутренние области короны, удалённые от фотосферы на расстояние до одного радиуса Солнца, можно наблюдать не только во время солнечных затмений (рис. 84), но и вне затмения с помощью коронोगрафа — специального телескопа, в фокусе объектива которого ставится зачернённый диск («искусственная Луна»). Коронोगрафы устанавливают в горах на высоте не ниже 2000 м над уровнем моря, где солнечное излучение значительно меньше рассеивается земной атмосферой.

Форма короны не остаётся постоянной (рис. 85). В годы, когда на поверхности Солнца много пятен, корона почти круглая. Когда же пятен мало, корона сильно вытянута в плоскости экватора Солнца. Корона неоднородна: в ней наблюдаются лучи, дуги, отдельные сгущения вещества, полярные «щёточки» (короткие прямые лучи, наблюдаемые у полюсов) и т. д. Детали короны неразрывно связаны с пятнами и факелами, а также с явлениями, происходящими в хромосфере. Все детали короны вращаются с той же угловой скоростью, что и расположенные под ними участки фотосферы.

Как далеко простирается корона? По фотографиям, полученным во время затмений, корону удастся проследить



а)



б)

Рис. 85. Солнечная корона: а) в год максимума; б) в год минимума

на расстоянии до нескольких солнечных радиусов от края Солнца. Отдельные выбросы солнечной плазмы, которые входят в состав сверхкороны Солнца, достигают земной орбиты. Сверхкорона была открыта радиоастрономическими методами. Огромная протяжённость короны объясняется большими скоростями входящих в неё частиц, а значит, и высокой температурой короны. Этот вывод подтверждает исследование спектра короны. Ряд линий в спектре короны оставался загадочным вплоть до 40-х гг. XX в. Оказалось, что эти линии принадлежат многократно ионизованным атомам хорошо известных на Земле элементов, например атомам железа, лишённым 13 электронов. Такая высокая ионизация в очень разреженном веществе короны возможна при температуре не менее 10^6 К. Следовательно, наблюдая корону, можно изучать в космической лаборатории высокотемпературную разреженную плазму в естественных условиях.

Поскольку средняя температура фотосферы около 6000 К, то она своим излучением не может нагреть солнечную корону до более высокой температуры. Согласно одной из гипотез конвективные движения газа внутри Солнца создают сжатия и разрежения (волны), которые переносят энергию из внутренних слоёв Солнца в его атмосферу. Энергия волнового движения нагревает вещество хромосферы и короны. Разреженный газ хромосферы и короны излучает мало и, получая большой приток энергии снизу, сильно нагревается.

4. Солнечная активность. *Комплекс нестационарных образований в атмосфере Солнца (пятна, факелы, протуберанцы, вспышки и др.) называется солнечной активностью.* Так, солнечные пятна всегда связаны с фотосферными факелами, вспышки и протуберанцы в большинстве случаев образуются над «возмущённой» фотосферой и т. д. Области на Солнце, где наблюдаются пятна, факелы, вспышки, протуберанцы и другие проявления солнечной активности, называются активными областями (или центрами активности). Как мы видели, центры активности, зарождаясь на некоторой глубине под фотосферой, простираются далеко в солнечную корону. Связующее звено между различными ярусами центров активности — *магнитное поле.*

Не только появление пятен, но и солнечная активность в целом имеет 11-летнюю цикличность. В годы максимума солнечной активности на Солнце много центров активности (возмущённое Солнце). В годы минимума центров активности мало (спокойное Солнце). Необычным был максимум 22-го цикла солнечной активности. Он отличался высокой активностью (в частности, большим числом пятен) и продолжительностью (растянутостью на несколько лет — примерно с 1989 по 1992 г.).

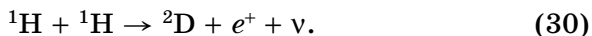
? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое фотосфера Солнца?
2. Сравните приведённые в тексте параметры фотосферы с плотностью и числом частиц, содержащихся в объёме 1 см^3 воздуха при комнатной температуре и нормальном давлении.
- 3*. Вычислите линейный диаметр пятна, зная, что его угловой диаметр равен $17,6''$. Сравните его с диаметром Земли. Можно ли без телескопа увидеть это пятно? (Вспомните, что невооружённым глазом можно увидеть предмет, угловой размер которого не менее $1'$.)
4. Что представляют собой солнечные пятна? гранулы? факелы?
5. Почему солнечные пятна темнее, чем фотосфера?
6. Опровергните иногда встречающееся мнение о том, что появление солнечных пятен свидетельствует об остывании Солнца.
7. Какие правила необходимо соблюдать при наблюдении Солнца?
- 8*. Постарайтесь не только увидеть пятна на экране, прикреплённом к биноклю или телескопу, но и проследить их развитие.
9. Какие явления наблюдаются в хромосфере и короне Солнца?
10. Почему в обычных условиях не видна солнечная корона?
11. Каковы протяжённость короны и физические условия в ней?
12. Что такое солнечная активность и какова её цикличность?
13. Что вам известно о магнитных полях на Солнце?

§ 20. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

1. Источники энергии Солнца. На протяжении миллиардов лет Солнце ежесекундно излучает огромную энергию. Как и все физические процессы, излучение Солнца и других звёзд подчиняется важнейшему закону природы — закону сохранения и превращения энергии. Следовательно, энергия Солнца не может возникнуть из ничего и существуют источники, поддерживающие непрерывное излучение Солнца.

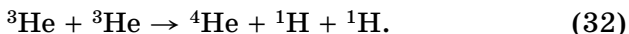
Согласно современным представлениям в недрах Солнца и других звёзд происходят *термоядерные реакции*. В ходе этих реакций, сопровождающихся большим выделением энергии, одни химические элементы превращаются в другие. Вы знаете, что самый распространённый элемент на Солнце — водород. В недрах Солнца он ионизован и находится в виде ядер атомов водорода — протонов. Скорость движения этих протонов в условиях огромных температур настолько велика, что они сближаются, преодолевая электрические силы отталкивания. На очень близких расстояниях вступают в действие мощные ядерные силы и начинаются реакции, в ходе которых возникают ядра новых химических элементов. *Внутри Солнца водород превращается в гелий*. Рассмотрим один из возможных путей такого перехода. Слияние двух протонов (${}^1\text{H}$) сопровождается образованием ядра тяжёлого водорода дейтерия (${}^2\text{D}$) и испусканием двух элементарных частиц: позитрона (e^+) и нейтрино (ν). Кратко эту реакцию можно записать так:



Если образовавшийся в результате взаимодействия протонов дейтерий сам вступит в ядерную реакцию с протоном, то возникнет ядро лёгкого изотопа гелия (${}^3\text{He}$) и выделится энергия в виде коротковолнового гамма-излучения (γ):



В дальнейшем слияние двух ядер ${}^3\text{He}$ приведёт к образованию ядра гелия (${}^4\text{He}$) и двух ядер водорода:



Рассмотренная цепочка из трёх реакций называется протон-протонным циклом. В результате этого цикла из четырёх ядер водорода образуется одно ядро гелия. Какая же энергия выделяется при этом?

Масса одного протона в атомных единицах составляет 1,008, четырёх — 4,032. Поскольку масса одного ядра гелия 4,004, то разность $4,032 - 4,004 = 0,028$ (дефект массы). Так как $0,028 : 4,032 = 0,007$, то при синтезе 1 г гелия дефект массы составит примерно 0,007 г. Зная это и используя открытый Эйнштейном закон взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2$, подсчитаем, сколько энергии выделяется при «сгорании» 1 г водорода:

$$E = mc^2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \approx 6,3 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$$

($c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света).

Один из продуктов протон-протонного цикла — *нейтрино*. Эти частицы способны почти без взаимодействия с веществом проникать сквозь толщу всей звезды, унося некоторую энергию непосредственно из её центральных областей. Огромная проникающая способность нейтрино делает их трудноуловимыми: их невозможно непосредственно зарегистрировать обычными счётчиками элементарных частиц. Но сделать это крайне важно и интересно, так как нейтринное излучение, в отличие от всех других видов излучения, позволяет «заглянуть» в недра Солнца. Нейтринные наблюдения Солнца (они уже проводятся с помощью *нейтринных телескопов*, установленных глубоко под Землёй) позволяют выяснить, насколько верна общепринятая гипотеза об источниках энергии Солнца и подобных ему звёзд. Открытие источника энергии звёзд имеет важное значение для понимания процессов, происходящих внутри звёзд. Кроме того, оно послужило толчком к поискам путей технического использования термоядерного синтеза в земных условиях (проблема управляемых термоядерных реакций).

2*. Внутреннее строение Солнца. Основываясь на данных о массе, светимости, радиусе Солнца, на физических законах (которые благодаря своей *универсальности* применимы не только на Земле, но и в условиях других небесных тел), можно получить данные о давлении, плотности, температуре и химическом составе на разных расстояниях

от центра Солнца. Первые три параметра (давление, плотность, температура) возрастают с глубиной, достигая максимальных значений в центре Солнца. Химический состав Солнца тоже не остаётся одинаковым на разных глубинах: водород всюду на Солнце оказывается самым распространённым элементом, но процентное содержание водорода меньше всего в центре и больше всего в фотосфере Солнца и его атмосфере.

Согласно современным данным термоядерные реакции происходят только в центральных областях Солнца, простирающихся не далее 0,3 радиуса от его центра. Ближе к поверхности, где температура значительно меньше, чем около центра Солнца, источников энергии нет. Значит, энергия, выделяющаяся в результате термоядерного синтеза, должна быть передана наружу через огромную толщу раскалённой плазмы. На расстоянии от 0,3 до 0,7 радиуса Солнца (считая от центра) энергия передается излучением от слоя к слою. При этом слои не меняются местами, а энергия, излучённая нижним слоем, поглощается верхним и затем переизлучается им и т. д. Происходит очень медленное, длящееся не менее миллиона лет «просачивание» излучения от центра Солнца к поверхности. Каждый последующий слой излучает кванты меньшей энергии, чем предыдущий. Поэтому хотя в центральных областях Солнца вырабатываются гамма-кванты, но далее они последовательно превращаются в кванты рентгеновского излучения, затем ультрафиолетового и, наконец, вблизи поверхности, в кванты видимого излучения. Примерно на расстоянии 0,3 радиуса Солнца от его поверхности основным процессом переноса энергии из глубины наружу становится, как вы уже знаете, конвекция. *Конвективная зона* простирается до фотосферы, и о происходящей в подфотосферных слоях конвекции свидетельствует грануляция на поверхности Солнца.

Равновесие Солнца обеспечивается тем, что силы тяготения, стремящиеся сжать газовый шар, уравновешиваются силами внутреннего газового давления. Исходя из этого, оценим давление и температуру в центре Солнца.

Выделим внутри Солнца столбик с площадью основания S и высотой $h = R_{\odot}$. Сила газового давления (F) вблизи центра уравновешивается весом столбика вещества,

т. е. $F = P$. Вес рассматриваемого вещества можно рассчитать по его массе: $P = mg$, а поскольку $m = \rho V = \rho S R_{\odot}$, то

$$P = \rho S R_{\odot} g.$$

Приняв с целью упрощения расчётов $\rho = \bar{\rho}_{\odot}$ и вычислив g из закона всемирного тяготения при $r = R_{\odot}/2$, получим

$$P = \bar{\rho}_{\odot} S_{\odot} R_{\odot} \frac{GM_{\odot}}{(R_{\odot}/2)^2}. \quad (33)$$

Так как давление есть $p = \frac{F}{S}$, то давление в центре Солнца можно оценить по формуле

$$p_{\text{ц}} = \frac{4G\bar{\rho}_{\odot}M_{\odot}}{R_{\odot}}, \quad (34)$$

откуда $p_{\text{ц}} = 1,1 \cdot 10^{15}$ Па. Более строгие вычисления дают $p_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^{16}$ Па.

Плотность в центре Солнца на самом деле не равна средней плотности, а на порядок выше её, т. е. $\rho_{\text{ц}} \approx 10 \cdot \bar{\rho}_{\odot}$ (так как $\bar{\rho}_{\odot} = 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³, то $\rho_{\text{ц}} = 1,4 \cdot 10^4$ кг/м³!).

Несмотря на огромную плотность вещества, даже в центре Солнца расстояния между частицами велики по сравнению с размерами частиц. Но в таком случае к веществу в центре Солнца применимо уравнение Менделеева — Клапейрона:

$$p = \frac{R}{M} \rho T,$$

где p — давление газа; $R = 8,31$ Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная; M , T и ρ — соответственно молярная масса, абсолютная температура и плотность газа. Отсюда

$$T = \frac{pM}{R\rho}$$

и получаем формулу для приближённого вычисления температуры в центре Солнца:

$$T_{\text{ц}} = \frac{p_{\text{ц}} M}{R_{\odot} \rho_{\text{ц}}}. \quad (35)$$

Аналогичные рассуждения позволяют сделать оценки p и T не только для центра Солнца, но и, например, для глубины, равной половине радиуса ($R_{\odot}/2$). В принципе можно вычислить p , T и ρ на любой глубине и получить рас-

пределение этих параметров с глубиной: $p = p(r)$, $T = T(r)$ и $\rho = \rho(r)$. Совокупность этих функций (их можно представить в виде формул, таблиц или графиков) образует *модель внутреннего строения Солнца*. Астрономы пытаются строить модели, максимально приближённые к реальности. Они сводят к минимуму упрощающие допущения; учитывают изменение химического состава с глубиной и то, как на Солнце вырабатывается энергия и каким образом осуществляется её перенос; используют самые современные методы вычисления. И всё-таки в результате получается не копия внутреннего строения Солнца (или других звёзд), а скорее «контуры», позволяющие постичь главное, отвлекаясь от второстепенного, несущественного.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Каковы современные представления об источниках энергии Солнца? 2*. Попробуйте оценить, какая энергия выделилась бы, если бы Солнце целиком состояло из водорода и весь водород превратился бы в гелий. На сколько лет хватило бы водорода для поддержания нынешней светимости Солнца? 3*. Как происходит передача энергии из недр Солнца к его поверхности? 4. Равенство каких сил поддерживает равновесие Солнца как раскалённого плазменного шара? 5. Каковы давление, плотность и температура в центре Солнца? 6. Что такое модели внутреннего строения Солнца (звёзд)? С какой целью их создают и в какой степени они способны отразить сложную картину внутреннего строения Солнца (звёзд)? 7*. Сколько надо сжечь каменного угля, чтобы получить энергию, выделяющуюся при превращении 1 г водорода в гелий?

§ 21. СОЛНЦЕ И ЖИЗНЬ ЗЕМЛИ

1. Использование солнечной энергии. Из всей энергии, излучаемой Солнцем в межпланетное пространство, примерно одна двухмиллиардная часть достигает границы земной атмосферы. Около трети энергии солнечного излучения, падающего на Землю, отражается ею и рассеивается в межпланетном пространстве. Много солнечной энергии идёт на нагревание земной атмосферы, океанов и суши.

В настоящее время в народном хозяйстве всё чаще используются *гелиотехнические установки* (различные типы солнечных теплиц, парников, опреснителей, водонагревателей, сушилок). Солнечные лучи, собранные в фокусе

вогнутого зеркала, плавят самые тугоплавкие металлы. Ведутся работы по созданию солнечных электростанций, по использованию солнечной энергии для отопления домов и т. д. Практическое применение находят полупроводниковые солнечные батареи, позволяющие непосредственно превращать солнечную энергию в электрическую. Наряду с химическими источниками тока солнечные батареи используются, например, в качестве источников электропитания на искусственных спутниках Земли, орбитальных космических станциях и АМС. Всё это — лишь первые успехи гелиотехники, использующей самую экологически чистую энергию.

2. Коротковолновое излучение Солнца. *Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения исходят в основном от верхних слоёв хромосферы и короны.* Это установили, запуская ракеты с приборами во время солнечных затмений. Очень горячая солнечная атмосфера всегда испускает невидимое коротковолновое излучение, но особенно мощным оно бывает в годы максимума солнечной активности. В это время ультрафиолетовое излучение возрастает примерно в два раза, а рентгеновское — в десятки и сотни раз по сравнению с излучением в годы минимума. Интенсивность коротковолнового излучения изменяется изо дня в день, резко возрастая, когда на Солнце происходят вспышки.

Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения частично ионизуют слои земной атмосферы, образуя на высотах 200—500 км от поверхности Земли ионосферу. Ионосфера играет важную роль в осуществлении дальней радиосвязи: радиоволны, идущие от радиопередатчика, прежде чем достичь антенны приёмника, многократно отражаются от ионосферы и поверхности Земли. Состояние ионосферы меняется в зависимости от условий освещения её Солнцем и от происходящих на нём явлений. Поэтому для обеспечения устойчивой радиосвязи приходится учитывать время суток, время года и состояние солнечной активности. После наиболее мощных вспышек на Солнце число ионизованных атомов в ионосфере возрастает и радиоволны частично или полностью поглощаются ею. Это приводит к ухудшению и даже к временному прекращению радиосвязи.

Особое внимание учёные уделяют исследованию *озонового* слоя в земной атмосфере. Озон образуется в результа-

те фотохимических реакций (поглощение света молекулами кислорода) в стратосфере, и там сосредоточена его основная масса. Всего в земной атмосфере примерно $3 \cdot 10^9$ т озона. Это очень мало: толщина слоя чистого озона у поверхности Земли не превысила бы и 3 мм! Но роль озонового слоя, простирающегося на высоте нескольких десятков километров над поверхностью Земли, исключительно велика, потому что он защищает всё живое от воздействия опасного коротковолнового (и прежде всего ультрафиолетового) излучения Солнца. Содержание озона непостоянно на разных широтах и в разные времена года. Оно может уменьшаться (иногда очень значительно) в результате различных процессов. Этому могут способствовать, например, выбросы в атмосферу большого количества разрушающих озон хлорсодержащих веществ промышленного происхождения или аэрозольные выбросы, а также выбросы, сопровождающие извержения вулканов. Области резкого снижения уровня озона («озоновые дыры») обнаруживались над разными регионами нашей планеты, причём не только над Антарктидой и рядом других территорий южного полушария Земли, но и над северным полушарием. В 1992 г. стали появляться тревожные сообщения о временном истощении озонового слоя над севером европейской части России и уменьшении содержания озона над Москвой и Санкт-Петербургом. Учёные всей планеты, осознавая глобальный характер проблемы, организуют экологические исследования, включающие прежде всего глобальную систему непрерывного наблюдения за состоянием озонового слоя. Разработаны и подписаны международные соглашения по охране озонового слоя и ограничению производства озоноразрушающих веществ.

3*. Радиоизлучение Солнца. Систематическое исследование радиоизлучения Солнца началось только после Второй мировой войны, когда обнаружилось, что Солнце — мощный источник радиоизлучения. В межпланетное пространство проникают радиоволны, которые излучают хромосфера (сантиметровые волны) и корона (дециметровые и метровые волны). Это радиоизлучение и достигает Земли. В радиоизлучении Солнца различают две составляющие — постоянную, почти не меняющуюся по интенсивности, и переменную (всплески, «шумовые бури»).

Радиоизлучение спокойного Солнца объясняется тем, что горячая солнечная плазма всегда излучает радиоволны наряду с электромагнитными колебаниями других длин волн (*тепловое радиоизлучение*). Во время больших вспышек радиоизлучение Солнца возрастает в тысячи и даже миллионы раз по сравнению с радиоизлучением спокойного Солнца. Это радиоизлучение, порождённое быстропротекающими нестационарными процессами, имеет *нетепловую природу*.

4. Корпускулярное излучение Солнца. Ряд геофизических явлений (*магнитные бури*, т. е. кратковременные изменения магнитного поля Земли, *полярные сияния* и др.) тоже связан с солнечной активностью. Но эти явления происходят не раньше, чем через сутки после вспышек на Солнце. Вызываются они не электромагнитным излучением, доходящим до Земли через 8,3 мин, а корпускулами (протонами и электронами, образующими разреженную плазму), которые с опозданием (на 1—2 сут.) проникают в околоземное пространство, поскольку движутся со скоростью 400—1000 км/с.

Корпускулы испускаются Солнцем и тогда, когда на нём нет вспышек и пятен. Солнечная корона — источник постоянного истечения плазмы (*солнечного ветра*), которое происходит во всех направлениях. Солнечный ветер, создаваемый непрерывно расширяющейся короной, охватывает движущиеся вблизи Солнца планеты и кометы. Вспышки сопровождаются «порывами» солнечного ветра. Эксперименты на межпланетных станциях и искусственных спутниках Земли позволили непосредственно обнаружить солнечный ветер в межпланетном пространстве. Во время вспышек и при спокойном истечении солнечного ветра в межпланетное пространство проникают не только корпускулы, но и связанное с движущейся плазмой магнитное поле.

5. Проблема «Солнце — Земля». Эта проблема, связывающая солнечную активность с её воздействием на Землю, находится на стыке нескольких наук — астрономии, геофизики, биологии и медицины.

Некоторые аспекты этой комплексной проблемы исследуются уже несколько десятилетий, например *ионосферные проявления солнечной активности*. Здесь удалось не только накопить множество фактов, но и обнаружить за-

кономерности, имеющие определённое значение для осуществления бесперебойной радиосвязи (выбор рабочих частот радиосвязи, прогнозы условий радиосвязи и др.).

Давно известно, что колебания магнитной стрелки во время *магнитной бури* особенно заметны в дневное время и имеют наибольшую амплитуду, иногда достигающую нескольких градусов, в периоды максимума солнечной активности.

Хорошо известно и то, что магнитные бури обычно сопровождаются свечением верхних разреженных слоев атмосферы (до нескольких сотен километров), которое вызвано действием протонов и электронов, проникающих в атмосферу из космоса. Это *полярные сияния* — одно из красивейших явлений природы. Необычайная игра красок, внезапная смена спокойного свечения стремительным перемещением дуг, полос и лучей, образующих то гигантские шатры, то величественные занавесы, издавна привлекала к себе людей. В полярных сияниях преобладают два цвета — зелёный и красный. Окраска полярных сияний обусловлена излучением атомов кислорода (наиболее интенсивными в спектрах полярных сияний являются зелёная и красная линии).

Полярные сияния, как правило, наблюдаются в высоких широтах земного шара. Это объясняется тем, что заряженные частицы, двигаясь вдоль линий индукции магнитного поля Земли, именно в полярных областях могут проникнуть в атмосферу. Но иногда в годы максимумов солнечной активности полярные сияния можно наблюдать и в средних широтах.

Существует связь между явлениями на Солнце и процессами в нижних слоях земной атмосферы. Солнечное излучение воздействует на нижний слой атмосферы — *тропосферу*, а следовательно, и на погоду через процессы в верхних слоях атмосферы Земли. Выяснение механизма этого сложного воздействия необходимо для метеорологии. Важное значение имеет исследование влияния солнечной активности на биосферу Земли, в частности на состояние здоровья людей.

Чтобы всесторонне исследовать явления, происходящие на Солнце, проводятся систематические наблюдения Солнца (*Служба Солнца*) на многочисленных обсерваториях

всего мира. Одна из основных задач службы Солнца — предсказание (прогноз) солнечных вспышек. Прогнозы вспышек позволяют своевременно предотвращать нарушения радиосвязи, а также принимать меры, необходимые для обеспечения безопасности пребывания человека в космическом пространстве.

Изучение воздействия Солнца на Землю требует объединения усилий учёных многих стран. В историю науки, например, уже вошли Международный геофизический год — МГГ (1957—1958), проводившийся во время мощного максимума солнечной активности, и Международный год спокойного Солнца — МГСС (1964—1965), который был приурочен к минимуму солнечной активности. Комплексные исследования Солнца продолжаются и в настоящее время. Наблюдения, в которых принимают участие десятки стран, проводятся на всех континентах Земли. Данные о процессах, происходящих на Солнце и на Земле, получают с помощью аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли и космических ракетах, на горных вершинах и в глубинах океанов. Разрабатываются новые космические проекты, имеющие целью исследование Солнца. Один из них назывался Международный гелиофизический год (2007—2008). Этот уникальный научно-исследовательский проект в области гелиофизики и геофизики осуществлялся с марта 2007 г., а анализ полученных данных продолжался в 2009—2010 гг. В этом проекте участвовало около 75 государств. Исследования Солнца, околоземного космического пространства, магнитосферы, ионосферы и других слоёв земной атмосферы проводились по обширной комплексной программе и предусматривали использование разнообразных наземных и космических средств. Главным итогом Международного гелиофизического года стало получение новейших сведений о физике Солнца и важных для всех нас солнечно-земных связях.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1*. Сколько нужно сжечь каменного угля, чтобы получить энергию, равную той, которую излучает Солнце в 1 с? **2***. На сколько порядков мощность излучения Солнца превосходит мощность крупнейших гидроэлектростанций? **3**. Охарактеризуйте основные виды излучения Солнца. **4**. Имеет ли использование солнечной энергии преимущества перед другими видами энергии в связи с проблемой охраны окружа-

ющей среды? 5. Какие вы знаете геофизические проявления солнечной активности? 6. Какое значение имеет комплексное изучение Солнца? 7. Какое сейчас Солнце — спокойное или возмущённое, если считать, что максимум солнечной активности был в 2000—2001 гг., а цикл равен 11 г.?

§ 22. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД

Не только в геоцентрических, но и в гелиоцентрической системе мира существовало представление о «сфере неподвижных звёзд» (см. § 8). Считалось, что звёзды расположены на шаровой поверхности, т. е. все они отстоят от нас на одном и том же расстоянии и не движутся относительно друг друга. Этот и следующий параграфы дают возможность убедиться в ошибочности этих представлений.

1. Определение расстояний до звёзд. Вы знаете, что при измерении расстояний до тел Солнечной системы применяется метод параллакса (см. § 11). Он пригоден и для определения расстояний до ближайших звёзд. Только в качестве базиса используется не радиус Земли, а средний радиус земной орбиты.

Угол π , под которым со звезды был бы виден средний радиус a земной орбиты, расположенный перпендикулярно направлению на звезду, называется **годи́чным параллаксом** (рис. 86). В тех случаях, когда удаётся определить значение π , расстояние r до звезды вычисляется по формуле

$$r = \frac{a}{\sin \pi}. \quad (36)$$

Угол π всегда очень мал (меньше $1''$). Поэтому (см. с. 51) формулу (36) можно записать в виде

$$r = \frac{206\,265'' a}{\pi} = \frac{206\,265''}{\pi} \text{ а. е.} \quad (37)$$

Расстояние до звезды, которое соответствует параллаксу в $1''$, называется **парсеком** (от слов «параллакс» и «секунда»; обозначается пк):

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.}$$

Эта единица используется в звёздной астрономии, так как не только километр, но даже астрономическая единица (а. е.) слишком мала для измерения расстояний до звёзд.

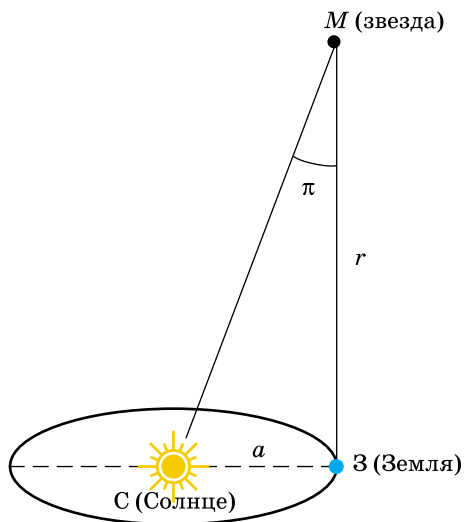


Рис. 86. Годи́чный параллакс

Очевидно, что расстояние до звезды в парсеках легко вычислить по формуле

$$r = \frac{1}{\pi}. \quad (38)$$

Самая близкая к нам звезда (не считая Солнца!) находится в созвездии *Центавра* (Проксима Центавра или Кентавра) на расстоянии 1,3 пк, или 270 000 а. е.; её годичный параллакс составляет 0,77". Полтора века назад астрономам, в том числе астроному Пулковской обсерватории *В. Я. Струве* (1793—1864), удалось впервые определить расстояние до звезды Вега (7,8 пк). Сейчас уже известны параллаксы нескольких тысяч звёзд.

Выясним, сколько километров содержится в парсеке, а также найдём соотношение между парсеком и световым годом — *расстоянием, которое свет проходит за год* (обозначается св. год, св. лет).

Поскольку 1 а. е. = $1,496 \cdot 10^8$ км, то

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.} = 206\,265 \cdot 1,496 \cdot 10^8 \text{ км} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ км};$$

$$1 \text{ св. г.} = 3 \cdot 10^5 \text{ км/с} \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км};$$

$$1 \text{ пк} = \frac{3,08 \cdot 10^{13} \text{ км}}{9,46 \cdot 10^{12} \text{ км}} \text{ св. лет} = 3,26 \text{ св. года};$$

$$10^3 \text{ пк} = 1 \text{ кпк (килопарсек)};$$

$$10^6 \text{ пк} = 1 \text{ Мпк (мегапарсек)}.$$

Пример 8. Годичный параллакс Веги (α Лиры) равен $0,12''$. Каково расстояние до неё в парсеках и световых годах?

Д а н о:

$$\pi = 0,12''$$

$$r_{\text{пк}} \text{ — ?}$$

$$r_{\text{св. лет}} \text{ — ?}$$

Р е ш е н и е:

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{\pi};$$

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{0,12} \text{ пк} = 8,33 \text{ пк};$$

$$r_{\text{св. лет}} = 3,26 \text{ св. года} \cdot 8,33 = 27,1 \text{ св. года}.$$

$$\text{О т в е т: } r_{\text{пк}} = 8,33 \text{ пк},$$

$$r_{\text{св. лет}} = 27,1 \text{ св. года}.$$

2. Видимые и абсолютные звёздные величины. Уже из первого знакомства со звёздным небом вы знаете о том, что яркость звёзд неодинакова. Со времён древнегреческого астронома *Гиппарха* (II в. до н. э.) используется понятие «звёздная величина». Считая, что расстояния до звёзд одинаковы, предполагали, что чем звезда ярче, тем она больше. Наиболее яркие звёзды отнесли к звёздам первой величины (сокращённое обозначение 1^m , от лат. *magnitudo* — величина), а едва различимые невооружённым глазом — к шестой (6^m). Сейчас мы знаем, что звёздная величина характеризует не размеры звезды, а её блеск, т. е. освещённость, которую создаёт звезда на Земле. Но шкала звёздных величин сохранилась. Блеск звезды 1^m больше блеска звезды 6^m ровно в 100 раз. Следовательно, разность в 5 звёздных величин соответствует различию в блеске ровно в 100 раз. Обозначим через x число, показывающее различие в блеске в одну звёздную величину, тогда $x^5 = 100$.

Найдём значение x из этого уравнения:

$$5 \lg x = \lg 100, \text{ откуда } 5 \lg x = 2, \text{ или } \lg x = 0,4,$$

тогда $x = 2,512$.

Если обозначить блеск звезды, звёздная величина которой равна m_1 , через I_1 , а блеск звезды, звёздная величина которой равна m_2 , через I_2 , то

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{(m_2 - m_1)}. \quad (39)$$

Светила, блеск которых превосходит блеск звёзд 1^m , имеют нулевые и отрицательные звёздные величины ($0^m, -1^m$

и т. д.). К ним относятся несколько наиболее ярких звёзд и планет, а также, конечно, Солнце и Луна. Шкала звёздных величин продолжается и в сторону звёзд, не видимых невооружённым глазом. Есть звёзды 7^m , 8^m и т. д. Для более точной оценки блеска звёзд используются дробные звёздные величины: $2,3^m$; $7,1^m$; $6,2^m$; $14,5^m$ и т. д.

Пример 9. Во сколько раз Капелла ярче Денеба?

Из таблицы (см. Приложение XII) найдём звёздную величину Капеллы ($m_1 = +0,2^m$) и Денеба ($m_2 = +1,3^m$).

Д а н о:

$$m_1 = +0,2^m$$

$$m_2 = +1,3^m$$

$$\frac{I_1}{I_2} = ?$$

Р е ш е н и е:

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{(m_2 - m_1)}.$$

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = (m_2 - m_1) \lg 2,512, \text{ а так как}$$

$$\lg 2,512 = 0,4, \text{ то для Капеллы и Денеба}$$

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = 0,4 \cdot 1,1 = 0,44; \quad \frac{I_1}{I_2} = 2,75.$$

$$\text{О т в е т: } \frac{I_1}{I_2} = 2,75.$$

Так как звёзды находятся от нас на различных расстояниях, то их видимые звёздные величины ничего не говорят о светимостях (*мощности излучения*) звёзд. Поэтому в астрономии, кроме понятия «видимая звёздная величина», используется понятие «абсолютная звёздная величина».

Звёздные величины, которые имели бы звёзды, если бы они находились на одинаковом расстоянии ($r_0 = 10$ пк), называются абсолютными звёздными величинами (M).

Пусть какая-нибудь звезда удалена от нас на расстояние r . Обозначим её видимую звёздную величину через m , абсолютную — через M . Воспользовавшись формулой (39), запишем:

$$\frac{I}{I_0} = 2,512^{(M - m)},$$

где I и I_0 — блеск звезды (точнее, создаваемая ею на Земле *освещённость*) на расстояниях r и $r_0 = 10$ пк. Поскольку освещённость изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, то

$$\frac{I}{I_0} = \frac{r_0^2}{r^2}, \text{ или } \frac{I}{I_0} = \frac{10^2}{r^2}.$$

$$\text{Поэтому } \frac{10^2}{r^2} = 2,512^{(M-m)}.$$

Отсюда, логарифмируя, найдём:

$$2 - 2 \lg r = 0,4(M - m), \text{ или } M - m = 5 - 5 \lg r.$$

Тогда

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (40)$$

По формуле (40) можно вычислить абсолютную звёздную величину, если известны видимая звёздная величина и расстояние до звезды. Абсолютная звёздная величина Солнца $M_{\odot} = +4,8^m$.

Если абсолютная звёздная величина звезды определена другим способом, например по спектру звезды, то из формулы (40) можно найти расстояние до звезды:

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5} = 0,2(m - M) + 1. \quad (41)$$

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что используется в качестве базиса при определении годовых параллаксов звёзд? Почему?
2. Какие единицы применяются при измерении расстояния до звёзд? Каково соотношение между этими единицами?
3. Сколько времени пришлось бы лететь к Проксиме Центавра космическому кораблю, способному развить скорость 17 км/с?
4. Во сколько раз Сириус ярче Полярной звезды?
- 5*. Экваториальные координаты яркой звезды $\alpha = 18^h 37^m$, $\delta = +38^\circ 47'$. Какая это звезда? Вычислите расстояние до неё в парсеках, если известно, что видимая и абсолютная звёздные величины соответственно равны $0,1^m$ и $0,5^m$.
6. Какие два метода определения расстояний до звёзд вы знаете?

§ 23. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СКОРОСТИ ЗВЁЗД

Введение. Итак, звёзды находятся от нас на различных расстояниях, т. е. никакой «сферы звёзд» не существует. Но не существует и неподвижных звёзд. Астрономические наблюдения доказывают, что звёзды движутся. Скорость, с которой звезда движется в пространстве относительно Солнца, назовём пространственной скоростью. Обозначим вектор пространственной скорости одной из звёзд через $\vec{v}$ (рис. 87). Его можно представить как сумму двух составляющих векторов, один из которых (тангенциальная скорость $\vec{v}_t$) перпендикулярен лучу зрения

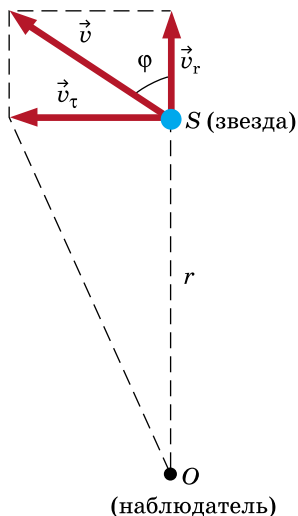


Рис. 87. Пространственная скорость звезды

сфере за год называется собственным движением. Оно выражается в секундах дуги в год и обозначается буквой μ . Наибольшим собственным движением обладает звезда Барнарда (в созвездии *Змееносца*), у которой $\mu = 10,3''$. Зная μ , можно вычислить модуль тангенциальной скорости v_τ . Действительно, расстоянию r до звезды соответствует годичный параллакс звезды π . Если π выражено в радианах, то $r = \frac{a}{\pi}$, где $a = 1$ а. е. Собственному движению звезды μ (тоже выраженному в радианах) соответствует линейное смещение $r\mu$. Учитывая сказанное выше, $r\mu = a \frac{\mu}{\pi}$. Зная перемещение звезды за год, легко найти её скорость v_τ , разделив это перемещение на время t_0 , равное году:

$$v_\tau = a \frac{\mu}{\pi t_0}.$$

Так как $1 \text{ а. е.} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ км}$, а $t_0 = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$, то тангенциальная скорость, выраженная в километрах в секунду, будет

$$v_\tau = 4,74 \frac{\mu}{\pi}. \quad (43)$$

(т. е. направлению звезда — наблюдатель), а другой направлен по лучу зрения (лучевая скорость $\vec{v}_r$). Тогда по теореме Пифагора модуль пространственной скорости будет равен

$$v = \sqrt{v_\tau^2 + v_r^2}. \quad (42)$$

Рассмотрим методы определения модулей векторов $\vec{v}_\tau$ и $\vec{v}_r$.

1*. Собственные движения и тангенциальные скорости звёзд. Уже в XVIII в. стало ясно, что экваториальные координаты звёзд в течение длительных промежутков времени изменяются. Одна из причин этого явления — движение звёзд в пространстве. Угловое перемещение звезды на небесной

2. Эффект Доплера и определение лучевых скоростей звёзд. Лучевые скорости определяют по спектрам звёзд. При этом используется явление, которое называют эффектом Доплера. Суть эффекта Доплера состоит в том, что *линии в спектре источника, приближающегося к наблюдателю, смещены к фиолетовому концу спектра, а линии в спектре удаляющегося источника — к красному концу спектра* (по отношению к положению линий в спектре неподвижного источника). Почему же меняется частота излучения, воспринимаемая наблюдателем? Пусть расстояние от источника до наблюдателя равно ct (где c — скорость света, t — время, за которое свет преодолевает расстояние до наблюдателя). За время t источник испускает $v_0 t$ волн (v_0 — частота излучения). Если источник неподвижен, то на отрезке ct как раз и укладывается $v_0 t$ волн. Но если источник движется (например, удаляется со скоростью v_r), то число волн $v_0 t$ уложится на отрезке, длина которого $ct + v_r t$. Перейдём от частоты к длинам волн (рис. 88). Длина волны, которую принимает наблюдатель от неподвижного источника, $\lambda_0 = \frac{ct}{v_0 t}$ (или известное вам из физики соотношение $\lambda_0 = \frac{c}{v_0}$), а длина волны, которую наблюдатель принимает от удаляющегося источника,

$$\lambda = \frac{ct + v_r t}{v_0 t}.$$

Тогда смещение, равное $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, есть

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{ct + v_r t}{v_0 t} - \frac{ct}{v_0 t},$$

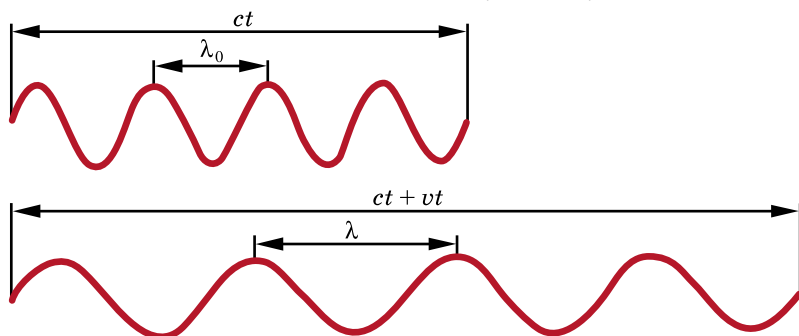


Рис. 88. К объяснению эффекта Доплера

т. е. $\Delta\lambda = \frac{v_r}{v_0}$, или $\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v_r}{c}$, откуда

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c. \quad (44)$$

Это формула для вычисления лучевых скоростей. Из неё видно, что для определения v_r нужно измерить сдвиг спектральной линии, т. е. сравнить положение данной линии в спектре звезды с положением этой же линии в спектре неподвижного (например, наблюдаемого в лаборатории) источника света. Лучевая скорость удаляющегося источника получается со знаком плюс, а приближающегося — со знаком минус.

К настоящему времени рассчитаны лучевые скорости и собственные движения многих звёзд. Измерение лучевых скоростей проще и быстрее, чем измерение собственных движений.

Пример 10. В спектре звезды линия, соответствующая длине волны $5,5 \cdot 10^{-4}$ мм, смещена к фиолетовому концу спектра на $5,5 \cdot 10^{-8}$ мм. Определите лучевую скорость звезды.

Дано:

$$\lambda_0 = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$$

$$\Delta\lambda = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм}$$

v_r — ?

Решение:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c;$$

$$v_r = \left(\frac{5,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм}}{5,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}} \right) \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ км/с} \approx 30 \text{ км/с}.$$

Ответ: $v_r \approx 30$ км/с. Поскольку смещение происходит к фиолетовому концу спектра, то звезда приближается к наблюдателю, т. е. $v_r \approx -30$ км/с.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что нужно знать, чтобы определить пространственную скорость звезды? 2*. Что нужно знать, чтобы определить тангенциальную скорость звезды? 3. В чём заключается эффект Доплера? С каким проявлением его в диапазоне звуковых частот вы знакомы? 4. Что нужно знать, чтобы определить лучевую скорость звезды? 5. Докажите, что не существует никакой «сферы неподвижных звёзд». 6*. Вычислите пространственную скорость Альдебарана, зная, что параллакс этой звезды $0,05''$, собственное движение $0,2''$ в год, а лучевая скорость $+54$ км/с.

§ 24. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВЁЗД

Вы уже знаете, что звёзды — это далёкие солнца, поэтому, изучая природу звёзд, мы будем сравнивать их физические характеристики с физическими характеристиками Солнца.

1. Цвет и температура звёзд. Во время наблюдений звёздного неба вы могли заметить, что *цвет звёзд различен*. Подобно тому как по цвету раскалённого металла можно судить о его температуре, цвет звезды свидетельствует о температуре её фотосферы. Вы знаете, что между максимальной длиной волны излучения и температурой существует определённая зависимость (29). У различных звёзд максимум излучения приходится на разные длины волн. Например, наше *Солнце — жёлтая звезда*. Такого же цвета *Капелла*, температура которой около 6000 К. Звёзды, имеющие температуру 3500—4000 К, *красноватого цвета (Альдебара)*. Температура *красных звёзд (Бетельгейзе)* примерно 3000 К. Самые холодные из известных в настоящее время звёзд имеют температуру менее 2000 К. Такие звёзды доступны наблюдениям в инфракрасной части спектра.

Известно много звёзд более горячих, чем Солнце. К ним относятся, например, *белые звёзды (Спика, Сириус, Вега)*. Их температура порядка 10^4 — $2 \cdot 10^4$ К. Реже встречаются *голубовато-белые звёзды*, температура фотосферы которых $3 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^4$ К. В недрах таких звёзд температура не менее 10^7 К.

2. Спектры и химический состав звёзд. Важнейшие сведения о природе звёзд астрономы получают, расшифровывая их спектры. Спектры большинства звёзд, как и спектр Солнца, представляют собой *спектры поглощения*: на фоне непрерывного спектра видны тёмные линии.

Сходные между собой спектры звёзд сгруппированы в семь основных спектральных классов, которые обозначаются прописными буквами латинского алфавита:

O — B — A — F — G — K — M

и располагаются в такой последовательности, что при переходе слева направо цвет звезды меняется от голубого (класс O) к белому (класс A), жёлтому (класс G), красному (класс M). Следовательно, в этом же направлении от класса к классу происходит убывание температуры звёзд.

Таким образом, последовательность спектральных классов отражает различие цвета и температуры звёзд. Внутри каждого класса существует разделение ещё на десять подклассов. Например, спектральный класс F имеет такие подклассы:

F0 — F1 — F2 — F3 — F4 — F5 — F6 — F7 — F8 — F9.

Солнце относится к спектральному классу G2.

Атмосферы звёзд в основном имеют сходный химический состав: самыми распространёнными элементами в них, как и на Солнце, оказались *водород* и *гелий*. *Разнообразие звёздных спектров объясняется прежде всего тем, что звёзды имеют разную температуру.* От температуры зависят физическое состояние, в котором находятся атомы вещества в звёздных атмосферах, и вид спектра. При невысоких температурах (красные звёзды) в атмосферах звёзд могут существовать нейтральные атомы и даже простейшие молекулярные соединения (C_2 , CN, TiO, ZrO и др.). В атмосферах очень горячих звёзд преобладают ионизованные атомы.

Кроме температуры, вид спектра звезды определяется давлением и плотностью газа её фотосферы, наличием магнитного поля, особенностями химического состава.

3. Светимости звёзд. Все звёзды, как и Солнце, излучают энергию в диапазоне всех длин волн электромагнитных колебаний. Вы знаете, что *св е т и м о с т ь* (L) характеризует общую мощность излучения звезды и представляет одну из важнейших её характеристик. Светимость пропорциональна площади поверхности (фотосферы) звезды (или квадрату радиуса R) и четвёртой степени эффективной температуры фотосферы (T) (см. формулы 26, 27), т. е.

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4. \quad (45)$$

Формула, связывающая абсолютные звёздные величины и светимости звёзд, аналогична известному вам соотношению между блеском звезды и её видимой звёздной величиной (39), т. е.

$$\frac{L_1}{L_2} = 2,512^{(M_2 - M_1)}, \quad (46)$$

где L_1 и L_2 — светимости двух звёзд, а M_1 и M_2 — их абсолютные звёздные величины.

Если в качестве одной из звёзд выбрать Солнце, то

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2,512^{(M_{\odot} - M)}, \quad (46')$$

где буквы без индексов относятся к любой звезде, а со знаком $\odot$ — к Солнцу.

Принимая светимость Солнца за единицу ($L_{\odot} = 1$), получаем

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

или

$$\lg L = 0,4(M_{\odot} - M). \quad (47)$$

По формуле (47) можно вычислить светимость любой звезды, у которой известна абсолютная звёздная величина.

Пример 11. Вычислите светимость Сириуса, если известно, что его видимая звёздная величина $-1,6^m$, а свет от него идёт до Земли 8,7 года.

Дано:

$$m = -1,6^m$$

$$r = \frac{8,7}{3,26} \text{ пк} = 2,7 \text{ пк}$$

$$M_{\odot} = 4,8^m$$

$$L = ?$$

Решение:

$$\lg L = 0,4(M_{\odot} - M),$$

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

$$M = -1,6 + 5 - 5 \lg 2,7 =$$

$$= 3,4 - 5 \cdot 0,4 = 1,4;$$

$$M = 1,4^m.$$

$$\lg L = 0,4(4,8 - 1,4) \approx 1,4; L = 25.$$

$$\text{Ответ: } L = 25L_{\odot}.$$

Звёзды имеют различную светимость. Известны звёзды, светимости которых в сотни и тысячи раз превосходят светимость Солнца. Например, светимость α Тельца (Альдебарана) почти в 160 раз больше светимости Солнца ($L \approx 150L_{\odot}$), светимость Ригеля (β Ориона) $L = 45\,000L_{\odot}$.

У подавляющего большинства звёзд светимости сравнимы со светимостью Солнца или меньше её. Например, светимость звезды, известной под названием Крюгер 60A, $L \approx 0,006L_{\odot}$.

4. Радиусы звёзд. Используя самую современную технику астрономических наблюдений, удалось в настоящее время непосредственно измерить угловые диаметры (а по ним, зная расстояние, и линейные размеры) лишь нескольких звёзд. В основном астрономы определяют радиусы звёзд другими методами. Один из них даёт формула (45).

Если известна светимость L и эффективная температура T звезды, то, используя формулу (45), можно вычислить *радиус звезды R , её объём и площадь фотосферы.*

Определив радиусы многих звёзд, астрономы убедились в том, что существуют звёзды, размеры которых сильно отличаются от размеров Солнца. Наибольшие размеры у сверхгигантов. Их радиусы в сотни раз превышают радиус Солнца. Например, радиус звезды VV Цефея примерно в 1200 раз больше солнечного. Звёзды, радиусы которых в десятки раз превосходят радиус Солнца, называются *гигантами*. Звёзды, по размерам близкие к Солнцу или меньшие, чем Солнце, относятся к *карликам*. Среди карликов есть звёзды, которые по диаметру меньше Земли. Открыты звёзды и ещё меньших размеров (см. § 26).

5. Массы звёзд. *Масса звезды — одна из важнейших её характеристик.* Массы звёзд различны. Однако, в отличие от светимостей и размеров, массы звёзд заключены сравнительно в узких пределах: самые массивные звёзды обычно лишь в десятки раз тяжелее Солнца, а наименьшие массы звёзд составляют порядка $0,06M_{\odot}$. Основным методом определения масс звёзд даёт исследование *двойных звёзд* (см. § 26). Обнаружена зависимость между *светимостью и массой звезды* (см. § 25).

6. Средние плотности звёзд. Так как размеры звёзд различаются значительно больше, чем их массы, то и средние плотности звёзд сильно отличаются друг от друга. У гигантов и сверхгигантов плотность очень мала. Например, плотность Бетельгейзе около 10^{-3} кг/м³. Вместе с тем существуют чрезвычайно плотные звёзды. К ним относятся небольшие по размерам *белые карлики* (их цвет обусловлен высокой температурой). Например, плотность белого карлика Сириус В более $4 \cdot 10^7$ кг/м³. В настоящее время известны значительно более плотные белые карлики (10^{10} — 10^{11} кг/м³). Огромные плотности белых карликов объясняются особыми свойствами вещества этих звёзд, которое представляет собой атомные ядра и оторванные от них электроны. Расстояния между атомными ядрами в веществе белых карликов должны быть в десятки и даже сотни раз меньше, чем в обычных твёрдых и жидких телах, с которыми мы встречаемся в земных условиях. Агрегатное состояние, в котором находится это вещество, нель-

зя назвать ни жидким, ни твёрдым, так как атомы вещества белых карликов разрушены. Мало похоже это вещество на газ или плазму. И всё-таки его принято считать «газом», учитывая, что расстояние между частицами даже в плотных белых карликах во много раз больше, чем сами ядра атомов или электроны.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. В каких пределах заключены радиусы, массы, светимости и температуры звёзд?
2. Из каких химических элементов в основном состоят звёзды?
3. Чем объясняется наблюдаемое различие спектров звёзд?
4. Обоснуйте вывод о том, что наше Солнце — обычная звезда.
5. Определите светимость звезды, принадлежащей к тому же спектральному классу, что и Солнце, радиус которой в 25 раз больше, чем у Солнца.

§ 25. СВЯЗЬ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗВЁЗД

1. **Диаграмма «спектр — светимость».** В начале XX в. датский астроном *Э. Герцшпрунг* (1873—1967) и американский астроном *Г. Расселл* (1877—1957) независимо друг от друга обнаружили, что существует связь между спектрами звёзд и их светимостями. Эта зависимость, полученная путём сопоставления данных наблюдений, представлена диаграммой (рис. 89): по горизонтальной оси отложены *спектральные классы* (или *температуры*) *звёзд*, а по вертикальной — *светимости звёзд* (или *абсолютные звёздные величины*).

Каждой звезде соответствует точка диаграммы, получившей название диаграммы «спектр — светимость», или диаграммы Герцшпрунга—Расселла (Г—Р). Если бы спектральные классы и светимости звёзд оказались независимыми физическими характеристиками, то в расположении точек на диаграмме не было бы закономерностей. Но точки на диаграмме группируются в пределах нескольких областей, названных *последовательностями*. Подавляющее большинство звёзд принадлежит *главной последовательности*, простирающейся от горячих сверхгигантов до холодных красных карликов. Рассматривая главную последовательность, можно заметить, что чем горячее относящиеся к ней звёзды, тем большую светимость они

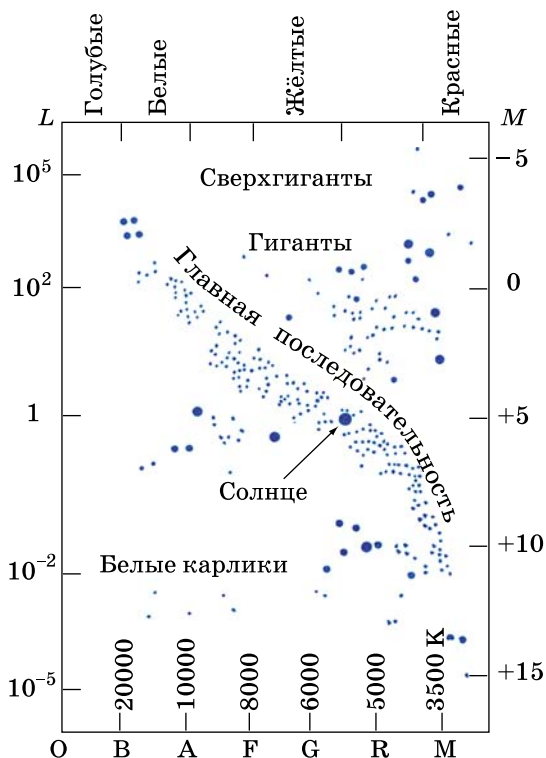


Рис. 89. Диаграмма «спектр — светимость»

имеют. Обособленно от главной последовательности в разных частях диаграммы сгруппированы *гиганты*, *сверхгиганты* и *белые карлики*.

Диаграмма «спектр — светимость» показывает, что звёзды данного спектрального класса не могут иметь произвольную светимость и, наоборот, звёзды с определённой светимостью не могут иметь любую температуру. Диаграмма «спектр — светимость» отражает важную *закономерность в мире звёзд*, основываясь на которой астрономы исследуют эволюцию звёзд (см. § 31).

2. Соотношение «масса — светимость». Существует связь между массой звезды и её светимостью. Наглядное представление об этом даёт диаграмма (рис. 90), по одной оси которой отложены *массы звёзд*, а по другой — их *светимости* (или *абсолютные звёздные величины*). Из диаграммы видно, что, чем больше масса звезды, тем больше

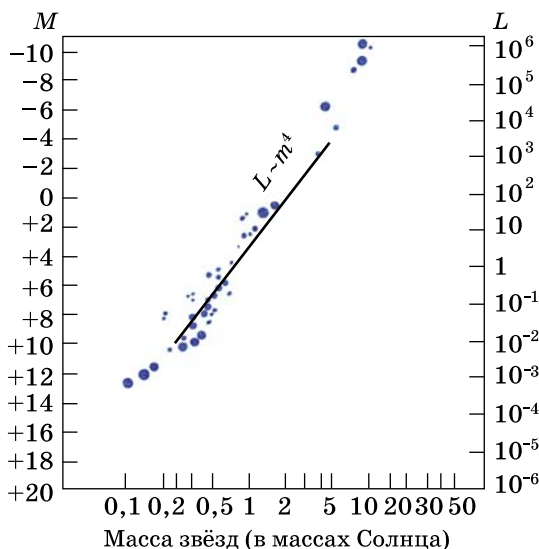


Рис. 90. Диаграмма «масса — светимость»

её светимость. Светимость пропорциональна примерно четвёртой степени массы звезды ($L \sim m^4$).

3*. Вращение звёзд различных спектральных классов.

Вы знаете, что наше Солнце вращается вокруг оси, причём его вращение легко обнаружить по перемещению деталей фотосферы (например, пятен). Рассмотреть какие-либо детали хотя бы на ближайших звёздах почти невозможно даже в самые крупные современные телескопы. Однако, анализируя спектры звёзд, удалось на основе эффекта Доплера доказать, что звёзды тоже вращаются вокруг своих осей, и определить скорости вращения. Некоторые звёзды (преимущественно относящиеся к спектральным классам O и B) вращаются с очень большой скоростью, достигающей на экваторе 200—400 км/с, т. е. в 100—200 раз быстрее Солнца.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как строится диаграмма «спектр — светимость»? 2. Чем интересна диаграмма «спектр — светимость»? С помощью диаграммы «спектр — светимость» ответьте на вопросы: а) Существуют ли звёзды спектрального класса A с абсолютной звёздной величиной, равной +4^m? б) Может ли светимость звезды спектрального класса B превышать светимость Солнца в 10 000 раз? в) Существуют ли звёзды, светимость

которых в 100 раз меньше светимости Солнца, а температура около 30 000 К? 3. Как связана светимость с размерами звезды? 4. Как строится диаграмма «масса — светимость»? 5. Звёзды каких спектральных классов наиболее массивны? 6. Звёзды каких спектральных классов имеют наибольшие скорости вращения вокруг своих осей? 7. Какие созвездия и наиболее яркие звёзды в них видны сегодня вечером?

§ 26. ДВОЙНЫЕ ЗВЁЗДЫ

1. Оптические двойные и физические двойные звёзды. Невооружённым глазом вблизи Мицара (средней звезды в ручке ковша *Большой Медведицы*) видна менее яркая звезда (5^m) — Алькор. Угловое расстояние между Мицаром и Алькором около $12'$, а линейное расстояние между этими звёздами примерно $1,7 \cdot 10^4$ а. е. Это пример *физической двойной звезды*. Мицар и Алькор не просто проецируются рядом на небесную сферу как *оптические двойные звёзды*, а движутся вокруг общего центра масс. Период обращения такой физической двойной системы звёзд около $2 \cdot 10^6$ лет. Обычно же звёзды, связанные силами тяготения, — *компоненты двойной системы* — образуют более тесные пары, а периоды их обращения не превышают сотен лет, а иногда и значительно меньше. Мицар, как видно в телескоп, и есть двойная система, включающая Мицар А и Мицар В.

Двойственность — распространённое явление среди звёзд: почти половина звёзд входит в состав двойных или более сложных (кратных) систем. В качестве примера рассмотрим звезду α *Близнецов* (Кастор). Расстояние между компонентами (А и В) этой системы примерно равно 100 а. е., а период обращения — около 600 лет. Звёзды А и В Кастора, в свою очередь, тоже двойные. Но их двойственность невозможно обнаружить при визуальных или фотографических наблюдениях, потому что компоненты находятся на расстоянии всего лишь нескольких сотых долей астрономической единицы (соответственно малы и периоды обращения). Двойственность таких тесных пар (их называют *спектрально-двойными звёздами*) выявляется лишь в результате исследования их спектров, в которых наблюдается периодическое раздвоение спектральных линий. Эффект Доплера позволяет объяснить раздвоение ли-

ний тем, что мы видим суммарный спектр, получающийся от наложения спектров звёзд, которые движутся в разных направлениях (одна из них в данный момент удаляется от нас, а другая приближается). Обе звезды в системе Мицара (А и В) оказались спектрально-двойными.

Нередко двойственность тесных пар звёзд можно выявить, изучая периодические изменения их блеска. Если направление от наблюдателя на центр масс двойной звезды проходит вблизи плоскости орбиты, то наблюдатель видит затмения, при которых одна звезда на время заслоняет другую. Такие звёзды называются *затменными двойными* или *затменными переменными*.

По многократным наблюдениям затменной переменной звезды можно построить *кривую блеска*. Если сравнить звёздные величины в минимуме и максимуме блеска, мы получим *амплитуду* изменения блеска. Промежуток вре-

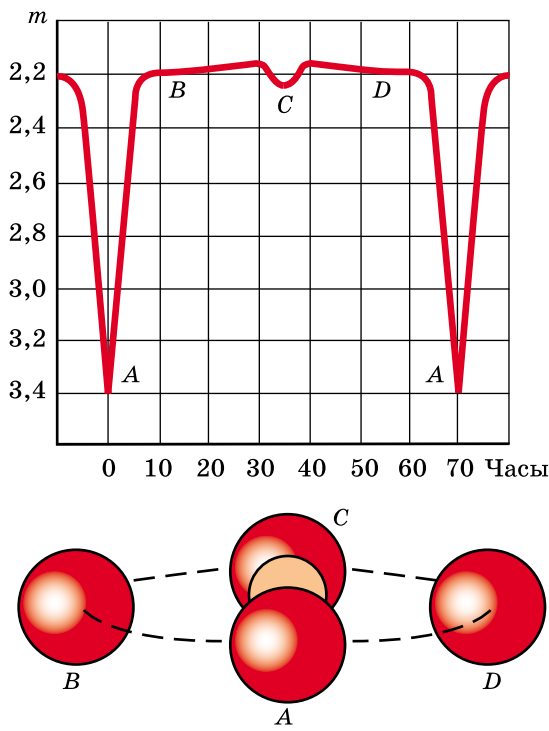


Рис. 91. Кривая блеска β Персея (вверху) и картина затмений в системе звёзд (внизу)

мени между двумя последовательными максимумами (или минимумами) называется *периодом* изменения блеска или *периодом* переменности.

На рисунке 91 изображена кривая блеска типичной затменной переменной звезды β Персея, названной арабами Алголем (Глаз Дьявола), а внизу показано взаимное расположение её компонентов.

Из анализа кривых блеска затменных переменных звёзд можно определить ряд важных физических характеристик звёзд, например их размеры.

2. Определение масс звёзд из наблюдений двойных звёзд. К системам двойных звёзд применимы закон всемирного тяготения и обобщённые Ньютоном законы Кеплера.

Остановимся на этом подробнее. Пусть массы главной звезды и её спутника M_1 и M_2 , P — период обращения спутника, A — большая полуось его орбиты. Тогда, обозначив через $M_\odot$ и $M_\oplus$ массы Солнца и Земли, $T_\oplus$ — сидерический период обращения Земли, a — большую полуось земной орбиты, можно написать:

$$\frac{(M_1 + M_2)P^2}{(M_\odot + M_\oplus)T_\oplus^2} = \frac{A^3}{a^3}. \quad (48)$$

Если принять массу Солнца за единицу ($M_\odot = 1$) и учесть, что

$$M_\oplus \ll M_\odot, \quad T = 1 \text{ год}, \quad a = 1 \text{ а. е.}, \text{ то}$$

$$M_1 + M_2 = \frac{A^3}{P^2}. \quad (48')$$

Величина A связана с годичным параллаксом звезды (π) и угловым расстоянием между компонентами (α) простым соотношением

$$A = \frac{\alpha}{\pi}, \quad (49)$$

где α и π выражены в секундах дуги, A — в астрономических единицах.

Учитывая равенство (48'), запишем формулу (49) в виде

$$M_1 + M_2 = \frac{\alpha^3}{\pi^3 P^2}. \quad (50)$$

Пример 12. Процион (α Малого Пса) — двойная звезда, у которой период обращения спутника около 39 лет, а боль-

шая полуось орбиты 13 а. е. Какова сумма масс компонентов этой системы?

Дано:

$P = 39$ лет

$A = 13$ а. е.

$(M_1 + M_2) = ?$

Решение:

$$M_1 + M_2 = \frac{A^3}{P^2};$$

$$M_1 + M_2 = \frac{13^3}{39^2} \approx 1,44.$$

Ответ: $M_1 + M_2 \approx 1,5M_{\odot}$.

3*. Невидимые спутники звёзд. Самая яркая звезда, украшающая наше зимнее небо, — Сириус — представляет собой двойную систему, состоящую из звезды Сириус А и массивного невидимого спутника (белого карлика) Сириус В. Спутник Сириуса был открыт в результате анализа отклонений в наблюдаемом движении Сириуса.

Но не только звёзды-карлики могут влиять на движение главной звезды; иногда компонентами двойных систем оказываются *нейтронные звёзды* (см. с. 158) и даже *чёрные дыры* (см. с. 191). Кроме того, спутниками звёзд могут быть и планеты. Об этом догадывались мыслители прошлого. Особенно чётко идею о существовании планет у других звёзд сформулировал Джордано Бруно. В конце XX в. удалось открыть планеты у десятков звёзд, находящихся от нас на расстоянии десятков и даже сотен световых лет. Такие звёзды, обладающие крупными спутниками (планетами) или планетными системами, обнаружены в созвездиях Лебедя, Пегаса, Андромеды, Большой Медведицы, Геркулеса, Волопаса и некоторых других. «Вне-солнечные» планеты часто называют *экзопланетами*. Уже обнаружено свыше 3500 экзопланет. Открытие «вне-солнечных» планет — одно из важнейших подтверждений идеи о множественности планетных систем во Вселенной. Особый интерес, конечно, представляют те планетные системы, которые похожи на Солнечную.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1*. Пусть из наблюдений двойной звезды удалось определить угловое расстояние между компонентами (α) и годичный параллакс (π) в секундах дуги. Докажите, что большую полуось орбиты двойной звезды можно вычислить по формуле (49). 2. С помощью рисунка 91 объясните, почему и как изменяется блеск β Персея, а также определите

амплитуду и период изменения блеска этой звезды. 3. Радиус звезды Бетельгейзе (α Ориона) не менее чем в 400 раз превышает радиус Солнца. Изобразите (в выбранном масштабе) три пары небесных тел: Бетельгейзе и Солнце, Солнце и Землю, Землю и Луну. 4*. Вычислите сумму масс двойной звезды α Кентавра ($\pi \approx 0,76''$), если спутник, находящийся от главной звезды на расстоянии $17,65''$, имеет период обращения около 80 лет. Что нужно знать, чтобы вычислить массу каждого из компонентов в отдельности? 5. Какие невидимые спутники могут быть у звёзд?

§ 27. ФИЗИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ, НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ ЗВЁЗДЫ

1. Введение. *Переменные звёзды* — это звёзды, блеск которых изменяется. У одних переменных звёзд *блеск изменяется периодически*, у других наблюдается *беспорядочное изменение блеска*. К периодическим переменным звёздам относятся, например, затменные переменные звёзды, которые, как вы знаете, представляют собой двойные системы. Однако, в отличие от них, известны десятки тысяч одиночных звёзд, блеск которых меняется вследствие происходящих в них физических процессов. Такие звёзды называются *физическими переменными*. Их открытие и исследование показали, что многообразие звёзд проявляется не только в том, что звёзды отличаются друг от друга массами, размерами, температурами, светимостями и спектрами, но и в том, что некоторые из этих физических характеристик не *остаются неизменными* у одних и тех же звёзд.

2. Цефеиды. *Цефеиды* — это весьма распространённый и очень важный тип физических переменных звёзд. Им присущи особенности звезды δ Цефея. Чем же замечательна эта звезда? Рассмотрим рисунок 92. На нём изображена *кривая блеска* δ Цефея, т. е. той звезды, которая стала родоначальницей группы цефеид. Из графика видно, что блеск δ Цефея непрерывно изменяется с *периодом* $5,4^d$ и амплитудой 1^m . Блеск возрастает быстрее, чем ослабевает после максимума. Форма кривой всё время в точности повторяется. Значит, δ Цефея — *периодическая переменная звезда*. Существуют цефеиды с меньшими периодами (до нескольких часов) и большими (до нескольких десятков суток).

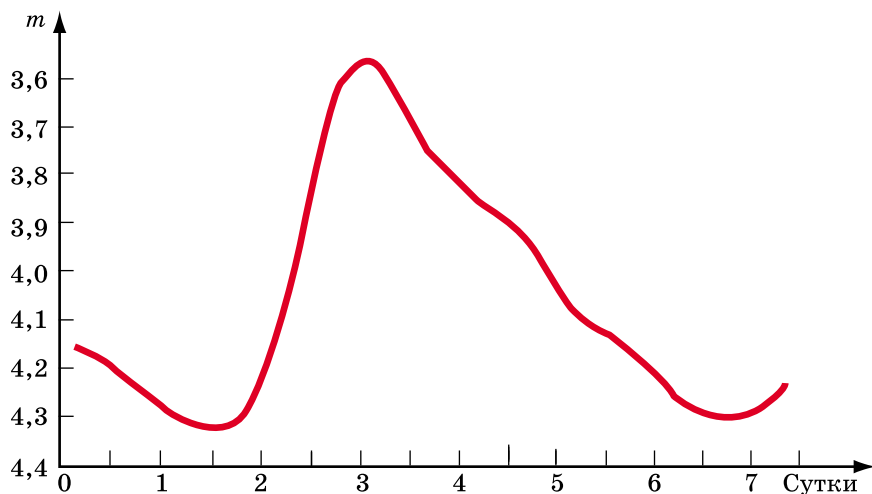


Рис. 92. Кривая блеска δ Цефея

Исследование спектров цефеид показывает, что их фотосферы приближаются к нам с наибольшей скоростью вблизи максимума блеска, а вблизи минимума — с наибольшей скоростью удаляются от нас. Это следует из анализа смещений линий в спектрах цефеид на основе эффекта Доплера.

С движением фотосферы звезды, а значит, и с изменением её размеров мы встречаемся впервые. В самом деле, у Солнца и других подобных ему звёзд размеры практически не меняются. Следовательно, в отличие от таких *стационарных звёзд* цефеиды — *нестационарные звёзды*. *Цефеиды — это пульсирующие звёзды, которые периодически раздуваются и сжимаются*. В процессе пульсации цефеиды изменяется и температура её фотосферы. Самую высокую температуру звезда имеет в максимуме блеска.

Между периодом пульсации долгопериодических цефеид и светимостью этих звёзд существует зависимость, получившая название «период — светимость» (рис. 93). Если из наблюдений известен период изменения блеска цефеиды, то, пользуясь зависимостью «период — светимость», можно определить её абсолютную звёздную величину, а тогда по формуле (41) легко вычислить расстояние до цефеиды, зная из наблюдений её видимую звёздную величину. Так как цефеиды относятся к звёздам-гигантам

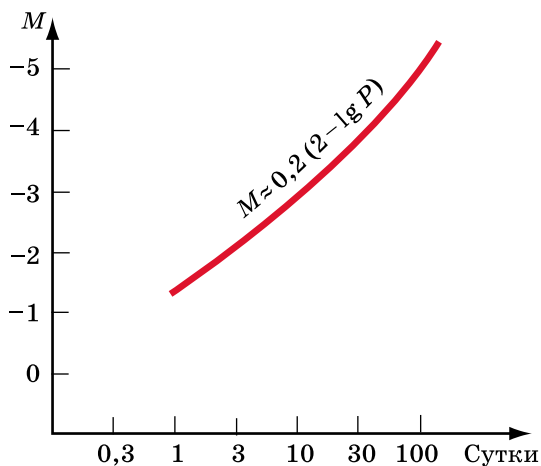


Рис. 93. Зависимость «период — светимость» для цефеид

и сверхгигантам (т. е. имеют огромные размеры и светимости), то они видны на больших расстояниях. Обнаруживая цефеиды в далёких звёздных системах, можно определять расстояния до этих систем.

Цефеиды не принадлежат к числу редко встречающихся звёзд. Вероятно, многие звёзды на протяжении своей жизни некоторое время бывают цефеидами. Поэтому изучение цефеид важно для понимания эволюции звёзд.

3*. Другие физические переменные звёзды. Цефеиды — это лишь один из многочисленных типов физических переменных звёзд. Первая переменная звезда была открыта

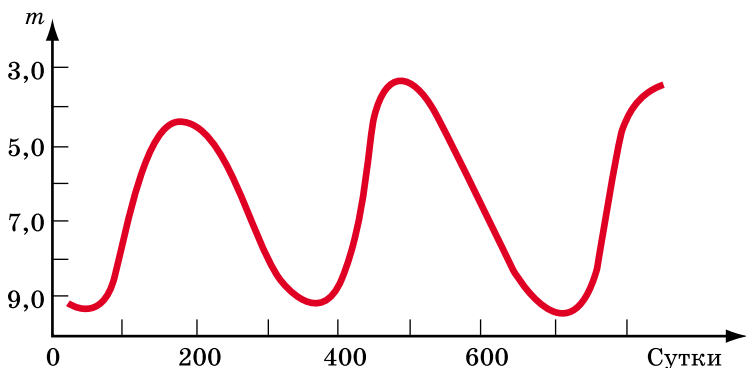


Рис. 94. Кривая блеска Миры Кита

в 1596 г. в созвездии Кита (Мира Кита, или Удивительная Кита). Это не цефеида. Её колебания блеска происходят с периодом около $350^д$, причём блеск в максимуме достигает 3^m , а в минимуме 9^m (рис. 94). Впоследствии было открыто много других *долгопериодических звёзд* типа Мира Кита. Преимущественно это «холодные» звёзды-гиганты спектрального класса М. Изменение блеска таких звёзд, по-видимому, связано с пульсацией и периодическими извержениями горячих газов из недр звезды в более высокие слои атмосферы.

Далеко не у всех физических переменных звёзд наблюдаются *периодические изменения*. Известно множество звёзд, которые относятся к *полуправильным* или даже *неправильным переменным*. У таких звёзд трудно или вообще невозможно заметить закономерность в изменении блеска.

4. Новые и сверхновые звёзды. Мы уже видели, что в отличие от Солнца и других стационарных звёзд у физических переменных звёзд изменяются размеры, температура фотосферы, светимость. Среди различных видов нестационарных звёзд особый интерес представляют *новые и сверхновые звёзды*. На самом деле это не вновь появившиеся звёзды, а ранее существовавшие, которые привлекли к себе внимание резким возрастанием блеска.

При *вспышках новых звёзд* блеск возрастает в тысячи и миллионы раз за время от нескольких суток до нескольких месяцев. Известны звёзды, которые повторно вспыхивали как новые. Согласно современным данным, новые звёзды обычно входят в состав двойных систем, а вспышки одной из звёзд происходят в результате обмена веществом между звёздами, образующими двойную систему. Например, в системе «белый карлик — обычная звезда (малой светимости)» взрывы, вызывающие явление новой звезды, могут возникать при падении газа с обычной звезды на белый карлик.

Ещё более грандиозны *вспышки сверхновых звёзд*, блеск которых внезапно возрастает примерно на 19^m ! В максимуме блеска излучающая поверхность звезды приближается к наблюдателю со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Картина вспышки сверхновых звёзд

свидетельствует о том, что *сверхновые — это взрывающиеся звёзды*.

При взрывах сверхновых в течение нескольких суток выделяется огромная энергия — порядка 10^{41} Дж. Такие колоссальные взрывы происходят на заключительных этапах эволюции звёзд, масса которых в несколько раз больше массы Солнца (см. § 31).

В максимуме блеска одна сверхновая звезда может светить ярче миллиарда звёзд, подобных нашему Солнцу. При наиболее мощных взрывах некоторых сверхновых звёзд может выбрасываться вещество со скоростью 5000—7000 км/с; масса этого вещества может достигать нескольких солнечных масс. *Остатки оболочек*, сброшенных сверхновыми звёздами, видны долгое время как расширяющиеся газовые туманности (см. § 28).

Обнаружены не только остатки оболочек сверхновых звёзд, но и то, что осталось от центральной части некогда взорвавшейся звезды. Такими «звёздными остатками» оказались удивительные источники радиоизлучения, которые получили название *пульсаров*. Первые пульсары были открыты в 1967 г.

У некоторых пульсаров поразительно стабильна частота повторения импульсов радиоизлучения: импульсы повторяются через строго одинаковые промежутки времени, измеренные с точностью до 10^{-9} с! Открытые пульсары находятся от нас на расстояниях, не превышающих сотни парсек. Предполагается, что *пульсары — это быстровращающиеся сверхплотные звёзды, радиусы которых около 10 км, а массы близки к массе Солнца*. Такие звёзды состоят из плотно упакованных нейтронов и называются *нейтронными*. Лишь часть времени своего существования нейтронные звёзды проявляют себя как пульсары.

Вспышки сверхновых звёзд относятся к редким явлениям. За последнее тысячелетие наблюдалось всего лишь несколько вспышек сверхновых. Из них достоверно установлены следующие три: вспышка в 1054 г. в созвездии Тельца, в 1572 г. — в созвездии Кассиопеи, в 1604 г. — в созвездии Змееносца. Первая из этих сверхновых описана как «звезда-гостя» китайскими и японскими астрономами, вторая — Тихо Браге, а третью наблюдал Иоганн Кеплер. Блеск сверхновых 1054 г. и 1572 г. превосходил блеск Ве-

неры, и эти звёзды были видны днём. Со времени изобретения телескопа (1609) в нашей звёздной системе не наблюдалось ни одной сверхновой звезды (возможно, что некоторые вспышки остались незамеченными). Когда же появилась возможность исследовать другие звёздные системы, в них стали часто открывать новые и сверхновые звёзды.

23 февраля 1987 г. сверхновая звезда вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке (рис. 95) — самом большом спутнике нашей Галактики. Впервые после 1604 г. сверхновую звезду можно было видеть даже невооружённым глазом. До вспышки на месте сверхновой находилась звезда 12-й звёздной величины.

Максимального блеска 4^m звезда достигла в начале марта, а затем стала медленно угасать. Учёным, наблюдавшим сверхновую с помощью телескопов крупнейших наземных обсерваторий, орбитальной обсерватории «Астрон» и рентгеновских телескопов на модуле «Квант» орбитальной станции «Мир», впервые удалось проследить весь процесс вспышки. Наблюдения проводились в разных диапазонах спектра, включая видимый оптический, ультрафиолетовый, рентгеновский и радиодиапазоны. В научной печати появлялись сенсационные сообщения о регистрации *нейтринного* и, возможно, *гравитационного* излучения от взорвавшейся звезды. Были уточнены и обогащены новыми результатами модели строения звезды в фазе, предшествующей взрыву.

Расстояние до сверхновой SN 1987 A не менее 160 тыс. св. лет (50 кпк). Поэтому на самом деле звезда вспыхнула не в 1987 г., а на 160 тыс. лет раньше! Если бы подобная вспышка произошла на расстоянии 10 пк от нас, то сверхновая освещала бы Землю лучше, чем Луна в полнолуние.



Рис. 95. Сверхновая 1987 в Большом Магеллановом Облаке

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. В чём принципиальное отличие физических переменных звёзд от обычных? 2. Почему изменяется блеск цефеид? 3. Нередко цефеиды называют «маяками Вселенной». Почему? 4. Оцените расстояние до цефеиды, видимая звёздная величина которой $+12^m$, а период колебания блеска примерно 4^d . 5*. Как должны периодически смещаться линии в спектре цефеиды? 6. Во сколько раз возрастает блеск звёзд, вспыхивающих как сверхновые? 7. Что такое пульсары? 8. Какова связь между вспышками сверхновых звёзд и появлением нейтронных звёзд и пульсаров? 9. Почему Солнце не может вспыхнуть как сверхновая звезда?

! Что желательно знать, изучив тему «Солнце и звёзды»

1. Солнце — единственная звезда в Солнечной системе, источник энергии на Земле. Это довольно обычная звезда Вселенной, которая не является уникальной по своим физическим характеристикам (массе, светимости, размерам, температуре, химическому составу).
2. Основные детали фотосферы Солнца — гранулы, пятна, факелы. Они, как вспышки и протуберанцы, наблюдаемые в хромосфере и короне, представляют собой проявление солнечной активности (её цикл длится в среднем 11 лет).
3. Во всех проявлениях солнечной активности исключительно важную роль играет магнитное поле активной области.
4. Зная солнечную постоянную, можно вычислить светимость Солнца.
5. Солнце излучает энергию в различных диапазонах электромагнитных волн; расширяющаяся солнечная корона — источник солнечного ветра.
6. Существует ряд геофизических проявлений солнечной активности. Интенсивно исследуется влияние солнечной активности на тропосферу и биосферу Земли.
7. Звёзды находятся от нас на различных расстояниях и движутся в пространстве. Среди них есть сверхгиганты, гиганты и карлики, которых очень много во Вселенной.
8. Многие звёзды образуют двойные и кратные системы. В системах двойных звёзд действует закон всемирного тяготения.

9. Источник энергии Солнца и звёзд — термоядерные реакции, происходящие в их недрах.

10. Основываясь на знании физических характеристик Солнца и звёзд и законах физики, установленных на Земле, можно построить модели внутреннего строения Солнца и звёзд.

11. Видимые звёздные величины характеризуют не размеры и светимости звёзд, а только освещённость, создаваемую звёздами на Земле.

12. Звёзды — раскалённые плазменные шары. Равновесие обычных звёзд обеспечивается равенством сил тяготения и сил внутреннего давления плазмы.

13. Между различными физическими характеристиками звёзд существует связь (например, «спектр — светимость», «масса — светимость»).

14. В отличие от практически стационарных звёзд, сходных с Солнцем, существуют пульсирующие звёзды (например, цефеиды) и взрывающиеся (сверхновые).



Что желательно уметь, изучив тему «Солнце и звёзды»

1. Наблюдать Солнце на экране школьного телескопа.

2*. Вычислять светимость Солнца по солнечной постоянной.

3. Анализировать причинно-следственные связи при объяснении влияния солнечной активности на околоземное пространство и явления в атмосфере Земли.

4. Сравнивать блеск звёзд по их видимым звёздным величинам с помощью формулы (39).

5. Вычислять расстояния до звёзд: а) по их годовому параллаксу с помощью формулы (38); б) по видимой и абсолютной звёздной величине с помощью формулы (41).

6. По формуле (48') вычислять сумму масс компонентов двойных звёзд.

7. Анализировать диаграммы «спектр — светимость» и «масса — светимость».

8. Находить на небе звёзды: α Малой Медведицы, α Лиры, α Лебедя, α Орла, α и β Ориона, α и β Близнецов, α Возничего, α Малого Пса, α Большого Пса, α Тельца.

§ 28. НАША ГАЛАКТИКА

1. **Млечный Путь.** В безлунную осеннюю ночь хорошо заметна тянущаяся через всё небо светлая полоса. Это *Млечный Путь*, названный так в древности за присущий ему оттенок. Направив на него бинокль или телескоп, вы убедитесь в том, что свет Млечного Пути исходит от множества не различимых невооружённым глазом звёзд (об этом догадывался ещё Демокрит в IV в. до н. э., а впервые обнаружил Галилей).

Млечный Путь опоясывает всё небо; у него нет резких границ, а разные участки имеют неодинаковую ширину и яркость. В Млечном Пути сосредоточено подавляющее число звёзд нашей *Галактики* — *огромной звёздной системы спиралеобразной формы* («галактика» — от греческого слова, означающего «молочный»). Солнце, являющееся одной из звёзд Галактики, находится вблизи её плоскости симметрии — *галактической плоскости*. Поэтому большинство звёзд Галактики проецируется на небесную сферу не хаотично, а в пределах той полосы, которую мы и называем Млечным Путём.

2. **Состав Галактики.** *Звёзды и звёздные скопления.* Число *звёзд* в Галактике порядка триллиона (10^{11} — 10^{12}). Самые многочисленные звёзды — это карлики с массами примерно в 10 раз меньше массы Солнца. Кроме одиночных звёзд и их *спутников* (планет), в состав Галактики входят *двойные* и *кратные звёзды*, а также группы звёзд, связанные силами тяготения и движущиеся в пространстве как единое целое, называемые *звёздными скоплениями*. Некоторые из них можно отыскать на небе в телескоп,

а иногда и невооружённым глазом, например звёздное скопление Плеяды в созвездии *Тельца* (рис. 96). Это *рассеянное звёздное скопление*. Такие скопления не имеют правильной формы; их в настоящее время известно более тысячи. На рисунке 97 изображено звёздное скопление, совершенно не похожее на рассеянное. Это *шаровое звёздное скопление* в созвездии Геркулеса. Если в рассеянных скоплениях содержатся сотни или тысячи звёзд, то в шаровых их сотни тысяч. Силы тяготения удерживают звёзды в таких скоплениях миллиарды лет. Известно около 150 шаровых скоплений. В отличие от рассеянных звёздных скоплений, состоящих в основном из звёзд, которые принадлежат *главной последовательности*, шаровые скопления содержат красные и жёлтые гиганты и сверхгиганты. С помощью рентгеновских телескопов, установленных на специальных искусственных спутниках Земли, открыто рентгеновское излучение многих шаровых скоплений.

Туманности. В различных созвездиях можно увидеть в телескоп туманные пятна, которые состоят в основном из газа и пыли, — это *туманности*, они тоже входят в состав нашей Галактики. Туманности неправильной, клочковатой формы называют *диффузными*, а те, которые имеют правильную форму и при наблюдении в небольшие



Рис. 96. Центральная часть рассеянного звёздного скопления Плеяды М 45 в созвездии Тельца



Рис. 97. Шаровое звёздное скопление М 13 (обозначение см. с. 171) в созвездии Геркулеса



Рис. 98. Диффузная туманность М 42 в созвездии Ориона

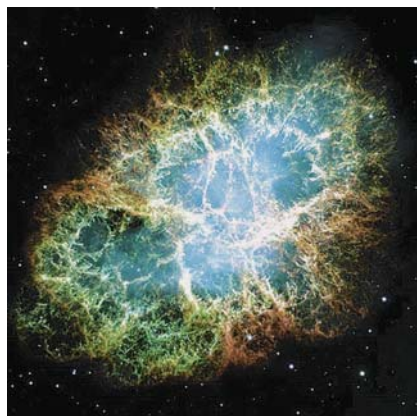
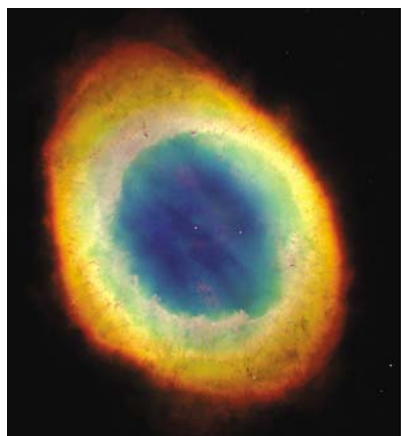


Рис. 99. Крабовидная туманность М 1 в созвездии Тельца

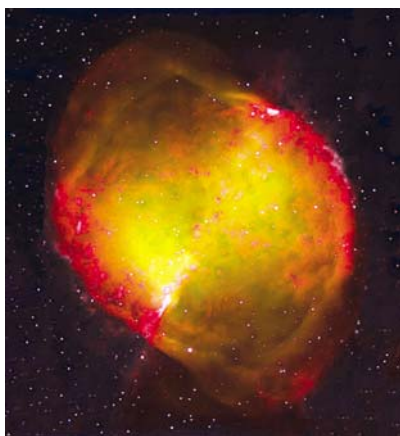
телескопы напоминают по виду планеты, — планетарными. Если вблизи большого газопылевого облака находится яркая звезда, то туманность, отражая или переизлучая излучение этой звезды, становится видимой как *светлая диффузная туманность*. Пример светлой диффузной туманности — большая *газопылевая туманность в созвездии Ориона* (рис. 98). Расстояние до неё около 500 пк, диаметр центральной части туманности — 6 пк, масса примерно в 100 раз больше массы Солнца.

Интересна небольшая диффузная туманность, названная *Крабовидной туманностью* (рис. 99) за свою необычную сетку из ажурных газовых волокон. Установлено, что эта туманность — остаток сверхновой звезды, вспыхнувшей в 1054 г. в созвездии Тельца. Крабовидная туманность удалена от нас на расстояние не менее 1,5 кпк. Её диаметр около 1 пк, масса всех волокон около 0,1 массы Солнца. Туманность расширяется со скоростью более 1000 км/с.

Крабовидная туманность — один из уникальных космических объектов. Это источник не только оптического излучения, но и радиоизлучения, рентгеновских и гамма-квантов. Наконец, в центре Крабовидной туманности находится пульсар, замечательный тем, что у него в 1969 г. наряду с *пульсациями радиоизлучения* впервые были обнаружены *оптические пульсации блеска* и *пульсации рент-*



а)



б)

Рис. 100. Планетарные туманности: а) Кольцо М 57 в созвездии Лиры; б) Гантель М 27 в созвездии Лисички

геновского излучения. Пульсар, обладающий мощным переменным магнитным полем, ускоряет электроны и вызывает свечение туманности в различных участках спектра электромагнитных волн.

Пример планетарной туманности — туманность *Кольцо* в созвездии Лиры (рис. 100). В центре планетарной туманности находится горячая звезда. Газ, из которого состоит планетарная туманность, входил когда-то в состав атмосферы этой звезды. Коротковолновое излучение звезды переизлучается газом планетарной туманности в видимое излучение. Именно флуоресценцией, а не простым отражением объясняется свечение планетарных туманностей.

Туманности, в основном состоящие из пыли, выделяются на photographиях звёздного неба в виде тёмных участков (рис. 101). Многие тёмные туманности расположены сравнительно близко от нас и сильно поглощают свет находящихся за ними звёзд.

Космические лучи и магнитные поля. Но даже там, где не видно ни звёзд, ни туманностей, пространство не пусто. Оно заполнено очень *разреженным межзвёздным газом и межзвёздной пылью*. В межзвёздном пространстве существуют и различные поля (*гравитационное и магнитное*). Пронизывают межзвёздное пространство и *космические*



Рис. 101. Туманность Конская голова в созвездии Ориона

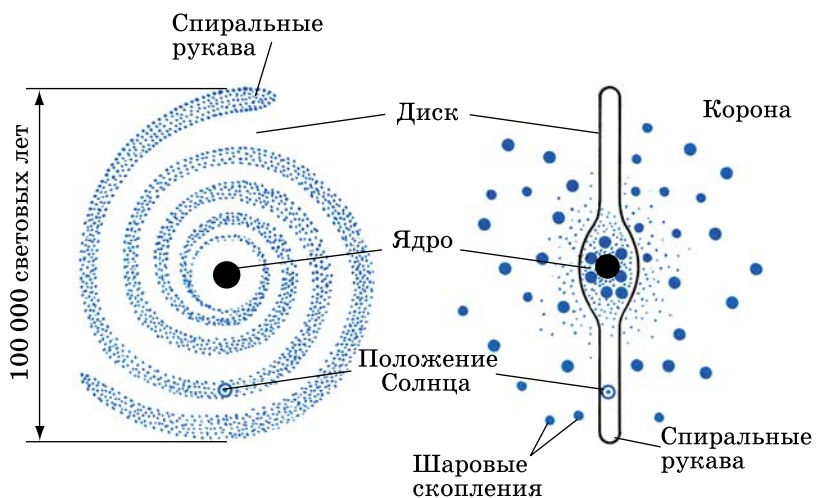


Рис. 102. Строение Галактики. Большой чёрной точкой обозначена существующая в центре Галактики сверхмассивная чёрная дыра

лучи, представляющие собой потоки электрически заряженных частиц, которые при движении в магнитных полях разогнались до скоростей, близких к скорости света, и приобрели огромную энергию.

3. Строение Галактики (рис. 102). Подавляющая часть звёзд и диффузной материи Галактики занимает линзообразный объём (диск с утолщением). Диаметр диска около $3 \cdot 10^4$ пк. Солнце находится на расстоянии около 10^4 пк от центра Галактики, скрытого от нас облаками межзвёздной пыли. В центре Галактики расположено её ядро, которое в последнее время тщательно исследуется в инфракрасном, радио- и рентгеновском диапазонах длин волн. Непрозрачные облака пыли застилают от нас ядро, препятствуя визуальным и обычным фотографическим наблюдениям этого интереснейшего объекта Галактики.

Если бы мы могли взглянуть на галактический диск сверху, то обнаружили бы огромные спиральные ветви, в основном содержащие наиболее горячие и яркие звёзды, а также массивные газовые облака. Диск со спиральными ветвями образует основу *плоской подсистемы Галактики*. А объекты, концентрирующиеся ближе к ядру Галактики и лишь частично проникающие в диск (например, шаровые звёздные скопления), относятся к *сферической подсистеме*. Такова лишь очень упрощённая схема строения Галактики. В Галактике известны и другие подсистемы, причём существование различных подсистем неразрывно связано с образованием и эволюцией звёзд, изменением химического состава (химическая эволюция) и, наконец, с эволюцией структуры Галактики (Галактика не всегда была такой, какой мы её застали!).

4. Вращение Галактики и движение звёзд в ней. Галактика вращается вокруг своей центральной области. *Центр Галактики расположен в созвездии Стрельца*. В отличие от Солнечной системы, в которой почти вся масса вещества сосредоточена в Солнце, в центре Галактики сосредоточена лишь сравнительно небольшая часть её массы. Поэтому вращение Галактики имеет свои особенности: с увеличением расстояния от центра изменяются и угловая, и линейная скорости вращения: угловая скорость убывает, а линейная сначала возрастает, а затем, достигнув максимума, начинает убывать. (Вращение Га-

лактики и все скорости определяются по эффекту Доплера.) Солнце и ближайшие к нему звёзды движутся вокруг центра Галактики со скоростью 250 км/с, совершая полный оборот примерно за 200 млн лет. Кроме того, Солнце (а вместе с ним и вся Солнечная система) движется со скоростью около 20 км/с по направлению к точке, которая называется *апексом* (от лат. «вершина») и положение которой на небесной сфере известно ($\alpha = 18^\circ$, $\delta = +30^\circ$). Вычисляя из наблюдений пространственную скорость какой-либо звезды (см. § 23), мы определяем эту скорость *относительно Солнца*.

Недавно выяснилось, что вблизи центра Галактики есть звёзды, которые движутся гораздо быстрее. Открыв это сверхбыстрое движение звёзд, астрономы пришли к выводу, что в центре Галактики находится *сверхмассивная чёрная дыра* с массой около 3 млн масс Солнца.

5*. Радиоизлучение Галактики. В начале 30-х гг. XX в. при изучении шумов, мешающих радиосвязи, был открыт источник необычных радиопомех, расположенный в направлении центра Галактики и находящийся за пределами Солнечной системы. Радиоизлучение приходит к нам не только из центра Галактики или от остатков когда-то вспыхнувших сверхновых звёзд, но и из межзвёздного пространства.

Радиоизлучение межзвёздной среды вызвано различными причинами. Например, радиоволны излучает находящийся в межзвёздном пространстве ионизованный горячий газ, нагретый до 10^4 К. Нагрев и ионизацию газа (преимущественно водорода) вызывают горячие звёзды и космические лучи. Другой источник радиоизлучения (на волне 21 см) — *нейтральный водород*, которого в межзвёздном пространстве значительно больше, чем ионизованного. Исследования радиоизлучения Галактики непрерывно пополняют наши сведения о ней. Так, например, наблюдения на волне 21 см распределения нейтрального водорода помогают выявить расположение спиральных ветвей, в которых сосредоточено особенно много межзвёздного газа. Такие наблюдения доказывают, что газ, как и звёзды, участвует во вращении Галактики. Это позволяет по радионаблюдениям уточнить закономерности вращения Галактики.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Пользуясь звёздной картой, проследите, через какие созвездия проходит Млечный Путь, и выясните, в каких созвездиях его пересекает небесный экватор. 2. Почему нашу Галактику называют «Млечный Путь»? 3. Что входит в состав Галактики? 4. Опишите строение Галактики. 5. В каких видах материя встречается в Галактике? 6. Сколько лет требуется лучу света, чтобы преодолеть расстояние, равное диаметру Галактики? 7. Где расположено Солнце в Галактике? 8. В каком созвездии находится солнечный апекс? 9. Сравните следующие скорости космических движений: скорость движения Земли вокруг Солнца, скорость движения Солнца относительно ближайших звёзд и скорость движения Солнца вокруг центра Галактики. 10*. Солнце находится внутри облака нейтрального водорода с концентрацией $\approx 0,1$ атома в 1 см^3 . Сравните это число с концентрацией частиц в воздухе при нормальном атмосферном давлении и в лучших вакуумных камерах, где на 1 см^3 приходится 10^{10} атомов. 11*. Определите расстояние до шарового скопления и размеры скопления, если известно, что: а) в нём находится цефеида, видимый блеск которой $15,1^m$, а абсолютная звёздная величина 0^m ; б) угловой диаметр скопления $12'$. 12. Во сколько раз число звёзд, входящих в Галактику, больше числа звёзд, которые одновременно доступны наблюдению невооружённым глазом ($3 \cdot 10^3$)? 13. Считая, что население земного шара составляет $6,5 \cdot 10^9$ человек, определите, сколько звёзд Галактики приходится на каждого жителя нашей планеты.

§ 29. ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

1. **Открытие других галактик.** В начале XX в. было доказано, что некоторые туманные пятна, видимые в телескоп в разных участках неба, находятся вне нашей Галактики и представляют собой *другие галактики*, каждая из которых, подобно нашей, состоит из многих миллиардов звёзд. Огромные расстояния, отделяющие Солнечную систему от этих миров, почти лишают нас возможности видеть их невооружённым глазом. Зато телескоп раскрывает перед человеком поистине космические глубины: крупнейшим современным телескопам доступна область Вселенной, в которой находятся *миллиарды галактик*. Исследованием мира галактик занимается *внегалактическая астрономия*. Подобно физике элементарных частиц, проникающей в тайны невидимого микромира, внегалактическая астрономия изучает разнообразные, очень далёкие от

нас, не видимые невооружённым глазом космические объекты безграничного мегамира, непрерывно расширяя наши представления о Вселенной.

2*. Определение расстояний, размеров и масс галактик. Один из методов определения *расстояний до галактик* основан на определении видимых и абсолютных звёздных величин цефеид, новых и сверхновых звёзд, открываемых в других галактиках.

По формуле (41) можно вычислить расстояния до тех галактик, в которых обнаружены цефеиды, новые и сверхновые звёзды.

Обозначив расстояние до галактики через r , линейный диаметр — D , угловой диаметр — d'' , легко вывести следующую формулу для определения *диаметра галактики*:

$$D = \frac{rd''}{206\,265''}, \quad (51)$$

где D и r выражены в парсеках, а d'' — в секундах дуги.

Линейный диаметр *Туманности Андромеды* не менее 40 кпк, т. е. превышает диаметр нашей Галактики.

Смещение спектральных линий, наблюдаемое в различных частях какой-нибудь близкой к нам галактики, свидетельствует о том, что галактики вращаются. Если область галактики, расположенная на окраине (на расстоянии R от её центра), имеет линейную скорость вращения v , то центростремительное ускорение этой области будет $\frac{v^2}{R}$. Приравняем его к гравитационному ускорению, получаемому из закона всемирного тяготения $\frac{GM}{R^2}$, где M — масса ядра галактики:

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

отсюда найдём массу ядра галактики:

$$M = \frac{Rv^2}{G}. \quad (52)$$

Масса всей галактики на один-два порядка больше массы её ядра. Например, масса ядра галактики в созвездии Андромеды порядка 10^{40} кг (примерно 10^{10} масс Солнца), а всей галактики — примерно в 100 раз больше (такова же примерно и масса нашей Галактики).

3. Многообразие галактик. Мир галактик поражает своим разнообразием. Галактики резко различаются *размерами, числом входящих в них звёзд, светимостями, внешним видом*. Они обозначаются номерами, под которыми их вносят в каталоги. Одни и те же галактики фигурируют в разных каталогах под разными номерами. Например, М 31, М 82 (*каталог Мессье*) или NGC 224, NGC 3034 (*«Новый общий каталог»* — New General Catalogue).



Рис. 103. Карликовая эллиптическая галактика М 110

По внешнему виду галактики условно разделены на три основных типа: *эллиптические, спиральные и неправильные*.

Пространственная форма эллиптических галактик — эллипсоиды с разной степенью сжатия. Среди эллиптических галактик встречаются гигантские и карликовые (рис. 103, 107 и 108). Почти четверть всех изученных галактик относится к эллиптическим. Это наиболее простые по структуре галактики. Распределение звёзд в них равномерно убывает от центра; пыли и газа почти нет. Самые яркие звёзды — красные гиганты.

Спиральные галактики — самый многочисленный тип галактик (рис. 104, 105). К нему относятся наша Галактика и гигантская *Туманность Андромеды* М 31, или NGC 224 (см. рис. 104), удалённая от нас примерно на 2,5 млн св. лет. Это одна из немногих галактик, которую можно увидеть невооружённым глазом. Массы спиральных галактик — порядка 10^9 — 10^{12} масс Солнца. Ближайшая к нам галактика М 31 не только красива, но и опасна. Через несколько миллиардов лет она может столкнуться с нашей Галактикой...

Неправильные галактики не имеют центральных ядер и не обнаруживают закономерностей в своём строении. Жители Южного полушария Земли могут невооружённым



Рис. 104. Спиральная галактика М 31, или NGC 224 (Туманность Андромеды)

глазом видеть две неправильные галактики — *Большое* и *Малое Магеллановы Облака* (рис. 106), являющиеся спутниками нашей Галактики. Они находятся сравнительно недалеко от нас, на расстоянии лишь в полтора раза большем диаметра Галактики. Магеллановы Облака значительно меньше нашей Галактики по массе и размерам. Изучение Магеллановых Облаков позволяет получить ценнейшие сведения о звёздах, звёздных скоплениях и диффузной материи. Вспомните, например, об открытии сверхновой звезды в Большом Магеллановом Облаке (см. § 27).

Нередко встречаются и другие виды галактик, которые по своим свойствам отличаются от эллиптических, спиральных и неправильных. Таковы, например, взаимодействующие галактики. Они обычно находятся на небольших расстояниях друг от друга, связаны «мостами» из светящейся материи, иногда как бы пронизывают одна другую.



а)



б)



в)



г)

Рис. 105. Спиральные галактики: а) двойная галактика М 51 в созвездии Гончих Псов; б) М 95; в) М 104 — Сомbrero; г) NGC 1300



а)



б)

Рис. 106. Неправильные галактики: Большое Магелланово Облако (а) и Малое Магелланово Облако (б) (соответственно в созвездиях Золотой Рыбы и Тукана)

4. Радиогалактики и активность ядер галактик. Некоторые галактики обладают исключительно мощным радиоизлучением, превосходящим видимое излучение. Это радиогалактики. Одна из них находится в созвездии *Лебедя* (Лебедь А). Её видимая звёздная величина — примерно 18^m (будучи столь слабым объектом в оптическом диапазоне, эта галактика даже не была внесена в каталог NGC). Но абсолютная звёздная величина галактики Лебедь А, находящейся от нас на расстоянии около 200 Мпк, достигает $-20,5^m$. Это такая же гигантская система, как и наша Галактика. Но, в отличие от нашей и других «нормальных» галактик, Лебедь А излучает в радиодиапазоне больше энергии, чем в оптическом диапазоне. В Лебеде А видны два ядра, образование которых, скорее всего, связано с мощным взрывом в центре этой галактики (хотя, возможно, это результат столкновения двух галактик).

Другой известный источник радиоизлучения — шаровая галактика NGC 5128 в созвездии *Центавра* (рис. 107). На её фотографии чётко выделяются огромные облака тёмной пылевой материи, которые разделяют галактику на две части.

В одной из ближайших к нам радиогалактик (Дева А; М 87, или NGC 4486) хорошо видна газовая струя, устремлённая из ядра (рис. 108). Длина струи достигает нескольких тысяч световых лет, внутри неё заметны отдельные сгущения.

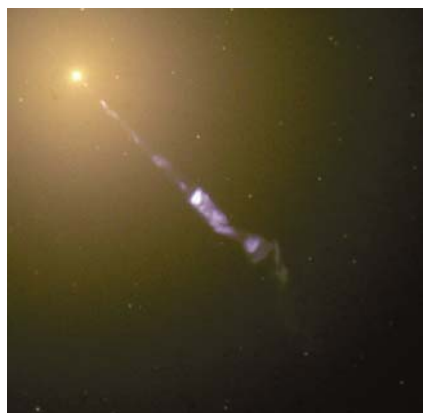
Ещё недавно считалось, что самые грандиозные проявления взрывных процессов — вспышки сверхновых. Однако при взрывах в ядрах галактик выделяется во много раз больше энергии. Наблюдаемая *активность ядер галактик*



Рис. 107. Радиогалактика Центавр А, или Кентавр А (эллиптическая, NGC 5128)



а)



б)

Рис. 108. Радиогалактика Дева А (гигантская эллиптическая галактика М 87): а) общий вид галактики с выбросом вещества; б) структура выброса

проявляется в следующих основных формах: непрерывное истечение потоков вещества; выбросы сгустков газа и облаков газа с массой в миллионы солнечных масс; нетепловое (т. е. не связанное с нагреванием) радиоизлучение из околоядерной области; взрывы, превращающие галактику в радиогалактику. Причина активности ядер галактик пока не выяснена. На протяжении многих лет активность ядер галактик в нашей стране исследовали академик *В. А. Амбарцумян* (1908—1996) и его ученики.

5. Квазары. Радионаблюдения привели в 1963 г. к открытию удивительных звёздоподобных источников радиоизлучения. Они были названы квазарами. Сейчас их открыто более тысячи. Самый яркий квазар, имеющий обозначение 3С 273 (3С — сокращённое название третьего Кембриджского каталога радиоисточников), виден как звезда $12,6^m$. В действительности этот квазар, находящийся от нас на расстоянии около 3 млрд св. лет, излучает больше энергии в оптическом диапазоне, чем самые яркие галактики. Светимость этого квазара в 500 раз превосходит светимость галактики в Андромеде. В радиодиапазоне мощность излучения 3С 273 сравнима с радиоизлучением Лебедя А. Кроме того, этот квазар оказался одним из самых мощных источников рентгеновского излучения. Сравнивая

между собой старые фотографии участка звёздного неба, полученные в то время, когда эта «слабая звезда» ничем не привлекала к себе внимания, обнаружили, что *блеск квазара не оставался постоянным*. Это позволило оценить размеры квазара. Они не превышают одного светового года. Следовательно, квазар по крайней мере больше обычных звёзд, но гораздо меньше, например, нашей Галактики.

Квазары не похожи на обычные звёзды и своими массами. Вычисления показывают, что массы квазаров достигают многих миллионов солнечных масс. Чтобы вызвать и длительное время поддерживать сверхмощное излучение квазаров, требуется энергия, которую не может обеспечить ни один из известных ныне источников, включая термоядерный синтез. Свет и радиоизлучение от самых далёких из известных ныне квазаров идут к нам более 10 млрд лет. Скорее всего, *квазары — это исключительно активные компактные ядра очень далёких галактик*.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие объекты открыты за пределами нашей Галактики? 2. Какие вы знаете спиральные галактики? 3. Чем отличаются от спиральных эллиптические и неправильные галактики? 4. Чем замечательны радиогалактики? 5. Какие вам известны проявления активности ядер галактик? 6. Что вам известно о квазарах? 7. Можно ли сегодня вечером (в случае безоблачной погоды) отыскать на небе галактику M31? 8. Какие из упомянутых в тексте галактик недоступны наблюдению в средних широтах? 9. Как, наблюдая цефеиды в близких спиральных галактиках, определить расстояние до этих галактик? (*Как изменится результат, если учесть поглощение света, идущего к нам от галактик? Повлияет ли учёт поглощения света на вычисленные диаметры галактик?) 10. Каково расстояние (в кпк) до ближайшей к нам галактики? Каковы её размеры и масса?

§ 30. МЕТАГАЛАКТИКА

1. Системы галактик и крупномасштабная структура Вселенной. Галактики, подобно звёздам, наблюдаются группами. Например, нашу Галактику, Магеллановы Облака и ещё около 20 небольших спутников нашей Галактики можно рассматривать как **к р а т н у ю с и с т е м у**. Кратной оказалась и Туманность Андромеды, окружённая несколькими эллиптическими галактиками-спутниками.



Рис. 109. Центральная часть скопления галактик в созвездии Волосы Вероники

Наша Галактика и Туманность Андромеды входят в Местную группу (систему) галактик, размеры которой достигают сотен тысяч парсек. Местная группа представляет собой сравнительно небольшую систему, так как существуют скопления, содержащие сотни и тысячи галактик.

Ближайшее к нам скопление галактик находится в созвездии Девы и насчитывает сотни крупных галактик. Расстояние до него порядка 20 Мпк, это система диаметром более 6 Мпк. Крупные скопления галактик находятся в созвездиях Волосы Вероники, Северная Корона, Геркулес и др. (рис. 109).

Не входят ли скопления в состав ещё больших систем? Данные внегалактической астрономии указывают на то, что, возможно, существует Местное сверхскопление галактик, насчитывающее примерно 10 тыс. галактик и имеющее диаметр около 50 Мпк. В его центре расположено скопление галактик в созвездии Девы. Открыто несколько десятков других сверхскоплений (два ближайших находятся от нас на расстоянии 100 Мпк). Таким образом, *Вселенной на самых разных уровнях присуща структур-*

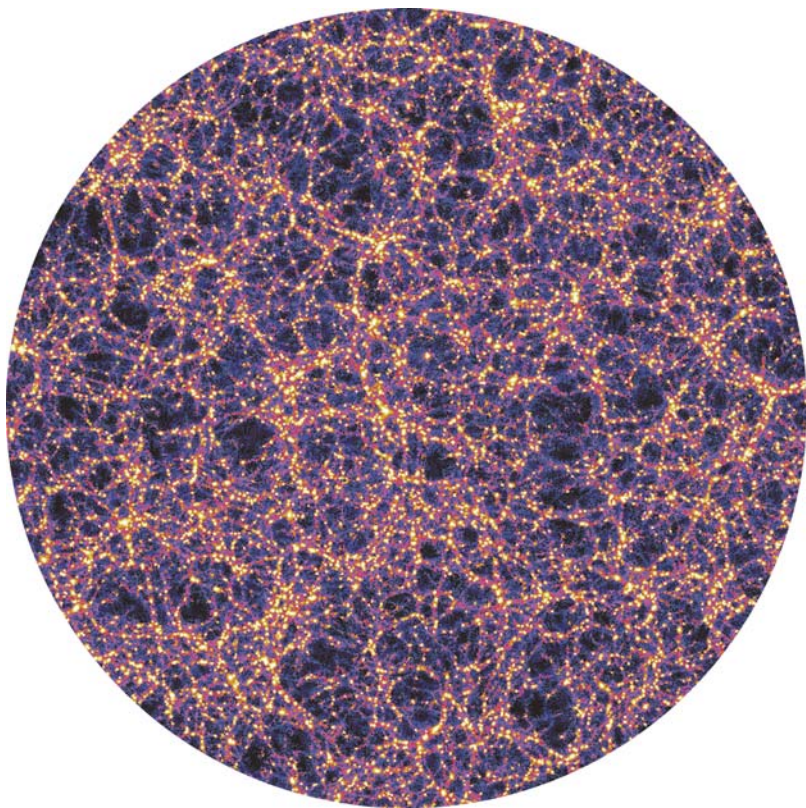


Рис. 110. Крупномасштабная структура Вселенной (в условных цветах)

ность: от ядер атомов до гигантских сверхскоплений галактик.

В конце 70-х гг. XX в. астрономы обнаружили, что галактики в сверхскоплениях распределены не равномерно, а сосредоточены вблизи границ ячеек, внутри которых галактик почти нет. Теоретики предвидели возможность такого распределения галактик, а потому открытие не было неожиданным. Следовательно, согласно современным представлениям для Вселенной характерна *ячеистая* (иногда говорят *сетчатая* или *пористая*) *структура*, которую можно видеть на специально обработанных фотографиях участков звёздного неба. Она напоминает «паутинную сетку» (рис. 110).

Вообразим себе достаточно большую «сеть», содержащую множество ячеек. Если не обращать внимания на индивидуальные особенности каждой отдельно взятой ячейки, то в больших масштабах её различные части выглядят сходным образом.

Мы рассматривали картину распределения сверхскоплений галактик в проекции на небесную сферу. А каково их пространственное распределение? Скорее всего, «пустоты» существуют не только внутри ячеек, так как при исследовании пространственного распределения галактик отмечены огромные объёмы пространства (порядка миллиона кубических мегапарсек), в которых галактик пока не обнаружено; они были названы «чёрными областями».

В свете этих открытий пространственной моделью структуры Вселенной может служить кусок пемзы. Пемза однородна в целом и неоднородна в небольших выделенных объёмах (в ней есть вещество и пузырьки воздуха). Так и во Вселенной: в «небольших» масштабах, например в масштабах Солнечной системы или Галактики, вещество распределено явно неравномерно, но в *масштабах сверхскоплений галактик — практически равномерно*. Итак, в крупномасштабной структуре Вселенной не существует каких-либо особых, чем-то выделяющихся мест или направлений, поэтому в больших масштабах (более 100—200 Мпк) Вселенную можно считать не только *однородной*, но и *изотропной*.

2. Метагалактика и её расширение. Вся охваченная современными методами астрономических наблюдений часть Вселенной называется *Метагалактикой* (или нашей Вселенной). В Метагалактике пространство между галактиками заполнено чрезвычайно разреженным *межгалактическим газом*, пронизывается *космическими лучами*, в нём существуют *гравитационные* и *электромагнитные поля*, а возможно, и *невидимые массы вещества* (не только «обычного», но и, например, состоящего из нейтрино).

От наиболее удалённых метагалактических объектов свет идёт до нас миллиарды лет. И всё-таки нет оснований отождествлять Метагалактику со всей Вселенной. *В принципе возможно существование других, пока неизвестных нам метагалактик.*

В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл (1889—1953) открыл важную закономерность: линии в спектрах подавляющего большинства галактик смещены к красному концу, причём смещение тем больше, чем дальше от нас находится галактика. Это интересное явление называется красным смещением.

Объяснив красное смещение эффектом Доплера, учёные пришли к выводу, что *расстояние между нашей и другими галактиками непрерывно увеличивается*. Конечно, галактики не разлетаются во все стороны от нашей Галактики, которая не занимает никакого особого положения в Метагалактике, а *происходит взаимное удаление всех галактик*. Это означает, что наблюдатель, находящийся в любой галактике, мог бы, подобно нам, обнаружить красное смещение, ему тоже казалось бы, что от него удаляются все галактики.

Таким образом, *Метагалактика нестационарна*.

Открытие расширения Метагалактики свидетельствует о том, что Метагалактика в прошлом была не такой, как сейчас, и станет иной в будущем, т. е. *Метагалактика эволюционирует*.

По красному смещению определены скорости удаления галактик. У многих галактик они очень велики, соизмеримы со скоростью света. Самыми большими скоростями, иногда превышающими 250 000 км/с, обладают некоторые квазары, считающиеся самыми удалёнными от нас объектами Метагалактики.

Закон, согласно которому красное смещение (а значит, и скорость удаления галактик!) возрастает пропорционально расстоянию от галактик (закон Хаббла), можно записать в виде

$$v = Hr, \quad (53)$$

где v — лучевая скорость галактики; r — расстояние до неё; H — **постоянная Хаббла** (Hubble), точнее, **параметр Хаббла**.

По современным оценкам, значение H заключено в пределах $60 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}) < H < 80 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Следовательно, наблюдаемый темп расширения Метагалактики таков, что галактики, разделённые расстоянием 1 Мпк ($3,08 \cdot 10^{19}$ км), удаляются друг от друга со скоростью от

60 до 80 км/с. Если скорость удаления галактики определена по формуле (44), то формула (53) даёт возможность вычислить расстояние до далёких галактик. Наиболее вероятное значение параметра Хаббла $H \approx 70$ км/(с · Мпк).

Пример 13. На каком расстоянии от нас находится галактика, имеющая скорость удаления $1,5 \cdot 10^4$ км/с?

Дано:

$$v = 1,5 \cdot 10^4 \text{ км/с}$$

$$H = 70 \text{ км/(с · Мпк)}$$

r — ?

Решение:

$$v = Hr; \quad r = \frac{v}{H};$$

$$r = \frac{1,5 \cdot 10^4 \text{ км/с}}{7 \cdot 10 \text{ км/(с · Мпк)}} \approx$$

$$\approx 0,2 \cdot 10^3 \text{ Мпк} = 200 \text{ Мпк}.$$

Ответ: $r \approx 200$ Мпк.

Закон Хаббла наиболее точно выполняется для далёких галактик (и их скоплений), разделённых расстояниями 100—300 Мпк. Отклонения от этого закона наблюдаются прежде всего для относительно близких к нам галактик, у которых, как и у наиболее близких к нам звёзд, весьма ощутимы индивидуальные движения внутри скоплений галактик. Кроме того, закон Хаббла нельзя считать точным для очень далёких внегалактических объектов, например квазаров, у которых $v > 100\,000$ км/с.

Итак, мы живём в расширяющейся Метагалактике (рис. 111). Это явление имеет свои особенности. Например, системы, подобные нашей Солнечной системе, кратным системам звёзд или даже отдельным галактикам, в распы-

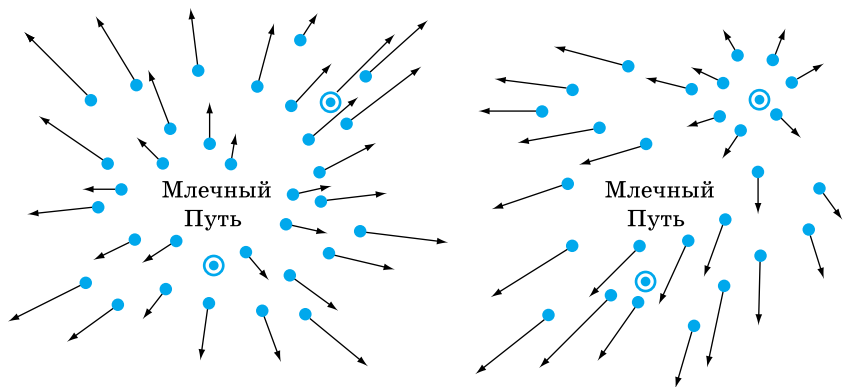


Рис. 111. «Разбегание» галактик

рении Метагалактики не участвуют (этому препятствуют силы тяготения, действующие между Солнцем и планетами, звёздами в кратных системах или между звёздами, входящими в состав галактик). Следовательно, *расширение Метагалактики проявляется только на уровне скоплений и сверхскоплений галактик*, т. е. систем, элементами которых являются галактики. Галактики в скоплениях иногда сравнивают с атомами нагреваемого вещества. При нагревании объём вещества увеличивается, возрастает расстояние между атомами, что, конечно, не отражается на размерах самих атомов.

О другой особенности расширения Метагалактики вы уже знаете. Она заключается в том, что *не существует центра, от которого разбегаются галактики*.



Альберт Эйнштейн
(1879—1955)

Расширение Метагалактики не только фиксируется наблюдениями (оптическими и радиоастрономическими). Оно было предсказано теорией. В России в 1922 г., за несколько лет до открытия Хаббла, *А. А. Фридман* (1888—1925), основываясь на общей теории относительности *А. Эйнштейна* (1879—1955), показал, что геометрические свойства Вселенной должны изменяться, т. е. расстояния между галактиками не могут оставаться постоянными. Открытие Хаббла, как вы знаете, свидетельствует о расширении Метагалактики.

Если допустить, что в прошлом расширение Метагалактики происходило такими же темпами, как и сейчас, то можно рассчитать, когда оно началось. Так как любые две галактики, отстоящие друг от друга на 1 Мпк, удаляются со скоростью 60—80 км/с, то $\frac{1}{H}$ — величина, обратная постоянной Хаббла, — даёт нам представление о промежутке времени от начала расширения Метагалактики. Этот промежуток времени (т. е. возраст нашей Вселенной), по новейшим данным, составляет не менее **13,7 млрд лет**.

Расширение Метагалактики — самое грандиозное из известных в настоящее время явлений природы. Пра-

вильное его истолкование имеет исключительно большое мировоззренческое значение. Не случайно при объяснении причины этого явления резко проявилось коренное различие философских взглядов учёных. Некоторые из них, отождествляя Метагалактику со всей Вселенной, пытаются доказать, что расширение Метагалактики подтверждает учение о сверхъестественном, божественном происхождении Вселенной. Однако во Вселенной известны естественные процессы, которые в прошлом могли вызвать наблюдаемое расширение. По всей вероятности, это *взрывы*. Их масштабы поражают нас уже при изучении отдельных видов галактик. Можно представить, что *расширение Метагалактики также началось с явления, напоминающего колоссальный взрыв (Большой взрыв) вещества, обладавшего огромной температурой и плотностью*.

3*. Гипотеза «горячей Вселенной». Расчёты, выполненные астрофизиками, свидетельствуют о том, что вскоре после начала расширения вещество Метагалактики имело очень высокую температуру и состояло из элементарных частиц (например, нуклонов) и их античастиц. По мере расширения изменялись не только температура и плотность вещества, но и состав входящих в него частиц, так как многие частицы и античастицы *аннигилировали*, порождая электромагнитные кванты излучения. Последних в современной нам Метагалактике оказалось неизмеримо больше, чем атомов, из которых состоят звёзды, планеты, диффузная материя. Согласно этой гипотезе, нередко именуемой теорией «горячей Вселенной», потребовалось всего лишь несколько минут, чтобы сверхплотное вещество превратилось в вещество с плотностью, близкой к плотности воды. Через несколько часов плотность стала сравнимой с плотностью нашего воздуха, а сейчас, по истечении миллиардов лет, оценка средней плотности вещества в Метагалактике приводит к значению порядка 10^{-28} кг/м³.

Выполненные расчёты основаны на законах физики (механики, термодинамики, ядерной физики). Знание этих законов и некоторые предположения о распределении вещества в пространстве позволяют получить представление о процессах, которые происходили во Вселенной миллиарды лет тому назад.

Существуют ли экспериментальные подтверждения гипотезы «горячей Вселенной»? Сейчас мы можем ответить на этот вопрос положительно, так как в 1965 г. было сделано открытие, которое считается подтверждением идеи о том, что в прошлом вещество Метагалактики было очень плотным и горячим. Оказалось, что космическое пространство заполнено электромагнитными волнами, являющимися посланцами той древней эпохи развития Метагалактики, когда ещё не было никаких звёзд, галактик, туманностей. Это электромагнитное излучение (его температура всего лишь 2,7 К) называется реликтовым. Реликтовое излучение пронизывает всё пространство, все галактики, оно участвует в расширении Метагалактики.

Реликтовое излучение впервые было случайно открыто американскими учёными, изучавшими радиопомехи на волне 7,3 см. Очень важно, что, хотя это открытие сделано случайно, существование реликтового излучения было предсказано теоретиками. Одним из первых предсказал это излучение *Дж. Гамов* (1904—1968), разрабатывая теорию происхождения химических элементов, возникших в первые минуты после Большого взрыва. Предсказание существования реликтового излучения и обнаружение его в космическом пространстве (*А. Пензиас* и *Р. Вильсон*, США) — ещё один убедительный пример познаваемости мира и его закономерностей.

Исследование Вселенной основывается на открытых в земных условиях законах физики. Эти законы позволили создать современные методы исследования Вселенной и объяснить подавляющее большинство известных в настоящее время космических явлений. В процессе познания Вселенной открываются новые явления и типы космических объектов. К началу XXI в. выяснилось, что во Вселенной существует по меньшей мере три вида материи: «обычная», состоящая из барионов, лептонов и фотонов, а также «тёмная материя» и «тёмная энергия» (квинтэссенция). Удивительным свойством квинтэссенции является её антигравитация, вызывающая *ускоренное расширение Вселенной*. Расчёты показали, что «обычная», наблюдаемая нами материя составляет не более нескольких процентов от всей массы нашей Вселенной;

на «тёмную материю», о существовании которой догадывались ещё в 30-х гг. прошлого века, приходится около 24 %, а на «тёмную энергию» — 74 %. Важно узнать природу невидимых «тёмной материи» и «тёмной энергии» (квинтэссенции), составляющих основную часть (!) массы нашей Вселенной.

4*. Космологические модели Вселенной. На стыке астрофизики, внегалактической астрономии, теоретической физики и новейших областей математики находится раздел астрономии, который называется космологией. Космология изучает не отдельные небесные тела и их системы, а строение Вселенной в целом и происходящие в ней процессы. С одним из таких процессов — расширением Метагалактики — мы уже познакомились и знаем, что, по существу, открытие этого явления было предсказано А. А. Фридманом. Он использовал упрощённую математическую модель Вселенной, которая называется однородной и изотропной. Современные представления о крупномасштабной структуре Вселенной не противоречат такой модели. Хотя на самом деле структура (и эволюция) Вселенной гораздо сложнее упрощённых математических схем и моделей.

Сейчас Метагалактика расширяется (причём *ускоренно!*). А что будет с ней в далёком будущем? Теория А. А. Фридмана допускает различные возможности в зависимости от *средней плотности* материи во Вселенной (рис. 112). Из этих возможностей наиболее вероятной представляется модель открытой (т. е. неограниченно расширяющейся) Вселенной.

Следует заметить, что даже в случае закрытого мира Вселенная тоже не имела бы никаких границ: она была бы конечной, но безграничной. Дело в том, что гигантские массы вещества искривляют пространство, оно перестаёт быть евклидовым, в нём лучи света не распространяются прямолинейно, а прямая линия уже не будет кратчайшим расстоянием между двумя точками. В евклидовом пространстве бесконечность и безграничность совпадают, например плоскость (двухмерное евклидово пространство) бесконечна и безгранична. Пример двухмерного неевклидова, искривлённого пространства — сфера. Сфера не имеет границ, она безгранична, но конечна, и её площадь мы

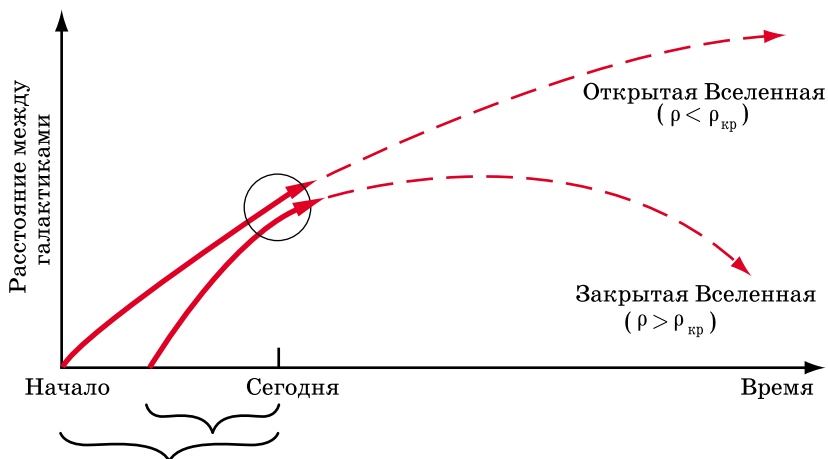


Рис. 112. Две основные космологические модели.

Учитывая, что уже открыто ускоренное расширение Вселенной, наиболее вероятно модель, согласно которой Вселенная будет неограниченно расширяться

умеем вычислять. Трудно наглядно представить себе искривлённое трёхмерное пространство, но и оно, подобно двумерному неевклидову пространству, может быть безграничным и конечным.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое Метагалактика?
2. С какими свойствами крупномасштабной структуры Вселенной вы познакомились?
3. В чём заключается закон Хаббла? Каков смысл входящей в него константы?
- 4*. Нанесите маркером несколько точек на поверхность воздушного шарика. Надувая шарик, проследите, как будут изменяться расстояния между точками. Выберите какую-нибудь одну точку («нашу Галактику»). Одинаково ли будут изменяться расстояния между ней и: а) соседними точками; б) далёкими точками?
5. Сколько лет свет идёт к нам от галактики, скорость удаления которой $6 \cdot 10^4$ км/с?
- 6*. Вычислите, какими примерно будут расстояние от Земли до Солнца, размеры Солнечной системы, расстояние до ближайшей звезды, размеры Галактики и расстояния до далёких квазаров, если представить себе Солнце в виде шарика диаметром 1 см.
7. Какие взрывные процессы во Вселенной вам известны?
- 8*. В чём сущность гипотезы «горячей Вселенной» и на каких данных наблюдений основана эта гипотеза?
9. Приведите примеры из астрономии, демонстрирующие возможность познаваемости мира и его закономерностей.

§ 31. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД И ГАЛАКТИК

1. Введение. Небесные тела находятся в непрерывном движении и изменении. Десятки тысяч лет назад небо Земли украшали фигуры других созвездий, миллиарды лет назад вообще ещё не было Земли, Луны, планет, Солнца, многих звёзд и галактик. Когда и как именно они произошли, наука стремится выяснить, изучая небесные тела и их системы. Раздел астрономии, занимающийся проблемами происхождения и эволюции небесных тел, называется космогонией.

Современные научные космогонические гипотезы — результат физического, математического и философского обобщения многочисленных наблюдений. В космогонических гипотезах, присущих данной эпохе, в значительной мере находит своё отражение общий уровень развития естествознания. Дальнейшее развитие науки, обязательно включающее астрономические наблюдения, подтверждает или опровергает эти гипотезы. *Подтверждаются те гипотезы, которые не только могут объяснить известные из наблюдений факты, но и предсказать новые открытия.*

2. Возраст галактик и звёзд. Возраст Метагалактики, как вы уже знаете, оценивается в 13,7 млрд лет, хотя он может быть и несколько больше. По некоторым новым данным, возраст нашей Галактики не 10 млрд лет, как ещё недавно считали, а около 13,5 млрд лет. Каждая звезда образовалась тоже в какой-то определённый момент времени, от которого и отсчитывается её *возраст*. Звёзды формировались неодновременно, а следовательно, должны встречаться и очень «старые», и очень «молодые» звёзды. Солнце можно считать звездой среднего возраста: оно образовалось около 5 млрд лет назад и, вероятно, столько же времени ещё будет существовать.

Возраст звёзд определяется различными методами. Естественно предположить, что звёзды, входящие в скопление, возникли одновременно и имеют одинаковый возраст. Поэтому один из методов определения возраста звёзд основан на определении возраста звёздных скоплений.

Самые «старые» звёзды должны входить в давно существующие скопления. Это шаровые скопления, возраст которых порядка 10^{10} лет. В шаровых скоплениях много крас-

ных и жёлтых звёзд. (Их возраст достигает нескольких миллиардов лет.) Рассеянные скопления «моложе». Возраст белых и голубых сверхгигантов, которые есть в этих скоплениях, порядка нескольких миллионов лет. Эти самые общие соображения подтверждаются данными спектральных наблюдений. В частности, в составе звёзд, входящих в шаровые скопления, во много раз меньше элементов тяжелее гелия, чем, например, у Солнца. Теория эволюции звёзд объясняет указанное явление тем, что «старые» звёзды образовались из вещества, не содержащего тяжёлых элементов (такие элементы просто ещё не существовали, когда формировались самые «старые» звёзды!).

3. Происхождение и эволюция звёзд. Звёзды возникали в ходе эволюции галактик. Большинство астрономов считают, что *это происходило в результате сгущения (конденсации) облаков диффузной материи*, которые постепенно формировались внутри галактик. Одна из исходных предпосылок такой гипотезы состоит в том, что, как показывают наблюдения, «молодые» звёзды всегда тесно связаны с газом и пылью. Эти звёзды и диффузная материя концентрируются в спиральных ветвях галактик. Местами наиболее интенсивного звездообразования считаются массы холодного межзвёздного вещества, которые называются *газово-пылевыми* комплексами. Наиболее изученный газово-пылевой комплекс нашей Галактики находится в созвездии Ориона, он включает в себя туманность в Орионе, более плотные газово-пылевые облака и другие объекты.

Представим себе холодное газово-пылевое облако. Силы тяготения сжимают его, оно принимает шарообразную форму. При сжатии возрастают плотность и температура облака. Возникает будущая, рождающаяся звезда (протозвезда). Температура её поверхности пока ещё мала, но протозвезда уже излучает в инфракрасном диапазоне, а поэтому рождающиеся звёзды можно попытаться обнаружить среди довольно многочисленных источников инфракрасного излучения. Поиски протозвёзд (и протогалактик!) сейчас успешно ведутся на многих обсерваториях.

Одно из основных отличий протозвезды от звезды заключается в том, что в протозвезде ещё не происходят термоядерные реакции, т. е. в ней нет ещё основного источника энергии обычных звёзд. Термоядерные реакции

начинаются, когда в процессе сжатия протозвезды температура в её недрах становится порядка 10^7 К. С этого времени стадия сжатия звезды прекращается: сила внутреннего давления газа теперь уже может уравновесить силу тяготения внешних частей звезд.

Стадия сжатия звёзд, массы которых значительно больше массы Солнца, продолжается всего лишь сотни тысяч лет, а звёзды, массы которых меньше солнечной, сжимаются сотни миллионов лет. Чем больше масса звезды, тем при большей температуре достигается равновесие. Поэтому, как вы знаете, у массивных звёзд самые большие светимости.

Стадию сжатия сменяет *стационарная стадия*, сопровождающаяся постепенным «выгоранием» водорода. В стационарной стадии звезда проводит большую часть своей жизни. Именно в этой стадии эволюции находятся звёзды, которые располагаются на главной последовательности диаграммы «спектр — светимость». Таких звёзд, как мы знаем, больше всего. Время пребывания звезды на главной последовательности пропорционально массе звезды, так как от этого зависит запас ядерного горючего, и обратно пропорционально светимости, которая определяет темп расхода ядерного горючего. А поскольку светимость звезды пропорциональна примерно четвёртой степени её массы (см. § 25), то массивные звёзды, массы которых в несколько раз больше массы Солнца, эволюционируют быстрее. Они находятся в стационарной стадии только несколько миллионов лет, а звёзды, подобные Солнцу, — миллиарды лет.

Когда весь водород в центральной области звезды превратится в гелий, внутри звезды образуется *гелиевое ядро*. Теперь уже водород будет превращаться в гелий не в центре звезды, а в слое, прилегающем к очень горячему гелиевому ядру. Пока внутри гелиевого ядра нет источников энергии, оно будет постепенно сжиматься и при этом ещё больше разогреваться. Когда температура внутри звезды превысит $1,5 \cdot 10^7$ К, гелий начнёт превращаться в углерод (с последующим образованием всё более тяжёлых химических элементов). Как показывают расчёты, светимость и размеры звезды будут возрастать. В результате обычная звезда постепенно превратится в красного гиганта или сверхгиганта. Такие звёзды, как вы знаете, занимают осо-

бое положение на диаграмме «спектр — светимость» (см. с. 148). Многие звёзды, по-видимому, не сразу становятся стационарными гигантами, а некоторое время пульсируют, как бы проходя в своём развитии стадию цефеид (см. § 27).

Заключительный этап жизни звезды, как и вся её эволюция, решающим образом зависит от *массы* звезды. Внешние слои звезды, подобной нашему Солнцу (но с массой не больше 1,2 массы Солнца), постепенно расширяются и в конце концов совсем покидают ядро звезды. На месте гиганта остаётся маленький и горячий белый карлик. Белых карликов в мире звёзд много. Это значит, что, по-видимому, многие звёзды превращаются в белых карликов, которые затем постепенно остывают, становясь «потухшими звёздами».

Иная судьба у более массивных звёзд. Если масса звезды примерно вдвое превышает массу Солнца, то такая звезда на последних этапах своей эволюции теряет устойчивость. В частности, она может взорваться как сверхновая, *обогащая межзвёздную среду тяжёлыми химическими элементами* (которые образовались внутри звезды и во время её взрыва), а затем катастрофически сжаться до размеров шара радиусом в несколько километров, т. е. превратиться в нейтронную звезду (см. § 27).

Внутри звёзд в ходе термоядерных реакций может образовываться до 30 химических элементов, а во время взрыва сверхновых — остальные элементы периодической системы. Из обогащённой тяжёлыми элементами межзвёздной среды образуются звёзды *следующих поколений*. Вот почему о возрасте звёзд можно судить по их химическому составу, определяемому методом спектрального анализа.

А какова судьба звезды, масса которой более чем вдвое превышает массу Солнца? Такая звезда, потеряв равновесие и начав сжиматься, либо превратится в нейтронную звезду, либо вообще не сможет достигнуть устойчивого состояния. В процессе неограниченного сжатия (к о л л а п с а) она, вероятно, может превратиться в удивительный объект — *чёрную дыру*. Такое странное название связано с тем, что могучее поле тяготения сжавшейся звезды не выпускает за её пределы никакое излучение (свет, рентгеновские лучи и т. д.). Поэтому чёрную дыру нельзя увидеть ни в каком диапазоне электромагнитных волн. Но, как показали

наши учёные, есть возможность обнаружить чёрные дыры. Дело в том, что чёрные дыры должны оказывать гравитационное воздействие на окружающие их тела. Не исключено, например, что чёрная дыра может быть в составе двойной звезды. Газ с поверхности обычной звезды будет непрерывно падать на чёрную дыру, образуя вокруг неё диск (рис. 113). Температура газа в этом вращающемся диске может достичь 10^7 К. При температуре в миллионы кельвинов газ будет излучать в рентгеновском диапазоне (см. формулу (29)). Поэтому с точки зрения поиска чёрных дыр интересны компактные источники рентгеновского излучения. Если такой источник обнаружен (с помощью рентгеновских телескопов на ИСЗ) и если он имеет достаточно большую массу (для выяснения этого в конечном счёте используются формулы (48) и (50)), то этот источник может оказаться нейтронной звездой или даже чёрной дырой. К 2018 г. в тесных двойных системах уже было обнаружено не менее 20 «кандидатов» в чёрные дыры. Так как массы этих чёрных дыр сравнимы с массами звёзд, то такие чёрные дыры называют *звёздными чёрными дырами*.

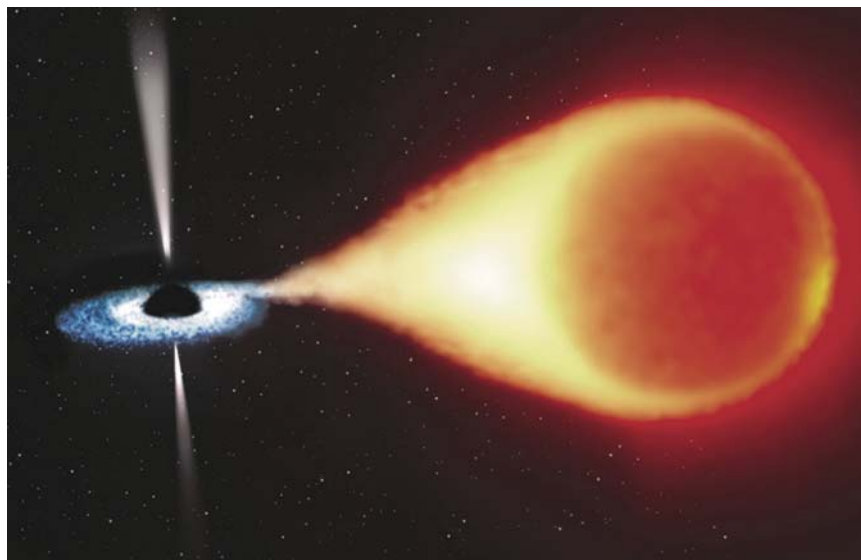


Рис. 113. Тесная двойная система, один из компонентов которой — звёздная чёрная дыра. (Чёрная дыра может наблюдаться лишь тогда, когда она «разрывает на части» звезду-спутник)

Кроме звёздных чёрных дыр, найдено более 300 *сверхмассивных чёрных дыр* в ядрах галактик, *включая нашу Галактику (!)*. Масса сверхмассивной чёрной дыры в миллиарды раз превосходит массу Солнца.

Дальнейшее развитие науки покажет, какие из сегодняшних представлений о происхождении галактик и звёзд окажутся правильными. Но уже теперь нет сомнения в том, что жизнь звёзд подчиняется определённым законам природы. Во-первых, они рождаются, живут и умирают, а не есть однажды созданные и вечно неизменные объекты Вселенной. Во-вторых, звёзды рождаются группами, причём процесс звездообразования продолжается и в настоящее время. В-третьих, в галактиках, включая нашу, может находиться много звёздных чёрных дыр, а в ядрах галактик — сверхмассивные чёрные дыры.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Сравните круг вопросов, рассматриваемых космогонией, с тем, что составляет предмет космологии. 2*. Некоторым людям кажется, что очень просто придумать свою космогоническую гипотезу. Можете ли вы опровергнуть такое представление? 3. Всегда ли окружающий нас мегамир был таким, как сейчас? 4. Каков возраст галактик и звёзд? 5. Из какого вещества образовались звёзды и галактики? 6. Каковы основные этапы эволюции звезды? 7. Как влияет масса звезды на заключительные этапы её эволюции? 8*. Проследите по диаграмме «спектр — светимость» основные этапы эволюции звезды, подобной нашему Солнцу. 9*. Чему равна плотность белого карлика, масса которого равна массе Солнца, а диаметр порядка диаметра Земли? Во сколько раз она меньше плотности нейтронной звезды, масса которой $2M_{\odot}$, а радиус 10 км?

§ 32. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

1. Возраст Земли и других тел Солнечной системы. Определение возраста земной коры основано на исследовании содержания в ней радиоактивных элементов (урана, тория и др.), а также радиоактивных изотопов таких элементов, как калий, аргон и др. Как известно из физики, радиоактивные элементы непрерывно распадаются, причём процесс распада совершенно не зависит от внешних воздействий. При радиоактивном распаде образуются изотопы соседних элементов периодической системы Менделеева.

ева. Эти изотопы сами нередко оказываются радиоактивными, а значит, и они распадаются. Распад заканчивается, когда атомы радиоактивных элементов превращаются в нерадиоактивные атомы химических элементов и их изотопы. Например, распад урана (^{238}U) завершается образованием нерадиоактивного изотопа свинца (^{206}Pb).

Промежуток времени (T), по истечении которого остаётся половина начального количества радиоактивных атомов, характеризует скорость распада и называется периодом полураспада. Для определения возраста земной коры используются медленно распадающиеся изотопы, например ^{238}U ($T \approx 4,5 \cdot 10^9$ лет), радиоактивный изотоп калия ^{40}K ($T \approx 1,3 \cdot 10^9$ лет) и др. Чтобы определить возраст земной коры, сравнивают содержание радиоактивных элементов и продуктов их распада в многочисленных пробах, взятых для анализа. Такое сравнение показывает, что возраст земной коры около 4,5 млрд лет. Примерно таков же возраст Земли как оформившейся планеты. К 3,5—4,5 млрд лет близок также возраст лунных пород и метеоритов. Солнце, конечно, не может быть моложе Земли и Луны. Напомним, что возраст Солнца (жёлтой звезды, находящейся в средней части главной последовательности диаграммы «спектр — светимость») около 5 млрд лет. Сопоставление возраста Солнечной системы с возрастом Метагалактики (будем считать его равным 14 млрд лет) показывает, что Солнце нельзя отнести к звёздам первого поколения. Вероятно, в состав Солнца и планет вошёл газ, дважды побывавший в недрах более старых звёзд. На ранних стадиях расширения Метагалактики, как вы уже знаете, вообще не было тяжёлых химических элементов, которые впоследствии стали центрами конденсации твёрдых частиц, необходимых для формирования планет.

2. Основные закономерности в Солнечной системе. Космогоническая гипотеза о происхождении планет должна объяснить следующие *основные закономерности*, наблюдаемые в Солнечной системе:

- углы наклона плоскостей орбит планет к плоскости эклиптики не превышают нескольких градусов, причём плоскость эклиптики почти совпадает с плоскостью экватора Солнца;
- эксцентриситеты орбит планет очень малы;

- средние расстояния планет от Солнца подчиняются определённому закону (см. формулу (25));

- планеты движутся вокруг Солнца в том же направлении, в каком Солнце вращается вокруг своей оси (в том же направлении вокруг планет обращается большинство спутников);

- у большинства планет (за исключением Венеры и Урана) направление вращения вокруг оси совпадает с направлением обращения вокруг Солнца;

- на долю планет приходится 98 % момента количества движения всей Солнечной системы; Солнце обладает 2 % момента количества движения;

- почти 99,9 % массы вещества Солнечной системы приходится на долю Солнца;

- по своим физическим характеристикам планеты резко делятся на две группы: планеты-гиганты и планеты земной группы.

3*. Первые космогонические гипотезы. Эти гипотезы появились значительно раньше, чем стали известны многие важные закономерности Солнечной системы. Значение первых космогонических гипотез состояло прежде всего в том, что они пытались объяснить происхождение небесных тел как результат *естественного* процесса, а не одновременно акта божественного творения. Кроме этого, некоторые ранние гипотезы содержали правильные идеи о происхождении небесных тел. Такой, например, оказалась гипотеза, предложенная немецким философом *И. Кантом* (1724—1804) в середине XVIII в. Кант высказал догадку о том, что Солнечная система образовалась из облака пыли.

Подробнее картина образования Солнечной системы вырисовывалась в гипотезе, предложенной в конце XVIII в. французским учёным *П. Лапласом* (1749—1827). Он рассматривал большую, медленно вращающуюся туманность, состоящую из разреженного горячего газа. При сжатии туманности скорость её вращения возрастала, туманность сплющивалась. Из её центральной части образовалось Солнце. По мере сжатия первичного Солнца угловая скорость его вращения вокруг оси увеличивалась (в силу закона сохранения момента количества движения) и в плоскости экватора Солнца стали отделяться газовые кольца. Из концентрической системы этих колец возникли планеты.

Картина получалась настолько наглядной, что очень долгое время гипотеза Лапласа была самой популярной. Однако в XX в. от гипотезы Лапласа пришлось отказаться, так как выяснилось, что она не может объяснить, например, распределение момента количества движения в Солнечной системе.

4. Современные представления о происхождении планет. На первый взгляд может показаться, что по сравнению с грандиозными проблемами космологии и звёздной космогонии проблема происхождения Солнечной системы, которой занимается *планетная космогония*, довольно проста. На самом деле это не так. Проблема происхождения планет очень сложна, и решение её во многом зависит от развития не только астрономии, но и многих других наук (прежде всего наук о Земле). Ведь пока можно исследовать только *единственную планетную систему*, окружающую наше Солнце. Мы ещё мало знаем о более молодых и более старых планетных системах, недавно открытых у других звёзд. Чтобы правильно объяснить происхождение планет, необходимо также знать, как образовались Солнце и другие звёзды, потому что планетные системы возникают вокруг звёзд в результате закономерных процессов развития материи. И всё-таки, несмотря на трудности, учёные убеждены в том, что правильное объяснение будет найдено. Знать, как произошла наша планета, очень важно для дальнейшего развития геофизики, геохимии, геологии и других наук о Земле.

Проблемами планетной космогонии в настоящее время занимаются учёные разных стран мира. В формирование современной планетной космогонии значительный вклад внесли отечественные учёные. Так, например, на протяжении полувека проблемами планетной космогонии занимался академик *В. Г. Фесенков* (1889—1972), всегда подчёркивавший, что должна существовать тесная связь между процессом формирования Солнца и процессом формирования планет. В начале 40-х гг. XX в. с космогонической гипотезой выступил академик *О. Ю. Шмидт* (1891—1956).

Наиболее важные идеи планетной космогонии сводятся к следующему:

- Планеты сформировались в результате объединения твёрдых (холодных) тел и частиц, входивших в состав ту-

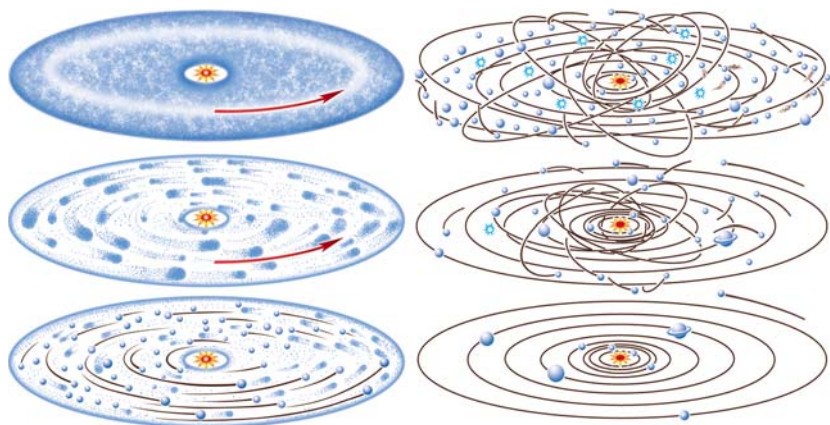


Рис. 114. Важнейшие этапы формирования планет

манности, которая когда-то окружала Солнце (рис. 114). Эту туманность часто называют *допланетным*, или *протопланетным*, облаком. Считается, что Солнце и протопланетное облако сформировались *одновременно* в едином процессе, хотя пока не ясно, как произошло отделение части туманности, из которой возникли планеты, от «протосолнца».

- Формирование планет происходило под воздействием различных физических процессов. Следствием *механических* процессов стало сжатие (уплощение) вращающейся туманности, её удаление от «протосолнца», столкновение частиц, их укрупнение и т. д. Изменялись температура вещества туманности и состояние, в котором находилось вещество. Замедление вращения будущего Солнца могло быть обусловлено *магнитным полем*, связывающим туманность с «протосолнцем». Взаимодействие солнечного излучения с веществом протопланетного облака привело к тому, что наиболее *лёгкие* и *многочисленные частицы* оказались вдали от Солнца (там, где сейчас планеты-гиганты). Теория, учитывающая все эти процессы, позволяет объяснить многие закономерности в Солнечной системе.

- Спутники планет (а значит, и наша Луна) возникли, по-видимому, из роя частиц, окружающих планеты, т. е. тоже из вещества протопланетной туманности.

- Главный пояс астероидов возник там, где притяжение Юпитера препятствовало формированию крупной планеты.

Таким образом, *основная идея современной планетной космогонии сводится к тому, что планеты и их спутники образовались из холодных твёрдых тел и частиц.*

Земля как планета в основном сформировалась за время порядка 100 млн лет и вначале тоже была холодной. Последующий разогрев Земли происходил в результате ударов крупных тел (размером с астероиды), гравитационного сжатия, распада радиоактивных элементов и некоторых других физических процессов. Постепенно в процессе *гравитационной дифференциации вещества* (т. е. в процессе разделения вещества, состоящего из тяжёлых и лёгких химических элементов) в центре Земли сосредоточивались тяжёлые химические элементы (железо, никель и др.), из которых сформировалось ядро нашей планеты. Из более лёгких химических элементов и их соединений образовалась мантия Земли.

Кремний и другие химические элементы стали основой формирования континентов, а самые лёгкие химические соединения образовали океаны и атмосферу Земли. В земной атмосфере первоначально было много водорода, гелия и таких водородсодержащих соединений, как метан, аммиак, водяной пар. Со временем водород и гелий улетучились, а с появлением растений, способных «выдыхать» кислород, земная атмосфера начала обогащаться кислородом, наличие которого представляет одно из необходимых условий существования животного мира.

Уже открыты газопылевые диски и даже планеты (*экзопланеты*) у нескольких сотен звёзд. Большинство экзопланет похожи не на планеты земной группы, а на планеты-гиганты (например, на Юпитер). Исследование экзопланет других систем поможет развитию планетной космогонии.

? Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как определяют возраст земной коры, лунных пород, метеоритов?
2. Какие закономерности в Солнечной системе должна объяснить космогоническая гипотеза?
3. Существует ли связь между проблемами звёздной и планетной космогонии?
- 4*. В чём суть гипотез И. Канта и П. Лапласа?
5. В чём сложность проблем планетной космогонии?
6. Как, согласно современным представлениям, образовались Земля и другие планеты?
7. Прекратилась ли эволюция Земли и планет после завершения формирования этих небесных тел как планет Солнечной системы?

§ 33. ЖИЗНЬ И РАЗУМ ВО ВСЕЛЕННОЙ (заключительный обзор)

1*. Эволюция Вселенной и жизнь. В курсе физики вы познакомились с *физической картиной мира*. Заканчивая изучение курса астрономии, вы должны иметь представление об *астрономической картине мира*, в основе которой лежат не только данные астрономических наблюдений, теории и гипотезы, но и важнейшие понятия и законы современной физики.

Революционными вехами на пути развития астрономии были: обоснование идеи о шарообразности Земли, создание Коперником гелиоцентрической системы мира, изобретение телескопа, открытие основных законов небесной механики, применение в астрономии спектрального анализа и фотографии, изучение структуры нашей Галактики, открытие Метагалактики и её расширения, начало радиоастрономических исследований и, наконец, начало космической эры и эпохи непосредственных астрономических экспериментов в космическом пространстве. Благодаря этим открытиям постепенно вырисовывалась величественная картина мироздания, по сравнению с которой наивными сказками кажутся теперь старинные легенды о плоской Земле, неподвижно покоящейся в центре мира, и о небесной тверди с воткнутыми в неё серебряными звёздами-булавками. В наши дни астрономия находится на переднем крае современного естествознания и развивается необычайно быстрыми темпами.

Астрономическая картина мира — это картина эволюционирующей Вселенной. Современная астрономия не только открыла грандиозный мир галактик, но и обнаружила явления (расширение Метагалактики, распространённость химических элементов в космосе, реликтовое излучение), свидетельствующие о том, что Вселенная непрерывно эволюционирует. Эволюция Вселенной включает *эволюцию вещества и эволюцию структуры*. Эволюция вещества сопровождалась понижением его температуры, плотности, образованием различных химических элементов. С эволюцией структуры связано возникновение сверхскоплений галактик, обособление и формирование звёзд и галактик, образование планет и их спутников.

С течением времени менялась и роль физических взаимодействий в процессе эволюции Вселенной. В мире планет, звёзд и галактик основную роль играет *гравитационное взаимодействие*: им обусловлено движение и в значительной степени эволюция небесных тел и их систем. Но, кроме гравитационного, существуют ещё три других вида взаимодействий: *слабое*, с которым связан, например, радиоактивный распад, *сильное*, с которым связан, например, синтез ядер атомов, и *электромагнитное*, с которым связано, например, взаимодействие квантов электромагнитного излучения с электронами и другими заряженными частицами. В «горячей Вселенной», представлявшей собой своеобразную «лабораторию высоких энергий», при фантастических температурах (10^{28} — 10^{32} К!) различные виды физических взаимодействий ныне могут быть представлены единым взаимодействием. Исследование такой возможности представляет огромный интерес для физики и космологии, потому что *свойства Вселенной неразрывно связаны со свойствами микромира*. При температуре 10^{13} К и плотности 10^{20} кг/м³ (такими параметрами характеризовалась плазма через 10^{-6} с после «начала» расширения Метагалактики) вещество обладало свойствами, которые пока мало изучены. Ещё менее понятны пока процессы, происходившие ещё раньше (при $t = 10^{-35}$ с температура была $T \approx 10^{28}$ К). Учёные предполагают, что следствием именно этих процессов стали такие фундаментальные свойства Метагалактики, как, например, её расширение, или тот факт, что в Метагалактике небесные тела состоят из вещества, а не из антивещества.

Таким образом, *Вселенная предстаёт перед нами как бесконечно разворачивающийся во времени и пространстве процесс эволюции материи*. В этом процессе взаимосвязанными оказываются самые разнообразные объекты и явления микромира и мегамира.

На определённом этапе эволюции материи при появлении подходящих условий *возникает жизнь*. Её зарождение, существование и развитие также обусловлены рядом фундаментальных свойств Вселенной, выражающихся, например, в константах, характеризующих гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. Учё-

ные считают, что при значениях этих констант (например, гравитационной постоянной), отличающихся от наблюдаемых, жизнь во Вселенной существовать просто бы не могла. Ясно, что жизнь не могла возникнуть и на ранних стадиях расширения Метагалактики. Но именно в первые минуты расширения при температурах более 10^9 К вещество уже имело «стандартный химический состав» (около 75 % ядер атомов водорода и 25 % ядер гелия). Если бы состав вещества был иным, то трудно сказать, какой стала бы дальнейшая химическая эволюция вещества Метагалактики. Вы знаете, что образовавшиеся на поздних стадиях расширения Метагалактики звёзды оказались не только источниками энергии, но и теми объектами Вселенной, в недрах которых синтезировались необходимые для возникновения жизни химические элементы. Для существования жизни небезразлично и то, что Метагалактика расширяется. Если бы по каким-либо причинам несколько миллиардов лет назад началось сжатие Метагалактики, то постепенное повышение температуры привело бы к превышению значений, при которых возможно существование жизни. Уже из приведённых примеров следует, что человек может величать себя не только сыном Солнца (по образному выражению К. А. Тимирязева), но и сыном Вселенной.

2. Проблема внеземных цивилизаций. Мы живём на небольшой планете, движущейся вокруг одной из бесчисленного множества звёзд Вселенной. И поэтому трудно примириться с мыслью о том, что мы одиноки в беспредельной Вселенной. Большинство современных астрономов и философов считают, что жизнь — распространённое явление во Вселенной и существует множество миров, в которых обитают цивилизации. Уровень развития некоторых внеземных цивилизаций может быть неизмеримо выше уровня развития земной цивилизации. Именно с такими цивилизациями землянам особенно интересно установить контакт.

Подобная точка зрения основывается на следующих фактах и предположениях:

- В Метагалактике есть огромное число звёзд, похожих на наше Солнце (хотя «двойников» Солнца отыскать трудно). Возможно, что и метагалактик множество.

- Планеты, согласно современным представлениям, существуют не только у нашего Солнца, но и у других звёзд (возможно, что таких звёзд много).

- Планетные системы есть даже у некоторых из ближайших к Солнцу звёзд.

- Жизнь на Земле появилась в результате сложной и длительной эволюции неживой материи. При соответствующих условиях жизнь могла возникнуть и на планетах других звёзд. Молекулярные соединения, необходимые для начальной стадии эволюции неживой материи, достаточно распространены во Вселенной и открыты даже в межзвёздной среде.

- Не исключается возможность существования небелковых форм жизни, принципиально отличных от тех, которые распространены на Земле.

Не все учёные столь оптимистично относятся к проблеме внеземных цивилизаций. Сторонники противоположной точки зрения считают, что жизнь, и особенно разумная жизнь, — исключительно редкое, а может быть, и уникальное явление во Вселенной. При этом обращается внимание на следующее:

- Вероятность того, что в процессе эволюции неживой материи возникает жизнь (а тем более разумная жизнь!), очень мала, так как в ходе такой эволюции появляется множество препятствий на пути образования и последующего усложнения живых клеток.

- Ничего конкретного о небелковых формах жизни науке неизвестно.

- В Солнечной системе высокоорганизованные формы жизни есть только на Земле. На Луне и на Марсе, вопреки ожиданиям, не оказалось даже микроорганизмов, обладающих хорошей приспособляемостью к условиям обитания. Ушли в прошлое представления о каких-либо высших формах жизни на Венере и Марсе.

- Нет ни одного неопровержимого доказательства, что Землю когда-либо посещали посланцы других миров.

- Радиопоиски сигналов внеземных цивилизаций пока не увенчались успехом.

- До сих пор не обнаружено никаких признаков инженерной (или какой-либо другой) деятельности внеземных цивилизаций, а это очень странно, если полагать, что вне-

земных цивилизаций много и некоторые из них вполне могли достигнуть высокого уровня развития.

Нередко с деятельностью внеземных цивилизаций пытаются связать неопознанные летающие объекты (НЛО). Появление каких-то странных объектов на небе люди замечали ещё во времена египетских фараонов, но первые официальные наблюдения обычно связывают с сообщениями о появлении НЛО в конце 50-х гг. XX в. В США и в ряде других стран, включая нашу, начали активно работать различные группы и комиссии, которые занимались сбором информации и исследованием феномена, иногда именуемого АЯ (аномальные явления).

Большинство аномальных явлений в действительности оказались связаны с запусками ИСЗ, различными техническими экспериментами в атмосфере, астрономическими явлениями, естественными атмосферными эффектами и т. п.

Внеземные цивилизации до сих пор относятся к числу *гипотетических объектов*, поиск которых представляет большой интерес. Причём учёные не только ищут внеземные цивилизации, но и в теоретическом плане исследуют их возможные модели. Несомненно, что внеземные цивилизации и НЛО — это не одно и то же. Более того, НЛО вообще не имеют никакого отношения к внеземным цивилизациям, а настоящие внеземные цивилизации (если они существуют!) могут проявлять себя и не в виде НЛО.

Таким образом, проблема внеземных цивилизаций на самом деле сложнее, чем может показаться с первого взгляда. Можно спорить и приводить новые доводы в пользу или против реальности внеземных цивилизаций, но лишь дальнейшие наблюдения и эксперименты позволят выяснить, существуют ли где-нибудь обитаемые миры или мы одиноки, по крайней мере, в пределах нашей Галактики. Поэтому учёные с интересом ожидают результатов новых экспериментов по «прослушиванию» Вселенной с помощью нескольких радиотелескопов, принимающих сигналы в большом диапазоне частот. Кроме того, в надежде на встречу с разумными существами на нескольких АМС («Пионер», «Вояджер»), которым предстояло улететь за пределы Солнечной системы, отправлены послания в виде пластинок, содержащих разнообразную информацию о нашей планете и её обитателях...



Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие системы небесных тел вы теперь знаете? 2. В каких формах материя встречается во Вселенной? 3. Каково наиболее распространённое состояние вещества во Вселенной? 4. Какие химические элементы наиболее распространены во Вселенной? 5. В веществе начавшейся расширяться Метагалактики не было химических элементов тяжелее гелия. В результате каких процессов возникали тяжёлые элементы, из которых состоит наша планета и мы сами? 6. Основываясь на данных астрономии, приведите подтверждение того, что материя находится в непрерывном движении и изменении. 7. Докажите, что Земля и Луна продолжают эволюционировать и в настоящее время. 8. Опираясь на знания по астрономии и биологии, сформулируйте доводы в пользу (и против!) существования жизни и разума во Вселенной. 9*. В 1974 г. было отправлено в сторону шарового скопления в созвездии Геркулеса (расстояние 7000 пк) радиопослание нашим братьям по разуму. Когда земляне в лучшем случае получат ответ? 10*. Сколько времени будут лететь до ближайших звёзд АМС, которые в конце XX в. уже находились далеко за пределами орбиты Нептуна, имея скорость около 20 км/с. 11. Сравните прошлые представления о строении Вселенной (геоцентрическая система мира, гелиоцентрическая система мира) с современными.



Что полезно знать, изучив тему «Строение и эволюция Вселенной»

1. В состав Галактики входят звёзды, звёздные скопления, туманности. В пространстве между звёздами есть очень разреженная диффузная материя (преимущественно водород), магнитные и гравитационные поля. Межзвёздное пространство пронизывают потоки космических лучей и электромагнитное излучение.
2. Солнце расположено вблизи галактической плоскости на расстоянии 10 кпк от центра Галактики, оборот вокруг которого оно совершает примерно за $2 \cdot 10^8$ лет (при скорости 250 км/с).
3. Галактика с её спутниками, галактика в Андромеде и ещё несколько ближайших к нам галактик входят в Местную группу (систему) галактик.
4. В охваченной астрономическими наблюдениями части Вселенной (Метагалактике) существуют миллиарды галактик.

5. Мир галактик чрезвычайно разнообразен: он далеко не исчерпывается спиральными, эллиптическими и неправильными галактиками.
6. Многим галактикам, например радиогалактикам, свойственны различные проявления активности (включая взрывные процессы в ядрах галактик).
7. Самые далёкие объекты Вселенной — квазары, которые, вероятно, представляют собой активные ядра галактик, находящихся от нас на расстоянии в несколько миллиардов световых лет.
8. Метагалактика непрерывно расширяется. Чем дальше от нас внегалактические объекты (галактики, квазары), тем с большей скоростью они удаляются (закон Хаббла).
9. Величина, обратная постоянной Хаббла, позволяет оценить промежуток времени от начала расширения Метагалактики (≈ 14 млрд лет).
- 10*. Согласно гипотезе «горячей Вселенной» расширение Метагалактики началось от состояния материи, характеризующегося чрезвычайно высокой плотностью и температурой. В пользу этой гипотезы свидетельствуют открытие реликтового излучения и данные исследования распространённости химических элементов во Вселенной.
- 11*. На ранних стадиях расширения Метагалактики в ходе реакций, происходивших между элементарными частицами, образовались ядра атомов водорода и гелия. Более тяжёлые химические элементы появлялись как продукты термоядерных реакций, происходивших в недрах звёзд. Эти элементы рассеивались в пространстве (например, в результате взрывов сверхновых), и из них постепенно возникали новые небесные тела (звёзды, планеты).
12. Строение и эволюцию Вселенной изучает космология.
13. Используемая в космологии модель однородной и изотропной Вселенной в известной мере подтверждается наблюдениями, из которых следует, что в больших масштабах, например превышающих размеры скопления галактик, Метагалактику можно считать однородной.

14. Согласно современным представлениям звёзды образуются путём сгущения и последующей эволюции облаков газа.

15. В зависимости от массы, которой звезда обладает на конечной стадии своей эволюции, могут образовываться белые карлики, нейтронные звёзды или, возможно, чёрные дыры.

16. Земля, Луна, а также планеты с их спутниками образовались из холодных тел и частиц, входивших в состав протопланетного облака.

17. Во Вселенной существуют и эволюционируют системы различной сложности, самые крупные из них — сверхскопления галактик.

18. Эволюционирует и Метагалактика, которая не просто расширяется, а расширяется с ускорением под действием всемирной антигравитации. Такое расширение может продолжаться бесконечно.

19. В XX в. впервые в истории человеческой цивилизации был достигнут такой уровень развития науки и техники, который дал возможность с научной точки зрения подойти к исследованию проблемы существования жизни и разума во Вселенной. Но пока никаких признаков внеземной жизни не обнаружено.

20. Внегалактическая астрономия и космология убедительно свидетельствуют о всеобщей связи явлений и процессов в природе, о познаваемости мира и его закономерностей, о мощи разума, способного проникнуть в извечные тайны мироздания.



Что желательно уметь, изучив тему «Строение и эволюция Вселенной»

1. Вычислять по формуле (53) расстояние до галактики, скорость удаления которой известна.

2. Оценивать возраст Метагалактики по значению постоянной Хаббла.

3. Обосновывать свою точку зрения о возможности существования внеземных цивилизаций.

4. Находить на небе звёзды α Волопаса, α Девы, α Льва.



I. Некоторые важнейшие события в истории астрономии (за последние 6 тыс. лет)

Зарождение астрономии: наблюдения звёздного неба, повторяющихся и необычных явлений на нём (шумеры, египтяне, майя)

4-е тыс. до н. э.

Выделение разными народами некоторых созвездий (в том числе, вероятно, зодиакальных), древнейшие наблюдения солнечных затмений и комет (Китай), изобретение гномона и первых угломерных инструментов (Вавилон, Древний Египет), появление календаря (365 дней, Древний Египет)

3-е тыс. до н. э.

Создание первых звёздных карт, строительство Стоунхенджа (Южная Англия), зарождение астрологии (Китай, Древний Египет), измерение угла наклона эклиптики к небесному экватору (Китай)

2-е тыс. до н. э.

Начало летосчисления по олимпиадам (Древняя Греция)

776 г. до н. э.

Начало римского летосчисления «от основания Рима»

753 г. до н. э.

Систематическая регистрация солнечных затмений в Китае

720 г. до н. э.

Выделение на небе Млечного Пути (Китай); появление семидневной недели с планетными названиями дней (в Индии намного раньше, чем в Древней Греции); выделение на небе созвездия Малой Медведицы с Полярной звездой (Фалес, Древняя Греция); наблюдения движения пяти

VI в. до н. э.

планет на фоне звёздного неба (пифагорейцы); идеи о шарообразности Земли (Фалес, Пифагор), её вращении вокруг оси (предположительно пифагорейцы Экфант и Хикетас, значительно позднее — Гераклит Понтийский), а также о том, что Луна светит, потому что её освещает Солнце (Фалес)	
Одна из первых догадок о том, что Млечный Путь — это множество звёзд (Демокрит, Древняя Греция)	Конец V — начало IV в. до н. э.
Первая математическая геоцентрическая модель мира — один из первых звёздных каталогов (Евдокс Книдский, Древняя Греция)	60-е гг. IV в. до н. э.
Разделение в Вавилоне эклиптики на 12 равных участков (знаков зодиака; зодиакальные созвездия были открыты намного раньше!); геоцентрическая система мира Аристотеля	IV в. до н. э.
Первая гелиоцентрическая система мира и оценка расстояний до Солнца и Луны (Аристарх Самосский)	Около 265 г. до н. э.
Изобретение компаса (Китай); первое достаточно точное измерение углового диаметра Солнца и создание небесного глобуса (Архимед)	Середина III в. до н. э.
Первое измерение размеров Земли (Эратостен, Александрия)	240 г. до н. э.
Обнаружение связи приливов и отливов с положением Луны (Древняя Греция)	Около 150 г. до н. э.
Открытие Гипархом явления прецессии земной оси (которая описывает за длительное время в пространстве конус); создание каталога (около 850 звёзд) и разделение звёзд по блеску на шесть звёздных величин (Древняя Греция)	150—123 гг. до н. э.
Введение юлианского календаря	45 г. до н. э.
Выделение на небе 124 созвездий (Китай)	Конец I — начало II в.
Геоцентрическая система мира Клавдия Птолемея (Александрия)	Около 140 г.

Наблюдения в Тельце вспышки сверхновой звезды, породившей Крабовидную туманность (Китай, Европа)	1054 г.
Создание астрономической обсерватории в Самарканде для проведения высокоточных угломерных измерений на небесной сфере (Улугбек)	Около 1425 г.
Перенос начала календарного года на Руси с 25 марта на 1 сентября	1492 г.
Объяснение «пепельного света» Луны, хорошо заметного, например, при узком серпе растущей Луны (Леонардо да Винчи, Италия)	Конец XV — начало XVI в.
Опубликование Николаем Коперником полного изложения гелиоцентрической системы мира	1543 г.
Создание обсерватории Тихо Браге (остров Вэн, Дания)	1576 г.
Введение григорианского календаря	1582 г.
Сожжение в Риме Джордано Бруно	17 февраля 1600 г.
Обозначение звёзд буквами греческого алфавита (И. Байер, Германия)	1603 г.
Изобретение зрительной трубы (Голландия)	1608 г.
Начало эры телескопической астрономии (Г. Галилей, Италия)	1609 г.
Открытие вращения Солнца, открытие Туманности Андромеды, сделанные невооружённым глазом (Германия)	1612 г.
Запрещение основного труда Н. Коперника «О вращении небесных сфер»	1616 г.
Открытие И. Кеплером трёх законов движения планет	1618—1619 гг.
Открытие туманности Ориона (Швейцария)	1619 г.
Суд инквизиции над Галилео Галилеем	1633 г.
Первое измерение горизонтального параллакса Солнца при прохождении Венеры по солнечному диску (Англия)	1639 г.

Создание обсерватории Яна Гевелия (Гданьск, Польша)	1641 г.
Открытие Х. Гюйгенсом кольца Сатурна	1656 г.
Открытие спектра солнечного света (И. Ньютон, Англия)	1662 г.
Открытие красного пятна Юпитера (Р. Гук, Англия; Дж. Д. Кассини, Франция)	1665 г.
Постройка Парижской обсерватории	1667—1672 гг.
Изобретение телескопа-рефлектора И. Ньютоном	1668 г.
Измерение скорости света по наблюдениям затмений в системе галилеевых спутников Юпитера (О. Ремер, Дания)	1675 г.
Основание Гринвичской обсерватории (Англия)	1677 г.
Издание «Начал» И. Ньютона	1687 г.
Введение в России нового летосчисления («от Рождества Христова») и начала года с 1 января (Пётр I)	1699 г.
Начало преподавания астрономии в России (Навигацкая школа)	1701 г.
Градусные измерения Земли, доказавшие сплюснутость нашей планеты у полюсов (экспедиции Парижской академии)	1735—1743 гг.
Космогоническая гипотеза И. Канта	1755 г.
Открытие Крабовидной туманности в созвездии Тельца (Ш. Мессье, Франция)	1758 г.
Открытие атмосферы на Венере (М. В. Ломоносов, Россия)	1761 г.
Первый каталог туманностей Мессье (103 объекта)	1771 г.
Закономерность планетных расстояний Тициуса—Боде	1772 г.
Открытие Урана В. Гершелем	1781 г.
Первые гипотезы о возможном существовании чёрных дыр (Дж. Мичелл, Англия; П. Лаплас, Франция)	1783 г., 1796 г.
Разгадка переменности блеска Алголя (Дж. Гудрайк, Англия)	1784 г.

Первые представления о форме и размерах Галактики (В. Гершель, Англия)	1785 г.
Космогоническая гипотеза П. Лапласа	1796 г.
Открытие первого астероида — Цереры (Дж. Пиацци, Италия)	1 января 1801 г.
Гипотеза о возникновении астероидов в результате разрушения планеты между Марсом и Юпитером (Ольберс, Германия)	1802 г.
Открытие фраунгоферовых линий (линий поглощения) в спектре Солнца	1815 г.
Сооружение Московской обсерватории при университете	1831 г.
Первое определение расстояний до звёзд (В. Я. Струве, Россия)	1837 г.
Первое определение расстояния до ближайшей звезды — α Центавра (Т. Гендерсон, Южная Африка). Основание Пулковской обсерватории (В. Я. Струве, Россия)	1839 г.
Зарождение фотографической астрономии (первые снимки Луны)	1839—1840 гг.
Открытие эффекта Доплера	1842 г.
Открытие Нептуна (Дж. К. Адамс, Англия; У. Ж. Леверье, Франция)	1846 г.
Открытие межзвёздного поглощения света (В. Я. Струве, Россия)	1846 г.
Открытие 11-летнего цикла солнечной активности (Р. Вольф, Швейцария)	1852 г.
Теория Дж. К. Максвелла о строении колец Сатурна	1859 г.
Появление спектрального анализа в астрофизике (Г. Кирхгоф, Р. Бунзен, Германия)	1859 г.
Обнаружение связи метеорных потоков с кометами	1864 г.
Открытие гелия на Солнце (П. Жансен, Франция; Д. Н. Локьер, Англия)	1868—1871 гг.
Открытие «каналов» на Марсе (Дж. Скиапарелли, Италия)	1877 г.
Открытие спутников Марса (А. Холл, США)	1877 г.

Теория форм кометных хвостов (Ф. А. Бредихин, Россия)	1877 г.
Первая гипотеза о пульсации цефеид	1879 г.
Введение часовых поясов в нескольких десятках стран, линия смены и отсчёта долгот от Гринвичского меридиана	1884 г.
«Новый общий каталог» (NGC), 13 тысяч туманностей (И. Л. Дрейер)	1887 г.
Доказательство метеоритного строения колец Сатурна (А. А. Белопольский, Россия)	1895 г.
Крупнейший в мире телескоп-рефрактор (диаметр объектива 1,02 м, Йерксская обсерватория, США)	1897 г.
Выход в свет труда К. Э. Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами», содержащего теоретическое обоснование возможности полётов в космос	1903 г.
Основание обсерватории Маунт Вилсон (Дж. Хейл, США)	1904 г.
Построение диаграммы «спектр — светимость» Герцшпрунга—Ресселла	1905—1913 гг.
Открытие зависимости между периодом и видимой звёздной величиной у цефеид (Г. Ливитт, США)	1908 г.
Падение Тунгусского метеорита	30 июня 1908 г.
Отнесение Полярной звезды к классу цефеид	1911 г.
Открытие космических лучей	1912 г.
Открытие Сириуса В — первого белого карлика	1915 г.
Открытие нецентрального положения Солнца в Галактике	1918 г.
Введение в строй 2,5-метрового телескопа-рефлектора (Маунт Вилсон)	1919 г.
Создание Международного астрономического союза (МАС)	1919 г.
Нестационарные релятивистские модели Вселенной (А. А. Фридман, СССР)	1922 г.

Доказательство внегалактической природы туманностей М31 и М33 (Э. Хаббл, США)	1924 г.
Открытие двойственности Полярной звезды	1924 г.
Открытие вращения Галактики (Б. Линдбланд, Швеция; Я. Оорт, Голландия)	1926—1927 гг.
Открытие закона Хаббла	1929 г.
Открытие Плутона (К. Томбо, США), который до 2006 г. считался 9-й планетой Солнечной системы	1930 г.
Открытие космического радиоизлучения (К. Янский, США)	1931 г.
Организация в СССР Службы Солнца	1932 г.
Зарождение идеи о существовании во Вселенной скрытой массы («невидимое», «тёмное» вещество)	1933 г.
Гипотеза о существовании нейтронных звёзд (Л. Д. Ландау и др., СССР)	1934 г.
Теория термоядерных реакций в недрах Солнца и других звёзд	1937 г.
Предсказание существования чёрных дыр на основе общей теории относительности А. Эйнштейна	1939 г.
Первые открытия молекул в межзвёздной среде (CN, NH)	1940 г.
Открытие первых активных галактик (К. Сейферт, США)	1940—1942 гг.
Изобретение зеркально-линзового менискового телескопа (Д. Д. Максудов, СССР)	1941 г.
Радиолокация Луны	1946 г.
Теория «горячей Вселенной» (Дж. Гамов, США)	1946 г.
Открытие первого радиоисточника Лебедь А	1946 г.
Основание обсерватории Маунт Паломар (США)	1947 г.
Введение в строй 5-метрового телескопа-рефлектора (Маунт Паломар)	1948 г.
Космогоническая теория О. Ю. Шмидта	1949—1951 гг.

Гипотеза о кометном облаке Я. Оорта	1950 г.
Выявление спиральной структуры нашей Галактики	1952 г.
Открытие радиоизлучения некоторых планет и комет	1955—1956 гг.
Запуск в СССР первого в мире искусственного спутника Земли (о последующих достижениях космонавтики см. Приложение II)	4 октября 1957 г.
Открытие радиационных поясов Земли	1958 г.
Радиолокация планет и уточнение значения астрономической единицы (СССР, США)	1961—1964 гг.
Начало рентгеновской астрономии	1962 г.
Открытие квазаров (М. Шмидт, США)	1963 г.
Первая лазерная локация Луны (СССР)	1963 г.
Открытие реликтового радиоизлучения	1965 г.
Разработка метода одновременных радиоинтерференционных наблюдений с помощью радиотелескопов, находящихся на огромных расстояниях друг от друга (Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашев, СССР)	1965 г.
Открытие первых загадочных источников γ -излучения	1966 г.
Основание Специальной астрофизической обсерватории (САО) АН СССР на Северном Кавказе	1966 г.
Открытие пульсаров (Дж. Белл, Э. Хьюиш, Англия)	1967 г.
Открытие возможности «испарения» чёрных дыр (С. Хокинг, Англия)	1974 г.
Открытие гигантских молекулярных облаков (ГМО), в которых рождаются звёзды (ГМО в Галактике несколько тысяч)	1975 г.
Активная разработка теории крупномасштабной структуры Вселенной (СССР, США)	1970—1980-е гг.
Ввод в строй крупнейшего в Европе 6-метрового телескопа-рефлектора (САО АН СССР)	1976 г.
Ввод в строй радиотелескопа РАТАН-600 (САО АН СССР)	1977 г.

Начало разработки теории раздувающейся («инфляционной») Вселенной (США, СССР), объясняющей многие свойства нашей Вселенной и предсказывающей существование других вселенных (!)

Открытие в Солнечной системе нескольких крупных объектов, подобных Плутону

На 26-й Ассамблее Международного астрономического союза было принято решение изменить определение термина «планета», в результате чего Плутон перестал относиться к этому классу объектов. Теперь он входит в группу карликовых планет вместе с Эридой, Церерой, Хаумеа

В конце XX в. и самом начале XXI в. сделан ряд замечательных открытий, в том числе в области космологии. Доказано существование невидимых «тёмной энергии» и «тёмной материи», составляющих основную часть массы Вселенной. В новейшую картину мироздания наряду со всемирной гравитацией включается всемирная антигравитация, являющаяся причиной ускоренного расширения Вселенной. Открыта анизотропия реликтового излучения. Обоснованы гипотезы о существовании множества вселенных. Были получены убедительные свидетельства существования звёздных чёрных дыр в системах двойных звёзд и сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик, включая нашу. Открыты планеты и даже планетные системы вокруг сотен звёзд. Обнаружены коричневые карлики — небесные объекты, которые больше, чем крупные планеты, но недостаточно большие, чтобы стать обычными звёздами. Открыты десятки спутников планет-гигантов. Обнаружено много льда под поверхностью Марса в преддверии первых полётов людей на эту планету. Вступили в строй гигантские телескопы-рефлекторы, например: Очень Большой Телескоп, объединяющий четыре телескопа с зеркалами

1970—1980-е гг.

2003—2005 гг.

24 августа 2006 г.

Конец XX в. —
начало XXI в.

диаметром 8,2 м (Европейская Южная Обсерватория в Чили), телескопы-рефлекторы им. Кека с зеркалами диаметром 10 м (Мауна-Кеа, Гавайские острова), Большой Канарский телескоп-рефлектор с зеркалом диаметром 10,4 м, Большой Южно-Африканский телескоп с зеркалом диаметром 11 м. Проектируются телескопы значительно бóльших размеров. Важное значение для космологии имеют эксперименты, которые в настоящее время проводятся в разных странах на самых больших ускорителях элементарных частиц, в том числе на Большом Адронном Коллайдере. В результате уже сейчас удаётся воспроизводить условия, существовавшие в ранней Вселенной вскоре после Большого взрыва.

Новые астрономические наблюдения и физические эксперименты помогут теоретикам «понять Вселенную», создав стройную и непротиворечивую модель множества происходящих в ней процессов и явлений. Ведь лишь недавно выяснилось, что более 90 % Вселенной составляют невидимые «тёмная материя» и «тёмная энергия», природа которых пока остаётся неизвестной. В настоящее время астрономы ищут не только решающие доказательства существования тёмных сущностей, но и «входы» и «выходы» из гипотетических тоннелей в пространстве-времени. Такие тоннели («*кротовые норы*»), возможно, когда-нибудь помогут землянам мгновенно переноситься в отдалённые части нашей Вселенной, попадать в другие вселенные или даже совершать путешествия в прошлое и будущее. О подобном ещё недавно можно было прочитать только в научно-фантастических произведениях.

В связи с 400-летием со времени первых телескопических наблюдений Галилея Организация Объединённых Наций (ООН) объявила 2009 год **Международным годом астрономии.**

2009 г.

II. Важнейшие даты в освоении космического пространства

Запуск первого в мире искусственного спутника Земли (начало космической эры)	4 октября 1957 г.
Фотографирование обратной стороны Луны (АМС «Луна-3», СССР)	7 октября 1959 г.
Первый в мире орбитальный полёт космического корабля «Восток», пилотируемого <i>Ю. А. Гагариным</i> , — первый полёт человека в космос	12 апреля 1961 г.
Первый космический полёт женщины (<i>В. В. Терешкова</i> ; корабль «Восток-6»)	16—19 июня 1963 г.
Первый выход человека из корабля в космическое пространство (<i>А. А. Леонов</i> ; корабль «Восход-2»)	18 марта 1965 г.
Первое фотографирование Марса с близкого расстояния (АМС «Маринер-4», США)	15 июля 1965 г.
Первая мягкая посадка на поверхность Луны (АМС «Луна-9», СССР). Впервые с помощью телевизионной системы на Землю были переданы панорамы лунного ландшафта	3 февраля 1966 г.
Первый межпланетный перелёт (Земля — Венера, АМС «Венера-3», СССР)	16 ноября 1965 г. — 1 марта 1966 г.
Запуск первого искусственного спутника Луны («Луна-10», СССР)	31 марта 1966 г.
Первый облёт Луны с возвращением АМС на Землю («Зонд-5», СССР)	15—21 сентября 1968 г.
Первая экспедиция на Луну (астронавты <i>Н. Армстронг</i> , <i>Э. Олдрин</i> , <i>М. Коллинз</i> ; корабль «Аполлон-11»)	16—24 июля 1969 г.
Первая доставка лунного грунта с помощью автоматического аппарата (АМС «Луна-16», СССР)	12—24 сентября 1970 г.
Первая доставка на Луну самоходной лаборатории «Луноход-1» (АМС «Луна-17», СССР)	17 ноября 1970 г.
Первая мягкая посадка космического аппарата на поверхность Венеры (АМС «Венера-7», СССР)	15 декабря 1970 г.

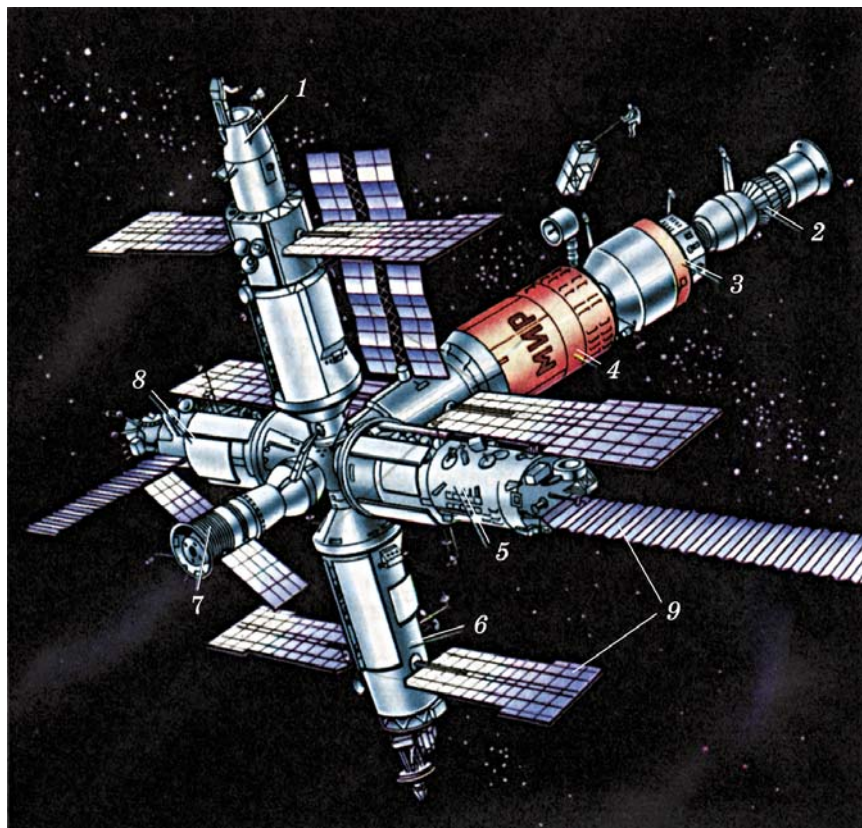


Рис. 115. «Мир» — долговременная (1986—2001 гг.) орбитальная станция (СССР—Россия):

1 — модуль «Квант-2»; 2 — космический корабль «Союз»; 3 — модуль «Квант»; 4 — станция «Мир»; 5 — модуль «Природа»; 6 — модуль «Спектр»; 7 — корабль «Прогресс»; 8 — модуль «Кристалл», 9 — солнечные батареи

Первая долговременная орбитальная научная станция «Салют» (СССР)

19 апреля —
12 октября
1971 г.

Первая мягкая посадка на поверхность Марса (АМС «Марс-3», СССР)

2 декабря 1971 г.

Первое фотографирование Юпитера с близкого расстояния (АМС «Пионер-10»)

Ноябрь—декабрь
1973 г.

Первое фотографирование Меркурия с близкого расстояния (АМС «Маринер-10»)

30 марта 1974 г.

Первый международный космический полёт — «Союз-19» (космонавты СССР А. А. Леонов и В. Н. Кубасов) и «Аполлон» (астронавты США — Т. Стаффорд, В. Бранд, Д. Слейтон)

15—21 июля
1975 г.

Передача первых телевизионных изображений поверхности Венеры (АМС «Венера-9» и «Венера-10», СССР)

22 и 25 октября
1975 г.

Полёт АМС «Вояджер-2» (США). Сближение с Юпитером — июль 1979 г., Сатурном — август 1981 г., Ураном — январь 1986 г., Нептуном — август 1989 г., Плутон — июль 2015 г. (рис. 116). Фотографирование планет, их спутников и колец

20 августа
1977 г. —
наст. время

Передача первых серий радиолокационных изображений поверхности Венеры (АМС «Венера-15», «Венера-16», СССР)

1983—1984 гг.

Получение первых фотографий ядра кометы (комета Галлея, АМС «Вега-1», СССР)

9 марта 1986 г.

Уникальная по длительности пребывания на околоземной орбите (15 лет) космическая станция «Мир» (СССР—Россия) (рис. 115). На ней в разное время работали более ста космонавтов и астронавтов

20 февраля
1986 г. —
16 марта 2001 г.

Выведение на околоземную орбиту космического телескопа имени Э. Хаббла (рис. 117)

25 апреля 1990 г.

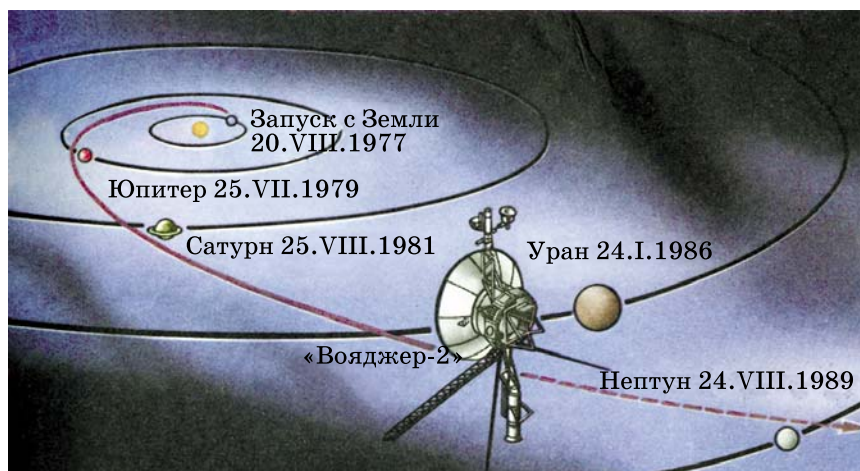


Рис. 116. Траектория движения в пространстве АМС «Вояджер-2»



Рис. 117. Космический телескоп-рефлектор им. Хаббла, КТХ (США)

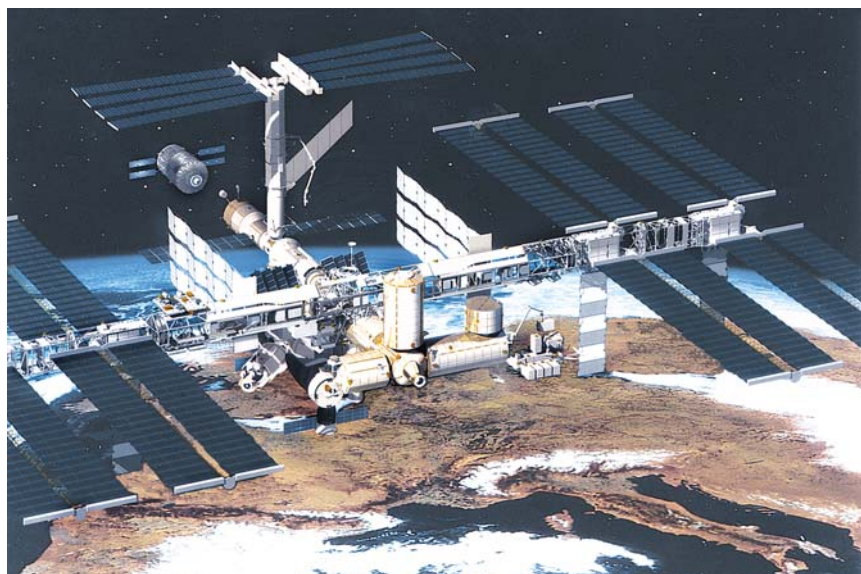


Рис. 118. Международная космическая станция, МКС (рисунок Европейского космического агентства)

Получение первых фотографий поверхности астероида (астероид Гаспра, АМС «Галилео», США)	29 октября 1991 г.
Новая радиолокационная съёмка поверхности Венеры (АМС «Магеллан», США)	1990—1994 гг.
Запуск космического аппарата для изучения Солнца — SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) (ЕКА, НАСА)	2 декабря 1995 г.
Старт к Сатурну АМС «Кассини» (США — Европа) с посадочным зондом «Гюйгенс»	15 октября 1997 г.
Ракетой-носителем «Протон-К» выведен на околоземную орбиту функционально-грузовой блок «Заря» — первый блок строящейся в космосе при участии 16 стран Международной космической станции (МКС) (рис. 118)	28 ноября 1998 г.
Первая посадка космического корабля (США) на поверхность астероида (а. Эрос)	12 февраля 2001 г.
Старт АМС «Мессенджер» к Меркурию	3 августа 2004 г.
Старт к Венере АМС «Венера-Экспресс» (ЕКА и Роскосмос) для исследований планеты с орбиты её искусственного спутника	9 ноября 2005 г.
Впервые доставлены на Землю частицы вещества, входящего в состав хвоста кометы (АМС «Стардаст», США)	Январь 2006 г.
Выход на орбиту искусственного спутника Марса АМС «Марсианский орбитальный разведчик» (США). Цель — выбор мест посадок пилотируемых экспедиций	10 марта 2006 г. (запущен 12 августа 2005 г.)
Первый старт к Плутону (АМС «Новые горизонты», США)	19 ноября 2006 г.
Передача на Землю фотографий поверхности Меркурия и результатов измерений по анализу солнечных вспышек и магнитного поля планеты (АМС «Мессенджер», США)	2008—2015 гг.
Поиск и исследование экзопланет и планетных систем с помощью космического телескопа «Кеплер» (НАСА)	2009—2018 гг.
Эксперимент по имитации полёта на Марс международного экипажа в рамках программы «Марс-500» (Роскосмос, ЕКА, РАН)	3 июня 2010 г. — 4 ноября 2011 г.

Работа в космосе первой китайской орбитальной станции «Тяньгун-1»

2011—2018 гг.

Мягкая посадка марсохода Кьюриосити (США). Цель миссии — подробное изучение климата и уровня радиации на Марсе

6 августа 2012 гг.
(запущен
26 ноября 2011 г.)

Выход за пределы гелиосферы Солнечной системы АМС «Вояджер-1» (США)

Сентябрь 2013 г.
(запущен в 1977 г.)

Мягкая посадка спускаемого аппарата АМС «Розетта» (ЕКА, НАСА) на поверхность кометы Чурюмова—Герасименко

12 ноября 2014 г.
(запущена
2 марта 2004 г.)

Удаление АМС «Вояджер-1» на расстоянии 20 млрд км (133 а. е.) от Солнца

5 января 2016 г.

Запуск к Марсу первого аппарата по программе «Экзомарс» (Роскосмос, ЕКА). Основная цель — поиск следов жизни

14 марта 2016 г.

Запуск к Меркурию двух аппаратов, составляющих исследовательскую Миссию «БепиКоломбо» (ЕКА, Россия, Япония)

19 октября
2018 г.

Выход за пределы Солнечной системы АМС «Вояджер-2» (США)

Декабрь 2018 г.

III. Греческий алфавит

Буквы		Название буквы	Буквы		Название буквы
печат- ные	руко- писные		печат- ные	руко- писные	
Αα	Αα	альфа	Νν	Νν	ню
Ββ	Ββ	бета	Ξξ	Ξξ	кси
Γγ	Γγ	гамма	Οο	Οο	омикрон
Δδ	Δδ	дельта	Ππ	Ππ	пи
Εε	Εε	эпсилон	Ρρ	Ρρ	ро
Ζζ	Ζζ	дзета	Σσ	Σσ	сигма
Ηη	Ηη	эта	Ττ	Ττ	тау
Θθ	Θθ	тэта	Υυ	Υυ	ипсилон
Ιι	Ιι	йота	Φφ	Φφ	фи
Κκ	Κκ	каппа	Χχ	Χχ	хи
Λλ	Λλ	ламбда	Ψψ	Ψψ	пси
Μμ	Μμ	мю	Ωω	Ωω	омега

IV. Подвижная карта звёздного неба (ПКЗН)

Эта карта (она есть и в «Школьном астрономическом календаре») поможет вам изучить звёздное небо. Подвижная карта состоит из двух частей: накладного круга (рис. 119) и карты звёздного неба (рис. 120). Постарайтесь сделать для себя их увеличенную копию. Карту и накладной круг, воспользовавшись увеличенной копией либо вырезав их из «Школьного астрономического календаря», наклейте на картон. Вырез в накладном круге сделайте в соответствии с географической широтой места наблюдения. Например, для Москвы (её широта $55^{\circ}45'$) вырез можно сделать по линии с отметками 55° . Если отмеченный на накладном круге час наблюдения расположить против даты, указанной на звёздной карте, то в вырезе круга окажутся созвездия,

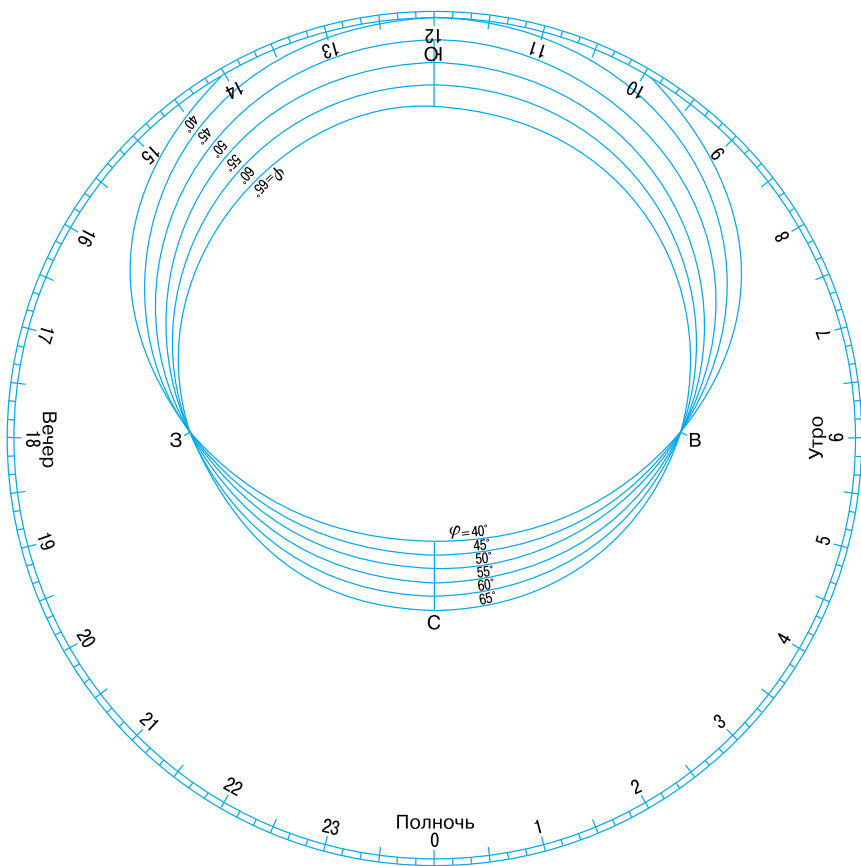
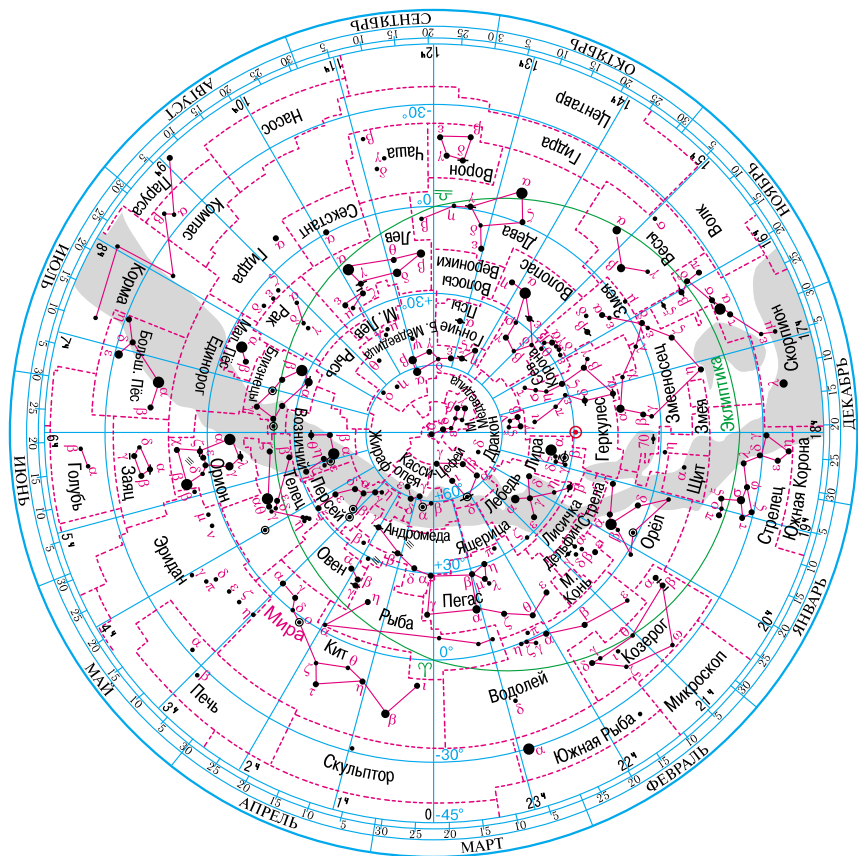


Рис. 119. Накладной круг к карте звёздного неба



- ... Звёзды
- + Двойные звёзды
- Две близкие звёзды
- Переменные звёзды
- ⊙ Апекс Солнца
- ☄ Туманности
- ☊ Точка весеннего равноденствия
- ☋ Точка осеннего равноденствия
- М. Конь Границы созвездий и их названия

Рис. 120. Карта звёздного неба

которые в данное время видны на небе. Края выреза накладного круга отмечают горизонт (на нём обозначены точки севера, юга, востока и запада). Центр выреза соответствует точке над головой наблюдателя — зениту. Вид вечернего звёздного неба в разное время года представлен на рисунках 121 и 122.

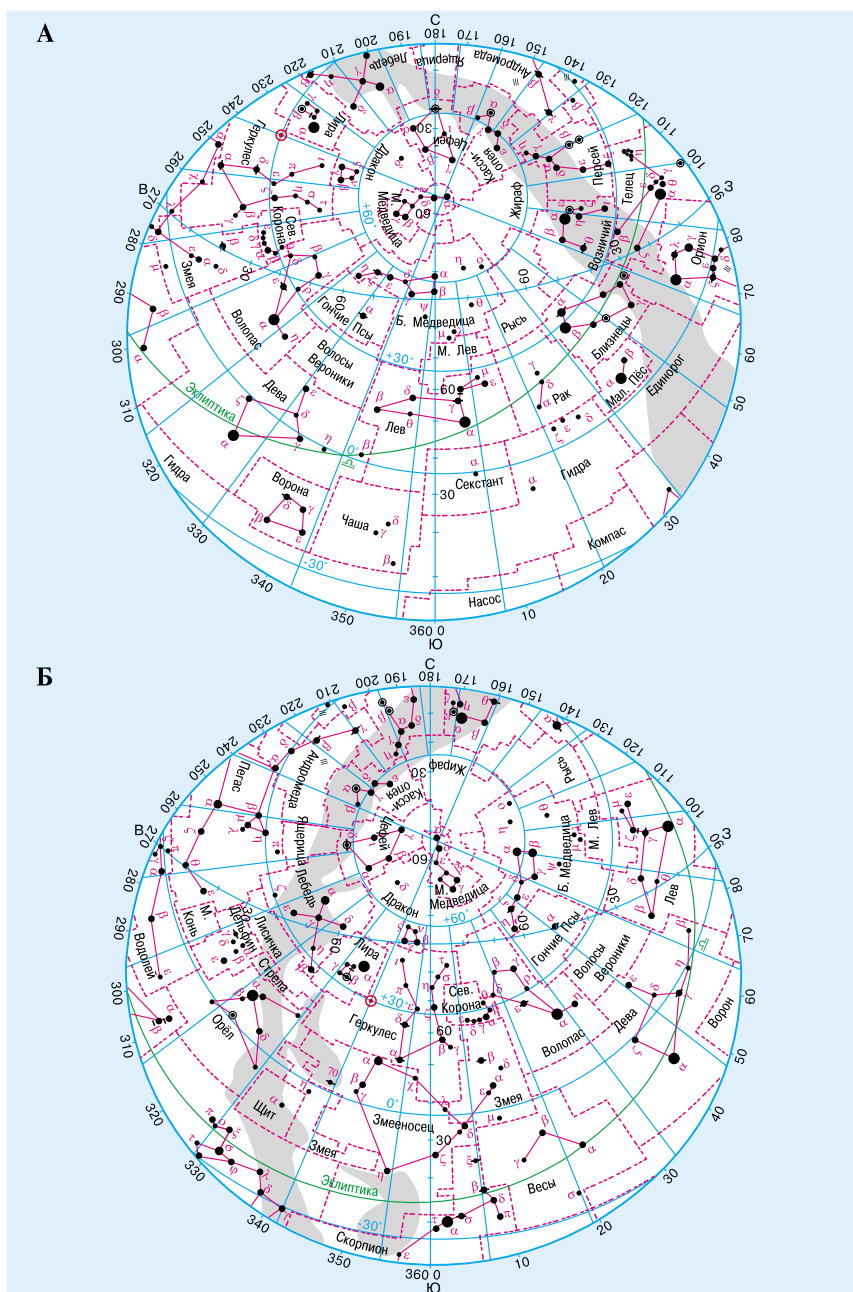


Рис. 121. Карты звёздного неба: А — весеннего (21 марта); Б — летнего (22 июня). $\varphi = 50\text{--}60^\circ$, 22–23 ч

V. Школьный астрономический календарь (ШАК)

Такой календарь выпускается на каждый учебный год. В нём вы найдёте сведения о различных астрономических явлениях, которые можно наблюдать в интересующее вас время. Приобретите ШАК и ознакомьтесь с его содержанием. Особое внимание уделите информации, содержащейся в первом разделе «Календаря наблюдателя», где сообщается о различных предстоящих астрономических явлениях в данном учебном году. Например, узнав, что сегодня вечером видна планета Марс, вы можете уточнить, в каком созвездии нужно искать эту планету. А подвижная карта звёздного неба поможет вам отыскать это созвездие на небе и определить условия его видимости. ШАК содержит и другие разделы, которые наверняка заинтересуют многих из вас.

VI. Основные сведения о Земле ☉

Экваториальный радиус	6378,16 км
Полярный радиус	6356,78 км
Средний радиус	6371 км
Сжатие	1 : 298,25
Масса	$6 \cdot 10^{24}$ кг
Средняя плотность	$5,5 \cdot 10^3$ кг/м ³
Средняя скорость движения по орбите	29,8 км/с
Ускорение свободного падения (для $\varphi = 45^\circ$)	9,8 м/с ²
Первая космическая скорость	7,9 км/с
Вторая космическая скорость	11,2 км/с
Третья космическая скорость (минимальная скорость, необходимая для полёта за пределы Солнечной системы)	16,7 км/с
Наклон плоскости экватора к плоскости орбиты	23°26′
Период вращения (по отношению к звёздам)	23 ^ч 56 ^м
Продолжительность звёздных суток	24 ^ч

VII. Основные сведения о Луне ☾

Среднее расстояние от Земли	384 400 км
Сидерический период обращения	27,3 ^д
Период вращения вокруг оси	27,3 ^д

VIII. Основные сведения о Солнце ☉

Горизонтальный параллакс	8,794''
Среднее расстояние от Земли	$1,496 \cdot 10^8$ км
Наибольший видимый угловой диаметр	32'31''
Линейный диаметр	$1,39 \cdot 10^6$ км ($109D_{\oplus}$)
Масса	$2 \cdot 10^{30}$ кг ($333\,000M_{\oplus}$)
Средняя плотность	$1,4 \cdot 10^3$ кг/м ³
Ускорение свободного падения	274 м/с ² ($27,9g_{\oplus}$)
Вторая космическая скорость на поверхности	620 км/с
Линейная скорость точек на экваторе Солнца	2 км/с
Период вращения точек экватора (сидерический период вращения экваториальной зоны)	25,4 ^д
Синодический (наблюдаемый с Земли) период вращения точек экватора	27,3 ^д
Температура фотосферы	$6 \cdot 10^3$ К
Температура солнечной короны	$1,5 \cdot 10^6$ К
Температура в центральных областях	$1,5 \cdot 10^7$ К
Солнечная постоянная	1,4 кВт/м ²
Светимость	$3,8 \cdot 10^{26}$ Вт
Видимая звёздная величина Солнца	-26,8 ^м
Абсолютная звёздная величина Солнца	+4,8 ^м
Спектральный класс	G2
Средняя продолжительность цикла солнечной активности	11 лет
Расстояние от Солнца до центра Галактики	10^4 пк $\approx 3,3 \cdot 10^4$ св. лет
Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики	250 км/с
Период обращения Солнца вокруг центра Галактики	$2 \cdot 10^8$ лет

IX. Основные сведения о планетах

Название планеты и её обозначение	Среднее расстояние от Солнца, а. е.	Сидерический период, годы	Эксцентриситет орбиты	Орбитальная скорость, км/с	Средний радиус, км	Наклон оси к плоскости орбиты, °	Период вращения	Средняя плотность, 10 ³ кг/м ³	Ускорение свободного падения, м/с ²	Вторая космическая скорость, км/с	Масса, в массах Земли ($M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24}$ кг)	Число спутников	Наличие атмосферы
Мерку- рий ☿	0,39	0,24	0,206	47,9	2440	89	58,7 ^д	5,5	3,7	4,2	0,06	—	Следы
Венера ♀	0,72	0,61	0,007	35,0	6050	—86,6	243,1 ^д	5,2	8,9	10,4	0,82	—	Очень плотная
Земля ⊕	1,00	1,00	0,017	29,8	6371	66,5	23 ^ч 56 ^м 4 ^с	5,5	9,8	11,2	1,0	1	Плотная
Марс ♂	1,52	1,88	0,093	24,1	3397	65,5	24 ^ч 37 ^м 22 ^с	3,9	3,7	5,0	0,11	2	Разре- женная
Юпитер ♃	5,20	11,86	0,048	13,1	69 900	87	9 ^ч 50 ^м	1,3	25,8	60,4	318	63	Очень плотная
Сатурн ♄	9,54	29,46	0,054	9,6	58 000	63,5	10 ^ч 14 ^м	0,7	11,3	36,2	95,2	60	Очень плотная
Уран ♅	19,19	84,02	0,046	6,8	25 400	—8	10 ^ч 49 ^м	1,4	9,0	21,4	14,6	27	
Нептун ♆	30,07	164,78	0,008	5,4	24 300	61	15 ^ч 48 ^м	1,6	11,6	23,8	17,2	13	

Х. Важнейшие параметры атмосфер планет земной группы

Характеристика	Планета		
	Земля	Венера	Марс
Основной химический состав (в % ко всему объёму газовой оболочки)	N_2 — 78 O_2 — 21 Ar — 0,93 H_2O — 0,1—1 CO_2 — 0,03	CO_2 > 95 N_2 — 3—5 Ar — 0,01 H_2O — 0,01—0,1 $O_2 < 5 \cdot 10^{-4}$	CO_2 — 95 N_2 — 2—3 Ar — 1—2 H_2O — 10^{-3} — 10^{-1} O_2 — 0,1—0,4
Давление у поверхности (давление у поверхности Земли принято за единицу)	1	92	$6 \cdot 10^{-3}$
Температура у поверхности (в средних широтах) T_{max} , К T_{min} , К	310 240	735 735	270 200

ХI. Названия наиболее ярких звёзд

Альдебаран	α Тельца	Кастор	α Близнецов
Альтаир	α Орла	Поллукс	β Близнецов
Антарес	α Скорпиона	Полярная	α М. Медведицы
Арктур	α Волопаса	Процион	α М. Пса
Бетельгейзе	α Ориона	Регул	α Льва
Вега	α Лиры	Ригель	β Ориона
Денеб	α Лебедя	Сириус	α Б. Пса
Капелла	α Возничего	Спика	α Девы

ХII. Основные сведения о наиболее ярких звёздах, видимых в России

№ п/п	Наимено- вание звезды	Экваториальные координаты		Видимая звёздная величи- на, m	Спект- раль- ный класс	Темпера- тура, К	Свети- мость ($L_{\odot} = 1$)	Масса ($M_{\odot} = 1$)	Радиус ($R_{\odot} = 1$)	Расстоя- ние, св. лет
		Прямое восхож- дение, α	Склоне- ние, δ							
1	Альдебаран	04 ^h 34 ^m	+16°28'	0,9	K5	3500	150	5	40	65
2	Альтаир	19 ^h 49 ^m	+08°48'	0,9	A5	10 000	10	2	1,6	17
3	Антарес	16 ^h 28 ^m	-26°23'	1,2	M0	3000	14 000	19	500	650
4	Арктур	14 ^h 14 ^m	+19°19'	0,2	K0	4000	100	4	22	36
5	Бетельгейзе	05 ^h 53 ^m	+07°24'	0,6	M0	3000	9000	20	400	430
6	Вега	18 ^h 36 ^m	+38°47'	0,1	A0	11 000	50	3	3	26
7	Денеб ¹	20 ^h 40 ^m	+45°10'	1,3	A2	10 000	250 000	15	50	3000
8	Капелла	05 ^h 14 ^m	+45°58'	0,1	G0	5200	100	3	16	43
9	Кастор	07 ^h 33 ^m	+31°57'	2,0	A0	10 000	26	3	2,5	45
10	Поллукс	07 ^h 43 ^m	+28°05'	1,2	K0	4600	32	3,5	11	34
11	Полярная	02 ^h 07 ^m	+89°09'	2,1	F8	6000	5100	10	70	650
12	Процион	07 ^h 38 ^m	+05°17'	0,5	F5	7000	10	1,5	2	11
13	Регул	10 ^h 07 ^m	+12°05'	1,3	B8	13 000	154	5	4	84
14	Ригель	05 ^h 13 ^m	-08°14'	0,3	B8	12 000	45 000	20	90	820
15	Сириус	06 ^h 44 ^m	-16°41'	-1,6	A0	10 000	22	3	1,7	8,7
16	Спика	13 ^h 23 ^m	-11°02'	1,0	B2	17 000	2000	15	7	260

¹ Этот белый сверхгигант — самая далёкая звезда из ярких звёзд нашего неба.

XIII. Примерные темы рефератов

1. Развитие представлений о Вселенной.
2. Важнейшие достижения в освоении космоса.
3. Земля — планета Солнечной системы.
4. Природа Венеры и Марса.
5. Кометы и их природа.
6. Солнце и жизнь Земли.
7. Что такое звёзды.
8. Мир галактик.
9. Как и зачем человек познаёт Вселенную.
10. Одиноки ли мы во Вселенной?

XIV. Список рекомендуемой литературы

А. Свои знания по разным вопросам астрономии и космонавтики, а также по их истории вы сумеете пополнить, прочитав эти книги:

Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной / Б. А. Воронцов-Вельяминов. — М.: Наука, 1980.

Гурштейн А. А. Извечные тайны неба / А. А. Гурштейн. — М.: Просвещение, 1991.

Дубкова С. И. История астрономии / С. И. Дубкова. — М.: Белый город, 2002.

Еремеева А. И. Астрономическая картина мира / А. И. Еремеева. — М.: Наука, 1984.

Климишин И. А. Элементарная астрономия / И. А. Климишин. — М.: Наука, 1991.

Левитан Е. П. Как открывали Вселенную / Е. П. Левитан. — М.: Аргументы и факты, 2003.

Левитан Е. П. Физика Вселенной / Е. П. Левитан. — М.: УРСС, 2003.

Левитан Е. П. Эволюционирующая Вселенная / Е. П. Левитан. — М.: Просвещение, 1993.

Моше Д. Астрономия / Д. Моше. — М.: Просвещение, 1985.

Мур П. Астрономия с Патриком Муром / П. Мур. — М.: Гранд, 1999.

Новиков И. Д. Как взорвалась Вселенная / И. Д. Новиков. — М.: Наука, 1988.

Паркер Б. Мечта Эйнштейна / Б. Паркер. — СПб.: Амфора, 2001.

Сикорук Л. Л. Телескопы для любителей астрономии / Л. Л. Сикорук. — М.: Наука, 1990.

Хокинг С. Краткая история времени. От Большого взрыва до чёрных дыр / С. Хокинг. — СПб.: Амфора, 2008.

Черепашук А. М. Вселенная, жизнь, чёрные дыры / А. М. Черепашук, А. Д. Чернин. — Фрязино, 2003.

Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум / И. С. Шкловский. — М.: Наука, 2007.

Астрономия: век XXI. — Фрязино, ГАИШ, 2007.

Б. Рекомендации по выполнению астрономических наблюдений, а также необходимый справочный материал по астрономии и космонавтике, карты звёздного неба, Луны и планет вы найдёте в следующих книгах и пособиях:

Большая детская энциклопедия. — М.: Русское энциклопедическое общество, 1999.

Дубкова С. И. Прогулки по звёздному небу / С. И. Дубкова. — М.: Белый город, 2002.

Герасютин С. А. России звёздные сыны: Малая энциклопедия космонавтики / С. А. Герасютин, Е. П. Левитан. — М.: Гелиос, 2001.

Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии / П. Г. Куликовский. — М.: УРСС, 2002.

Левитан Е. П. Астрономия от А до Я: Малая детская энциклопедия / Е. П. Левитан. — М.: Аргументы и факты, 1999.

Левитан Е. П. Космонавтика от А до Я: Малая детская энциклопедия / Е. П. Левитан. — М.: Аргументы и факты, 2001.

Человек и Вселенная: атлас. — М.: ПКО «Картография», 1994.

Шевченко М. Ю. Школьный астрономический календарь / М. Ю. Шевченко. — М.: Дрофа.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2011.

В. Полезные для работы над рефератами сведения по астрономии и космонавтике вы найдёте в научно-популярном журнале Российской академии наук «Земля и Вселенная» и в журнале «Наука и жизнь».

Г. Любителям решать задачи по астрономии рекомендуем задачки:

Гусев Е. Б. Сборник вопросов и качественных задач по астрономии / Е. Б. Гусев. — М.: Просвещение, 2003.

Субботин Г. П. Сборник задач по астрономии / Г. П. Субботин. — М.: Аквариум, 1997.

Сурдин В. Г. Астрономические задачи с решениями / В. Г. Сурдин. — М.: УРСС, 2002.

XV. Список полезных интернет-ресурсов

1. <http://www.astronet.ru> — Российская Астрономическая сеть
2. <http://www.astrolab.ru> — Всё об астрономии и космосе
3. <http://www.dailytechinfo.org> — Новости науки и технологий
4. <http://space.rin.ru> — Астрономия и законы космоса. На шаг ближе к звёздам
5. <http://www.astrogorizont.com> — Астрогоризонт. Новости космоса
6. <http://rusnasa.ru> — Сайт НАСА на русском языке
7. <http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html> — Фотожурнал НАСА
8. <http://www.esa.int/ESA> — Сайт ЕКА
9. <http://hubblesite.org> — Сайт космического телескопа «Хаббл» с Галереей
10. <http://selena.sai.msu.ru/Home/lectures/lectures.htm> — Лекции о Луне и планетах
11. <http://www.sai.msu.su/ng/slovo.htm> — Астрономический словарь
12. <http://www.astro.websib.ru> — Сайт «Астрономия» Максименко А. В.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсолютно чёрное тело 114

АДАМС 46

АМБАРЦУМЯН 175

АМС 56

антигравитация 184

апекс 168

апогей 43

апоселений 44

АРИСТАРХ САМОССКИЙ 207

АРИСТОТЕЛЬ 38, 207

астероиды 97

— орбиты 97

— пояс (Главный, Койпера) 97

— столкновения с Землёй 97

астрограф 7

астрономическая единица 43, 52

астрономическая картина мира 10

астрономия 3, 5, 10, 37

— внегалактическая 170

— всеволновая 9

— древняя 37

— связь с другими науками 9

астрофизика 9

афелий 43

БЕЛОПОЛЬСКИЙ 94

белые карлики 148

болид 106

БРАГЕ Тихо 42

БРУНО Джордано 40

БТА — шестиметровый рефлектор 8

Взрыв Метагалактики (Большой взрыв) 183, 215

внеземные цивилизации 200

возмущения 45

время

— всемирное (гринвичское) 27

— летнее 28

— местное 27

— московское 28

— поясное 28

Вселенная

— изотропность 179

— расширение 179, 181

— ускоренное расширение 185

— эволюция 180, 198

ВСЕХСВЯТСКИЙ 95

высота полюса мира 23

ГАГАРИН 216

Галактика 5, 162, 166

галактики 169

— взаимодействующие 174

— возраст 187

— вращение 167

— движение звёзд 167

— массы 171

— неправильные 171, 172

— размеры 170

— расстояния 170

— состав 162

— спиральные 171, 173

— строение 166

— эллиптические 171

ГАЛИЛЕЙ 40, 207

ГАЛЛЕ 46

ГАМОВ 184

географические координаты 19, 23

— долгота и время 27

— определение широты 23

ГЕРШЕЛЬ 46

ГЕРЦШПРУНГ 147

ГИППАРХ 137

главная последовательность звёзд
147, 163

«горячая Вселенная» 183

Двойная планета 59

— Земля—Луна 59

— Плутон—Харон 73

ДЕМОКРИТ 207

диаграмма «спектр—светимость»
148

дифференциация вещества 197

диффузная материя 188

дни

— весеннего и осеннего равноденствия 21

— зимнего и летнего солнцестояния 21

ЕВДОКС КНИДСКИЙ 207

Жизнь во Вселенной 198

Закон Вина 115

закон Стефана—Больцмана 113

закон Хаббла 180

закон всемирного тяготения 45

законы Кеплера 42—44, 46—48

затмения

— лунные 38, 61

— солнечные 60

звёздные скопления 162

— рассеянные 163

— шаровые 163

звёзды

— возраст 187

— гиганты 146

— главная последовательность 147

— диаграмма «спектр—светимость» 147

— долгопериодические 157

— затменные двойные 151

— затменные переменные 151

— звёздная величина 137

— карлики 146

— кратные 150

— лучевая скорость 140

— масса 146, 152, 190

— невидимые спутники 153

— нейтронные 158

— новые 157

— оптические двойные 150

— пространственная скорость 139

— расстояние 135

— сверхгиганты 146

— сверхновые 157

— светимость 138, 144

— собственные движения 140

— соотношение «масса—светимость» 148

— спектр 141, 143

— спектрально-двойные 150

— средняя плотность 146

— тангенциальная скорость 139

— физические двойные 150

— химический состав 143

— цвет и температура 143

— цефеиды 154

— эволюция 188

Земля 56—58

— вращение 57

— обращение 57

— смена времён года 58

зенит 17

Изотропность Вселенной 179

ионосфера 130, 132

Календарь

— григорианский 30

— солнечный 29

— юлианский 29

КАНТ 194

Карта звёздного неба подвижная (ПКЗН) 4

каталоги 171

квазары 175

квинтэссенция 184

КЕПЛЕР 41, 42

коллапс 190

кометы 101

— вид, строение 101

— орбиты 102

— периодические 101, 103

— природа 103

— ядро и хвост 104

КОПЕРНИК 39

коричневые карлики 214

коронограф 122

корпускулы 121

космическая эра 56

космические лучи 165

космический телескоп Хаббла (КТХ) 9, 219

космогонические гипотезы 194

космогония 187

— звёздная 187

— планетная 195

космология 185

космонавтика 11

кульминация

— верхняя 18

— нижняя 19

кривая блеска звёзд 151, 155

ЛАПЛАС 194

ЛЕВЕРЬЕ 46

летосчисление 29

ЛОМОНОСОВ 42

Луна 58

— видимое движение 59

- внутреннее строение 70
- лунотрясения 70
- поверхность 64, 65
- породы 69
- природа 63
- фазы 59

Магнитные бури 133

МАКСВЕЛЛ 94

Местная группа галактик 177

местное сверхскопление галактик 177

месяц

- сидерический 60
- синодический 59

Метагалактика 177, 179

метеориты 99

метеорный поток 106

метеоры 106

МКС 219, 220

Млечный Путь 162

Наблюдения

- визуальные 7
- внеатмосферные 9
- наземные 9
- спектральные 7
- фотографические 7

надир 17

небесная механика 10, 45

небесная сфера 15

- суточное вращение 15
- точки и линии 16, 20
- угловые измерения 17

небесные координаты 16

- горизонтальные 17
- экваториальные 19

нейтральный водород 168

нейтринное излучение звёзд 159

нейтринное излучение Солнца 126

НЛО 202

НЬЮТОН 41

Обсерватории 6

- Главная астрономическая обсерватория РАН 6
- Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ) 6

- Специальная астрофизическая обсерватория РАН 6
 - орбитальные 9
- озоновый слой** 130

Параллакс 49

- годичный 135

- горизонтальный экваториальный 50

параллактическое смещение 38, 57

парсек 135

перигей 43

перигелий 43

период

- сидерический (звёздный) 36

- синодический 36

периселений 44

планеты 33

- конфигурации 34

- петлеобразное движение 34

планеты-гиганты 86

- кольца 94

- спутники 90

- строение 88

планеты земной группы 70

- атмосферы 73

- обзор 71

- поверхности 75

полярные сияния 133

постоянная Хаббла 180

происхождение и эволюция звёзд 188

происхождение химических элементов 189, 197

протозвезда 188

протопланетное облако 196

ПТОЛЕМЕЙ 38

пульсары 158, 164

Радиогалактики 174

радиоизлучение 132

- Галактики 168, 174

- Солнца 121, 131

радиолокация 51

радиотелескопы 9

разум во Вселенной 198

РАТАН-600 8

реголит 69

реликтовое излучение 184

рентгеновское излучение

— пульсаров 158

— Солнца 121, 130

РАССЕЛЛ 147

Сверхмассивные чёрные дыры
192

световой год 136

сверхскопления галактик 178

системы галактик 177

системы мира

— геоцентрическая 38

— гелиоцентрическая 39

скопление галактик 177

«скрытая масса» (невидимое ве-
щество) 185

Служба Солнца 133

созвездия 12

— восходящие и заходящие 19

— зодиакальные 22

— невосходящие 19

— незаходящие 19

Солнечная система 5, 33

— возраст 192

— закономерности 193

— определение масс небесных
тел 47

— определение размеров тел 52

— определение расстояний 49

солнечный ветер 132

Солнце 5, 110

— активность 124, 132

— вид в телескоп 111

— внутреннее строение 126

— возмущённое 124

— вращение 112

— вспышки 121

— годовичное движение 21, 22

— гранулы 116

— использование энергии 129

— источники энергии 125

— корона 120

— коротковолновое излучение
130

— корпускулярное излучение
132

— протуберанцы 121

— пятна 110, 117

— роль в жизни на Земле 132

— сверхкорона 123

— солнечная постоянная 112

— спектр 115

— спокойное 124

— физические характеристики
112

— фотосфера 116

— фотосферные факелы 120

— химический состав 115

— хромосфера 120

— циклы 118

средняя плотность вещества

Метагалактики 185

Телескопы 6

— зеркально-линзовые 7

— оптические 6

— радиотелескопы 9

— рефлекторы 7

— рефракторы 6

— солнечные 111

тёмная материя 184

тёмная энергия 184

терминатор 66

туманности 163

— диффузные 163

— планетарные 163, 164

Угловое расстояние 6

ФЕСЕНКОВ 195

ФРАУНГОФЕР 115

ФРИДМАН 182, 185

ХАББЛ 180

Чёрные дыры 190

Школьный астрономический
календарь (ШАК) 4, 226

ШМИДТ 195

Эволюция

— Вселенной 183

— планет 195

— Солнца и звёзд 188

ЭЙНШТЕЙН 182

экзопланеты 153, 197

эклиптика 22

Эффект Доплера 141

ОГЛАВЛЕНИЕ

Как работать с учебником	3
I. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ	5
§ 1. Предмет астрономии	—
§ 2. Звёздное небо	12
§ 3. Изменение вида звёздного неба в течение суток	15
§ 4. Изменение вида звёздного неба в течение года	19
§ 5. Способы определения географической широты	23
§ 6. Основы измерения времени	27
II. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	33
§ 7. Видимое движение планет	—
§ 8. Развитие представлений о Солнечной системе	37
§ 9. Законы Кеплера — законы движения небесных тел	42
§ 10. Обобщение и уточнение Ньютоном законов Кеплера	45
§ 11. Определение расстояний до тел Солнечной системы и размеров этих небесных тел	49
III. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	56
§ 12. Система «Земля — Луна»	57
§ 13. Природа Луны	63
§ 14. Планеты земной группы	70
§ 15. Планеты-гиганты	86
§ 16. Астероиды и метеориты	96
§ 17. Кометы и метеоры	101
IV. СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДЫ	110
§ 18. Общие сведения о Солнце	—
§ 19. Атмосфера Солнца	116
§ 20. Источники энергии и внутреннее строение Солнца	125
§ 21. Солнце и жизнь Земли	129
§ 22. Расстояния до звёзд	135
§ 23. Пространственные скорости звёзд	139
§ 24. Физическая природа звёзд	143
§ 25. Связь между физическими характеристиками звёзд	147
§ 26. Двойные звёзды	150
§ 27. Физические переменные, новые и сверхновые звёзды	154
V. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ	162
§ 28. Наша Галактика	—
§ 29. Другие галактики	169
§ 30. Метагалактика	176
§ 31. Происхождение и эволюция звёзд и галактик	187
§ 32. Происхождение планет и их спутников	192
§ 33. Жизнь и разум во Вселенной (заключительный обзор)	198

ПРИЛОЖЕНИЯ	206
I. Некоторые важнейшие события в истории астрономии (за последние 6 тыс. лет)	—
II. Важнейшие даты в освоении космического пространства	216
III. Греческий алфавит	221
IV. Подвижная карта звёздного неба (ПКЗН)	222
V. Школьный астрономический календарь (ШАК)	226
VI. Основные сведения о Земле	—
VII. Основные сведения о Луне	—
VIII. Основные сведения о Солнце	229
IX. Основные сведения о планетах	230
X. Важнейшие параметры атмосфер планет земной группы	231
XI. Названия наиболее ярких звёзд	—
XII. Основные сведения о наиболее ярких звёздах, видимых в России	232
XIII. Примерные темы рефератов	233
XIV. Список рекомендуемой литературы	—
XV. Список полезных интернет-ресурсов	235
Предметно-именной указатель	236

Учебное издание

Левитан Ефрем Павлович

АСТРОНОМИЯ

11 класс

Базовый уровень

Учебник

Центр физики и астрономии

Ответственный за выпуск *Е. А. Гришкина*. Редактор *Н. В. Мелешко*. Художник *С. Г. Бессонов*. Художественный редактор *Т. В. Глушкова*. Редактор карт *Н. В. Заболотная*. Технический редактор и верстальщик *А. Г. Хуторовская*. Корректор *Е. В. Павлова*

Подписано в печать 22.11.2021. Формат 60×90/16. Гарнитура SchoolBook.
Уч.-изд. л. 12,7. Усл. печ. л. 15,0. 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.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА



Радиус Земли, $R_{\oplus}$ 6 371 км
Радиус Солнца, $R_{\odot}$ 696 000 км
Астрономическая единица (а. е.) 149 600 000 км

	Радиус, $\times R_{\oplus}$	Расстояние до Солнца, а. е.
Солнце	109,00	
Меркурий	0,38	0,39
Венера	0,95	0,72
Земля	1,00	1,00
Марс	0,53	1,52
Юпитер	10,97	5,20
Сатурн	9,10	9,54
Уран	3,99	19,19
Нептун	3,81	30,07

Граница Солнечной системы ~ 100 а. е.

ГАЛАКТИКИ

ТУМАННОСТИ

ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ

НЕПРАВИЛЬНАЯ

ДИФFUЗНАЯ

ДВОЙНАЯ

ШАРОВОЕ
СКОПЛЕНИЕ

ПЛАНЕТАРНАЯ

СПИРАЛЬНАЯ

РАСSEЯННОЕ
СКОПЛЕНИЕ