

А.В. ЗАСОВ
Э.В. КОНОНОВИЧ

АСТРОНОМИЯ



„Просвещение“

11

ББК 22.6я72
3-36

Б И Б Л И О Т Е К А
ВОЛГ
{облас

Географ

Профизмат

С

З

06

100

100

Засов А. В., Кононович Э. В.

3-36 Астрономия: Учеб. для 11 кл. шк. и классов с углубл. изуч.
физики и астрономии.— М.: Просвещение, 1993.— 160 с.: ил.—
ISBN 5-09-004329-9.

3 $\frac{4306021200-577}{103(03)-93}$ БЗ 1993/94, доп. № 1, № 39

ББК 22.6я72

ISBN 5-09-004329-9

© Засов А. В., Кононович Э. В., 1993

I. ВВЕДЕНИЕ

1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

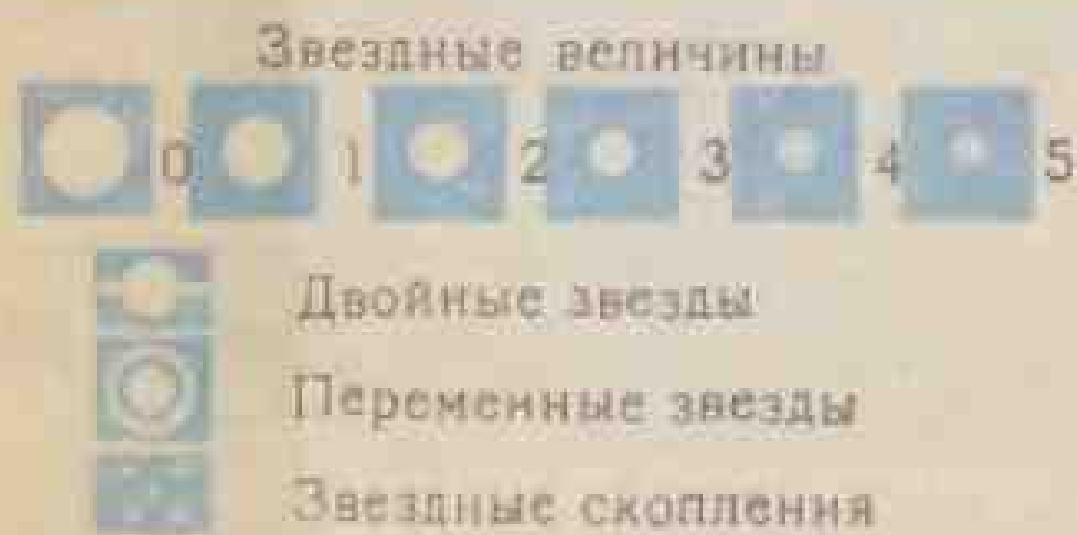
1.1. Что изучает астрономия. Наша Земля — небольшая планета, принадлежащая безграничному миру, называемому Вселенная или по-гречески — космос.

Вспомним, какие светила можно наблюдать на небе. Прежде всего это ближайшие к нам космические тела: Солнце, Луна, большие планеты, которые видны как яркие объекты. Вместе с Землей они входят в состав Солнечной системы. В безлунную ясную ночь невооруженным глазом можно наблюдать несколько тысяч далеких звезд, по своей при-

роде подобных нашему Солнцу. Огромное число более слабых объектов доступно изучению только при помощи специальных инструментов — телескопов.

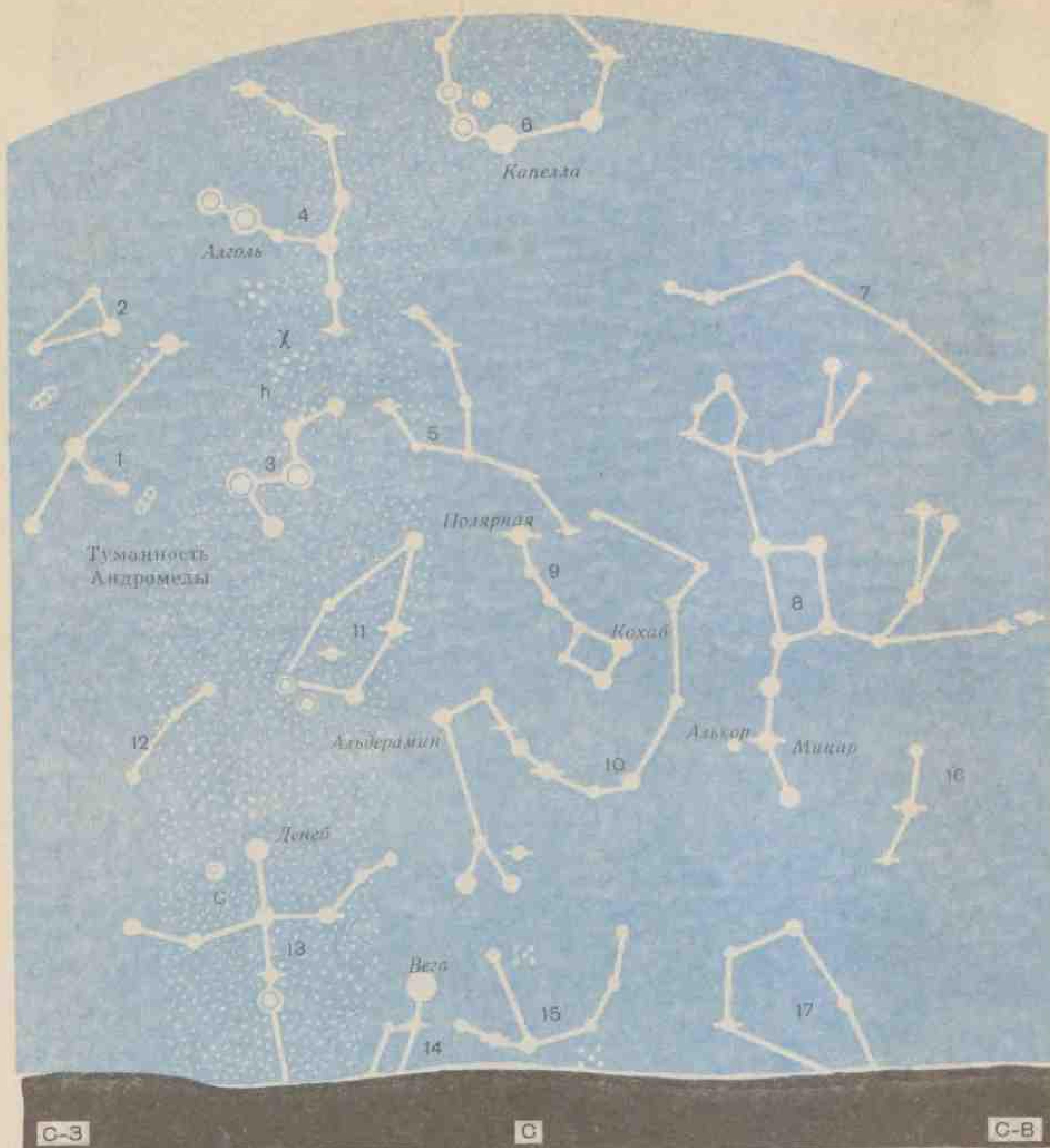
В темную ясную ночь вдали от городских огней хорошо видна проходящая через все небо широкая бледная полоса Млечного Пути (рис. 1.1 и 1.2). Она образована огромным числом слабых звезд, входящих вместе с более яркими звездами и Солнечной системой в состав гигантской звездной системы — на-

Рис. 1.1. Осенне-зимнее ночное звездное небо и Млечный Путь. Южная часть



Цифрами обозначены созвездия:

1 Нормы	7 Близнецы	13 Овен
2 Большой Пёс	8 Возничий	14 Пегас
3 Голубь	9 Телец	15 Водолей
4 Заяц	10 Персей	16 Рыбы
5 Орион	11 Треугольник	17 Кит
6 Малый Пёс	12 Андромеда	18 Эридан



Цифрами обозначены созвездия

1 Андромеда	7 Рысь	13 Лебедь
2 Треугольник	8 Большая Медведица	14 Лира
3 Кассиопея	9 Малая Медведица	15 Геркулес
4 Персей	10 Дракон	16 Гонимые Псы
5 Жираф	11 Цефей	17 Волопас
6 Возничий	12 Ящерица	

Рис. 1.2. Северная часть осенне-зимнего неба
шей Галактики (рис. 1.3). Мно-
жество других подобных ей звезд-

ных систем, называемых галакти-
ками, можно сфотографировать при
помощи телескопов.

Всевозможные космические объ-

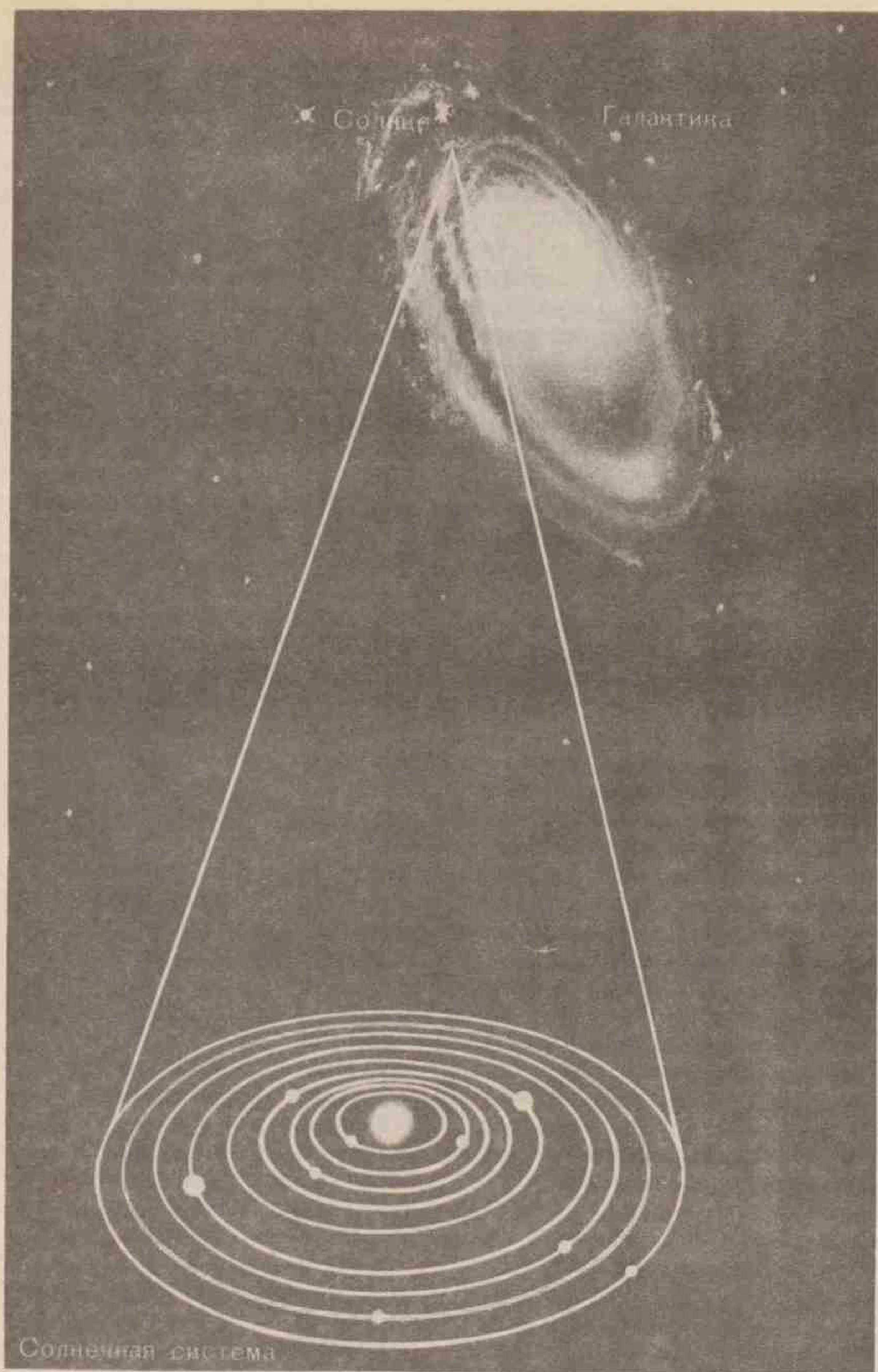


Рис. 1.3. Расположение Солнечной системы в Галактике

екты, начиная с самых близких к нам и кончая наиболее удаленными, которые мы можем наблюдать, а также всю безграничную Вселенную как целое исследует наука астрономия (по-греч. «астрон» — светило, «номос» — закон).

Астрономия изучает строение Вселенной, движение, физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел и образованных ими систем.

Астрономия исследует также и фундаментальные свойства всей окружающей нас Вселенной. Не зная их, невозможно выяснить, почему мир вокруг нас именно такой, каким мы его наблюдаем. Приведем один пример. Казалось бы, простой вопрос: почему ночью темно? Очевидно, потому, что источник света — Солнце — находится в это время под горизонтом. Такой ответ будет правильным, но далеко не полным. Ведь, кроме Солнца, есть звезды, галактики. И хотя они чрезвычайно далеки, но их очень много. Если Вселенная существует достаточно долго и содержит бесконечное число звезд и звездных систем, более или менее равномерно распределенных в пространстве, то все небо сплошь должно быть «усыпано» звездами и одинаково ярко светиться как днем, так и ночью (и это можно строго доказать). Объяснение этого парадокса уходит своими корнями в глубь сложных физических представлений, описывающих эволюцию Вселенной: мир, в котором мы наблюдаем звезды и галактики, подвержен медленным изменениям. Самое грандиозное из них — это его расширение, которое мы рассмотрим в конце учебника. Оказалось, что оно ослабляет потоки света, приходящие от далеких объектов, уменьшая тем самым их вклад в наблюдаемую

яркость неба. За миллиарды лет сами источники света также меняются. Изучение эволюции звезд, планет, галактик и других образований — одна из важнейших задач астрономии.

1.2. Особенности астрономии. Астрономия основывается прежде всего на наблюдениях. Это является важнейшей ее особенностью.

В отличие от физиков, астрономы лишены возможности ставить эксперименты над изучаемыми объектами. Основную информацию о небесных телах нам приносят световые лучи, радиоволны и другие виды электромагнитного излучения. Направление, откуда приходит свет, указывает положение объекта на небе, а количество и спектральный состав излучения дают возможность судить о физических свойствах источника и расстоянии до него.

Только в последние десятилетия благодаря приборам, устанавливаемым на космических аппаратах, некоторые тела Солнечной системы начали изучать непосредственно методами геологии, геофизики и других наук, а именно: анализировать образцы лунного грунта, исследовать межпланетную среду, зондировать атмосферы планет, используя датчики температуры, давления и т. д.

Кроме видимых и невидимых глазом электромагнитных лучей, со всех сторон к Земле приходят из космоса потоки быстро летящих ядер атомов различных химических элементов, называемые космическими лучами. Их излучение также позволяет многое узнать о свойствах вещества во Вселенной.

Вспомните, в каком еще случае можно подвергнуть лабораторным исследованиям вещество из космоса.

Другой особенностью астрономии является ее эволюционный характер: она изучает не только наблюдаемое состояние, но и развитие исследуемых объектов. Современная астрономия рассматривает звезды, газовые туманности, галактики не как неизменные объекты, а как непрерывно изменяющиеся, эволюционирующие тела и системы тел.

Изучение эволюции небесных тел облегчает то обстоятельство, что одновременно мы наблюдаем множество объектов различного возраста. Рассматривая небесные тела на разных стадиях их эволюции, можно восстановить отдельные этапы «жизни» звезд, галактик и других объектов.

Масштабы наблюдаемой части Вселенной огромны. Для измерения больших расстояний обычно используют специальные, достаточно крупные единицы длины, например *световой год* (св. г.).

Световым годом называется расстояние, которое свет проходит за 1 год. В году примерно $3,2 \cdot 10^7$ с. Умножая на это число скорость света (300 000 км/с), получим, что $1 \text{ св. г.} \approx 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м.}$

От Луны до Земли свет идет $1\frac{1}{3}$ с, от Солнца — $8\frac{1}{3}$ мин, от самой далекой планеты Солнечной системы — Плутона — примерно 6 ч, от ближайшей к Солнцу звезды Проксима Центавра — почти 4 года, от ближайших к нам галактик — сотни тысяч и миллионы лет (рис. 1.4). До самых далеких наблюдаемых галактик — несколько миллиардов световых лет.

Из-за большого времени распространения света очень далекие объекты наблюдаются такими, какими они были в прошлом, что дает воз-

можность, сравнивая их с более близкими, исследовать те эволюционные изменения, которые происходят в окружающей Вселенной за большие промежутки времени.

1.3. Связь астрономии с другими науками. Астрономия тесно связана со многими науками, и прежде всего с физикой и математикой, достижения которых она широко использует. В свою очередь, астрономия оказывает большую помощь физике и математике. Много важных методов математики было разработано в связи с проблемами астрономии. Большинство физических идей и теорий в той или иной степени прошли или проходят проверку в астрономии: законы классической механики и теории относительности, элементарных частиц и строения атома, теории взаимодействия вещества с излучением и т. д.

Для современной физики космическое пространство представляет собой незаменимую лабораторию, в которой вещество находится в самых разнообразных условиях — от сильно разреженного газа в пространстве между галактиками до сверхплотных состояний в нейтронных звездах, при температурах, как близких к абсолютному нулю вдали от звезд, так и достигающих десятков и сотен миллионов градусов в их недрах, и т. д. Вещество в таких экстремальных состояниях нельзя получить на Земле. Поэтому его исследование методами астрономии позволяет проверить существующие физические теории и лучше понять *фундаментальные свойства материи*.

Помимо физики и математики, с которыми в настоящее время астрономия органически связана, она оказывает большую помощь и многим другим наукам, например геологии, геофизике и биологии, изучая те

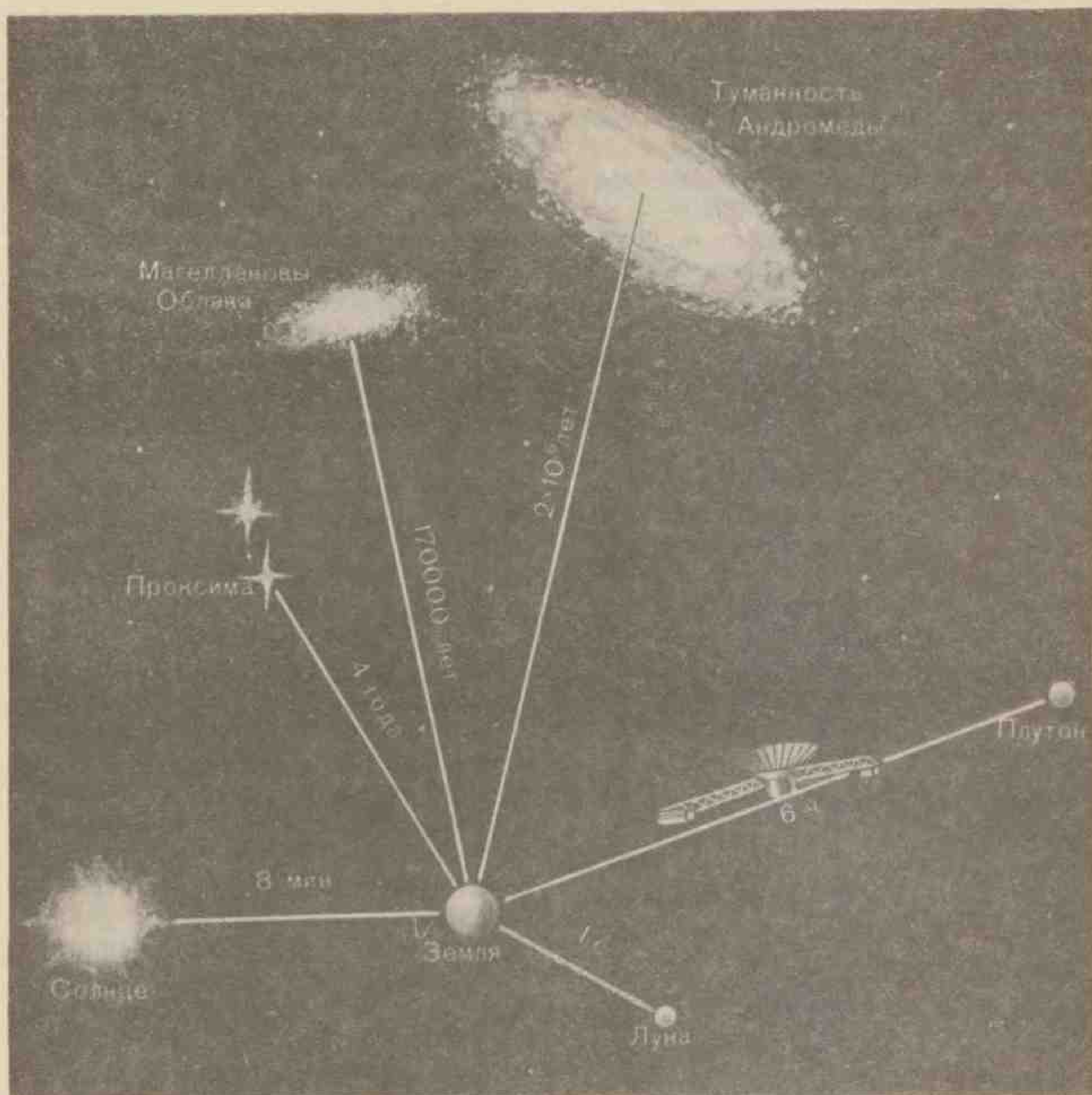


Рис. 1.4. Время, за которое свет доходит до Земли от различных объектов

условия, в которых возникла и развивалась Земля. По астрономическим явлениям, упоминаемым в древних летописях и хрониках, она помогает истории уточнять даты важных исторических событий.

1.4. Развитие астрономии. Астрономия — одна из древнейших наук. Она возникла в процессе практи-

ческой деятельности людей. Наиболее наглядно это проявилось в выработке календарной системы. Так, например, развитие сельского хозяйства сильно зависит от сезонных явлений, которые надо уметь предсказывать, потому что среди них важное место занимают периодические наступления холодов, дождей, засух, разливов рек и т. п. Уже с незапамятных времен было замечено, что климатические явления по-

вторяются через определенный промежуток времени, который был назван *годом*. Замечая положения небесных светил, люди обнаружили, что в разное время года, но в одно и то же время суток восходят и заходят различные звезды. Изучение звездного неба помогало предсказывать моменты наступления важнейших сезонных явлений. Так в древности начал разрабатываться *календарь* и были заложены принципы измерения больших промежутков времени.

Огромную роль в истории цивилизации сыграли астрономические способы ориентации по странам света и определения положения путешественников на земном шаре. Уже тысячи лет назад мореплаватели умели ориентироваться и водить корабли, находя свой путь в открытом море по звездам.

Вспомните из курса географии, как по звездам можно определить направления стран света и почему с изменением широты места наблюдения меняется вид звездного неба.

Систематические наблюдения небесных светил были начаты еще тысячи лет тому назад в Древнем Египте, Двуречье, Индии и Китае. Положения Солнца, Луны, звезд и планет определялись с помощью простейших угломерных приспособлений и визиров, фиксировавших направление. Имеются остатки древних обсерваторий, где проводились такие наблюдения. В Европе самой древней обсерваторией считаются исполинские каменные глыбы Стоунхенджа (Великобритания), сооруженные еще в каменном веке, около шести тысяч лет тому назад (рис. 1.5).

В странах древнего мира систематические наблюдения за небесными объектами и их движением были делом служителей культа — жрецов. Уже тогда астрономия носила как мировоззренческий, так и практический характер. Появление комет и «новых» звезд, затмения Солнца и Луны, а также многие другие явле-

Рис. 1.5. Древняя обсерватория Стоунхендж



ния интерпретировались как божественные знаки, предупреждающие о тех или иных земных событиях. Накопление информации, полученной из астрономических наблюдений, сыграло очень большую роль в развитии цивилизации, поскольку позволило создать различные системы календаря, определить продолжительность года. Но астрономии как фундаментальной науки еще не существовало. Происхождение и строение Вселенной были предметом мифологии.

Философы Древней Греции первыми поставили вопрос об изучении строения окружающего мира, об оценке расстояний до небесных тел на основе астрономических наблюдений. Для объяснения наблюдаемых движений Солнца, Луны и планет были разработаны сложные схемы их движения по окружностям. Философы античного мира смогли не только понять, что Земля — шар, висящий, ни на что не опираясь, но и определить его радиус из астрономических наблюдений. Аристарх Самосский уже в III в. до н. э. показал, что Солнце значительно больше Земли. Была подорвана вера в то, что Земля покоится в центре мира.

В средние века в Европе развитие новых идей затормозилось, а многие достижения античной науки оказались забытыми или отвергнутыми. Хотя астрономические наблюдения продолжались, общие концепции строения мира оставались религиозно-догматическими. Землю снова стали считать плоской.

Только в эпоху Возрождения верные догадки древних мыслителей получили дальнейшее развитие. Николай Коперник возродил и обосновал гелиоцентрическую систему мира, в которой Земля как рядо-

вая планета обращается вокруг Солнца. Первые кругосветные путешествия не оставили сомнений в шарообразности Земли. Леонардо да Винчи, развивая идеи Демокрита и других античных философов, рассматривал Землю и небесные светила как тела одной природы.

С развитием техники появились более совершенные астрономические угломерные инструменты. С их помощью были уточнены законы движения планет, что впоследствии сыграло большую роль в установлении основных законов механики.

Изобретение телескопа в XVII веке раздвинуло границы наблюдаемой Вселенной. Перед астрономией открылись новые горизонты. В середине XVII века были определены расстояния до Солнца и размеры планетных орбит. Стали очевидными гигантские размеры окружающего мира по сравнению с масштабами Земли.

Развитие физики, открытие законов механики, газовых законов и законов излучения света со временем не только позволили объяснить в общих чертах наблюдаемую картину мира, но и дали возможность исследовать физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел.

Наблюдаемое положение на небе и движение небесных тел человек издревле пытался связать не только с сезонными изменениями в природе, но и с более сложными явлениями, такими, как стихийные бедствия, войны, различные исторические события, а также с судьбами отдельных личностей. В качестве исходных данных принимались взаимные расположения Солнца, Луны, планет и звезд в определенные моменты времени (например, при рождении человека). Так воз-

никла *астрология*, связывающая судьбы людей и различные земные события с космическими явлениями и претендующая на их предвидение. Она пришла к нам из глубокой древности и отражает культуру прошлых веков. Астрология базируется на чисто формальных соотношениях и правилах, которые обычно допускают довольно вольную трактовку. Важную роль здесь играет и психологический фактор, как, впрочем, и интуиция предсказателя. Научного обоснования у астрологии нет. Однако сама идея о связи земных и космических явлений имеет рациональное зерно. Современная наука активно изучает, например, солнечно-земные связи — важный раздел геофизики и астрономии.

Историю развития астрономических знаний можно разбить на три основных периода: 1) *древний* — до-телескопический период, в течение которого все накопленные знания основывались только на наблюдениях невооруженным глазом или приобретались при помощи простых угломерных инструментов; этот период завершается гениальным трудом Н. Коперника, совершившим переход от старых геоцентрических представлений к гелиоцентрической системе мира; 2) *классический* период, начавшийся в эпоху Возрождения с первых телескопических наблюдений Г. Галилея и продолжавшийся примерно до середины XIX столетия; теоретической основой астрономии стала в это время механика И. Ньютона; 3) *современный* период, начавшийся с открытия метода спектрального анализа и применения фотографии. В наше время благодаря совершенствованию техники и привлечению космических исследований астрономия стала все-

волновой, т. е. ей доступны практически все виды электромагнитного излучения космических объектов. Использование достижений физики дало возможность изучать физическую картину окружающего мира.

1.5. Значение астрономии. Измерение времени, определение положения наблюдателя на земном шаре и другие практические задачи до сих пор остаются существенными в астрономии. В наше время к ним прибавилось много новых. Например, расчет траекторий космических кораблей и искусственных спутников Земли. Определение их положения и ориентации в пространстве проводится с помощью астрономических методов.

Возникновение космонавтики и космических исследований, которые в последние десятилетия приобрели важное практическое и оборонное значение, было бы невозможным без достаточно высокого уровня астрономических знаний. Такую же большую роль играет изучение околоземного пространства, процессы в котором оказывают сильное влияние на многие геофизические явления.

Наряду с прикладным значением все более усиливается роль астрономии как фундаментальной науки, которая изучает самые общие законы природы, объясняет строение и эволюцию известных объектов, включая и всю Вселенную как целое.

Земля не существует сама по себе, изолированно от окружающего мира. Вместе с Солнцем она возникла в космическом пространстве нашей Галактики миллиарды лет назад. Химические элементы, из которых состоит Земля, также образовались в результате космических процессов. Наша планета, как и все, что на ней находится, испытывает сильное влияние ближайшей к ней

звезды — Солнца, от которого она получает свет и тепло. В атмосферу и на поверхность Земли каждые сутки выпадает огромная масса твердого межпланетного вещества, составляющая сотни тонн. Потоки быстрых элементарных частиц и рентгеновских лучей, непрерывно приходящих из космического пространства, влияют на состояние земной атмосферы. Даже резкие изменения климата, неоднократно происходившие на Земле, могут иметь не только земные, но, как предполагают, и космические причины. Следовательно, астрономия дает возможность лучше понять не только далекие объекты, но и нашу планету — Землю.

Так как астрономия рассматривает наиболее общие закономерности строения мира, она всегда определяла мировоззрение людей. В наше время ее философское значение особенно велико. За свою многовековую историю астрономия собрала и обобщила богатый фактический материал о природе окружающего мира. Эти знания важны для понимания фундаментальных законов природы и места человека в ней, служат основой для борьбы с невежеством, суеверием и предрассудками.

Данные современной астрономии говорят о том, что на любом расстоянии от Земли мир подчиняется известным физическим законам. По мере развития науки представления о природе космических объектов становятся все шире и глубже, но одновременно возрастает и количество нерешенных проблем. Вся история развития астрономии доказывает, что мир познаваем, что всюду во Вселенной действуют одни и те же общие законы природы. Астрономия изучает эти законы и помогает человеку их использовать.

1.6. Вопросы

1. Какие астрономические объекты вам известны? Перечислите их в каком-либо определенном порядке (например, в порядке удаленности от Солнца или Земли). 2. Какое место в астрономии занимает изучение Земли? 3. Перечислите известные вам системы небесных тел. Какие из них не были упомянуты в § 1? 4. В чем различие между понятиями «Галактика» и «галактика»? 5. Дайте наиболее полное и развернутое определение предмета астрономии. 6. Перечислите важнейшие особенности астрономии. 7. Назовите источники информации в астрономии. 8. Приведите известные вам примеры связи астрономии с другими науками. 9. Как возникла астрономия? Охарактеризуйте основные периоды ее развития. 10. Назовите имена известных вам астрономов. К каким периодам относится их деятельность? 11. Могла ли астрология принести какую-нибудь пользу развитию науки? 12. Приведите примеры прикладного и фундаментального значения астрономии. 13. Как астрономические знания связаны с мировоззрением?

1.7. Упражнения

1. Сколько времени идет до нас свет от Сириуса (расстояние $8,1 \cdot 10^{16}$ м)?

2. Пользуясь данными § 1.2, выразите расстояния до Луны, Солнца и Плутона в световых годах. Удобно ли этой единицей измерять расстояния до тел Солнечной системы? Какую более удобную единицу вы предложили бы?

3. Перечислите объекты, которые можно наблюдать невооруженным глазом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА I

Астрономия изучает строение Вселенной, движение, физическую природу, происхождение и эволюцию небесных тел и образуемых ими систем. Важнейшие ее особенности — наблюдательный характер и возможность исследовать эволюцию небесных тел. Она тесно связана с другими науками, прежде всего с физикой и математикой, и, подобно им, имеет большое прикладное значение. Астрономия является фундаментальной наукой, раскрывающей основные закономерности природы и способствующей формированию мировоззрения.

Астрономия возникла в глубокой древности в связи с практическими потребностями людей. В первую очередь изучалось видимое движение ярких объектов: Солнца, Луны, планет и звезд. Выявление закономерностей их движения было использовано для разработки календарной системы; на основе астрономических наблюдений были предложены способы определения географического положения наблюдателя. Современная астрономия исследует физические свойства космических тел, их происхождение и эволюцию, фундаментальные законы природы.

II. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

2. ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ СВЕТИЛ

2.1. Созвездия. Человек с нормальным зрением в ясную ночь может видеть одновременно на небе 2—3 тыс. звезд. В отличие от Солнца, Луны и планет их относительное расположение почти не меняется со временем. Поэтому картина, образуемая звездами, на небе остается в течение многих веков практически неизменной. Их положение можно зарисовать, нанести на карту.

Еще в древности наблюдатели стали выделять на небе яркие звезды и объединять их в легко запоминающиеся картины — созвездия, давая им названия, связанные с мифами и легендами.

Древние греки в определенных группах звезд видели изображения героев: Персея (рис. 2.1), охотника Ориона, сражающегося с разъяренным Тельцом, царя Цефея, царицы

Рис. 2.1. Созвездие Персея из атласа Яна Гевелия (1660 г., Польша)



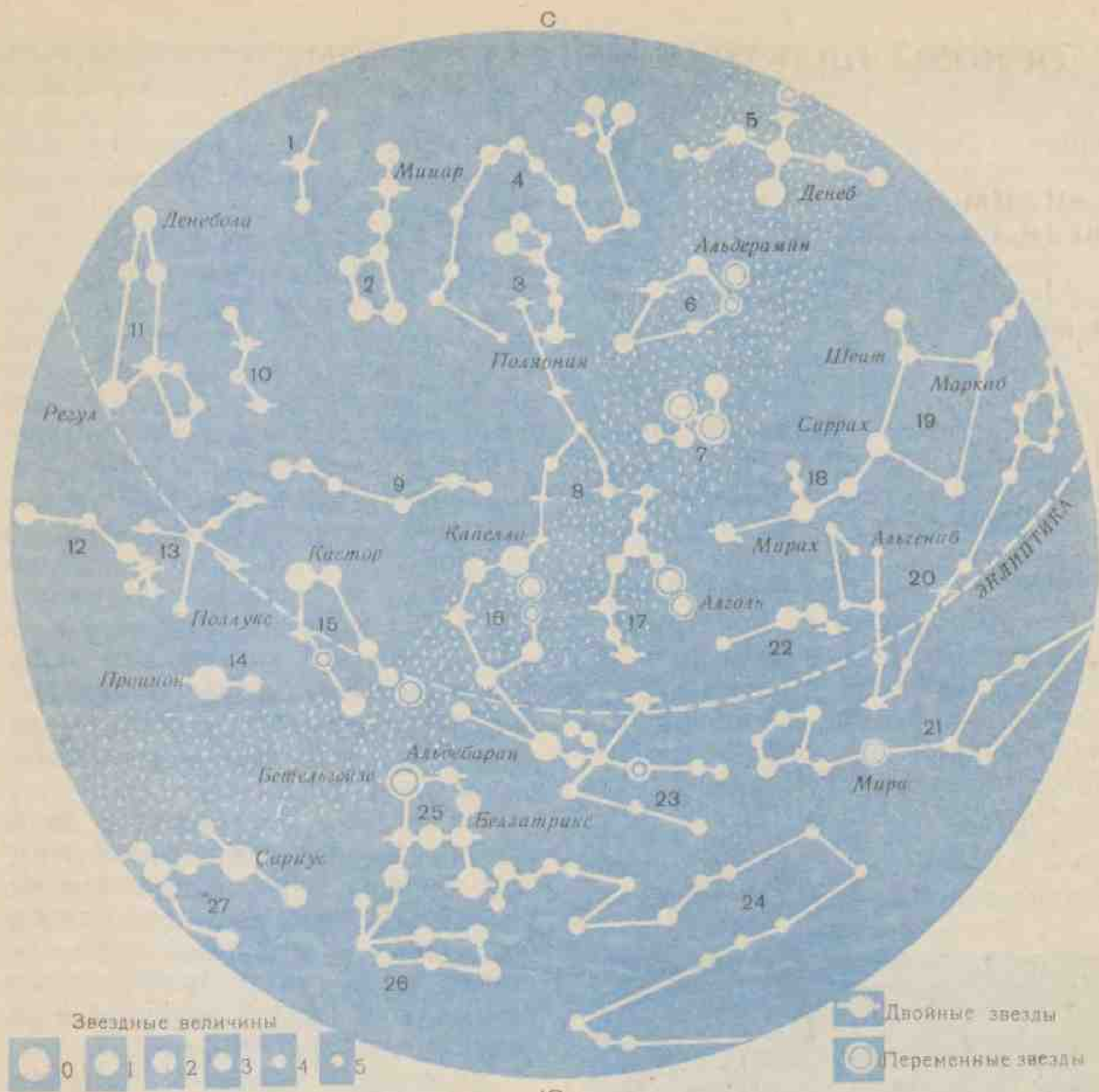


Рис. 2.2. Созвездия Северного полушария звездного неба

Кассиопеи и их дочери Андромеды, которую Персей спас от мифического чудовища — Кита.

Все небо принято разделять на 88

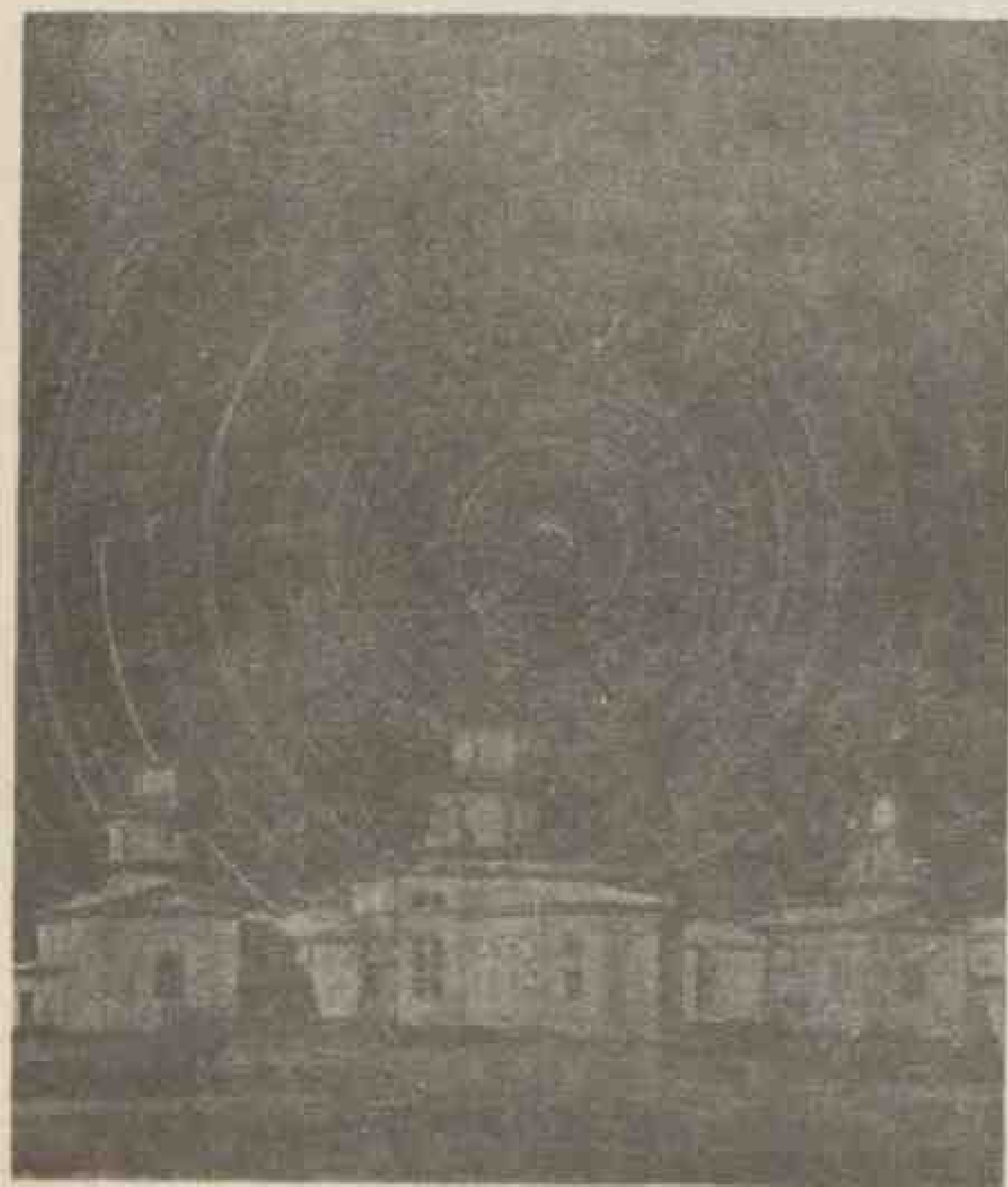
строго определенных участков — созвездий. Границы между ними условны и не имеют никакого физического смысла. Наиболее яркие звезды каждого созвездия обозначены буквами греческого алфавита: α (альфа), β (бета), γ (гамма),

δ (дельта) и т. д. — в порядке убывания их кажущейся яркости, которая измеряется в специальных единицах — звездных величинах (подробно об этом будет сказано в § 21). Чем слабее звезда, тем больше ее звездная величина.

Несколько десятков наиболее ярких звезд имеют названия (рис. 2.2). Например, Вега (α *Лиры*), Сириус (α *Большого Пса*), Полярная (α *Малой Медведицы*).

2.2. Суточное движение светил. В средних широтах Солнце всегда восходит в восточной стороне неба. Оно появляется из-за удаленных предметов или неровностей земного рельефа, затем постепенно поднимается над горизонтом и, наконец, в полдень достигает наивысшего положения на небе. Наблюдатель в северном полушарии Земли при этом видит Солнце на юге, а находящийся в южном полушарии — на севере. После полудня Солнце начи-

Рис. 2.3. Следы околополярных звезд, сфотографированные неподвижной камерой



нает опускаться, приближаясь к горизонту, и заходит в западной части неба.

Дневной путь Солнца на небе симметричен относительно направления север — юг.

Подобное движение по небу в течение суток можно заметить и у других светил: Луны, звезд и планет. В целом создается впечатление, что небосвод вращается как целое вокруг некоторой оси, называемой *осью мира*. Наблюдая ясной ночью звезды в северной части неба, можно заметить, что они описывают концентрические круги с центром в некоторой точке, близкой к звезде α *Малой Медведицы* (*Полярная*). Эта точка называется *северным полюсом мира*. В южном полушарии можно найти диаметрально противоположную ей точку — *южный полюс мира*. Ось мира проходит через оба полюса мира.

На рисунке 2.3 приведена фотография звездного неба вблизи северного полюса мира, полученная неподвижной камерой, затвор которой был открыт на несколько часов. Видимые пути звезд изобразились дугами окружностей одинаковой угловой протяженности.

Кажущееся вращение небесного свода вокруг оси мира — следствие действительного вращения Земли вокруг своей оси, происходящего в противоположную сторону, т. е. с запада на восток. Поэтому ось мира параллельна оси вращения Земли.

Видимое движение светил, происходящее из-за вращения Земли вокруг оси, называется *суточным движением*, а период вращения Земли вокруг оси — *сутками*.

2.3. Небесная сфера. Небесные объекты так далеки, что мы не замечаем, на каком расстоянии они на-

ходятся. Кажется, что все они одинаково удалены и как бы расположены на небосводе, окружающем наблюдателя. Поэтому в астрономии для определения взаимного расположения различных объектов на небе измеряют углы между соответствующими направлениями (или угловые расстояния). Для удобства измерений, а также для решения множества практических задач в астрономии используются специальные системы координат на *небесной сфере*.

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса, на которую проецируются объекты, видимые на небе, и в центре которой предполагается наблюдатель.

Примером задач, решаемых при помощи небесной сферы, может служить определение условий видимости тех или иных объектов, изучение их движений и т. д.

2.4. Важнейшие круги и точки на небесной сфере. На рисунке 2.4 изображена небесная сфера. P_N — северный полюс мира, P_S — южный полюс мира, $P_N P_S$ — ось мира, параллельная оси вращения Земли. Глядя из центра O небесной сферы, мы видим, что звезды движутся **вокруг северного полюса мира против часовой стрелки**.

Направление $P_N P_S$ — одно из двух главных направлений, связанных с небесной сферой. Другим является *отвесная линия*.

Отвесной линией называется линия, параллельная направлению силы тяжести (а следовательно, и радиусу Земли) в месте наблюдения.

Отвесная линия пересекает небесную сферу в двух точках: **зени**та Z (над головой наблюдателя) и **нади**ра Z' (диаметрально противоположная точка).

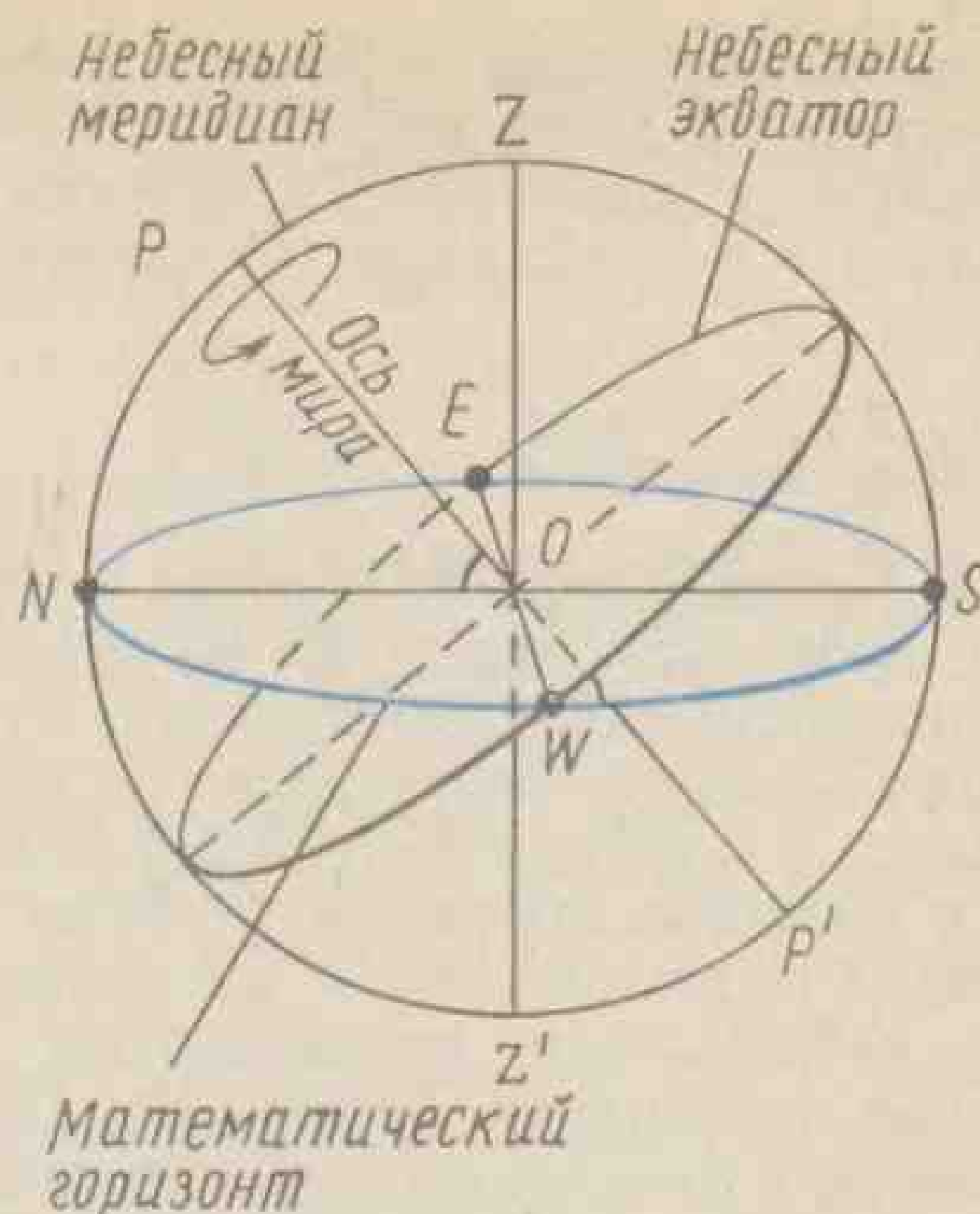


Рис. 2.4. Схематическое изображение небесной сферы

Отсчет углов между точками на небесной сфере производят по дугам больших кругов, измеряя соответствующие центральные углы.

Важнейшими большими кругами на небесной сфере являются следующие:

1) **математический горизонт**, плоскость которого перпендикулярна отвесной линии;

2) **небесный экватор**, плоскость которого перпендикулярна оси мира;

3) **небесный меридиан**, проходящий через зени Z и полюс мира P_N (а следовательно, и через надир Z' и южный полюс мира P_S).

Математический горизонт пересекается с небесным меридианом в точках **севера** N и **юга** S , а с небесным экватором — в точках **востока** E и **запада** W .

Точка **севера** — ближайшая к северному полюсу мира точка горизонта, а **юга** — к южному; точка **востока** справа, а **запада** — слева от точки **севера**.

ВОЛГОГРАДСКИЙ ЦЕНТР
(областная экспериментальная
музыкальная школа
интернат
педагогического профиля)

« » 06 19 »

Математический горизонт делит небесную сферу на две половины — *видимую* и *невидимую*, а небесный экватор — на *северную* и *южную*.

2.5. Вопросы

1. Назовите основные точки и линии небесной сферы. 2. В каком направлении наблюдатель видит суточное движение светил, если он находится в северном полушарии Земли и обращен лицом к югу? Если к северу? (Ответьте на тот же вопрос для наблюдателя, находящегося в южном полушарии Земли.) 3. Где восходят и заходят небесные светила для наблюдателя, находящегося в южном полушарии Земли?

2.6. Упражнения

1. Докажите, что угол между плоскостью горизонта и осью мира равен углу между плоскостью экватора и отвесной линией.

2. Начертите небесную сферу и проведите на ней суточные пути: а) для звезд, которые можно наблюдать в зените; б) для звезд, которые в течение суток бывают только в одной точке горизонта.

3. СИСТЕМА НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

3.1. Небесные координаты. Определить положение точки на поверхности Земли нам помогают географические координаты — *широта* и *долгота*. Точно так же на небесной сфере, для того чтобы изучать видимое расположение и движение светил, вводятся небесные координаты.

Как и на географическом гло-

бусе, положение точки на небесной сфере однозначно определяется двумя углами. Поэтому координат должно быть две. Для их отсчета необходимо ввести основную плоскость, в которой отсчитываются соответствующие углы; кроме того, на этой плоскости надо установить начало и направление отсчета.

Для географических координат основной является плоскость *земного экватора*, началом отсчета — *нулевой меридиан*.

В качестве основной плоскости для отсчета углов на небесной сфере обычно используют плоскость небесного экватора.

Чтобы определить первую координату светила M (рис. 3.1), на сфере проведем через него большой круг P_NMP_S , плоскость которого перпендикулярна плоскости небесного экватора. Его называют *кругом склонения*.

Дуга $M'M$ круга склонения от экватора до светила определяет небесную координату, называемую *склонением* (δ). Склонение отсчитывают от плоскости небесного экватора к северному полюсу мира со знаком «+», а к южному — со знаком «-» и выражают в градусах, минутах и секундах дуги. Эта координата аналогична географической широте.

Вторая координата — *прямое восхождение* (α) — аналогична географической долготе. Она отсчитывается по экватору (дуга $\gamma M'$) с запада на восток от особой точки γ , в которой Солнце бывает 20—21 марта; γ — точка *весеннего равноденствия*. При этом углы обычно выражают не в градусах, а в часах, минутах и секундах времени, из расчета, что 24 ч соответствуют полной окружности (360°). Один градус при этом равен четырем минутам ($1^\circ = 4 \text{ мин}$).

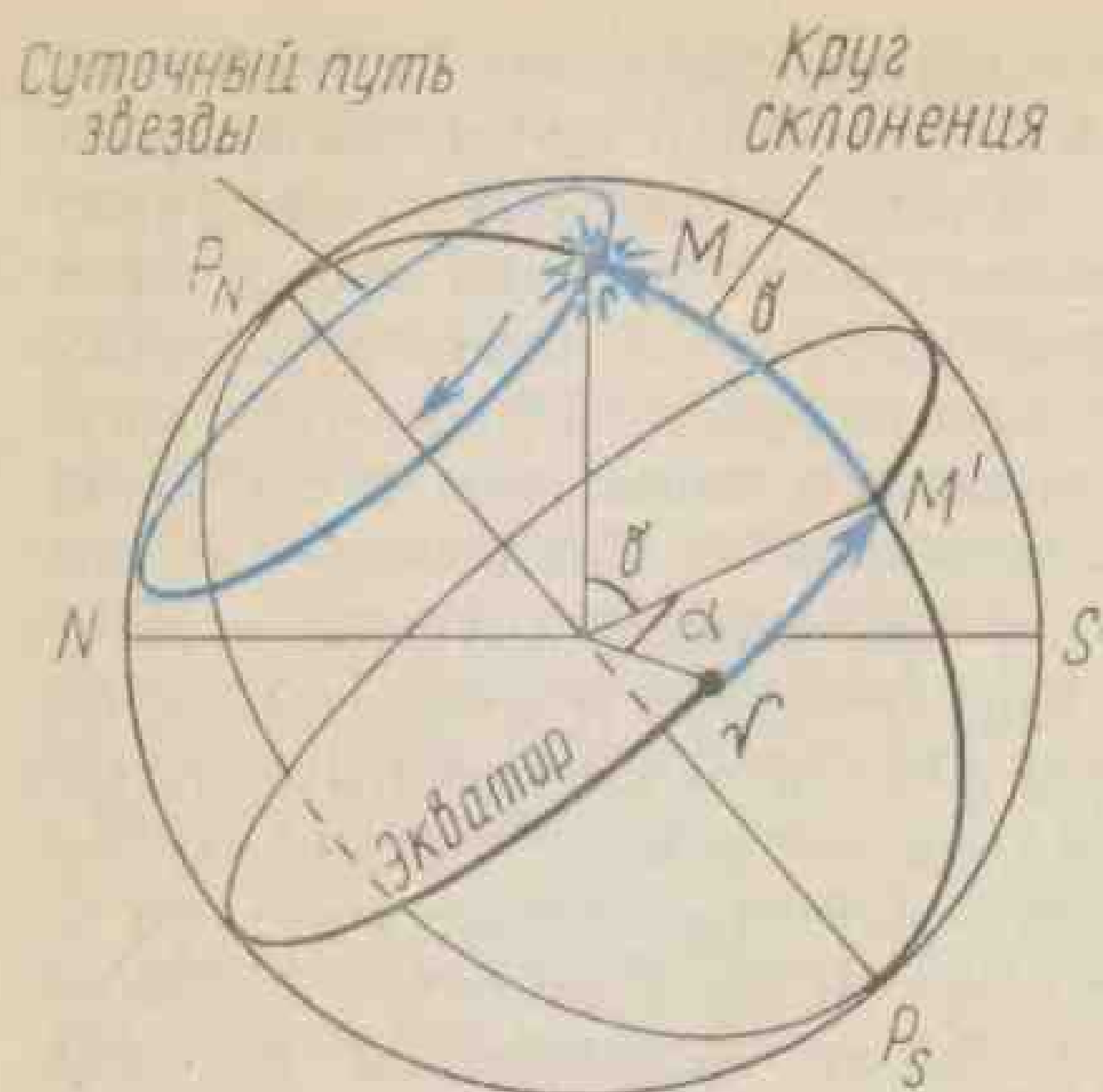


Рис. 3.1. Экваториальная система небесных координат

Вследствие суточного движения все звезды вместе с точкой весеннего равноденствия γ перемещаются по небу с одинаковой угловой скоростью. Поэтому их координаты (α и δ) остаются неизменными, что позволяет создавать звездные карты.

Описанная система координат называется экваториальной. В астрономии широко используются и другие системы координат, например горизонтальная, в которой основной является плоскость математического горизонта. Угол между направлением на светило и плоскостью горизонта называется высотой светила (h). Он отсчитывается от горизонта к зениту со знаком «+» и к надиру со знаком «-».

3.2. Зависимость суточного движения светил от положения наблюдателя на Земле. Суточные пути светил на небесной сфере — окружности, плоскости которых параллельны небесному экватору. Каждая из этих окружностей в двух точках пересекает небесный меридиан (рис. 3.2, а).

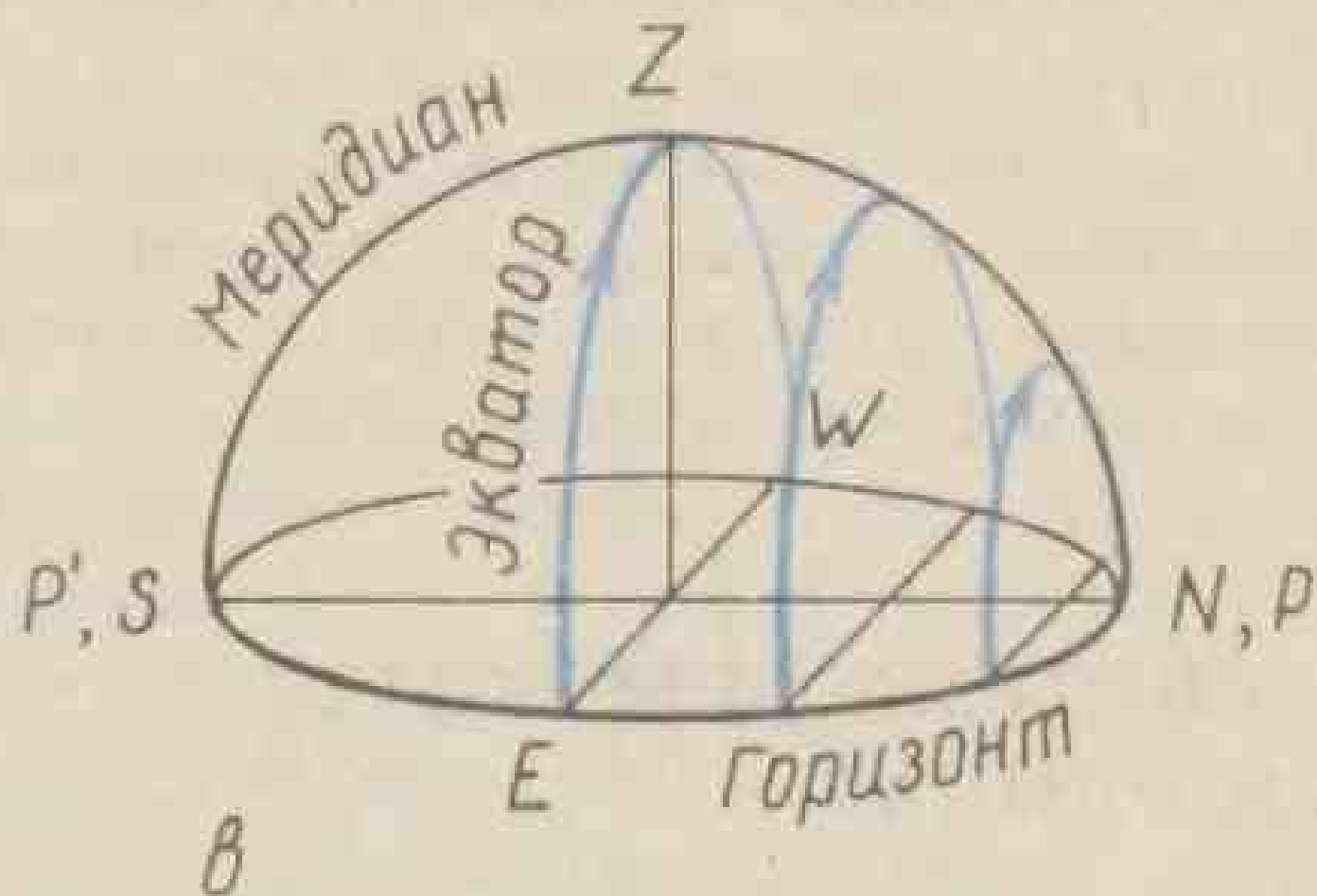
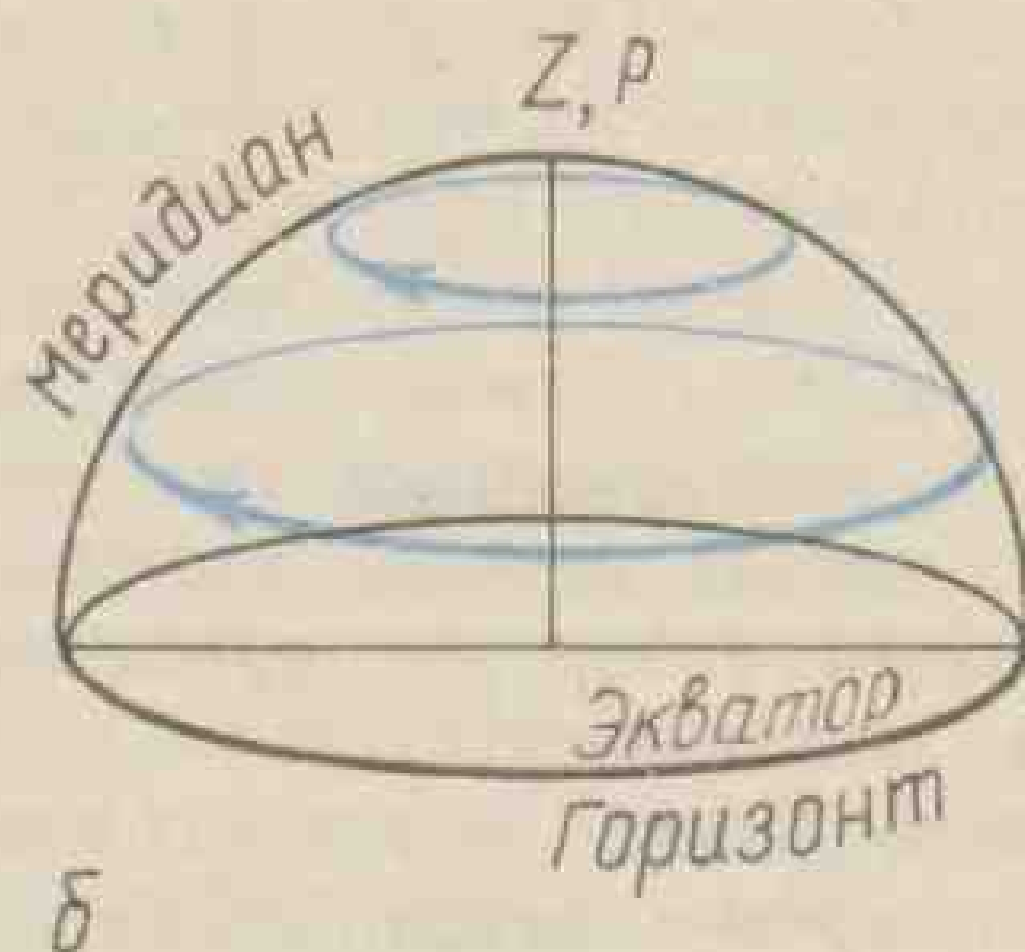
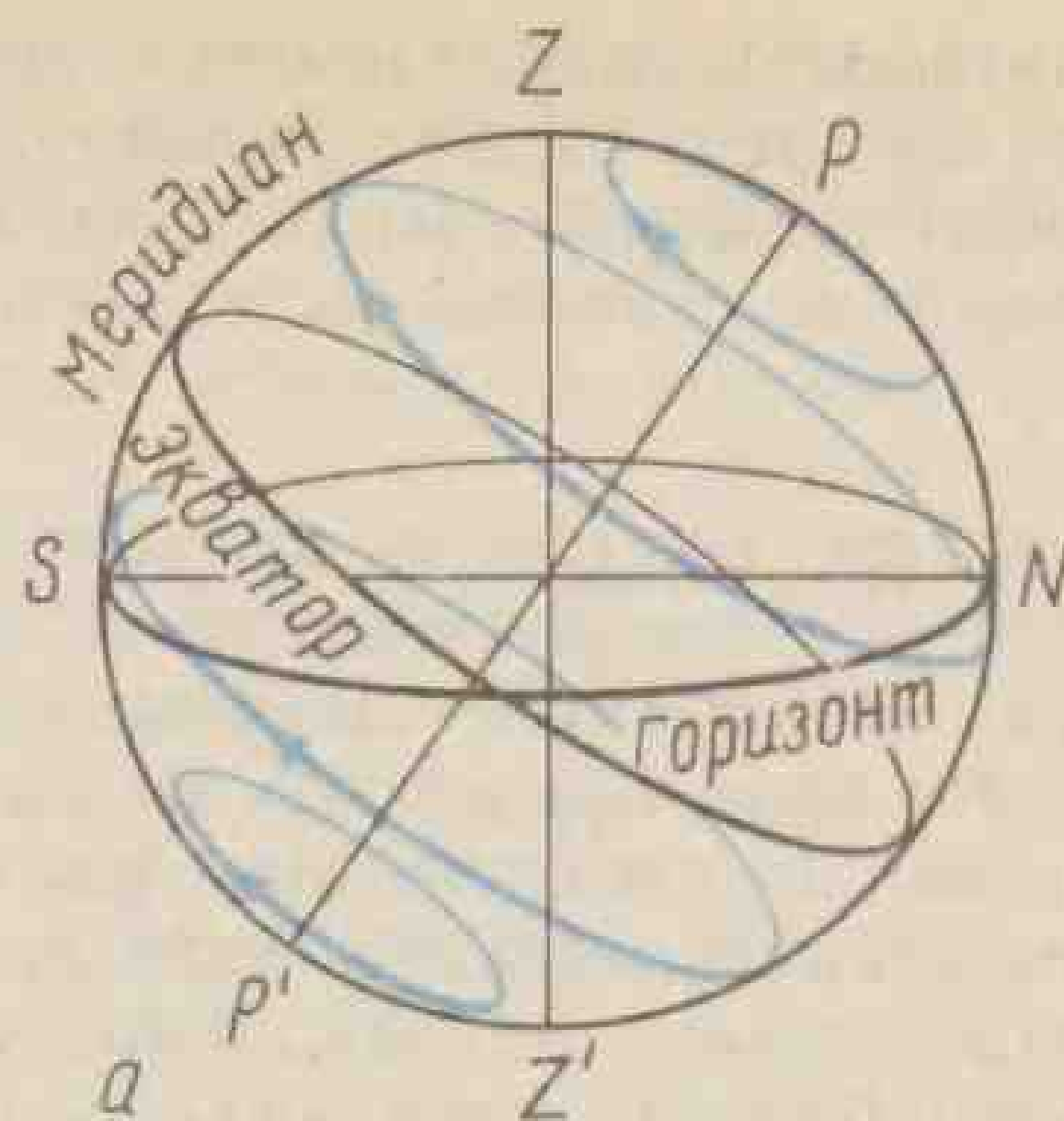


Рис. 3.2. Суточные пути светил:
а) на средних широтах; б) на Северном полюсе Земли; в) на экваторе

Явление пересечения светилом небесного меридиана называется *кульминацией*, причем ближайшее к зениту — *верхней кульминацией*, а более удаленное — *нижней*. В верхней

кульминации светило имеет наибольшую высоту, а в нижней — наименьшую. Момент верхней кульминации центра Солнца называется истинным полуднем, а нижней — истинной полночью.

Высота светила в кульминации зависит от географической широты места наблюдения. Действительно, если наблюдатель находится на одном из географических полюсов Земли, то для него ось мира совпадает с отвесной линией. Высота северного полюса мира над горизонтом в этом случае $h_{PN} = 90^\circ$. Наблюдателю кажется, что небо вращается вокруг вертикальной оси, а суточные пути светил параллельны математическому горизонту, с которым совпадает небесный экватор (рис. 3.2, б). Поэтому для наблюдателя, находящегося на полюсе Земли, высота любого светила над горизонтом в течение суток не меняется.

Предположим теперь, что наблюдатель перемещается от Северного полюса вдоль какого-либо геогра-

фического меридиана. Высота полюса мира для него начнет уменьшаться. Когда наблюдатель достигнет земного экватора, ось мира станет перпендикулярной отвесной линии и будет находиться в плоскости математического горизонта (рис. 3.2, в). Тогда $h_{PN} = 0^\circ$. Полюсы мира окажутся при этом в соответствующих им точках севера N и юга S , а плоскости небесного экватора и суточных путей светил станут перпендикулярными плоскости математического горизонта. Вследствие этого на экваторе могут наблюдаться все светила северного и южного полушарий неба.

Итак, наблюдатели, находящиеся на полюсе Земли и на ее экваторе, видят движение светил совершенно по-разному: на полюсе всегда над горизонтом находятся звезды соответствующего полушария неба, они являются *незаходящими*; на экваторе в каждый момент времени над горизонтом находится половина обоих полушарий неба, все светила в течение суток восходят и заходят.

Когда наблюдатель переходит в южное полушарие Земли, северный полюс мира становится невидимым. Над горизонтом оказывается южный полюс мира, который тем ближе к зениту, чем наблюдатель ближе к южному полюсу Земли. Вблизи южного полюса мира нет яркой звезды, но на расстоянии около 10° имеется красивое созвездие Южного Креста.

3.3. Высота полюса мира над горизонтом. Описанные выше свойства суточных движений светил являются следствием важной теоремы о том, что высота северного полюса мира равна географической широте места наблюдения:

$$h_{PN} = \varphi.$$

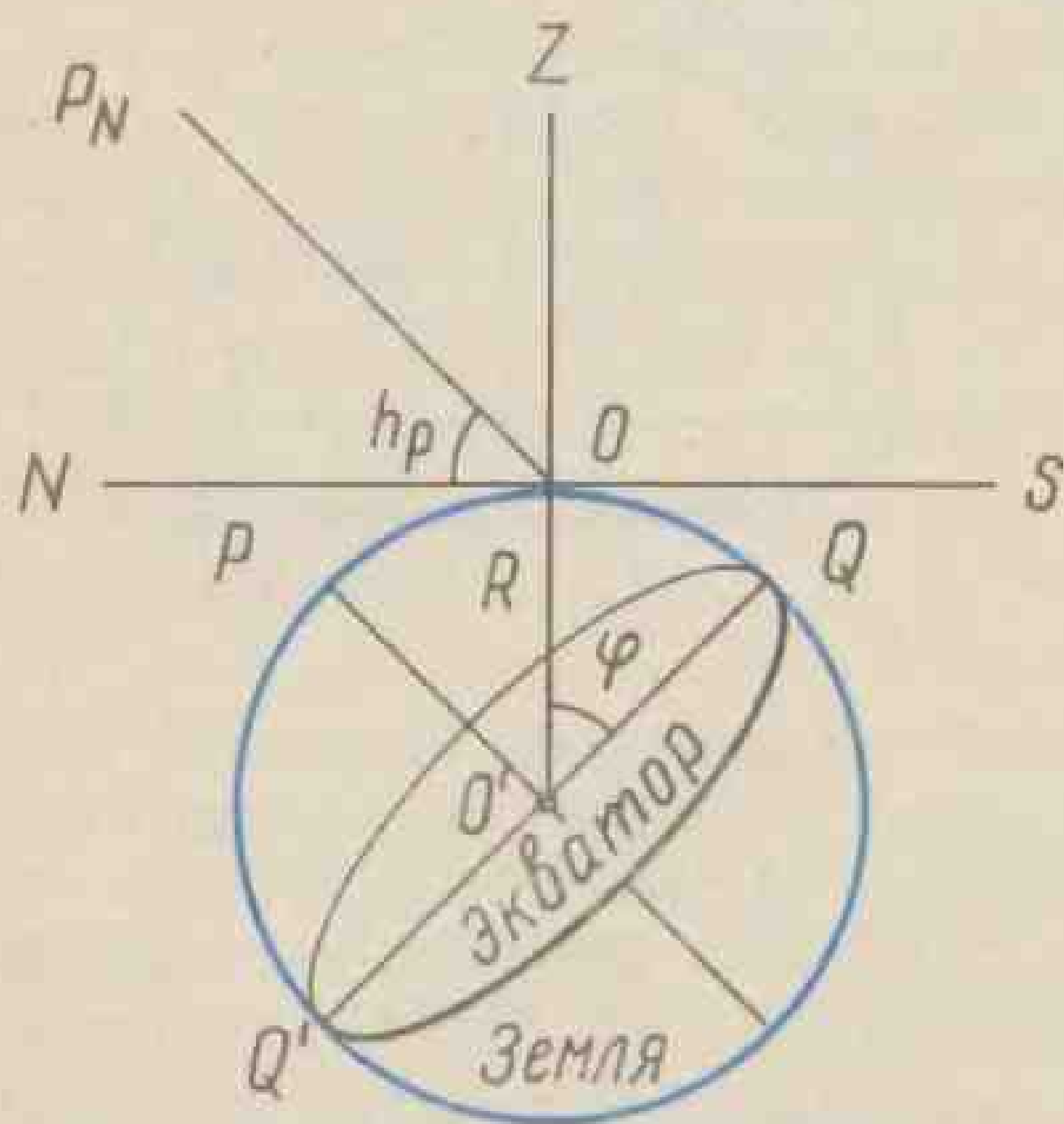


Рис. 3.3. Связь между высотой полюса мира и географической широтой

Докажем это. По определению, географическая широта — это угол между плоскостью экватора и радиусом Земли, проведенным в данную точку (угол φ на рисунке 3.3), а высота полюса мира h_{P_N} — это угол между осью мира и линией NO , лежащей в плоскости горизонта. Ось мира OP_N и ось вращения Земли $O'P$ параллельны, поэтому отвесная линия $O'z$ пересекает их под одним и тем же углом: $\angle P_N O z = \angle P O' O$. Следовательно, равны и дополнительные углы: $\angle O O' Q = \angle N O P_N$, т. е. $\varphi = h_{P_N}$.

3.4. Типовая задача. Высота светила в кульминации.

Условие. Светило M находится в верхней кульминации к югу от зенита (рис. 3.4). Найти его высоту, зная, что широта места равна φ , а склонение светила δ .

Решение. Обозначим искомую высоту через h . Она равна дуге меридиана от точки юга до светила. Как видно из рисунка 3.4, дуга SM равна сумме двух дуг: от горизонта до экватора QS , равной $90^\circ - \varphi$, и от экватора до светила QM , равной δ . Следовательно,

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta.$$

3.5. Видимость светил в данном месте Земли. Как мы знаем (см. § 3.3), на экваторе можно увидеть любое светило, а на полюсе Земли видны только светила соответствующего полушария. Для всех остальных мест на Земле, где географическая широта удовлетворяет условию

$$0 < |\varphi| < 90^\circ,$$

имеются три категории светил: 1) *незаходящие*, у которых высота в нижней кульминации $h > 0$ (они всегда находятся выше горизонта); 2) *восходящие* и *заходящие*; 3) *не-*

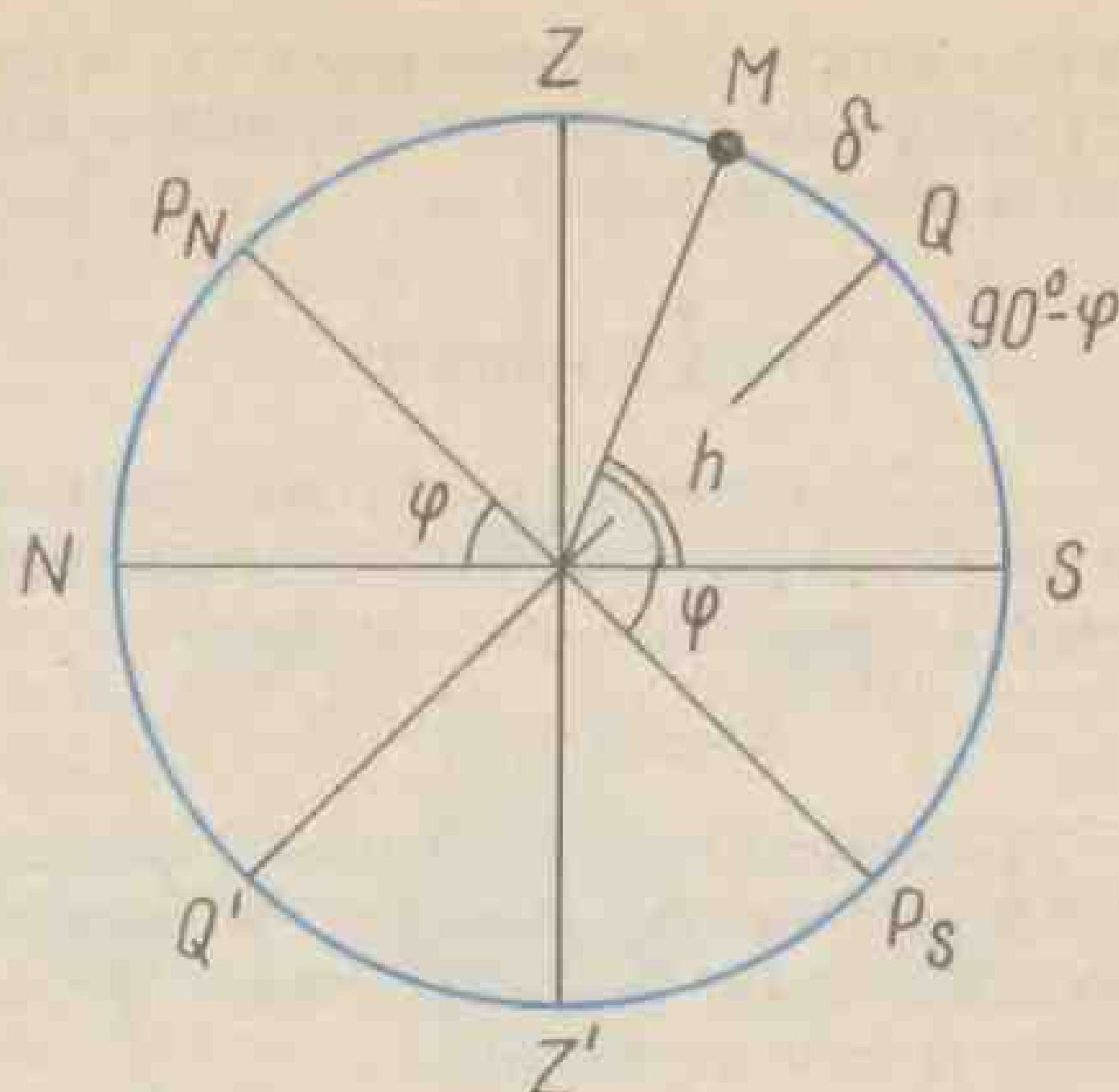


Рис. 3.4. К задаче о высоте светила в кульминации

восходящие, никогда не наблюдаемые в данном месте (высота в верхней кульминации $h < 0$). К какой категории относится данное светило, зависит лишь от его склонения и широты места наблюдения.

3.6. Вопросы

1. Как изменяется при суточном движении светила его: а) высота, б) прямое восхождение, в) склонение?
2. Меняются ли в течение суток высота, прямое восхождение и склонение основных точек небесной сферы: z , z' , P_N , P_S , N , S , E , W ?
3. На сколько отличаются высоты светил в верхней и нижней кульминациях для наблюдателя, находящегося на полюсе Земли?
4. Находясь на полюсе Земли, вы наблюдаете суточный путь неизвестного светила. Как определить, на каком именно полюсе вы находитесь?
5. Справедлива ли теорема о высоте северного полюса мира над горизонтом для южного полушария Земли?
6. Какая аналогичная теорема мо-

жет быть сформулирована относительно высоты над горизонтом южного полюса мира?

3.7. Упражнения

1. Докажите, что высота светила в верхней кульминации, происходящей к северу от зенита,

$$h = 90^\circ - \varphi - \delta.$$

2. Выведите формулы, определяющие высоту светила в нижней кульминации, происходящей к северу и югу от надира.

3. Найдите интервал склонений звезд, которые на данной широте: а) никогда не заходят, б) никогда не восходят, в) могут восходить и заходить.

4. ВИДИМЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЛУНЫ И СОЛНЦА

4.1. Видимое движение и фазы Луны. Люди давно уже заметили, что звезды не изменяют своего взаимного расположения, в то время как другие светила — Солнце, Луна и планеты — перемещаются относительно их. Эти светила, участвуя в общем суточном движении, обладают еще «своим» движением.

Быстрее всех других светил движется на фоне звезд Луна. Это движение всегда происходит с запада на восток, т. е. в сторону, противоположную суточному вращению неба. За несколько часов наблюдений невооруженным глазом легко заметить движение Луны относительно звезд.

Пронаблюдайте Луну в ясную ночь. Вспомните, всегда ли она видна вечером вскоре после захода Солнца. Заметьте расположение Лу-

ны относительно близких к ней ярких звезд. Измерьте расстояние от них до Луны, например в диаметрах видимого ее диска. Выразите это расстояние в градусах, учитывая, что видимый угловой диаметр диска Луны $0,5^\circ$. Повторите наблюдения через несколько часов. В каком направлении и с какой угловой скоростью происходит видимое движение Луны среди звезд?

Видимое перемещение Луны на фоне звездного неба объясняется действительным ее движением вокруг Земли, которое происходит с линейной скоростью около 1 км/с.

Луна не только изменяет видимое свое положение на небе относительно звезд, но и перемещается относительно Солнца. Поэтому с Земли мы видим в различных пропорциях освещенную и неосвещенную ее части (рис. 4.1).

Изменение внешнего вида Луны, вызванное обращением вокруг Земли, называется явлением *фаз Луны*.

Рассмотрим фазы Луны, начиная с *новолуния*, когда Луна проходит на небе мимо Солнца и совсем не видна с Земли.

Через 2—3 дня после новолуния Луну можно увидеть ясным вечером вскоре после захода Солнца на западе. Ее тонкий узкий серп обращен выпуклостью в сторону только что зашедшего Солнца. На фоне неба заметна также и не освещенная Солнцем часть Луны благодаря своему тусклому сероватому свечению. Это *пепельный свет* Луны. Он объясняется тем, что Луну освещает Земля, которая в это время обращена к Луне дневной, т. е. яркой, стороной.

В течение первой недели после новолуния, перемещаясь все время на восток, Луна проходит по небу

среди звезд путь, примерно равный четверти полного круга, и ее угловое расстояние от Солнца достигает 90° . Тогда западная ее половина видна освещенной, а восточная — темной. Эта фаза называется *первой четвертью* (см. рис. 4.1).

Еще через неделю Луна оказывается в противоположной Солнцу части неба и лучше всего видна в середине ночи. В это время весь диск Луны освещен Солнцем. Эта фаза называется *полнолунием*. После полнолуния появляется ущерб с западной стороны. Луна начинает приближаться к положению Солнца на небе, и освещенная ее часть постепенно уменьшается.

Когда снова окажется освещенной только обращенная к Солнцу половина видимого диска Луны, наступает *последняя четверть*. Затем, приближаясь к Солнцу с запада, Луна становится видна только под утро перед восходом Солнца в виде узенького серпа, обращенного выпуклостью на этот раз к востоку. Потом снова наступает новолуние, и Луна перестает быть видимой на небе.

От одного новолуния до следующего проходит около $29\frac{1}{2}$ сут. Этот период смены лунных фаз называется *синодическим месяцем* (греч. «синодос» — соединение).

4.2. Годичное движение Солнца. Наблюдая звездное небо в один и тот же час в течение ряда ночей, можно заметить, что вид его меняется: одни звезды уходят под горизонт, другие появляются; небо как будто медленно поворачивается в ту же сторону, в которую происходит его суточное вращение. Из-за этого каждую ночь любая звезда кульминирует раньше, чем в предыдущую ночь, примерно на 4 мин, а точнее на 3 мин 56 с.

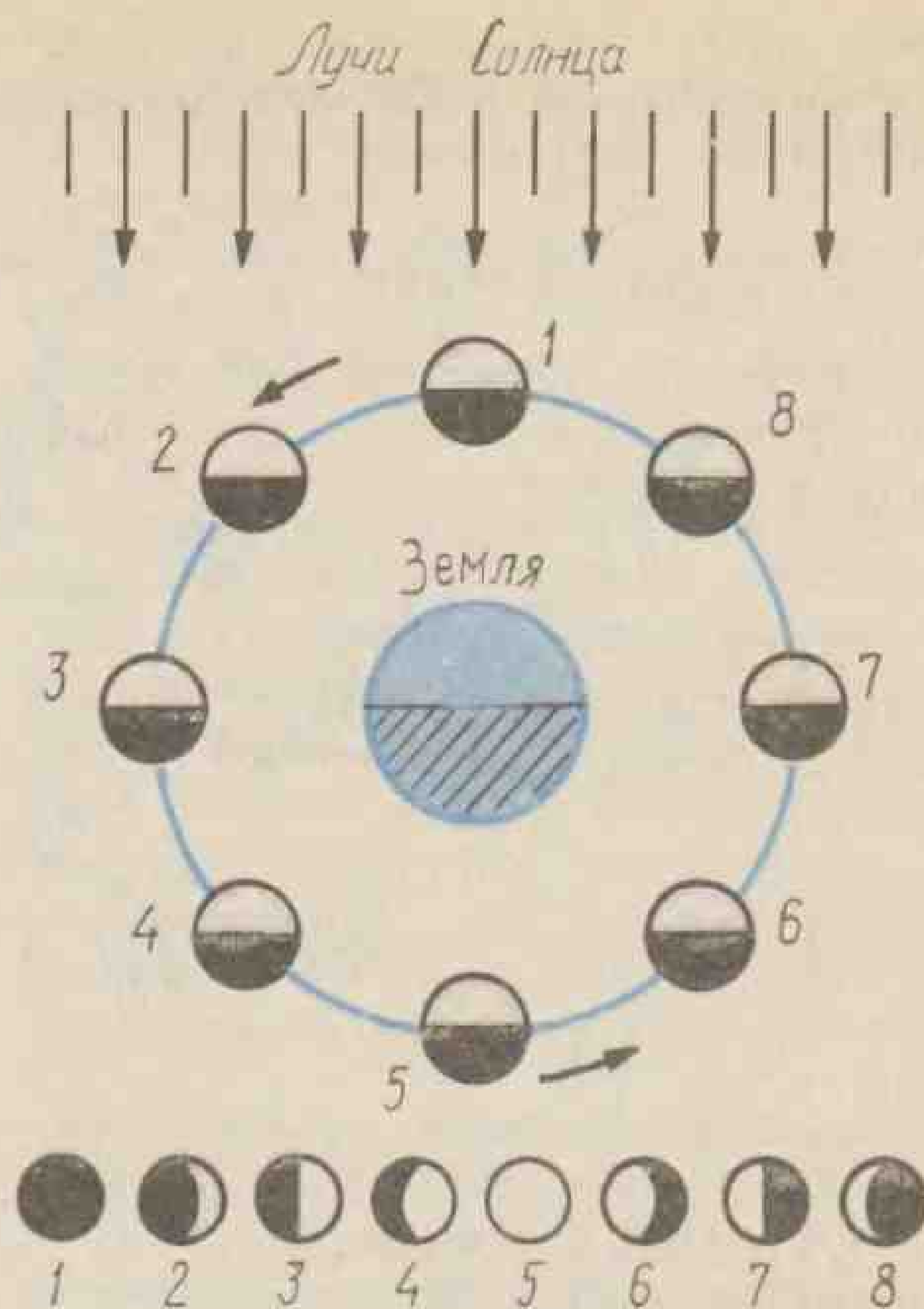


Рис. 4.1. Смена лунных фаз:

1 — новолуние; 3 — первая четверть; 5 — полнолуние; 7 — последняя четверть

Постарайтесь пронаблюдать звездное небо осенью. При помощи подвижной карты звездного неба из «Школьного астрономического календаря» определите, какие созвездия видны. Проведите несколько наблюдений в различные дни, но в одно и то же время. Каждый раз отмечайте созвездия, которые видны на востоке и на западе в это время, а какие проходят через меридиан (кульминируют). Выясните, как изменяется расположение созвездий относительно горизонта за 1—2 месяца.

Выполняя приведенное выше задание, вы, например, заметите, что созвездие Лебедя, которое в начале

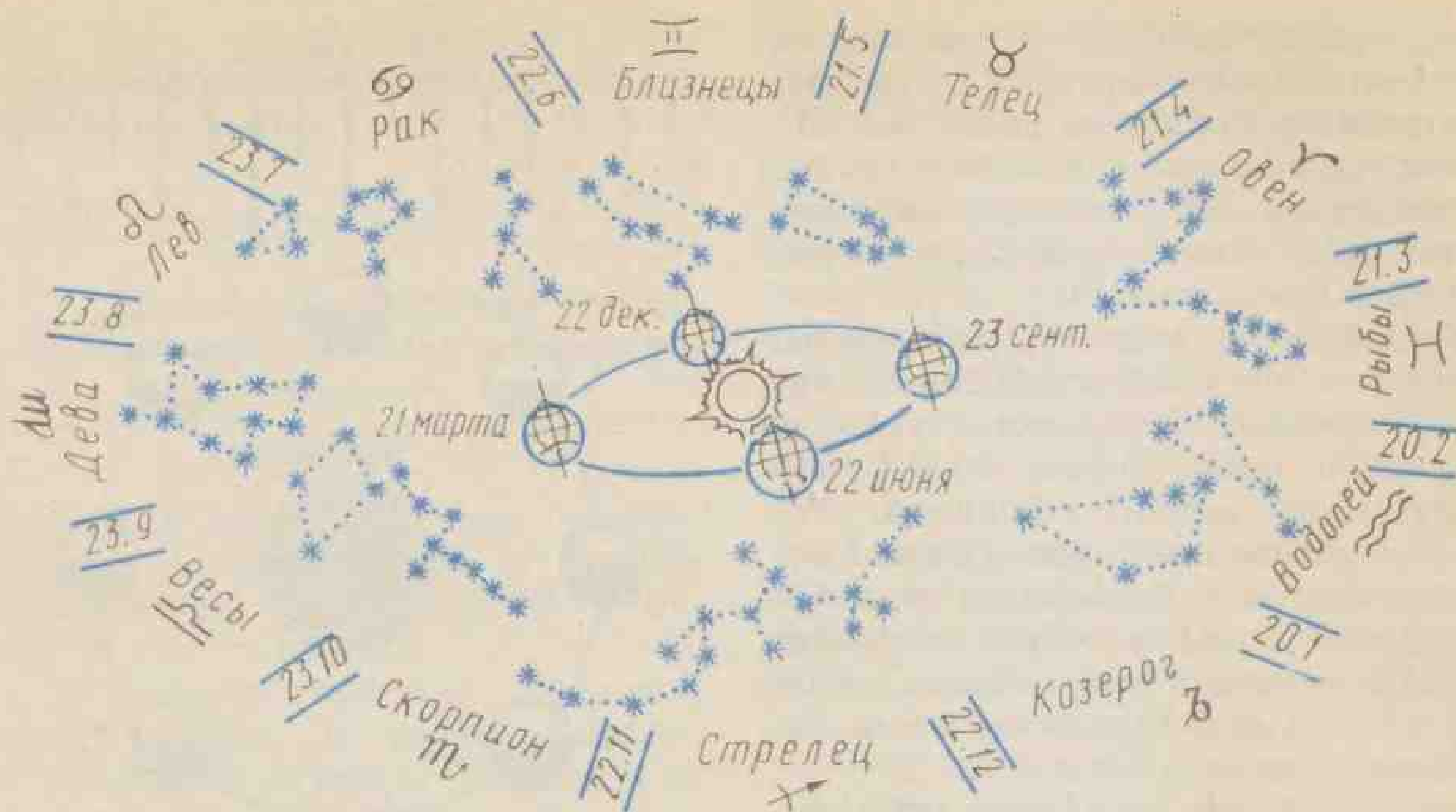


Рис. 4.2. К объяснению годового движения Солнца среди звезд

сентября в 20 ч было к востоку от меридиана, в конце месяца в тот же час окажется западнее его. Причина этого явления — *годовое движение Земли вокруг Солнца* (рис. 4.2), которое, как и суточное, происходит против часовой стрелки, если смотреть на систему Солнце — Земля от северного полюса мира. Вследствие этого кажется, что Солнце медленно движется относительно звезд с запада на восток, каждый месяц проецируясь на различные созвездия.

Наблюдения предутренних восходов звезд позволяют обнаружить годовое движение Солнца. Проводя такие наблюдения ежедневно перед восходом Солнца, можно заметить, что те звезды, которые несколько дней назад до восхода Солнца успевали только взойти на востоке, теперь поднялись выше, а на их место пришли другие, которые до этого совсем не были видны в лучах зари.

Видимое годовое движение Солнца среди звезд происходит по большому кругу небесной сферы, наклоненному к плоскости небесного экватора под углом $23,5^\circ$ и называемому *эклиптикой* (греч. «эклипис» — затмение). Это название связано с тем, что Луна, передвигаясь на фоне звезд, при пересечении эклиптики может оказаться в той же точке неба, что и Солнце, тогда произойдет редкое и красивое явление — *солнечное затмение*.

Очевидно, что *плоскость эклиптики* — это плоскость, в которой лежит *путь Земли вокруг Солнца* (ее *орбита*).

Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках: в *точке весеннего равноденствия* (точке *весны*) γ , в которой Солнце переходит из южного полушария неба в северное, и в противоположной ей точке *осеннего равноденствия* (точке *осени*) $\simeq$ (рис. 4.3). Эклиптика проходит через 12 созвездий, называемых *зодиакальными* (греч. «зоон» — животное).

Всю эклиптику (360°) Солнце проходит за год, т. е. за $365\frac{1}{4}$ дней. Поэтому за одни сутки Солнце перемещается относительно звезд по эклиптике чуть меньше чем на 1° . Это примерно два видимых угловых диаметра Солнца. Созвездия, через которые проходит эклиптика, называются зодиакальными. В каждом зодиакальном созвездии Солнце проводит в среднем по одному месяцу.

4.3. Изменение суточного пути Солнца и Луны в течение года. В точке весны (созвездие Рыбы) Солнце бывает 20—21 марта, в точке осени (созвездие Девы) — около 23 сентября. В эти моменты оно находится на небесном экваторе и его склонение равно 0° , а точки его восхода и захода в точности совпадают с точками востока и запада.

В середине лета (21—22 июня) Солнце достигает наиболее удаленной от небесного экватора точки эклиптики, называемой точкой *летнего солнцестояния* (точка лета, созвездие Близнецов): в это время его склонение меняется очень медленно и достигает своего наибольшего значения

$$\delta_{\max} = +23,5^\circ.$$

Во вторую половину лета склонение Солнца $\delta_\odot$ уменьшается от $23,5^\circ$ до 0° в момент осеннего равноденствия, после чего оно становится отрицательным и достигает своего наименьшего значения $-23,5^\circ$ в момент зимнего солнцестояния (в точке зимы, 21—22 декабря; созвездие Стрельца).

Плоскость, в которой лежит орбита Луны, наклонена к плоскости эклиптики (или земной орбиты) под углом около 5° . Поэтому максимальное склонение Луны составляет примерно $+28,5^\circ$, а минимальное $-28,5^\circ$.

Из-за изменения склонения Солнца и Луны их суточные пути все время меняются.

Ежедневно изменяется и полуденная высота Солнца. Ее легко определить по формуле (см. § 3.4):

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot.$$

С изменением $\delta_\odot$ меняются также точки восхода и захода Солнца (рис. 4.4). Летом в средних широтах северного полушария Земли Солнце восходит в северо-восточной части неба и заходит в северо-за-

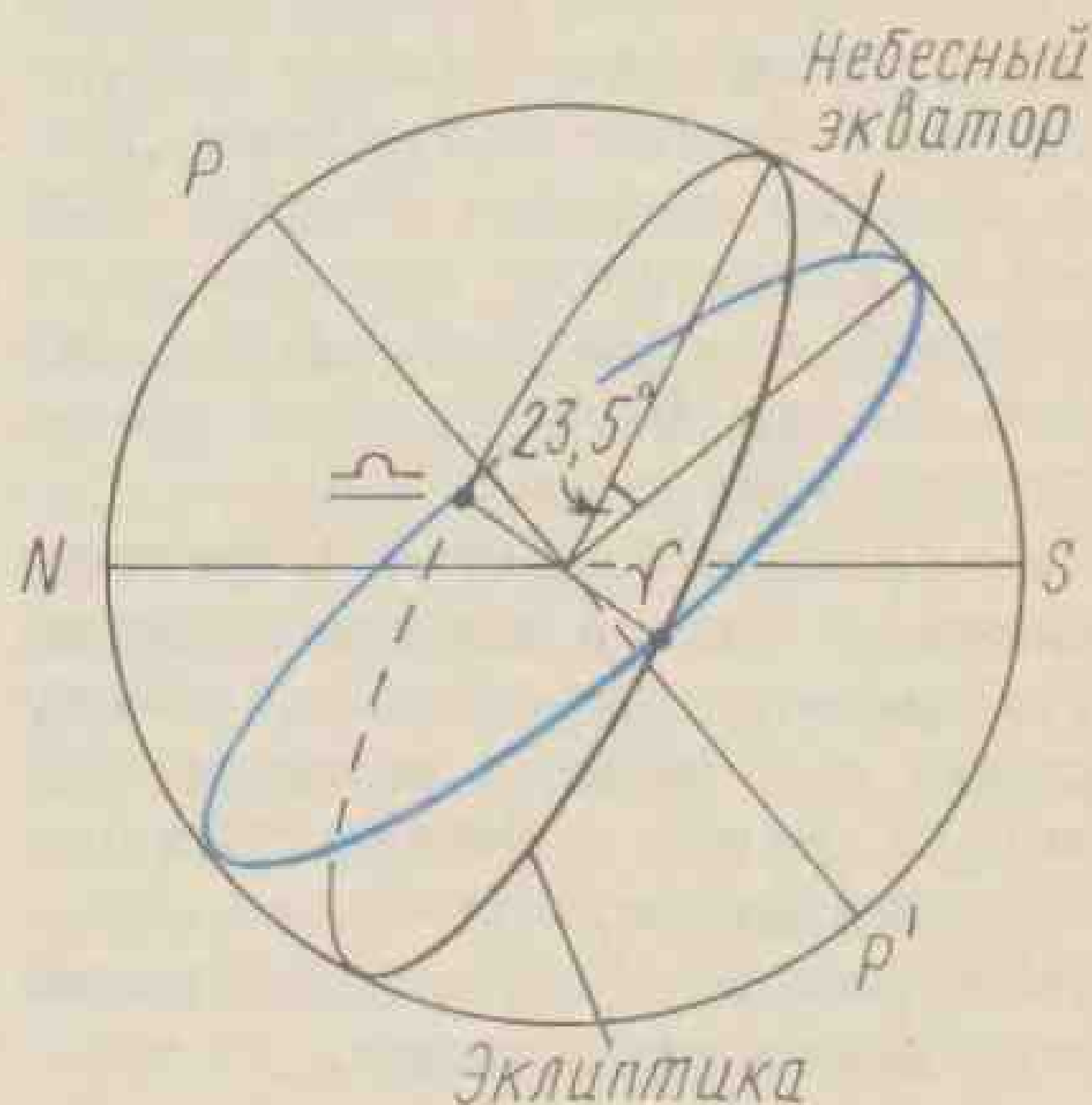


Рис. 4.3. Эклиптика и небесный экватор

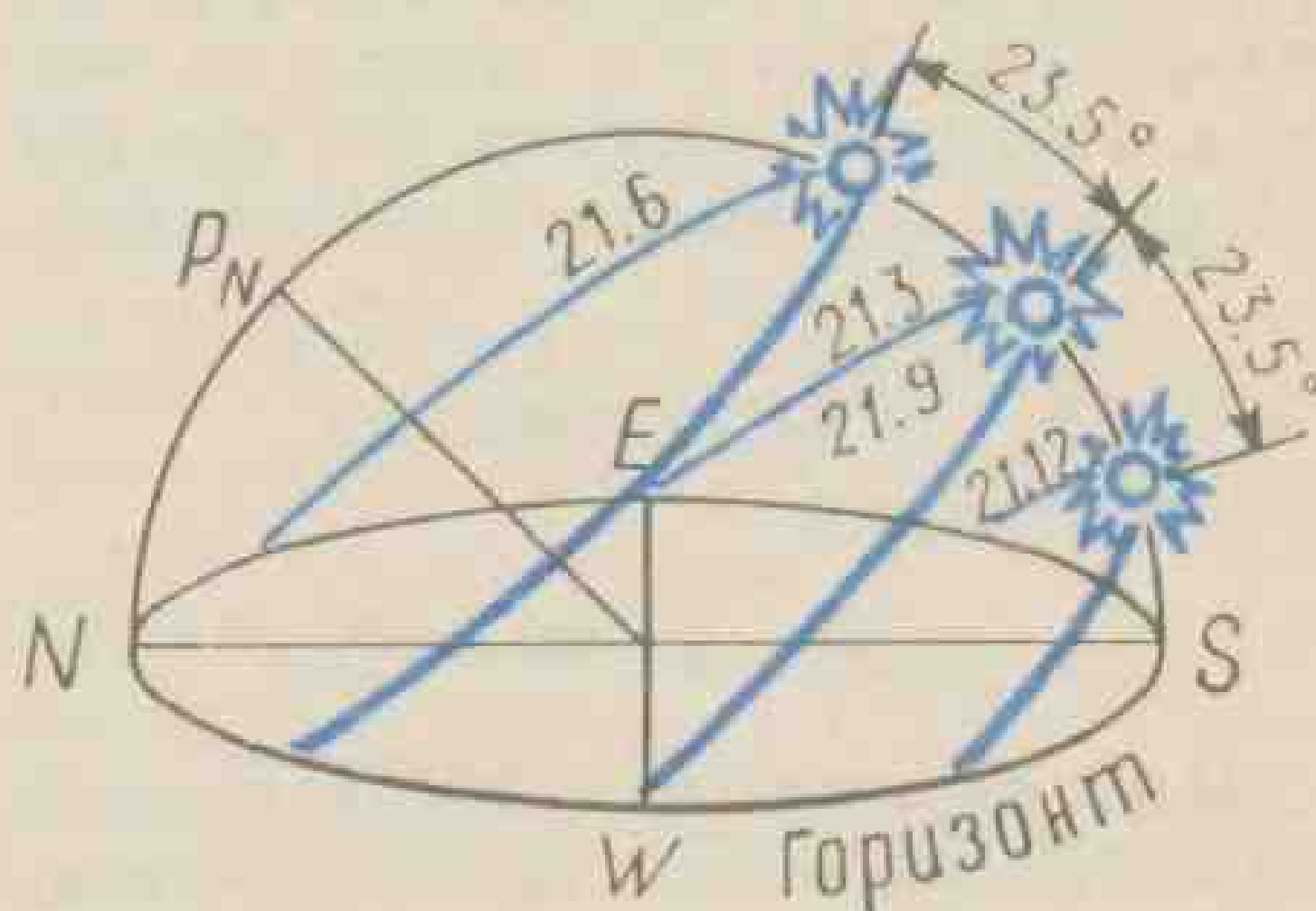


Рис. 4.4. Видимый путь Солнца на небе в разные времена года

падной, а зимой восходит на юго-востоке и заходит на юго-западе. Большая высота кульминации Солнца и большая продолжительность дня и являются причиной наступления лета.

За полярными кругами на Земле, где $|\varphi| > 66,5^\circ$, высоты светил в течение суток изменяются мало. Солнце до полугода может оставаться незаходящим и столько же — невосходящим светилом. Это объясняет явления *полярного дня* и *полярной ночи*. Напротив, в тропических областях ($|\varphi| < 23,5^\circ$) Солнце дважды в году кульминирует вблизи зенита.

Летом в южном полушарии Земли в средних широтах Солнце восходит на юго-востоке, кульминирует в северной стороне неба и заходит на юго-западе. В это время в северном полушарии зима.

4.4. Типовая задача. Определение высоты Солнца в кульминациях.

Условие. Определить высоту верхней и нижней кульминаций Солнца 8 марта в Киеве. Склонение Солнца $\delta_\odot = -5^\circ$.

Решение. Сначала находим широту Киева (по карте):

$$\varphi = 50^\circ.$$

Поскольку $\delta_\odot < 90^\circ - \varphi$, верхняя кульминация происходит к югу от зенита, а нижняя — к северу от надира. Поэтому формулы для высоты светила в кульминации имеют вид:

$$h_{в.к} = (90^\circ - \varphi) + \delta_\odot.$$

$$h_{н.к} = \delta_\odot - (90^\circ - \varphi).$$

Следовательно,

$$h_{в.к} = 35^\circ, h_{н.к} = -45^\circ.$$

Примечание. Приближенное значение склонения Солнца можно узнать, пользуясь подвижной картой звездного неба, положением эклиптики и оцифровкой дат на ней.

4.5. Вопросы

1. Найдите, в каких пределах меняется максимальная высота над горизонтом Солнца и Луны для широты вашего места жительства.
2. Где восходит и заходит Солнце зимой в южном полушарии (т. е. когда в северном полушарии лето)?
3. Когда в южных полярных областях бывает полярный день? А полярная ночь?
4. Почему летом Солнце поднимается высоко над горизонтом, а зимой — низко? Объясните это, исходя из характера движения Солнца по эклиптике.
5. Почему зимой вблизи полнолуния Луна поднимается высоко над горизонтом, а летом — низко?
6. Северный и южный полярные круги имеют широту $\pm 66,5^\circ$. Чем характерны эти широты?
7. На каких широтах Солнце может проходить через зенит только один раз в году? На каких — Луна?
8. Когда Солнце бывает в зените на экваторе?
9. Как движется Солнце для наблюдателя на полюсе?

4.6. Упражнения

1. Определите, на каких высотах кульминирует Солнце в городах Архангельск, Мурманск, Норильск, С.-Петербург, Москва, Хабаровск, Каир, Сидней в следующие даты: 1 января, 25 октября, 12 июля — того года, для которого вы располагаете астрономическим календарем. Координаты городов определите по карте.

2. Когда в Каире Солнце бывает в зените?

- 3*. Когда наступает и заканчивается полярный день на северной оконечности Новой Земли?

* Звездочкой здесь и далее отмечены задачи повышенной трудности.

4. Может ли в нашей стране Луна наблюдаться в зените?

5. СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

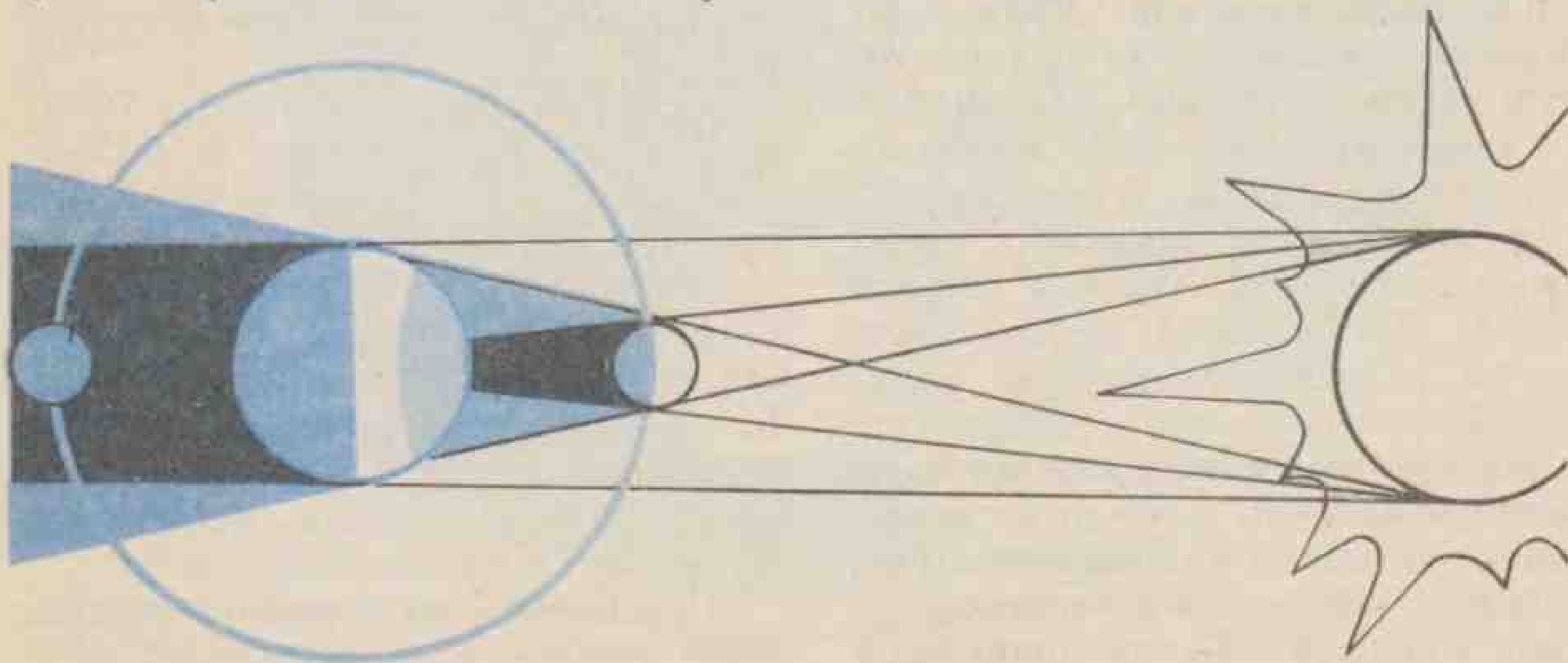
5.1. Условия наступления затмений. Если бы плоскость орбиты Луны совпадала с плоскостью эклиптики, то в каждое новолуние Луна в точности оказывалась бы между Землей и Солнцем и наблюдалось бы *солнечное затмение*, а каждое полнолуние она сама входила бы в тень Земли и наступало бы *лунное затмение* (рис. 5.1). В действительности эти явления случаются значительно реже, так как орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом около 5° и пересекается с ней только в двух точках, называемых *узлами орбиты Луны*.

Луна находится ближе к нам, чем Солнце. Поэтому для наступления солнечного затмения необходимо, чтобы Солнце и Луна находились в одном и том же направлении, а для лунного — в противоположных. Это может произойти только тогда, когда Солнце, перемещаясь по эклиптике, окажется вблизи одного из узлов орбиты Луны. Когда Солнце и Луна

оказываются вблизи одного узла (в новолуние), наступает солнечное затмение, а если оба тела близки к противоположным узлам (в полнолуние!), то происходит лунное затмение.

Соотношения между наклоном орбиты Луны к эклиптике и видимыми угловыми диаметрами Солнца и Луны таковы, что условия для возникновения солнечного затмения сохраняются в течение 17 сут (рис. 5.2), а лунного — около 11 сут, до и после момента прохождения Солнца через узел. Поскольку интервал времени между последовательными новолуниями составляет 29,5 сут, то каждое прохождение Солнца через узел лунной орбиты обязательно сопровождается хотя бы одним солнечным затмением. Но их может быть и два (см. рис. 5.2), так как интервал $17 \text{ сут} \cdot 2 = 34 \text{ сут}$ длиннее, чем 29,5 сут. Кроме того, может произойти одно лунное затмение (или ни одного, так как промежуток в 22 дня короче 29,5 сут). Следующий благоприятный для затмений период наступает почти через полгода, когда Солнце оказывается в

Рис. 5.1. Схемы возникновения солнечных и лунных затмений



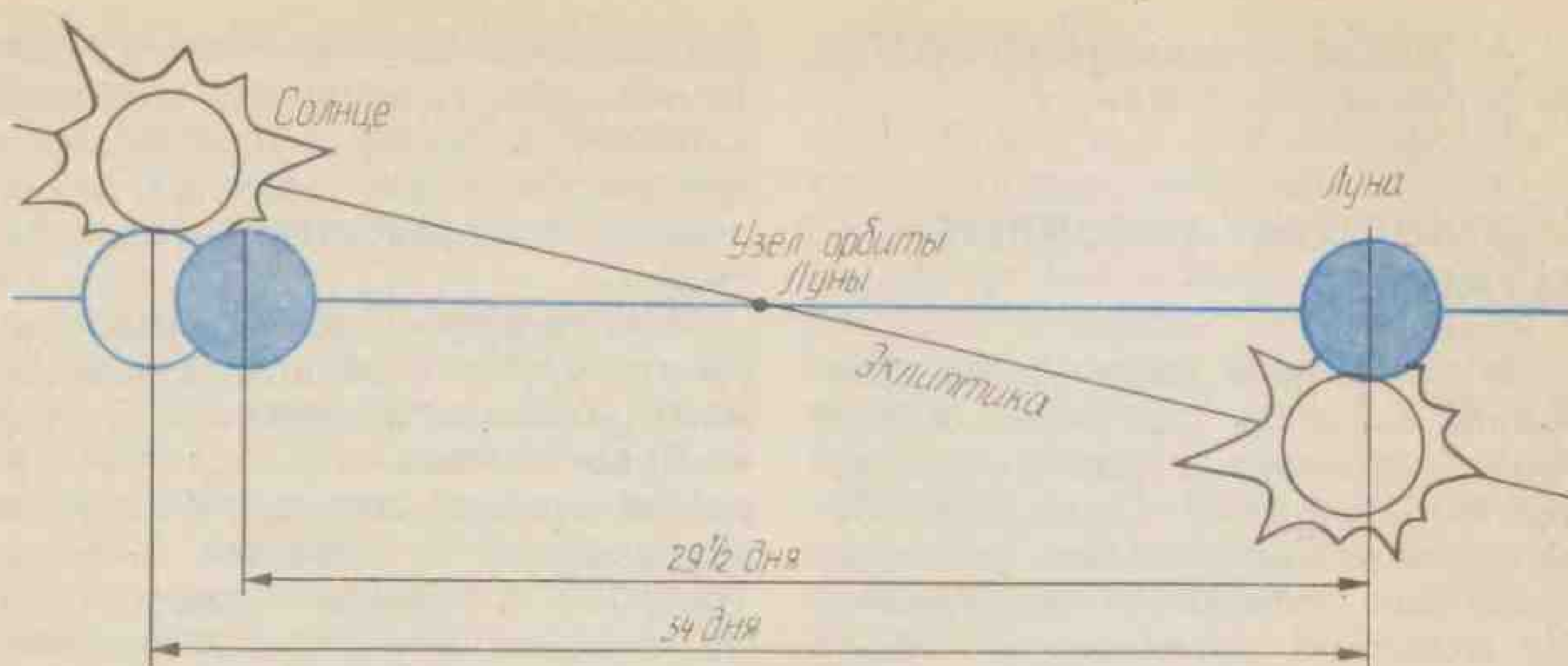


Рис. 5.2. Условия наступлений солнечных затмений

направлении противоположного узла.

В итоге в течение календарного года условия, благоприятные для затмений, обязательно наступают дважды, хотя если первые затмения произошли в самом начале года, то в конце года Солнце может еще раз подойти к узлу лунной орбиты. Поэтому в году происходит не менее двух, но и не более пяти солнечных затмений, а лунных — не более трех. Однако солнечных и лунных затмений вместе в году бывает не более семи.

5.2. Виды затмений. Лунное затмение возникает, когда Луна целиком (*полное затмение*) или частично (*частное затмение*) попадает в конус земной тени. Очевидно, что во время лунного затмения с Луны можно наблюдать затмение Солнца Землей. На лунном небе Земля должна казаться темной, но окруженной ярким кольцом — это светятся под лучами Солнца верхние слои земной атмосферы. Они-то во время лунного затмения и освещают Луну, которая поэтому наблюдается с Земли окрашенной, как правило, в

буровато-зеленоватые и красноватые тона (вспомните цвет зари).

Полное затмение Луны может длиться почти два часа, а вместе с частными фазами — вдвое больше.

Так как во время лунного затмения поверхность Луны действительно находится в тени, это явление видно из любой точки Земли, где только может наблюдаться Луна.

В отличие от лунных, *солнечные затмения* видны только в тех областях, где Земля пересекается с конусом лунной тени (*полное солнечное затмение*) или полутени (*частное солнечное затмение*). Поэтому, хотя солнечные затмения случаются чаще лунных, в каждом данном месте Земли они наблюдаются реже.

Видимые угловые диаметры Солнца и Луны очень близки и составляют около $0,5^\circ$. Однако из-за эллиптичности орбит Земли и Луны они слегка меняются. В итоге видимый диаметр Луны часто оказывается меньше видимого диаметра Солнца. Тогда вершина конуса лунной тени не достигает поверхности Земли и вместо полного солнечного затмения наблюдается *кольцеобразное*.

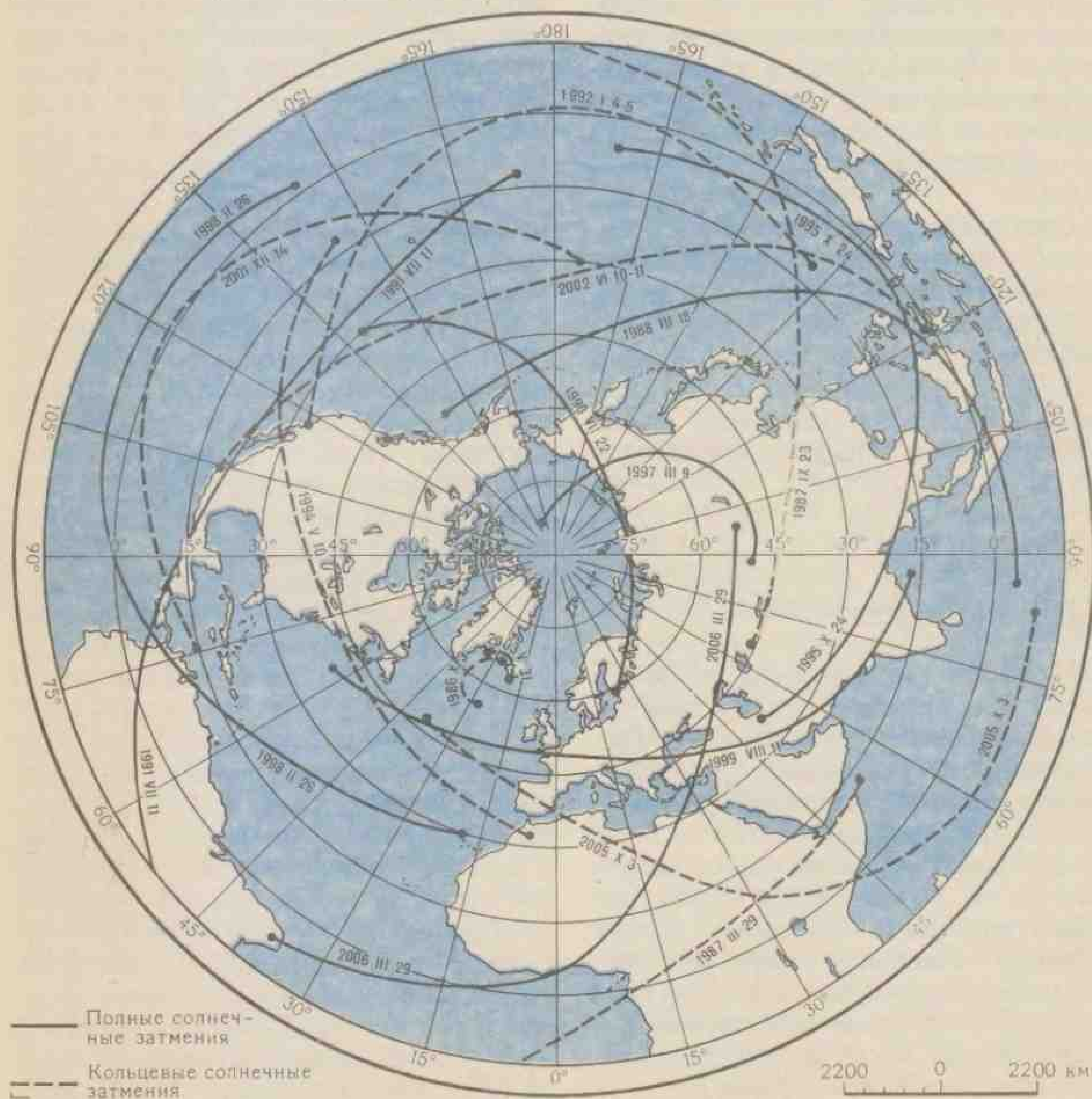
При полном солнечном затмении конус лунной тени пересекает зем-

ную поверхность, образуя эллипс размером не более 270 км. Из-за вращения Земли и движения Луны по орбите с запада на восток лунная тень пробегает путь длиной в несколько тысяч километров по поверхности Земли. Этот путь называется *полосой полного солнечного затмения*. В центре полосы продолжительность полного затмения — наибольшая, достигает в редких случаях 8 мин. Вне полосы полной фазы на обширной территории Зем-

ли наблюдается *частное затмение Солнца*.

Для научных исследований особенно ценны наблюдения полных солнечных затмений, позволяющие изучить внешние разреженные слои атмосферы Солнца. Полное солнечное затмение — очень красивое явление, если его удастся наблюдать в ясную погоду. Вначале появляется

Рис. 5.3. Полосы солнечных затмений с 1986 по 2006 г.



едва заметный ущерб на западном краю Солнца. С его увеличением дневной свет постепенно ослабевает. Вот от Солнца остается узкий яркий серп. Надвигаются сумерки. Тени становятся резче. Наконец Луна целиком закрывает Солнце, наступает темнота и на небе появляются звезды. Вокруг черного диска Луны вспыхивает розовое кольцо солнечной хромосферы и серебристо-жемчужное лучистое сияние *солнечной короны*. Это — внешние части атмосферы Солнца. Через несколько минут вновь появляются яркие лучи Солнца. Полная фаза затмения кончается, корона исчезает. Быстро светлеет, и частные фазы затмения повторяются, но уже в обратном порядке.

Для наблюдений солнечных затмений организуются специальные экспедиции. Время, место и условия наблюдения затмений точно рассчитываются на много лет вперед (рис. 5.3). Ближайшее полное затмение Солнца, которое будет наблюдаться в Москве, произойдет в 2126 г.

5.3. Вопросы

1. В каком направлении по Земле перемещается конус лунной тени во время солнечного затмения? 2. Одновременно ли начинается и заканчивается лунное затмение для наблюдателей в разных местах на Земле? (То же для солнечного затмения.) 3. С какого края Луна начинает затмевать Солнце во время затмения? Поясните ответ. 4. С какого края начинается затмение Луны? 5. Почему солнечные затмения в любом пункте Земли наблюдаются во много раз реже, чем лунные?

6. ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ

6.1. Измерение времени. Повседневная жизнь людей тесно связана со сменой дня и ночи. Естественно, что сутки стали первой простой и удобной единицей для измерения времени. В древности положение Солнца на небе служило наиболее надежным указателем времени. Но точность его определения оставалась очень низкой.

Промежуток времени между последовательными моментами верхних (или нижних) кульминаций центра диска Солнца получил название *солнечных суток*, в отличие от периода осевого вращения Земли — *звездных суток*, которые равны промежутку времени между верхними кульминациями любой звезды. Из-за годичного движения Земли вокруг Солнца солнечные сутки почти на 4 мин длиннее звездных.

Астрономические наблюдения показали, что движение Солнца по эклиптике происходит неравномерно. Причина этого в том, что из-за эллиптичности земной орбиты угловая скорость обращения Земли вокруг Солнца в течение года меняется в пределах нескольких процентов. Это приводит к медленному изменению продолжительности солнечных суток. Следовательно, часы, «идущие» по Солнцу, должны то спешить, то отставать, что неудобно. Поэтому за единицу измерения времени приняли среднюю продолжительность солнечных суток в году. Время, измеряемое в таких «средних» сутках, называется *средним солнечным временем*.

Среднее солнечное время согласовано с движением Солнца за год. Однако в каждый данный день полдень по среднему солнечному времени может отличаться от момента верхней кульминации центра сол-

нечного диска, хотя и не более чем на ± 16 мин.

Для наблюдателей, находящихся на одном и том же географическом меридиане, кульминация Солнца, как и любого другого светила, происходит одновременно. Пусть долгота данного меридиана выражена в часах. Когда Солнце кульминирует на этом меридиане, то к востоку от него кульминация уже прошла, а к западу, на меридиане с долготой $\lambda_2 < \lambda_1$, произойдет через промежуток времени $\lambda_1 - \lambda_2$: за этот промежуток Земля повернется так, что меридиан λ_2 встанет на место меридиана λ_1 . Если, допустим, на московском меридиане 5 ч утра, то на меридиане, расположенном на 90° (или на 6 ч) к востоку, время уже 11 ч, а на 180° оно равно 17 ч. Отсюда следует, что **разность средних солнечных времен равна разности долгот, выраженных в часах.**

Чтобы избежать неудобства, связанного с тем, что в пределах одного экономического района, области или даже крупного города время заметно различается, по специальному международному соглашению было решено разделить весь земной шар на 24 часовых пояса со средней шириной в 1 ч по долготе (15°) и считать время в пределах каждого пояса одинаковым и совпадающим с временем центрального меридиана данного пояса. Такой счет времени называется *поясным*. При пересечении границы двух соседних поясов с запада на восток часы надо переставить на один час вперед, а с востока на запад — на один час назад. Минуты и секунды во всех поясах остаются одинаковыми.

Часовой пояс, для которого центральным является гринвичский меридиан, считается *нулевым*. Москва, имея долготу 2 ч 30 мин ($37,5^\circ$),

расположена во втором часовом поясе, вблизи границы с третьим. Границы часовых поясов идут не строго по меридианам, а с учетом границ административных районов.

Почти все страны живут по поясному времени. В некоторых государствах (например, в России) используется так называемое декретное время, которое равно поясному времени, увеличенному на 1 час. Кроме того, летом в нашей стране, как и в ряде других, часы переводятся еще на один час вперед (летнее время). Это делается для того, чтобы сместить начало и конец рабочего дня на более раннее время суток и сэкономить тем самым электроэнергию, которая тратится на вечернее освещение.

Продолжительность средних солнечных суток, положенная в основу измерения времени (в том числе и поясного), определяется и контролируется астрономическими наблюдениями. Оказалось, что и она медленно меняется. Это связано с тем, что земной шар вращается не строго равномерно. Поэтому для очень точных измерений времени понадобились часы, ход которых не связан с вращением Земли. Такие часы были созданы на основе известных свойств излучения атомов. Они называются *атомными часами*, а время, основанное на их показаниях, — *атомным временем*. В качестве основной единицы времени (*секунды*) выбран интервал времени, за которое электромагнитная волна, излучаемая атомами одного из изотопов цезия, совершает определенное число колебаний. Сигналы точного атомного времени транслируются по всей планете по радио как наземными радиостанциями, так и через искусственные спутники Земли. По атомному времени проверяются все часы.

Таким образом, самое точное время определяется не астрономическим путем. Но его всегда согласуют с «астрономическим», средним солнечным временем, связанным с вращением Земли. Специальные службы времени следят за различием между средним солнечным и атомным временем. Когда оно приближается к 1 с, решением Международного бюро времени показания атомных часов меняют на целую секунду,

декретное время $T_d = T - 1 \text{ ч} = 14 \text{ ч } 17 \text{ мин}$;
 поясное время $T_n = T_d - 1 \text{ ч} = 13 \text{ ч } 17 \text{ мин}$;
 номер пояса (для Москвы) $n = 2$;
 поясное время нулевого меридиана $T_0 = T_n - n = 11 \text{ ч } 17 \text{ мин}$;
 среднее солнечное время нулевого меридиана $T_{\text{ср., } \lambda=0} = T_0$;
 долгота Иркутска $\lambda = 104^\circ = 6 \text{ ч } 56 \text{ мин}$ (по карте);
 среднее время в Иркутске $T_{\text{ср., } \lambda} = T_0 + \lambda = 18 \text{ ч } 13 \text{ мин}$.

6.3. Календарь. В результате длительных и высокоточных измерений установлено, что продолжительность года составляет 365 дней 5 ч 48 мин 46 с, или 365,2422 средних солнечных суток. Дробное число суток в году приводит к большим неудобствам. Календарный год, по которому живут и работают люди, должен содержать целое число суток. Это достигается чередованием календарных лет с разным числом дней.

Было разработано множество систем календарей, в которых год всегда содержит целое число суток. Мы живем по *григорианскому календарю (новый стиль)*, введенному в странах Европы в конце XVI в.

В григорианском календаре средняя продолжительность календарного года очень близка к действительной продолжительности года и составляет 365,2425 средних солнечных суток. Это число можно представить в таком виде: $365,2425 = 365 + 1/4 - 3/400$. Чтобы обеспечить такую среднюю продолжитель-

«подстраивая» атомное время под время, определяемое вращением Земли.

6.2. Типовая задача. Нахождение среднего солнечного времени.

Условие. В Москве часы показывают $T = 15 \text{ ч } 17 \text{ мин } 8 \text{ августа}$. Чему равно среднее солнечное время в Иркутске?

Решение. В августе в Москве часы идут по летнему декретному времени. Следовательно,

ность года, в каждом году, номер которого не делится на 4, принимается 365 дней (*простой год*), а в остальных — 366 дней (*високосный год*). Средняя продолжительность года при этом равна $365 \frac{1}{4}$ сут, как в юлианском календаре (старый стиль). Чтобы уменьшить ее на $3/400$ суток, три раза каждые 400 лет високосные годы делают простыми. Такими годами договорились считать те, номера которых оканчиваются на 00 и не делятся без остатка на 400. Например, 1700, 1800, 1900-й годы считаются простыми, а 1600, 2000, 2400-й — високосными. Таким образом, за 400 лет набирается 303 года по 365 дней и 97 лет по 366 дней, т. е. в среднем

$$\frac{365 \cdot 303 + 366 \cdot 97}{400} = 365,2425.$$

Это превышает истинную продолжительность года на 0,0003 сут, что дает расхождение в 1 сут лишь за 3300 лет.

До 14 февраля 1918 г. наша

страна жила по юлианскому календарю (старый стиль), который отличался от нового тем, что каждый четвертый год считался високосным (без исключений), так что средняя продолжительность календарного года составляла точно $365\frac{1}{4}$ сут. В настоящее время юлианский календарь отстает от григорианского на 13 дней. По новому и по старому стилю 2000 г. високосный, это различие сохранится вплоть до 28 февраля 2100 года, после чего оно достигнет 14 дней.

6.4. Типовая задача. Перевод дат старого и нового стиля.

Условие. А. С. Пушкин родился в Москве 26 мая 1799 г. Когда следует отмечать день его рождения по новому стилю?

Решение. В XVIII в. в Москве действовал старый стиль, в котором, в отличие от нового стиля, считались високосными годы 1800-й и 1900-й. Следовательно, в 1799 г. оба стиля различались не на 13 дней, как сейчас, а на 11 дней, и по новому стилю искомая дата — 6 июня.

6.5. Вопросы

1. Что такое звездные и солнечные сутки? 2. На сколько отличаются солнечные сутки от звездных? 3. Что такое средние солнечные сутки? 4. Равна ли разность поясных времен разности долгот? 5. Чему равна разность декретного и летнего времени? 6. На сколько часов максимально различается время, по которому живут в нашей стране? 7. Как определяется современная шкала времени?

6.6. Упражнения

1. Считая движение Солнца по эклипке равномерным, докажете,

что солнечные сутки примерно на 4 мин превышают период осевого вращения Земли. А на сколько, если с точностью до секунды?

2*. На сколько секунд различается истинное солнечное время на восточной и западной окраинах Москвы, если протяженность города около 30 км?

Указание. Широта Москвы 56° . На экваторе 1° долготы примерно соответствует 110 км.

3. Торжественное открытие Пулковской обсерватории состоялось 19 августа 1839 г. по новому стилю. Какая это дата по старому стилю?

4*. Предположим, что длина года на Марсе равна в точности 668,60 марсианских суток. Разработайте удобную систему календаря для этой планеты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА II

Для определения видимых положений и движений светил на небе пользуются вспомогательным построением — небесной сферой. На нее проецируют наблюдаемые небесные объекты, а также направление, параллельное оси вращения Земли (ось мира). Перпендикулярная ему плоскость экватора используется в качестве основной для отсчета небесных координат (склонения и прямого восхождения). Небесная сфера удобна для описания различных астрономических явлений: суточного движения светил, движения Луны и Солнца среди звезд, солнечных и лунных затмений и т. д.

Видимое расположение светил на небе и их суточное движение, обусловленное вращением Земли вокруг своей оси, зависят от географической широты места наблюдения, так как ось мира составляет с плос-

костью горизонта угол, равный этой широте.

Следствием движения Луны вокруг Земли является смена фаз Луны, связанная с изменением взаимного расположения Солнца и Луны.

Солнце и Луна изредка оказываются либо в близких, либо в диаметрально противоположных точках неба. Тогда на Земле можно наблюдать солнечные и лунные затмения.

Видимое движение Солнца среди

звезд объясняется обращением Земли вокруг Солнца. Период этого обращения, называемый годом, используется в качестве единицы в системе измерения длительных промежутков времени (т. е. в календаре), а период осевого вращения Земли — для измерения коротких промежутков времени. Для удобства счета времени земной шар условно разделен на 24 часовых пояса, в пределах каждого из которых время считается одинаковым.

III. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

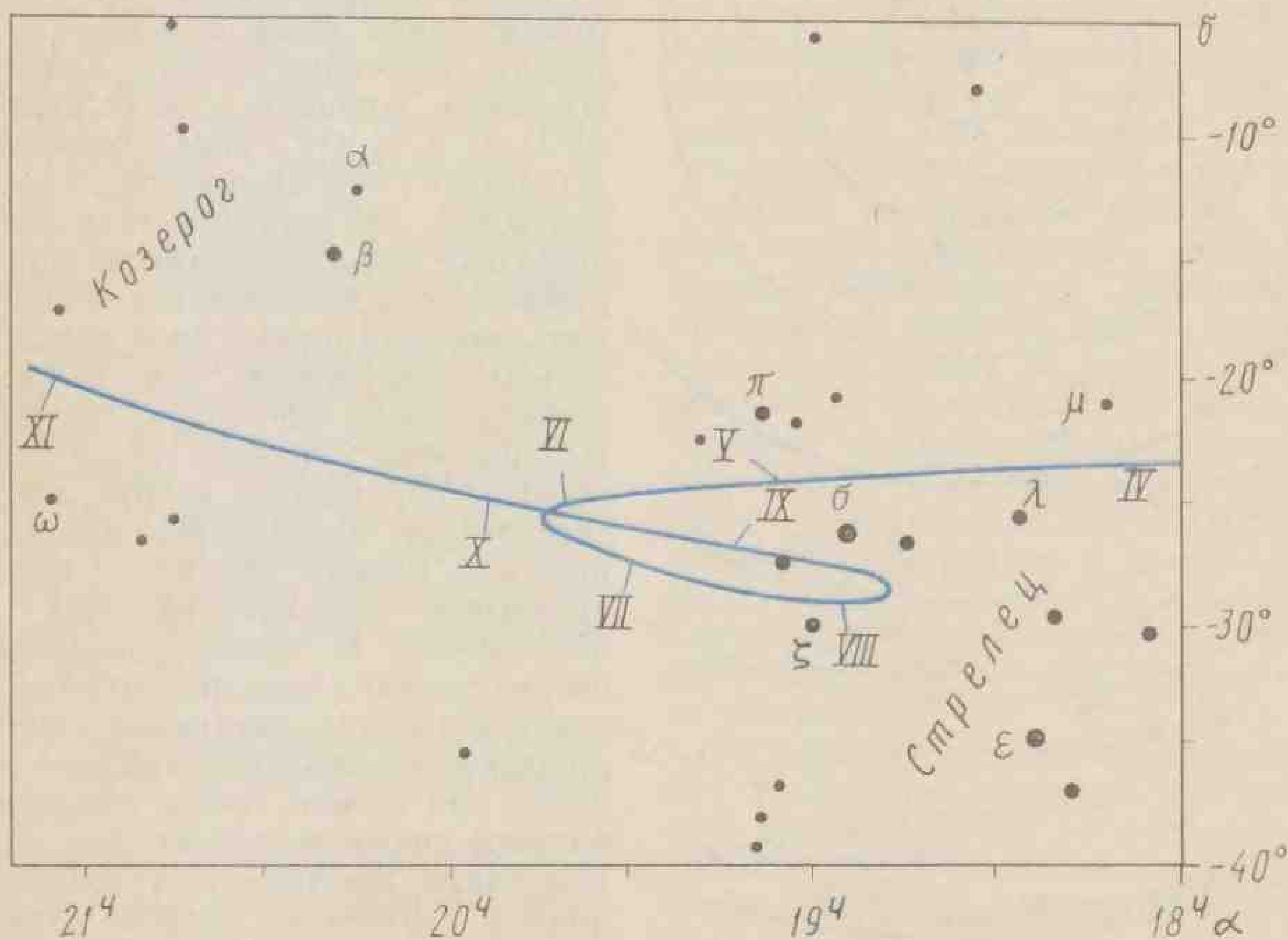
7. ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

7.1. Видимые движения планет. Уже в глубокой древности люди заметили, что, помимо Солнца и Луны, еще пять ярких светил постоянно изменяют свое положение относительно звезд. Их называли *планетами*, что означает блуждающие (звезды). Римляне дали им имена своих богов: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Телескоп позволил открыть и другие планеты, не видимые невооруженным глазом.

Помимо общего суточного движения, планеты на фоне звезд описывают сложные петлеобразные пути

(рис. 7.1), медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное движение*). В результате длительных наблюдений еще в до-телескопическую эпоху удалось выявить некоторые закономерности этих движений. Например, оказалось, что Меркурий никогда не удаляется от Солнца более чем на 28° , а для Венеры этот предельный угол составляет 48° . Остальные планеты могут находиться на любых угловых расстояниях от Солнца, даже диаметрально противоположно Солнцу.

Рис. 7.1. Видимое движение Марса среди звезд в 1986 г.

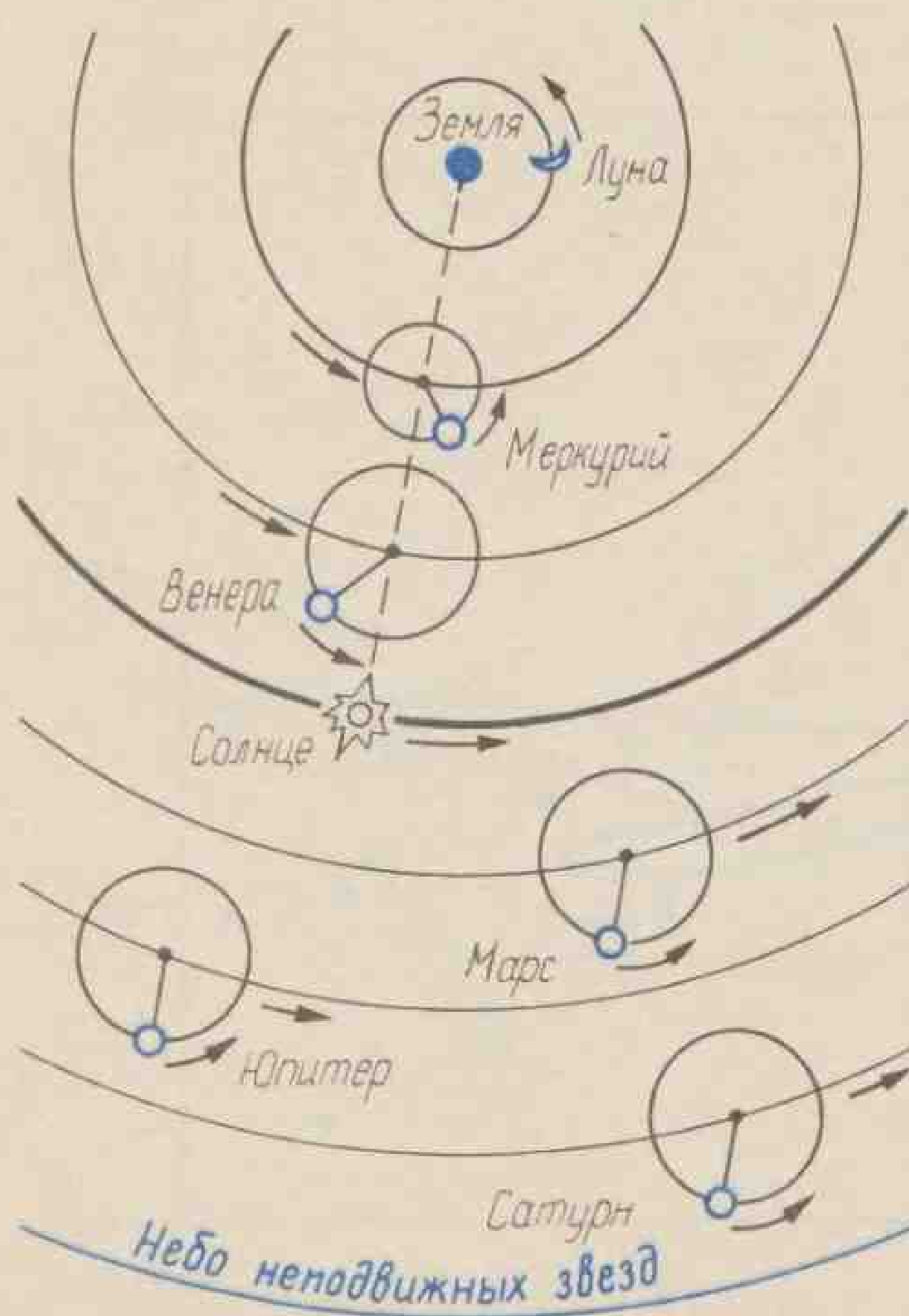


В эти моменты планеты движутся среди звезд всегда попятно. Для каждой планеты длина дуги попятного движения имеет определенное значение. Для Марса она составляет около 14° , для Юпитера — 10° и для Сатурна — 7° .

Проверьте по рисунку 7.1 приведенное выше значение дуги попятного движения Марса.

Уже в древности некоторые ученые подозревали, что сложность видимых движений планет связана с движением Земли вокруг Солнца. Таких взглядов, например, придерживался древнегреческий астроном Аристарх Самосский, живший в начале III в. до н. э. Однако в ту

Рис. 7.2. Система Птолемея



эпоху еще не было достаточных данных для доказательства подобных взглядов. Поэтому более распространенными в древнем мире были взгляды греческого философа Аристотеля, который жил в IV в. до н. э. Он утверждал, что Земля неподвижна и находится в центре мира (*геоцентрическая система мира*). Такая точка зрения соответствовала религиозным догмам о божественном происхождении Земли и человека. Геоцентрическая система мира господствовала в науке и поддерживалась церковью вплоть до эпохи Возрождения, т. е. до конца XV столетия. Ее живучесть во многом связана с тем, что сама идея движения Земли в пространстве оказалась очень трудной для восприятия и выглядела неубедительной, поскольку это движение не проявляло себя заметным образом в обычных земных явлениях.

Наиболее полно геоцентрическая система мира была разработана в трудах греческого ученого Клавдия Птолемея, жившего в Александрии во II в. н. э. Он принял без доказательства утверждение древних ученых о том, что небесные тела могут двигаться только равномерно по окружностям, а для объяснения попятных движений планет ввел дополнительные окружности, по которым должны были двигаться планеты. Центры этих окружностей, в свою очередь, обращались вокруг Земли. Чем точнее проводились наблюдения, тем больше вводилось дополнительных окружностей для их объяснения. В целом получалась очень сложная схема, подобная колесикам часового механизма, общее вращение которых подбиралось так, чтобы как можно точнее объяснить видимое движение планет (рис. 7.2). Благодаря многовековым наблюдениям и уточнениям система Птоле-

мея позволяла предсказывать видимые положения планет на многие годы вперед. Разумеется, точность этих предсказаний была невелика, однако она соответствовала возможностям измерений, проводимых невооруженным глазом при помощи простейших угломерных инструментов.

В течение средневековья астрономия в Европе практически не развивалась. Средневековая церковь возвела в ранг догматов принципы Аристотеля, а систему Птолемея рассматривала как незыблемую истину.

7.2. Система Коперника. В эпоху Возрождения начали успешно развиваться естественные науки и произошла революция в астрономии. Она связана с именем великого польского ученого Николая Коперника. Коперник глубоко изучал труды Птолемея и сам много наблюдал движения Солнца и планет. В результате огромной работы, занявшей почти всю жизнь ученого, он пришел к выводу, что система строения мира, по Птолемею, принципиально неверна. В центре мира находится не Земля, а Солнце, а все планеты вместе с Землей обращаются вокруг него.

Система Коперника легко объясняла, почему Меркурий и Венера, которые ближе к Солнцу, чем Земля, в своем видимом движении никогда не удаляются от него дальше определенных угловых расстояний, а остальные планеты описывают на небе среди звезд петлеобразные пути (см. рис. 7.1).

Пользуясь рисунком 7.3, объясните прямое и попятное движения планет.

Передовые ученые эпохи Возрождения сразу же оценили огромную роль идей Коперника и стали горя-



Николай Коперник (1473—1543)

чими его сторонниками. Они заложили основы современного научного мировоззрения. Вам хорошо известно имя итальянского ученого Джордано Бруно. Если Коперник низвел Землю до уровня рядовой планеты, то Бруно выступал со смелым утверждением, что Солнце — рядовая звезда. Вселенная не ограничена «сферой неподвижных звезд», а бесконечна, и всюду в ней должны действовать одни и те же законы природы. Развивая учение Коперника, Бруно с огромным энтузиазмом и убежденностью говорил о бесконечности Вселенной и бесчисленности миров в глубинах космоса. Католической инквизицией он был обвинен в ереси и в 1600 г. сожжен на костре.

Последовательным коперниканцем был также великий итальянский ученый Галилео Галилей, который впервые использовал подзорную трубу (телескоп) для астрономических наблюдений. С ее помощью

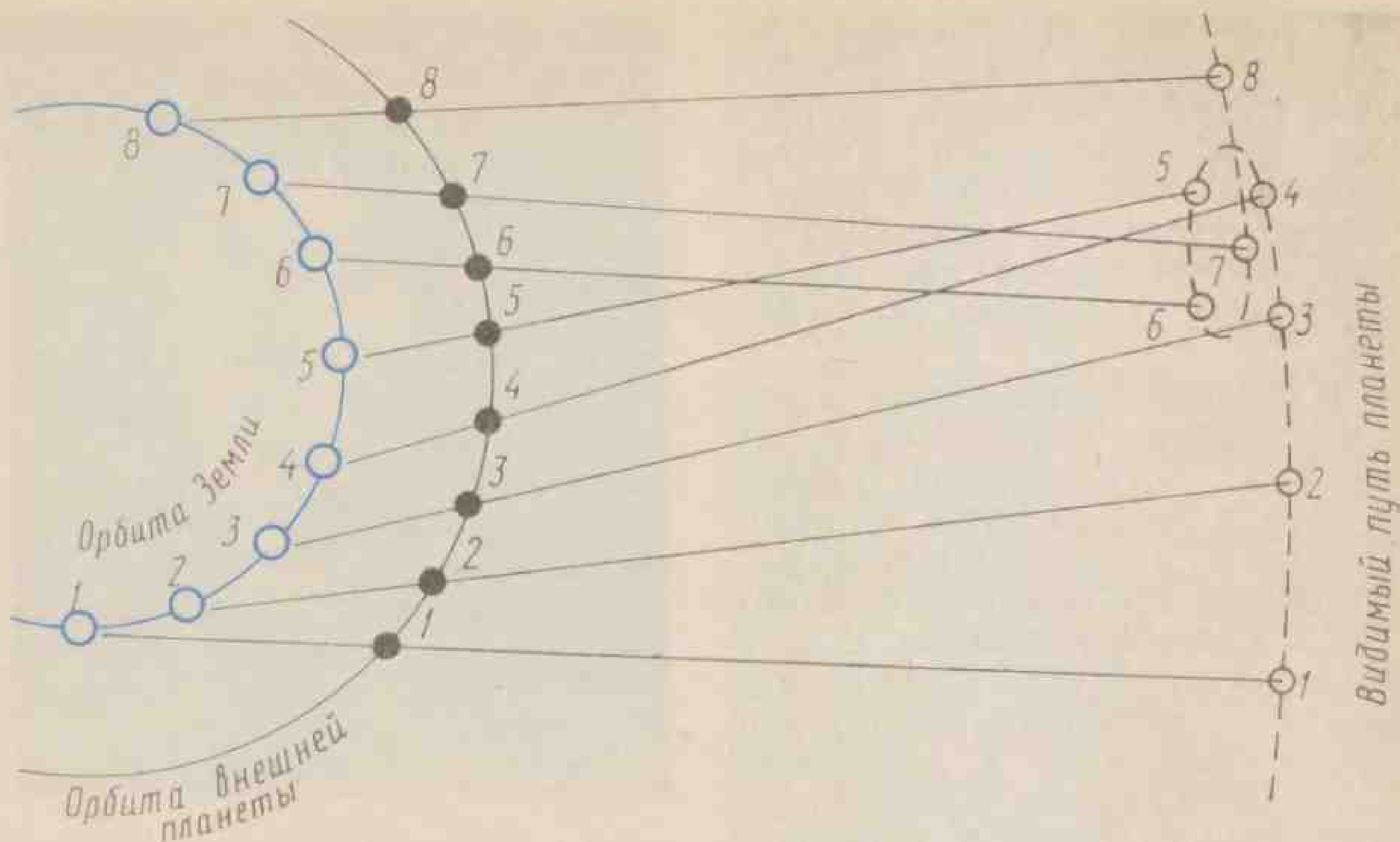


Рис. 7.3. К объяснению видимого петлеобразного движения планет

он, в частности, обнаружил четыре спутника Юпитера, обращающиеся вокруг планеты, открыл фазы Венеры, аналогичные лунным фазам, узнал о существовании гор на Луне. Все это сыграло большую роль в последующем принятии идей Коперника. Галилей первым осознал роль фундаментального свойства движущихся тел — инерции — и сформулировал важнейший физический принцип, утверждающий, что тело, на которое не действуют никакие силы, должно двигаться не замедляясь, т. е. равномерно. Открытие закона инерции положило конец ошибочным аристотелевским основам динамики, согласно которым для поддержания движения любого тела требовалось постоянное действие на него внешней силы. По Аристотелю, прекращение действия силы означало прекращение движения. На этом основании «доказывалась» непо-

движность Земли, поскольку считалось, что если бы Земля двигалась, то подброшенные вверх тела, потеряв с нею связь, тут же начали бы

Джордано Бруно (1548 – 1600)





Галилео Галилей (1564—1642)

отставать от нее, чего не наблюдается.

Труды Галилея помогли впоследствии Ньютону установить основные законы механики, открыть закон всемирного тяготения и объяснить причины движения планет.

7.3. Вопросы

1. Чем различаются прямое и попятное движения? 2. Наблюдается ли у Луны попятное движение? 3*. Посмотрите внимательно на рисунок 7.2. Какие закономерности в системе Птолемея можно заметить? 4. В чем заключается революционность взглядов Коперника?

8. ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

8.1. Конфигурация светил. В системе Коперника роль Солнца как центрального тела планетной систе-

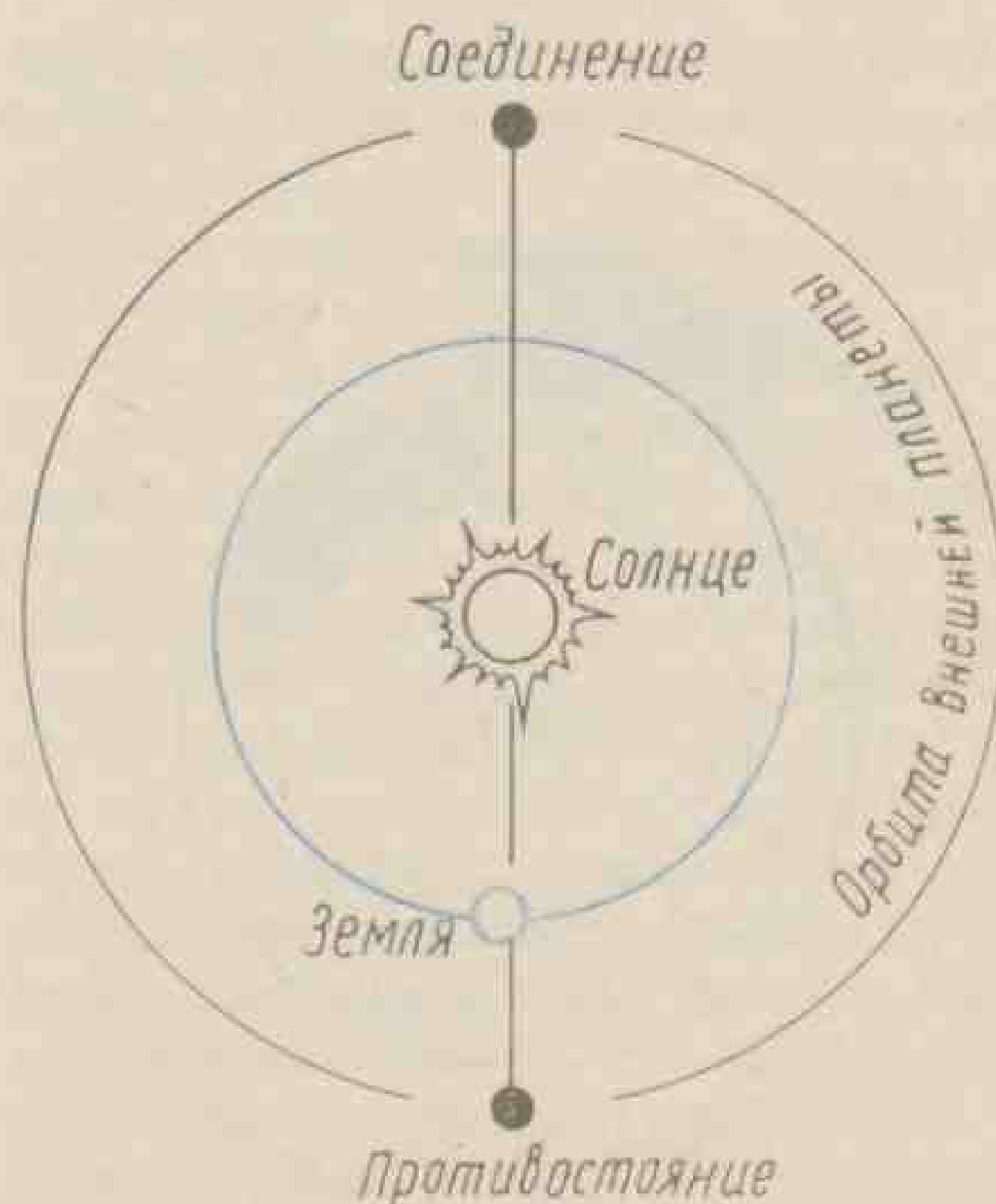
мы стала очевидной. Наблюдаемое движение планет на фоне звезд кажется сложным потому, что мы его видим с движущейся Земли. Поэтому особое значение приобретают определенные взаимные расположения Солнца и планет, называемые *конфигурациями*.

Рассмотрим две из них (рис. 8.1).

1. *Соединение* — конфигурация, при которой Солнце и светило имеют одинаковое прямое восхождение. В частности, солнечное затмение может происходить лишь при соединении Луны с Солнцем. Однако соединение не означает, что светила находятся обязательно в одной и той же точке неба: Луна и планеты движутся не точно по эклиптике, а лишь вблизи нее и во время соединения обычно проходят выше или ниже Солнца.

2. *Противостояние* — конфигурация, при которой прямые восхождения светила и Солнца различаются на 180° , или 12 ч.

Рис. 8.1. Конфигурации планет



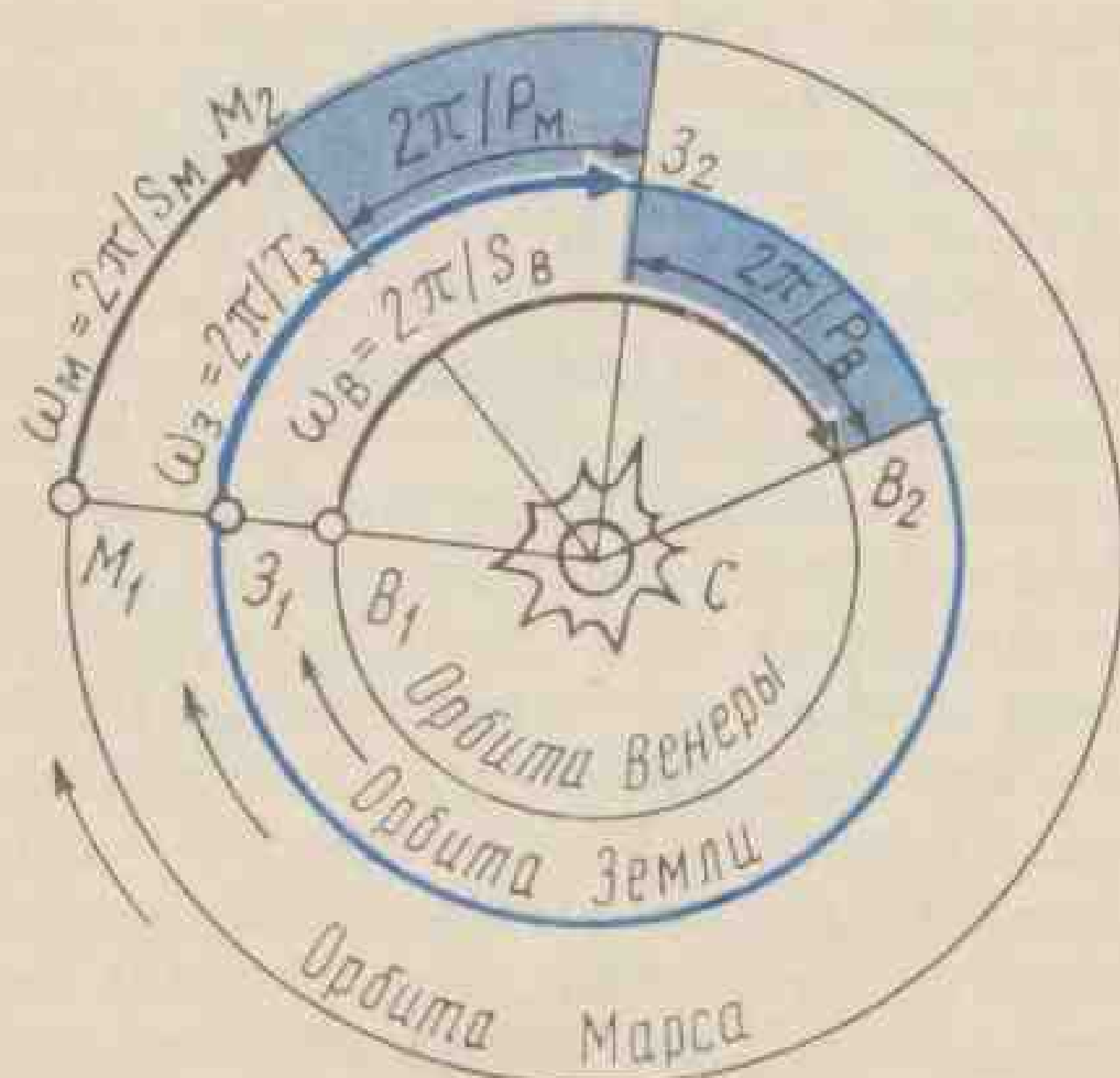
8.2. Синодический и сидерический периоды обращений. Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями называется *синодическим периодом обращения* светила. Синодический период обращения Луны был рассмотрен в § 5.

Период обращения небесного тела по его орбите, измеренный в инерциальной (не вращающейся) системе координат (т. е. относительно далеких звезд), называется *звездным* или *сидерическим* (лат. «сидерис» — звезда).

Непосредственно из наблюдений определяются только синодические периоды обращения Луны и планет. Они были установлены еще в глубокой древности.

Система Коперника позволила легко установить простое соотношение между синодическим и сидерическим периодами обращения. Рассмотрим, например, наблюдаемое с Земли обращение более далекой и более близкой к Солнцу планеты (Марса и Венеры) вокруг Солнца.

Рис. 8.2. К выводу соотношения между синодическим и сидерическим периодами планет



Пусть в начальный момент времени Венера наблюдается с Земли в соединении с Солнцем, а Марс — в противостоянии, т. е. все четыре тела проецируются на линию SM_1 (рис. 8.2). Если бы угловая скорость обращения по орбитам ω у всех планет была одинакова, то они все время сохраняли бы указанные выше конфигурации. В действительности же, чем ближе планета к Солнцу, тем больше ее орбитальная угловая скорость. Разность угловых скоростей определяет скорость изменения угла между направлениями из Солнца на планету и на Землю. Этот угол за промежуток времени, равный синодическому периоду обращения (P), увеличивается от 0 до 2π (360°). Следовательно, за единицу времени он изменяется на $\omega = \frac{2\pi}{P}$ радиан. Тогда, обозначая через S сидерический период обращения планеты, а через T_Z — земной год, получим для Венеры:

$$\frac{2\pi}{S_V} - \frac{2\pi}{T_Z} = \frac{2\pi}{P_V},$$

$$\text{или } \frac{1}{S_V} - \frac{1}{T_Z} = \frac{1}{P_V},$$

а для Марса, который движется медленнее, чем Земля:

$$\frac{2\pi}{T_Z} - \frac{2\pi}{S_M} = \frac{2\pi}{P_M},$$

$$\text{или } \frac{1}{T_Z} - \frac{1}{S_M} = \frac{1}{P_M}.$$

Для любой планеты оба выражения можно объединить, взяв модуль разности:

$$\left| \frac{1}{S} - \frac{1}{T} \right| = \frac{1}{P}.$$

При помощи этой формулы по наблюдаемому значению P (синодического периода обращения плане-

ты) легко вычислить S (сидерический период ее обращения вокруг Солнца).

8.3. Типовая задача. Соотношение между сидерическим и синодическим периодами обращений.

Условие. Определить период обращения Луны вокруг Земли относительно звезд (сидерический месяц), если период смены фаз (синодический месяц) 29,5 сут.

Решение. Синодический месяц (P) больше звездного (S) из-за движения Земли вокруг Солнца, происходящего с периодом T в ту же сторону, что и Луны вокруг Земли. Поэтому соотношение между периодами имеет вид

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{T} = \frac{1}{P}.$$

Подставляя в полученную формулу значения $T = 365 \frac{1}{4}$ сут и $P = 29,5$ сут, находим, что $S = 27,3$ дня.

8.4. Расстояния до планет. Найдя правильное объяснение видимых движений планет, Коперник впервые в истории астрономии смог установить верные соотношения между расстояниями планет от Солнца. Это было важным достижением, принципиально невозможным в системе Птолемея.

Основную идею определения относительных расстояний до планет проще всего уяснить на примере внутренней планеты, например Венеры. Наибольшее угловое удаление этой планеты от Солнца C (рис. 8.3) составляет 46° ; следовательно, под таким углом виден с Земли Z радиус орбиты Венеры, когда луч зрения ZB касается орбиты. Так как треугольник BCZ прямоугольный, то $CB = CZ \cdot \sin 46^\circ = CZ \cdot 0,72$, и расстояние до Венеры составляет 0,72 расстояния от Земли до Солнца.

Строго говоря, удаление Венеры

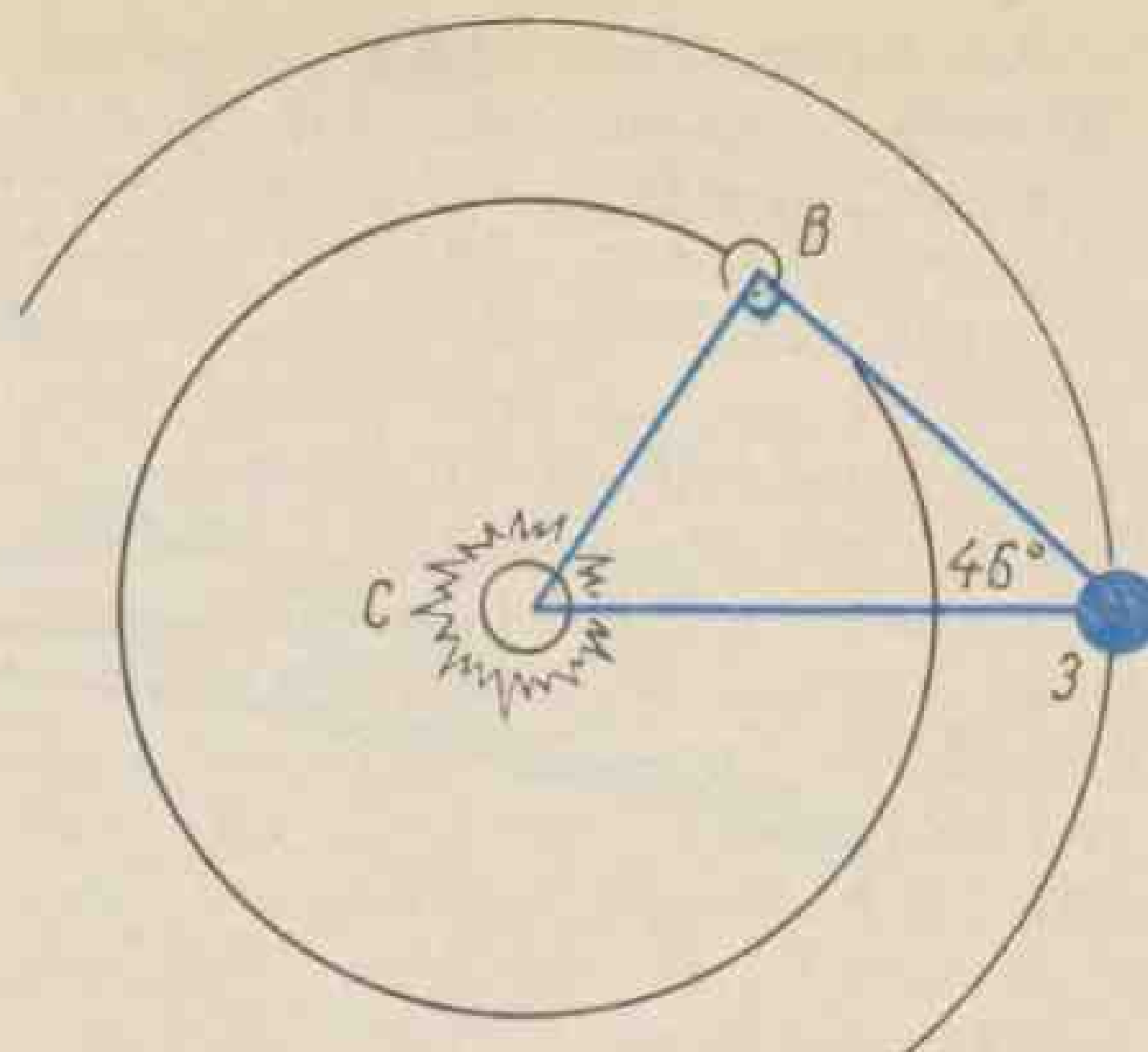


Рис. 8.3. Принцип определения расстояния до Венеры

от Солнца бывает то немного больше, то меньше 46° . Это означает, что орбиты Земли и Венеры — не точно круги и расстояние планет от Солнца меняется в некоторых пределах. У Меркурия эти пределы отличаются весьма заметно — от 0,31 до 0,47 расстояния от Солнца до Земли. Поэтому говорят о средних расстояниях планет от Солнца.

Среднее расстояние Земли от Солнца называют астрономической единицей и обозначают 1 а.е.

В астрономических единицах измеряют расстояния до тел Солнечной системы.

Для планет, находящихся от Солнца дальше Земли, определение расстояний в системе Коперника также сводится к несложной геометрической задаче. Ясно, что, чем дальше от нас находится космический объект, тем меньше дуга его попятного движения, которая фактически отражает движение земного наблюдателя вокруг Солнца. Это хорошо иллюстрирует рисунок 8.4, на котором изображен видимый на небе путь кометы Галлея при ее приближении к Солнцу. Чем ближе

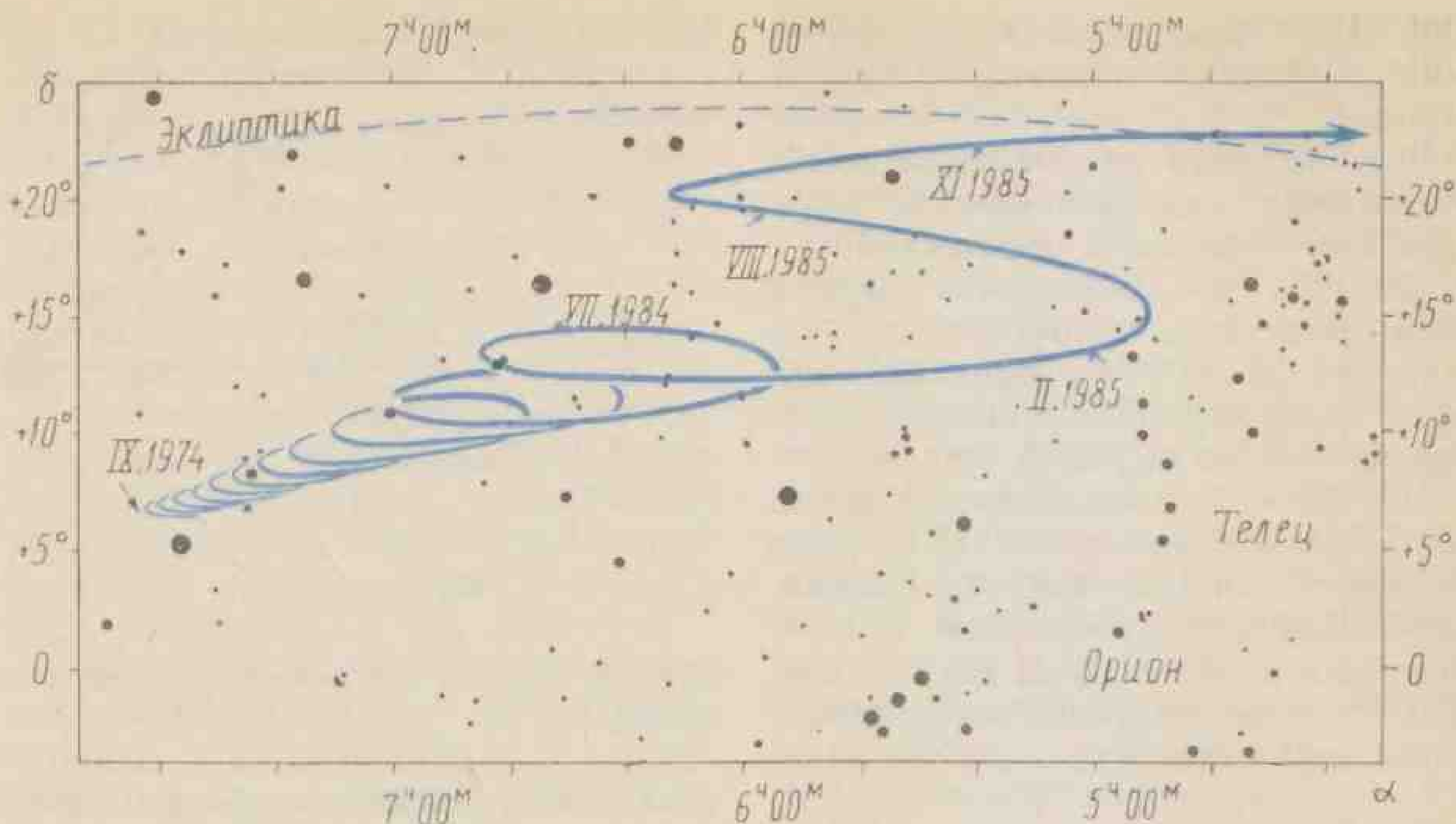


Рис. 8.4. Видимый путь по небу кометы Галлея

она к Солнцу и Земле, тем шире «размах» годичной петли на траектории кометы. В равной степени это относится и к планетам.

Таким образом, в системе Коперника удалось измерить периоды обращения планет вокруг Солнца и расстояния до них, выраженные в расстояниях от Земли до Солнца (см. приложение, табл. II).

8.5. Методы определения расстояний до тел Солнечной системы. По дугам попятных движений или по максимальным угловым отклонениям планет от Солнца можно определить лишь расстояния до них, выраженные в астрономических единицах. Точные значения расстояний в данный момент, выраженные в километрах, были измерены методом тригонометрического параллакса.

Параллаксом p называется угловое изменение направления на объект, вызванное перемещением наблюдателя. Этот метод лежит в

основе способов составления топографических планов и карт. Абсолютное значение перемещения наблюдателя, выраженное в линейной мере, называется *базисом*. Зная базис и углы, которые он образует с направлениями на объект (рис. 8.5), легко из треугольника *ABC* найти расстояние до удаленного недоступного предмета (точка *C*).

При определении расстояний до тел Солнечной системы методом параллакса одну и ту же планету надо наблюдать одновременно из разных пунктов Земли или из одного и того же места, но спустя несколько часов, когда положение наблюдателя вследствие осевого и орбитального движения Земли изменится. Параллакс измеряется величиной кажущегося углового смещения наблюдаемой планеты на фоне далеких звезд.

В настоящее время для определения расстояний до тел Солнечной системы используются наиболее точные — радиолокационные — измере-

ния. Измерив время t , которое необходимо для того, чтобы радиолокационный импульс достиг Луны или какой-либо планеты, отразился и вернулся на Землю, вычисляют расстояние d до этого тела по формуле:

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

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

Посредством радиолокации найдены наиболее точные значения расстояний до тел Солнечной системы и, в частности, определена астрономическая единица: $1 \text{ а.е.} = 149\,598\,500 \text{ км}$ (около $1,5 \cdot 10^{11}$ м).

8.6. Вопросы

1. Прохождение каких планет по диску Солнца можно наблюдать с Земли? 2. Можно ли из непосредственных наблюдений планеты определить ее сидерический период обращения? 3. Как определяют расстояния до тел Солнечной системы?

8.7. Упражнения

1. Определите сидерический период планеты, если он равен синодическому. Какая реальная планета Солнечной системы ближе всех к этому условию?

2. Крупнейший астероид Церера имеет сидерический период обращения 4,6 года. Вычислите синодический период и выразите его в годах и в сутках.

3. Астероид Икар имеет сидерический период около 14 лет. Каков синодический период его обращения?

4. Найдите приближенные значения линейных размеров Солнца и Луны, принимая, что их видимые

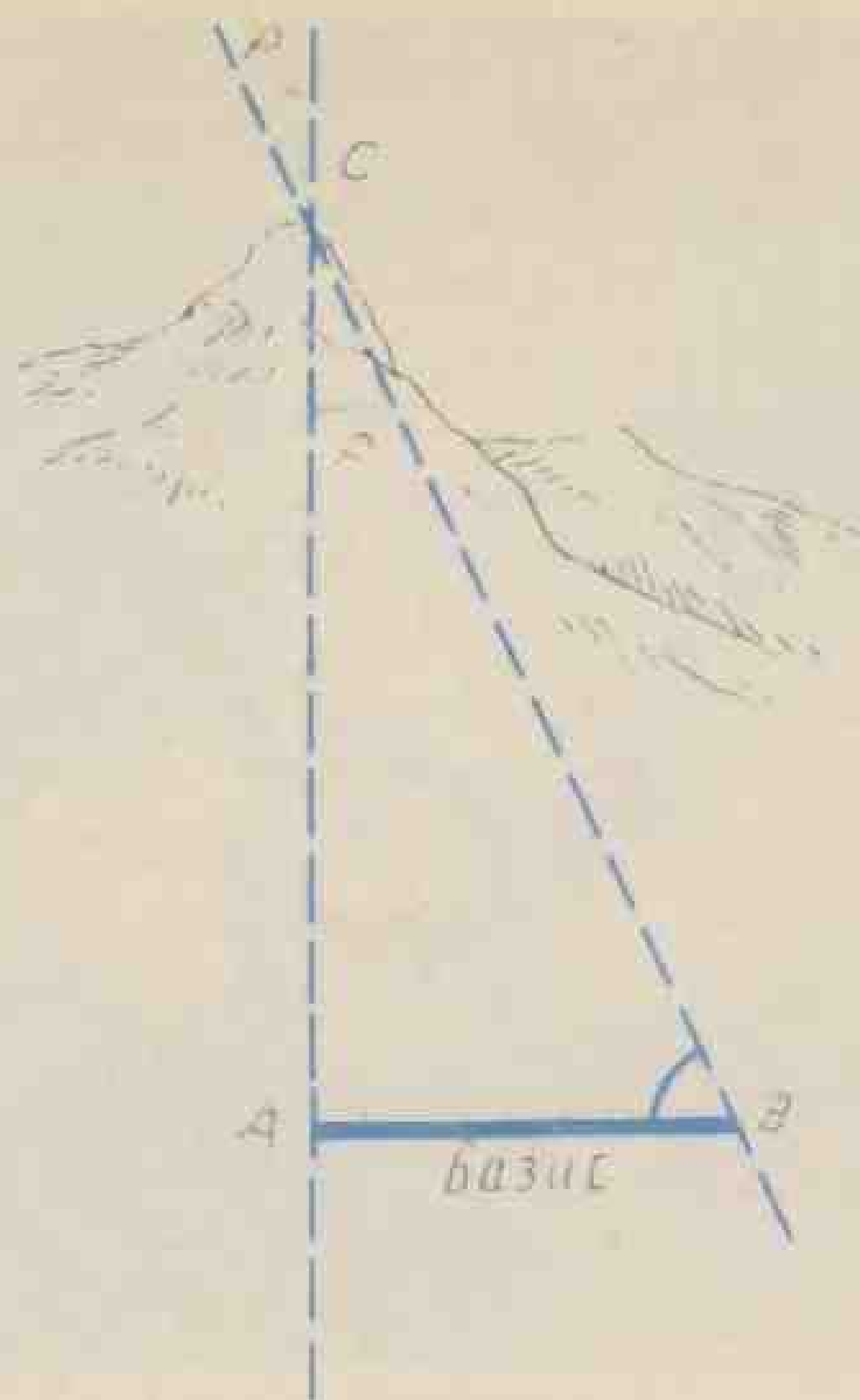


Рис. 8.5. Принцип определения расстояния по параллактическому смещению. Угол p — параллакс

диаметры одинаковы и составляют $0,53^\circ$. Расстояние до Луны считать равным 384 400 км.

9. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

9.1. Законы Кеплера. В конце XVI в. датский астроном Тихо Браге достиг той наибольшей точности определения угловых положений светил, которая в принципе возможна при работе с угломерными инструментами без использования оптики. Ошибки измеренных им угловых положений планет не превышали $\pm 2'$ дуги. Под таким углом виден отрезок длиной 1 см с расстояния 17 м. Результаты наблюдений Марса Тихо Браге передал своему ученику и помощнику, немецкому астроному Иоганну Кеплеру.



Иоганн Кеплер (1571—1630)

Тихо Браге надеялся, что эти наблюдения подтвердят его собственную систему мира, в которой все планеты, кроме Земли, обращались около Солнца, но само Солнце при этом, как и в системе Птолемея, двигалось вокруг Земли, неподвижно расположенной в центре мира. Однако выдвинутая уже после выхода в свет бессмертного труда Коперника система Тихо Браге была шагом назад в развитии астрономических представлений о строении мира.

Кеплер был убежден в правоте Коперника и выполнил огромное число расчетов относительных расстояний от Солнца до Земли и до Марса, основываясь на гелиоцентрической системе. Надо учесть, что в эпоху Кеплера не было тригонометрических таблиц и он фактически рассчитал их сам. Получив множество значений относительных расстояний сначала между Землей и Солнцем, а затем между Солнцем и Марсом, Кеплер смог вычертить ор-

биты Земли и Марса вокруг Солнца и получить форму траекторий. Испробовав разные кривые, он нашел, что планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам.

Эллипс — замкнутая кривая, замечательным свойством которой является постоянство суммы расстояний от любой ее точки до двух заданных точек, называемых *фокусами*.

Вспомните, как это свойство можно использовать, чтобы начертить эллипс.

Отрезок прямой, соединяющей наиболее удаленные друг от друга точки эллипса, называется его *большой осью*.

Среднее расстояние планеты от Солнца равно половине длины большой оси орбиты.

Почти 24 года потратил Кеплер на обработку наблюдений Тихо Браге. В итоге он установил три закона движения планет:

1. **Каждая планета движется вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.**

2. **Прямая, соединяющая планету с Солнцем, описывает площади, пропорциональные времени (т. е. равные площади за равные промежутки времени).**

3. **Квадраты времен обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца.**

Используя принцип инерции Галилея и законы Кеплера, следующий большой шаг в развитии астрономии и физики сделал Ньютон, введя в науку представление о *гравитационном взаимодействии тел*.

9.2. Закон всемирного тяготения. Представление о том, что между телами действуют силы притяжения,

возникло очень давно. Кеплер, например, считал, что вес тела аналогичен магнитному притяжению. Однако он думал, что сила взаимодействия между телами убывает обратно пропорционально первой степени расстояния. Заслуга Ньютона в том, что он сумел количественно определить силу взаимодействия между телами, показал, что она убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, и доказал ее универсальность в природе.

Закон всемирного тяготения был сформулирован и доказан на основе астрономических наблюдений.

Сначала Ньютон рассмотрел движение Луны и показал, что центростремительное ускорение, с которым она движется по орбите, меньше ускорения свободного падения тел на поверхности Земли примерно в 3630 раз. Это число оказалось близким к квадрату расстояния от Земли до Луны (выраженного в радиусах Земли): $(60,3)^2$. Отсюда Ньютон сделал вывод, что сила, удерживающая Луну при ее движении вокруг Земли, имеет ту же природу, что и сила тяжести (гравитация), и что действие этой силы убывает как квадрат расстояния. Затем, пользуясь законами Кеплера, Ньютон доказал, что та же зависимость имеет место и при движении планет вокруг Солнца.

Если M_1 и M_2 — массы тел, а r — расстояние между их центрами, то закон всемирного тяготения записывается в виде

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$, называется *гравитационной постоянной*.

Надо иметь в виду, что эта формула является достаточно точной лишь для частиц, имеющих исче-

зающе малые размеры по сравнению с расстоянием между ними. Однако она строго справедлива и для тел конечного размера, внутри которых вещество распределено сферически симметрично. Для астрономических объектов эти условия почти всегда выполняются, хотя в случае таких сравнительно близких друг к другу тел, как Земля и Луна, точные измерения обнаруживают отличие силы гравитационного притяжения от той, которая следует из приведенной выше формулы, вызванное неоднородным и несферическим распределением масс.

9.3. Вопросы

1. Что послужило Кеплеру основой для вывода своих законов?
2. Какие астрономические наблюдения использовал Ньютон при выводе закона всемирного тяготения?

9.4. Упражнения

1*. Докажите, что из второго закона Кеплера следует вывод: планета, двигаясь по своей орбите, имеет максимальную скорость на самом близком расстоянии от Солнца, а минимальную — на самом большом расстоянии. Как этот вывод согласуется с законом сохранения энергии?

2. Меняется ли скорость планеты, движущейся по круговой орбите? Является это движение равномерным или равноускоренным?

3. Сравнив расстояния от Солнца до Земли и до других планет с периодами их обращения (см. приложение III), проверьте выполнение третьего закона Кеплера.

4. Вычислите ускорение, которое Солнце сообщает Земле, притяги-

вая ее, а Земля Солнцу, притягивая его. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, масса Солнца в 330 000 раз больше.

10. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИИ

10.1. Задача двух тел. Только с открытием закона всемирного тяготения и основных законов механики появилась возможность математически рассчитать скорости и траектории тел, движущихся под действием сил гравитации.

Все тела в космическом пространстве притягивают друг друга. Поэтому не существует таких тел, которые бы двигались строго равномерно и прямолинейно.

Рассмотрим, как движутся два тела массой M и массой m (будем называть их телом M и телом m) под действием силы взаимного тяготения. Эта задача носит название задачи двух тел. Ускорение a тела m вызывается силой притяжения со стороны M , т. е.

$$F = \frac{GMm}{r^2} = ma. \quad (10.1)$$

Следовательно,

$$a = \frac{GM}{r^2}. \quad (10.2)$$

Тело m также действует на M , сообщая ему ускорение

$$a_1 = \frac{Gm}{r^2}. \quad (10.3)$$

Отнесем массу M к массивному объекту (звезда, Солнце, большая планета), а m — к его спутнику. Из формул 10.2 и 10.3 видно, что ускорения a и a_1 относятся, как массы M и m . Иными словами, ускорение

всегда испытывают оба притягивающих друг друга тела, но с наибольшим ускорением движется спутник m . Поэтому он перемещается на большие расстояния. Главное тело с массой M движется с ускорением в M/m раз меньшим, и нередко им можно пренебречь, считая тело неподвижным.

Ньютон математически доказал, что под действием тяготения тело m будет двигаться относительно M по одной из трех кривых: по эллипсу, параболе или гиперболе (две последние кривые не замкнуты). Каждую из них можно получить, пересекая конус вращения плоскостью под разными углами к его оси. Поэтому эти кривые плоские (т. е. все точки лежат в одной плоскости), и их называют *коническими сечениями*.

Таким образом, Ньютон уточнил и обобщил первый закон Кеплера, который теперь можно сформулировать следующим образом:

Под действием тяготения всякое тело движется по коническому сечению, т. е. по одной из трех кривых: эллипсу, параболе или гиперболе. При движении по эллипсу притягивающее тело всегда находится в одном из двух фокусов этой кривой.

В частности, движение тела m вокруг M может происходить по круговой орбите. Окружность — это предельный случай эллипса. Действительно, если фокусы эллипса совпадают, то кривая превращается в окружность.

Рассмотрим сначала задачу двух тел для кругового движения.

Пусть тело массой $m \ll M$ движется с линейной скоростью v_k вокруг тела M по окружности радиуса r_k (рис. 10.1). Это возможно только в том случае, если движение происходит под действием силы, создающей центростремительное уско-

рение $a = v_k^2 / r_k$. Единственная сила, создающая ускорение, — сила тяготения, равная GMm/r^2 . Приравнявая v_k^2/r_k к ускорению GM/r_k^2 , создаваемому тяготением, получаем:

$$v_k^2 = \frac{GM}{r_k}. \quad (10.4)$$

Мы получили важный вывод: круговое движение возможно при строго определенном значении скорости движения, зависящей от радиуса орбиты.

Скорость, которую необходимо сообщить телу для вывода на круговую орбиту вокруг Земли радиусом, равным радиусу Земли, называется первой космической скоростью v_1 :

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3}}; v_1 = 7,9 \text{ км/с}, \quad (10.5)$$

где M_3 — масса Земли.

Представим себе, что из точки A на расстоянии r_0 от центра тела M производят запуски искусственных спутников с различными значениями начальной скорости v_0 , перпендикулярной к r_0 (рис. 10.2).

Очевидно, что если

$$v_0 < v_k, \quad (10.6)$$

то тело движется медленнее, чем по круговой орбите, и эллипс орбиты оказывается внутри круга радиусом r_0 , а тело M — в более дальнем от точки A фокусе. При

$$v_0 > v_k \quad (10.7)$$

движение быстрее кругового, и эллипс орбиты оказывается вне круга r_0 , а тело M находится в ближнем к точке A фокусе этого эллипса.

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

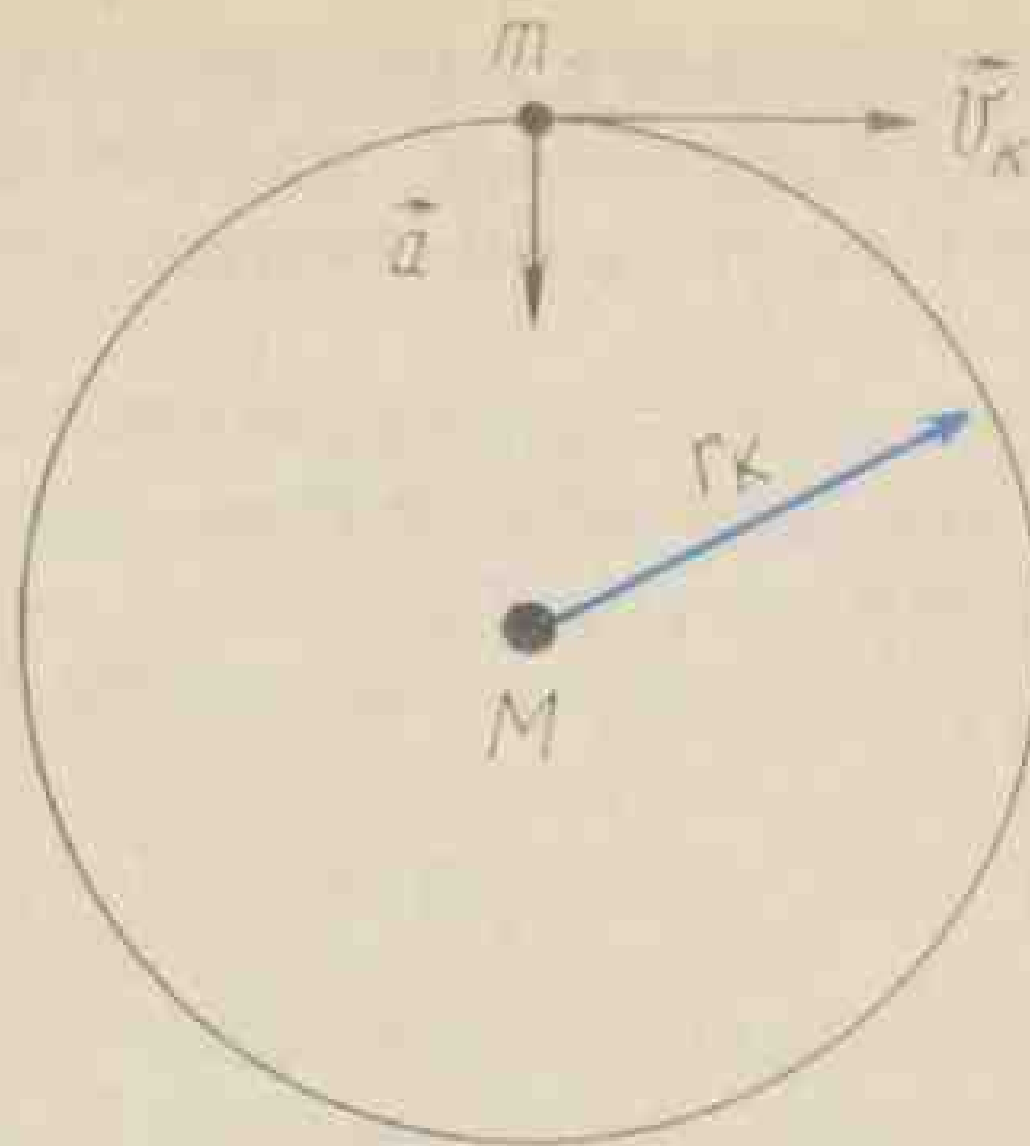


Рис. 10.1. Схема кругового движения тел

а для Земли — *второй космической скоростью*. Эта скорость равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{r_0}} = \sqrt{2} v_k. \quad (10.8)$$

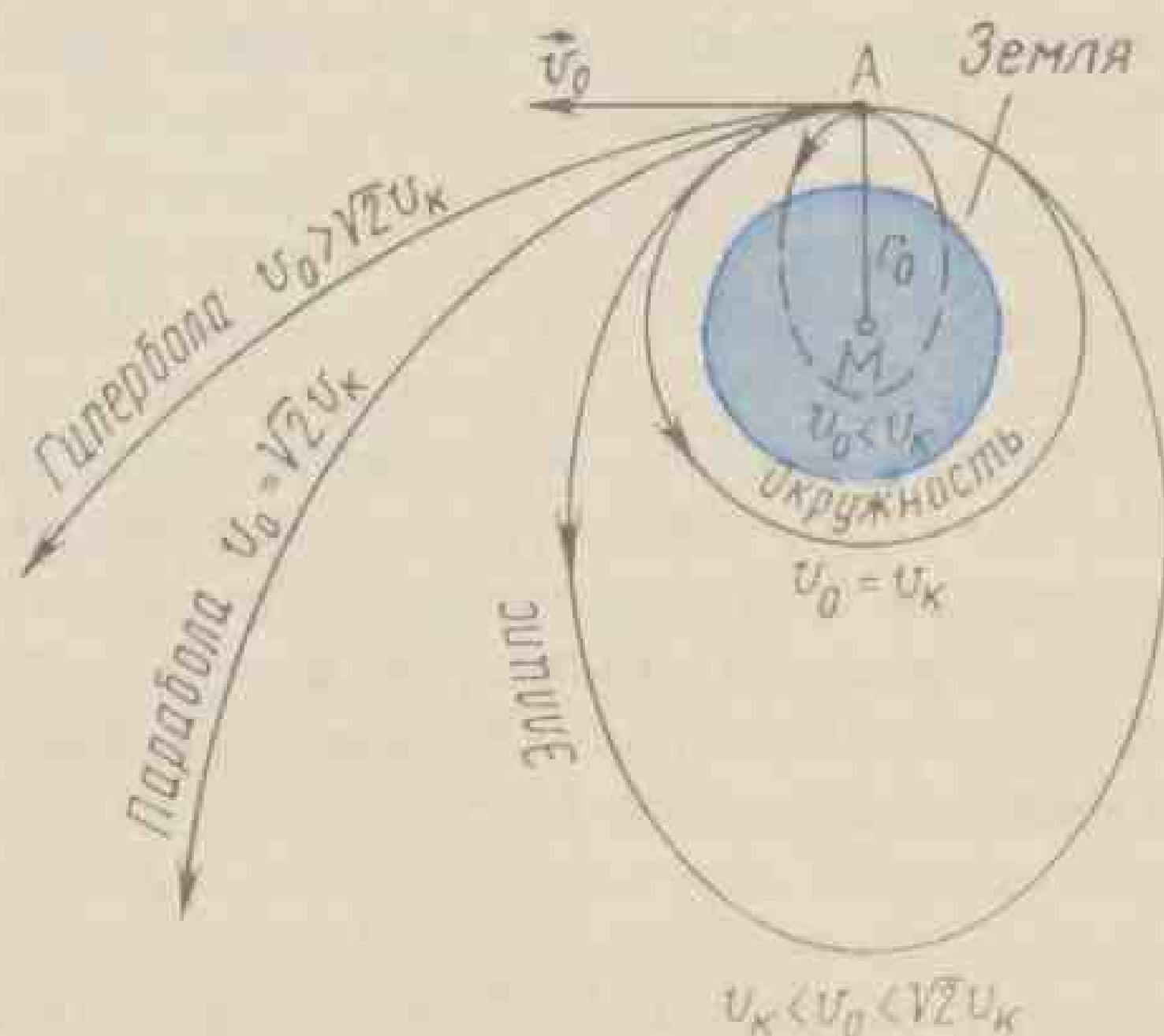
При запуске со второй космической скоростью тело m движется по незамкнутой кривой — параболе — и навсегда покидает тело M .

Если

$$v_0 > \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}, \quad (10.9)$$

то тело m движется по гиперболе и также уходит от тела M .

Рис. 10.2. Типы орбит



На основании закона всемирного тяготения и законов механики Ньютон объяснил не только первый закон Кеплера, но и два других.

Покажем выполнение третьего закона Кеплера для случая кругового движения со скоростью v_k .

Мы уже знаем из формулы (10.4), что

$$v_k^2 = GM/r_k.$$

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

$$v_k = 2\pi r_k / T. \quad (10.10)$$

Подставляя это выражение в формулу для v_k^2 , получим

$$\left(2\pi \frac{r_k}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r_k}, \quad (10.11)$$

$$\text{или } \frac{r_k^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}.$$

Для эллиптического движения эта формула также справедлива, если вместо радиуса окружности r_k подставить большую полуось A эллиптической орбиты. Тогда получим соотношение, которое можно сформулировать так: **куб большой полуоси орбиты тела, деленный на квадрат периода его обращения и на массу центрального тела, есть величина постоянная:**

$$\frac{A^3}{T^2 M} = \frac{G}{4\pi^2}. \quad (10.12)$$

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

$$\frac{A^3}{T^2 (M + m)} = \frac{G}{4\pi^2}. \quad (10.13)$$

Третий закон Кеплера играет исключительно важную роль в астрономии, позволяя на основании наблюдаемых значений периодов и известных значений расстояний находить массы — важнейшие характеристики небесных тел.

10.2. Небесная механика. В XVIII в. происходит быстрое развитие *небесной механики*, изучающей движения небесных тел с учетом их взаимного притяжения.

Математический аппарат небесной механики в XVIII и XIX вв. достиг большого совершенства, и появилась возможность решения сложных астрономических задач. Некоторые из них имели принципиальное значение и послужили кардинальной проверкой правильности теории движения небесных тел. Так, на основании трудоемких расчетов английский астроном Эдмунд Галлей пришел к заключению, что ряд ранее наблюдавшихся комет в действительности представляет собой одну комету, которая обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой эллиптической орбите. С тех пор эта комета носит имя Галлея. Так было доказано, что кометы входят в состав Солнечной системы и их движение подчиняется закону всемирного тяготения.

Триумфом небесной механики было открытие восьмой планеты Солнечной системы — Нептуна — на основании теоретических расчетов. Основой для них послужили отклонения наблюдаемого движения самой далекой из известных в то время планет — Урана — от теоретически вычисленного. Стало ясно, что имеется неизвестное небесное тело, которое своим притяжением искажает (возмущает) движение Урана. В 1846 г. положение этой гипотетической планеты практически одно-

временно было определено путем расчетов независимо друг от друга двумя астрономами: Леверье во Франции и Адамсом в Англии. Как только телескоп был наведен в соответствующую точку неба, обнаружилась ранее неизвестная планета. Ее назвали Нептуном.

Открытие Нептуна было великолепным подтверждением правильности основных положений теории движения небесных тел.

В настоящее время небесная механика используется для расчета движения не только естественных тел Солнечной системы, но и искусственных космических аппаратов.

10.3. Вопросы

1. Как Ньютон уточнил законы Кеплера? Какие из уточнений связаны с их обобщением, а какие — с более точными числовыми соотношениями? 2. Какие задачи решает небесная механика?

10.4. Упражнения

1. Какую скорость надо сообщить космическому аппарату, чтобы он навсегда покинул Землю?

2. Вычислите первую и вторую космические скорости для Луны, масса которой в 81 раз, а радиус в 4 раза меньше, чем у Земли.

3. Определите период обращения ИСЗ, движущегося по круговой орбите на высоте 20 000 км, сравнив его с периодом обращения Луны, расстояние до которой 400 000 км.

4. Большая полуось орбиты спутника — 100 000 км. Каков период его обращения?

11. ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

11.1. Движение искусственных небесных тел. Закон всемирного тяготения и вытекающие из него законы небесной механики в равной степени применимы для определения движения как естественных, так и искусственных небесных тел. Без знания небесной механики нельзя рассчитать траектории космических аппаратов (КА), ракет и орбитальных станций, невозможно осваивать космическое пространство.

Идея применения ракетной техники для запуска аппаратов с людьми или научным оборудованием в космическое пространство была обоснована в работах нашего замечательного соотечественника К. Э. Циолковского. Задача посылки аппаратов в космос технически очень сложна. Ведь минимальная скорость, которую для этого надо сообщить телам, — первая космическая скорость — в несколько раз превышает скорость артиллерийского снаряда.

Первый в истории искусственный спутник Земли (ИСЗ), возвестивший начало космической эры, был запущен в СССР 4 октября 1957 г. Уже через несколько лет после этого в нашей стране были созданы космические аппараты, которым при запуске сообщалась вторая космическая скорость, так что они могли навсегда покинуть Землю (полеты КА к Луне, а затем к Венере и Марсу).

В настоящее время в космическом пространстве движется несколько тысяч тел, созданных человеком (главным образом в нашей стране и США). Большая часть аппаратов обращается вокруг Земли по эллиптическим орбитам. Форма их орбиты

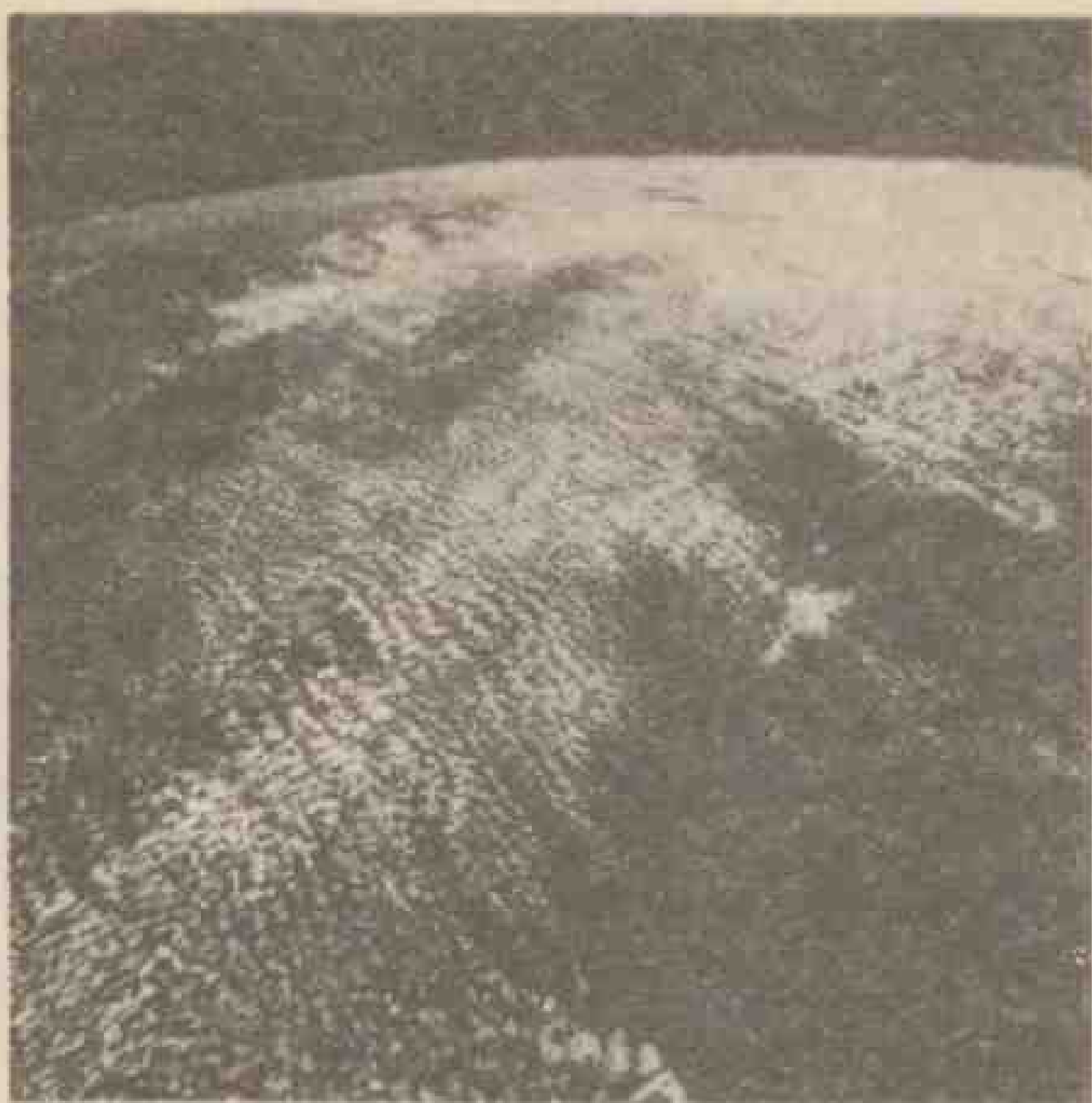


Рис. 11.1. Участок земной поверхности (фотография из космоса)

выбирается в зависимости от конкретных задач, выполняемых КА. Почти во всех случаях самая близкая к Земле точка орбиты (*перигей*) находится на высоте не менее 200 км. На меньшей высоте спутники, испытывая сильное тормозящее влияние земной атмосферы, быстро теряют свою скорость и падают на Землю.

11.2. Возможности космических исследований. Использование ИСЗ оказалось очень удобным и рентабельным во многих отраслях народного хозяйства. При помощи КА можно получать изображения больших участков поверхности Земли (рис. 11.1). Через ИСЗ устанавливают надежную радиосвязь между отдаленными пунктами Земли или между океанскими судами и материком, осуществляют прием радио- и телепередач на большие расстояния. Метеорологические спутники следят за перемещением облачного покрова и изменением температуры различных районов планеты. Поступающая от них информация используется для составления прогно-

зов погоды. Специализированные ИСЗ используются для составления точных карт и для определения географических координат места наблюдения. Из космоса проводится геологическое исследование планеты, слежение за морями и океанами, за таянием льдов, за ростом и созреванием сельскохозяйственных культур. Этим далеко не исчерпываются все возможности применения ИСЗ.

Для ретрансляции радио- и телевизионных сигналов запускаются *геостационарные спутники*, радиус орбит которых составляет около 42 000 км, а плоскость совпадает с плоскостью экватора. Период обращения этих ИСЗ равен периоду осевого вращения Земли (т. е. звездным суткам, или 23 ч 56 мин). Поэтому, двигаясь в сторону вращения Земли, такой спутник оказывается неподвижным относительно земной поверхности, он как бы «висит» над некоторой точкой экватора. Это дает возможность установить круглосуточную связь со спутником с помощью неподвижных (стационарных) радиоантенн, направленных в ту точку неба, где находится спутник.

Запуск космических аппаратов осуществляют при помощи ракет, состоящих из нескольких ступеней, или реактивных аппаратов многоразового использования, сочетающих возможности самолета и ракеты.

Начальный участок траектории, на протяжении которого работают ракетные двигатели, называется *активным*. На этом участке, помимо силы притяжения Земли и сопротивления воздуха, на КА действует еще и сила тяги ракетного двигателя. Когда скорость КА достигает заданных значений величины и направления, двигатели выключа-

ются, и КА начинает свободный полет под действием лишь сил гравитации. Аппарат движется по траектории, которую можно рассчитать методами небесной механики. При этом обычно выбираются энергетически наиболее выгодные траектории, касательные к орбитам Земли и другой планеты (рис. 11.2). Свободный полет КА может продолжаться сколь угодно долго без всякой затраты энергии, если на пути его движения не встретится какое-либо космическое тело.

Когда КА удаляется на большое расстояние от Земли, становятся существенными силы притяжения, действующие на него со стороны Луны, Солнца или тех планет, к которым он приблизился. Сила, действующая на КА, в этом случае определяется как векторная сумма соответствующих гравитационных сил. Из-за того что все тела непрерывно движутся относительно КА, расстояния и направления на них все время меняются. Это значительно усложняет расчеты движения КА, и их выполняют на быстродействующих ЭВМ.

Если слежение за КА показывает, что его траектория отличается от расчетной, то обычно в определенный момент на короткое время включают специальный ракетный двигатель КА и, слегка изменяя скорость, выводят его на правильную траекторию. Такая процедура называется *коррекцией* траектории. Участок траектории, на котором она проводится, также является активным. При полете КА к другим планетам обычно проводят несколько коррекций траектории, чтобы аппарат подошел к планете в определенное время и приблизился на заданное расстояние.

В настоящее время благодаря успехам космической техники все пла-

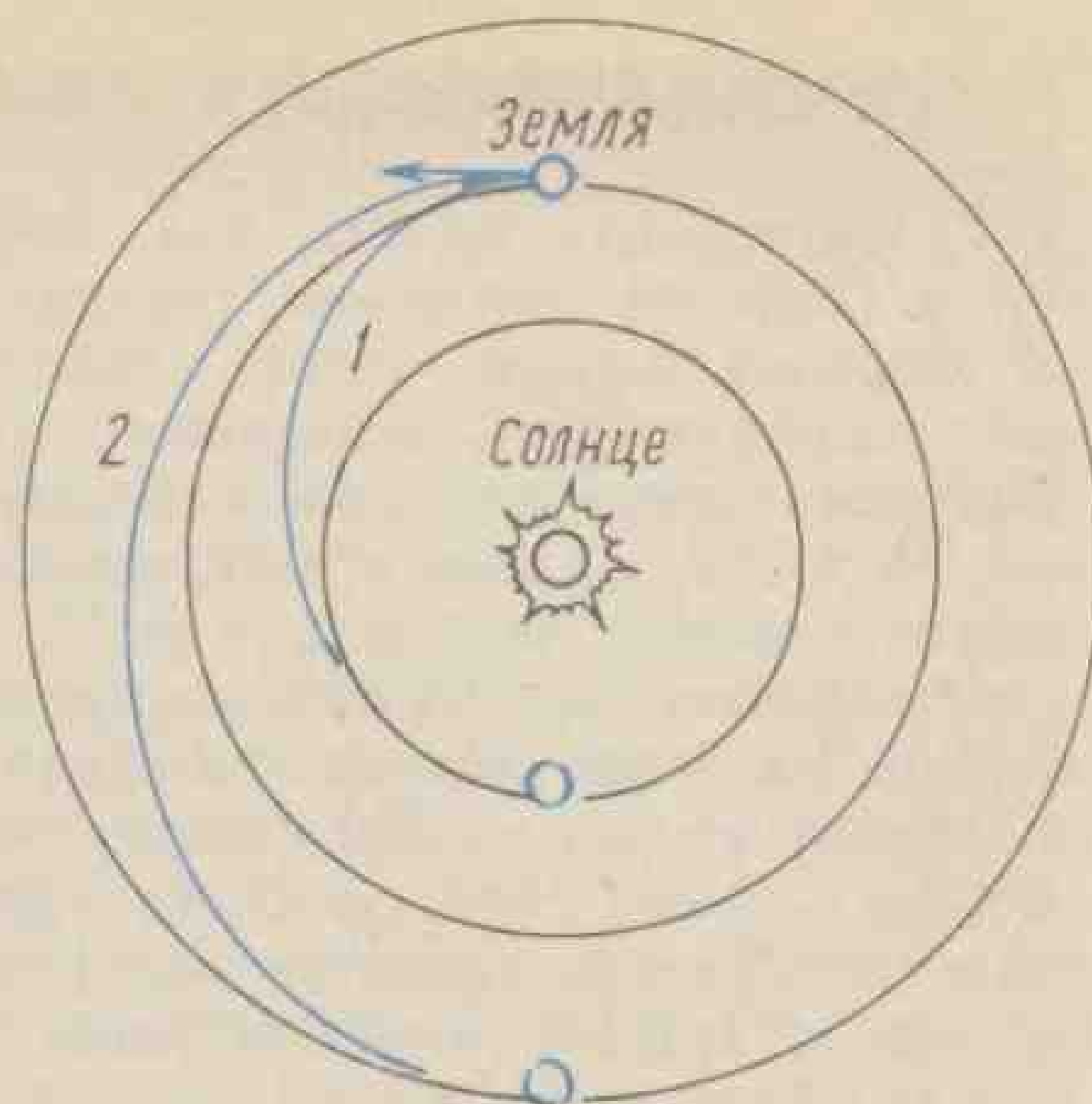


Рис. 11.2. Оптимальные траектории полета к внутренней (1) и внешней (2) планете

неты Солнечной системы находятся в пределах досягаемости космических аппаратов.

Исследование космического пространства все шире приобретает международный характер. Совместные эксперименты в космосе по международным программам не только дают ощутимый экономический эффект, но и играют огромную роль, сближая различные страны в решении глобальных общечеловеческих задач.

11.3. Вопросы

1. Почему с точки зрения затраты энергии выгоднее запускать ИСЗ в направлении с запада на восток?
2. Первый ИСЗ совершал один оборот вокруг Земли за 1,5 ч. Может ли современный космический аппарат облететь Землю быстрее?
3. Можно ли запустить ИСЗ, который бы, вращаясь вокруг Земли, все время «висел» над Москвой?
4. В каком направлении энергетически выгодно запускать КА: а) к Марсу; б) к Меркурию?

11.4. Упражнения

1. Определите высоту над Землей и скорость движения спутника на геостационарной орбите. *Указание:* воспользуйтесь значением первой космической скорости и формулой скорости движения по круговой орбите в задаче двух тел.

2*. Рассчитайте время перелета до Венеры и до Марса (в годах) по траекториям, изображенным на рисунке 11.2. (Радиусы орбит Венеры и Марса считать равными 0,7 а.е. и 1,5 а.е. соответственно.)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА III

Первые попытки объяснить сложные видимые движения планет были предприняты еще в древности. Непосредственно из наблюдений можно было установить только синодический период повторяемости различных конфигураций (положений) планет относительно Солнца (соединение, противостояния и т. д.). Правильные представления о движении тел Солнечной системы сложились лишь в XVI—XVII вв. благодаря трудам Коперника, Кеплера, Галилея и Ньютона.

Коперник показал, что видимые перемещения планет по небу объясняются их обращением вокруг Солнца, наблюдаемым с движущейся Зем-

ли. Система Коперника позволила установить соотношение между синодическим и сидерическим периодами обращения планет, а также найти относительные расстояния планет от Солнца. После того как удалось измерить параллакс ближайших планет, стало возможным выражать расстояния до планет в километрах.

Кеплер на основании наблюдений сформулировал три важных закона обращения планет вокруг Солнца. Галилей открыл свойство инерции механического движения, а Ньютон сформулировал основные законы механики и закон всемирного тяготения. Эти законы легли в основу важного раздела астрономии — небесной механики, целью которой является расчет траекторий движения (орбит) космических тел (как естественных, так и искусственных) и их положений на орбитах.

В общем случае два притягивающих друг друга тела могут двигаться по эллипсу, параболе или гиперболу. У планет скорость движения по орбите тем больше, чем они ближе к Солнцу.

Движение космических аппаратов подчиняется тем же законам, что и движение планет. Развитие космической техники открыло новые широкие возможности для науки и народного хозяйства.

IV. МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

12. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

12.1. Шкала электромагнитных волн. Подавляющая часть наших знаний о физической природе космических объектов получена путем анализа приходящего от них света или других видов электромагнитного излучения.

Свет — сложное физическое явление: с одной стороны, это электромагнитные волны; с другой стороны, свет излучается и поглощается отдельными «порциями», которые характеризуются определенным значением энергии и импульса. Поэтому всякое излучение можно рассматривать и как волну, и как поток отдельных частиц — *фотонов* (квантов).

В вакууме электромагнитные волны распространяются с одинаковой для всех видов излучения скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Вы уже знаете, что всякая волна характеризуется частотой ν и длиной волны λ , между которыми существует зависимость

$$\nu\lambda = c.$$

Энергия фотона пропорциональна частоте излучения.

При помощи специальных приборов излучение можно разложить на составляющие его электромагнитные колебания разных длин волн. Результат такого разложения называют *спектром*. Радуга, часто наблюдаемая на небе после дождя, — пример естественного спектра, получающегося при разложении света

Солнца капельками воды на лучи различных цветов.

Цвет видимого излучения определяется длиной волны. Глаз человека воспринимает излучение с длиной волны от 0,4 мкм (*фиолетовый цвет*) до 0,7 мкм (*красный цвет*). Свет — лишь один из многих видов электромагнитных излучений, которые все вместе образуют *шкалу* (последовательность) *электромагнитных волн*. Наибольшую длину волны имеют радиоволны, а наименьшую — *гамма-лучи*.

12.2. Всеволновая астрономия. Земная атмосфера прозрачна для видимого электромагнитного излучения. Из недоступных человеческому глазу видов излучения она пропускает только незначительную часть ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, а также широкий диапазон радиоволн от нескольких миллиметров до 15—20 м. Все остальные электромагнитные волны сильно поглощаются различными слоями земной атмосферы и недоступны наблюдениям с поверхности Земли (рис. 12.1).

До изобретения фотографии единственным приемником излучения являлся глаз наблюдателя. Поэтому использовалась лишь ничтожная часть всей шкалы электромагнитных волн.

С появлением фотографии, а позднее и фотоэлектрических приемников излучения стали осваиваться другие участки спектра электромагнитных волн — *инфракрасные* и *ультрафиолетовые лучи*, частично проходящие через земную атмосферу.



Рис. 12.1. Пропускание электромагнитного излучения земной атмосферой. По ординате отложена высота, до которой проникает данный вид излучения

В 30-х годах нашего столетия развитие радиотехники привело к открытию *космического радиоизлучения*, приходящего из межзвездного пространства и достигающего земной поверхности. Тем самым началось освоение «радиоокна» земной атмосферы. Возникла *радиоастрономия*, необычайно расширившая наши знания о процессах, происходящих во Вселенной.

Прием электромагнитного излучения в диапазонах, не пропускаемых земной атмосферой, стал возможен лишь в последние десятилетия в результате использования высотных ракет, искусственных спут-

ников Земли и других космических аппаратов. На них устанавливают научную аппаратуру для регистрации рентгеновского и гамма-излучения или наиболее длинноволнового инфракрасного излучения, приходящего из космоса.

Наблюдение астрономических объектов в диапазонах спектра, недоступных с Земли, является основной задачей современных космических исследований в области астрономии.

С возникновением радиоастрономии и развитием внеатмосферных методов наблюдений небесных объектов ученым стали доступны практически все виды электромагнитного излучения из космических глубин. В результате современная астрономия стала всеволновой.

Оказалось, что в различных диа-

пазонах электромагнитного излучения небо «выглядит» совершенно по-разному. Объекты, яркие в одних лучах, могут быть совершенно незаметными в других. В видимых лучах, например, ничто не может сравниться по яркости с Солнцем, следующий по яркости объект — полная Луна — уступает Солнцу примерно в миллион раз. Однако на «радионебе» в диапазоне метровых волн ярче всего «светит» центр нашей Галактики и отдельный источник в созвездии Кассиопеи, возникший в результате взрыва звезды. В рентгеновских и гамма-лучах наблюдается множество источников, которые вообще не видны в других диапазонах спектра и о существовании которых в большинстве случаев ранее даже не догадывались.

12.3. Вопросы

1*. Скольким октавам (изменение частоты вдвое) соответствует шкала наблюдаемых электромагнитных волн (см. табл. V в приложении) и сколько из них приходится на видимое излучение? 2. Что означает выражение «всеволновая астрономия»? 3. Каковы цели и возможности внеатмосферной астрономии?

13. ТЕЛЕСКОПЫ В АСТРОНОМИИ

13.1. Назначение телескопов. Чтобы принять излучение, приходящее от космического объекта, в астрономии используют специальные инструменты — *телескопы*. Их конструкция и размеры зависят от конкретных задач, в первую очередь от вида исследуемого объекта. Существуют оптические телескопы для изучения ультрафиолетового, видимого

и инфракрасного излучений, специальные рентгеновские, гамма- и радиотелескопы и даже телескопы для регистрации приходящих из космоса потоков всепроникающих элементарных частиц — нейтрино, они устанавливаются глубоко под поверхностью Земли.

При всем своем разнообразии телескопы, принимающие электромагнитные излучения, решают две основные задачи:

1) собрать от исследуемого объекта как можно больше энергии излучения данного вида; 2) создать по возможности наиболее резкое изображение объекта, чтобы можно было выделять излучение от отдельных его деталей, а также измерять угловые расстояния между ними.

Любой телескоп содержит два важнейших элемента: 1) *объектив*, собирающий излучение и создающий изображение (у радиотелескопа роль объектива играет антенна); 2) устройство, регистрирующее и анализирующее это излучение (*глаз, фотопластинка, фотоэлектрический приемник излучения, приемник радиоволн* и т. д.).

Современный астрономический телескоп — это сложный высокоточный измерительный инструмент, оснащенный разнообразным оборудованием, предназначенным для управления работой телескопа, регистрации и анализа излучения.

13.2. Оптические телескопы. В начале XVII в. Галилео Галилей впервые направил на небо изготовленный им телескоп, состоящий из двух линз. Телескопы Галилея по качеству изображения были не лучше современного бинокля. Тем не менее при помощи этих инструментов путем внимательных и кропотливых наблюдений Галилей смог сделать ряд важнейших открытий: пятна на

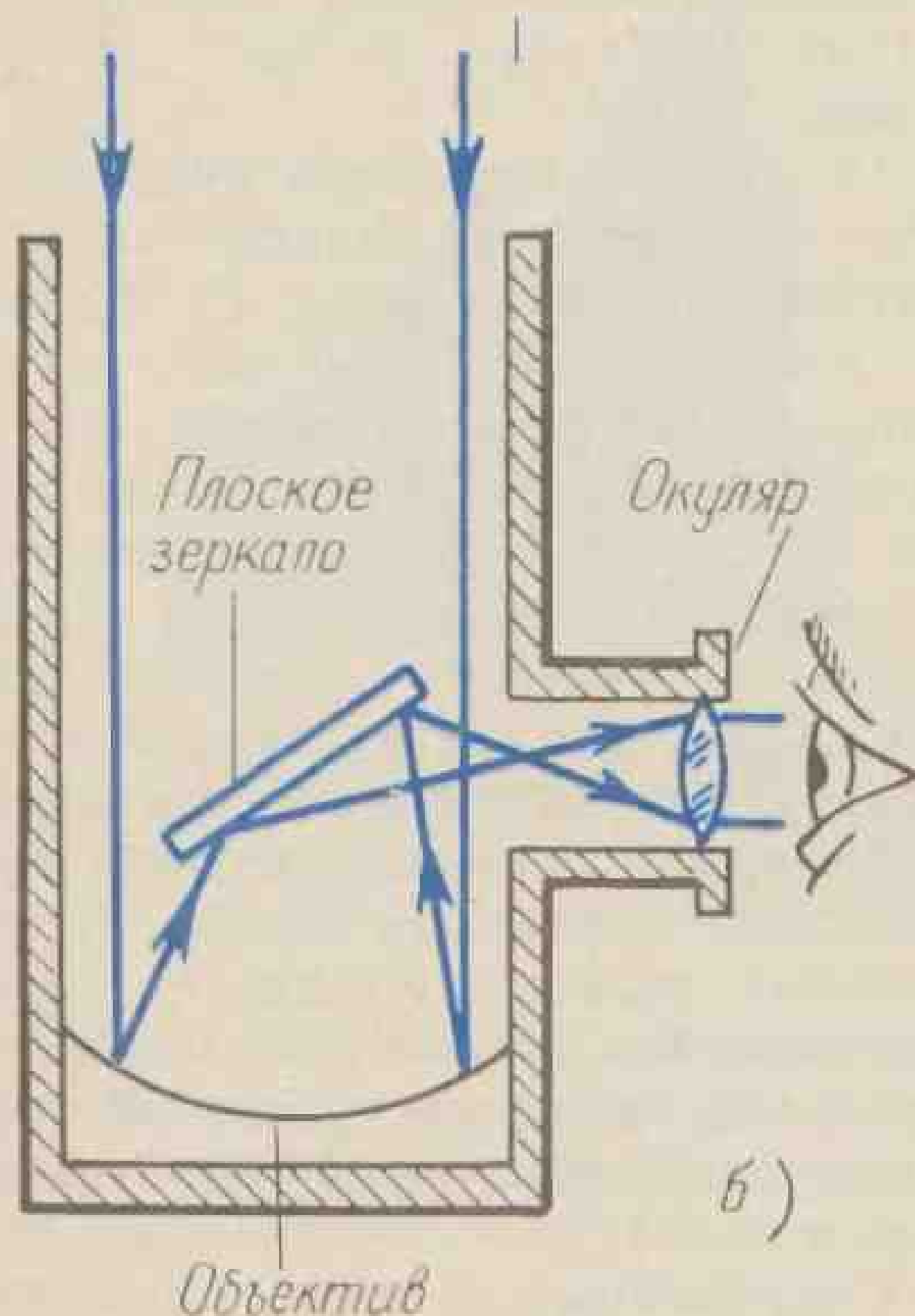
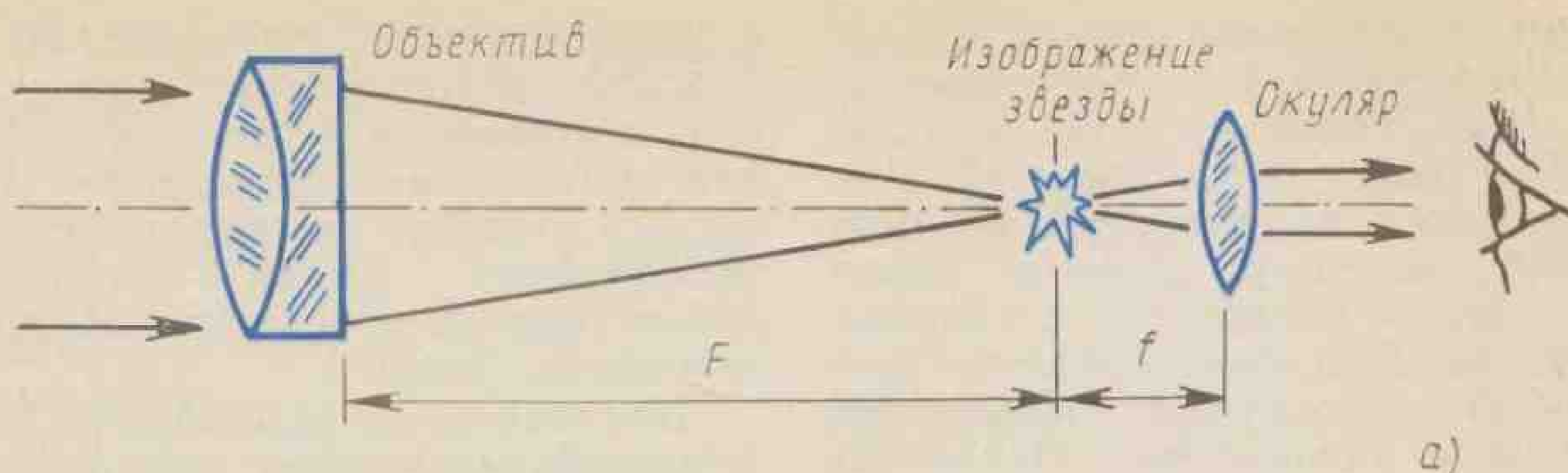


Рис. 13.1. Ход лучей от звезды в рефракторе (а) и рефлекторе (б)

Солнце, горы на Луне, четыре спутника Юпитера, фазы Венеры и множество слабых звезд, никогда прежде не наблюдавшихся невооруженным глазом. В астрономии настала эпоха *телескопических наблюдений*.

Принцип работы *оптического телескопа* основан на свойстве выпуклой линзы или вогнутого зеркала (*объектива*) собирать в точку (*фокус*) параллельные лучи света, приходящие от далеких источников, и создавать *резкое изображение* этих

источников в плоскости, называемой *фокальной*. Изображение в фокальной плоскости можно рассматривать в *лупу* (линзу), называемую *окуляром*, фотографировать, разлагать в спектр или изучать каким-либо другим способом.

Самым важным параметром телескопа является диаметр объектива, который строит изображение. Чем больше его площадь, тем больше света попадает в телескоп и тем более слабые объекты будут доступны наблюдателю. Если объективом телескопа является линза или система линз, то телескоп называется *рефрактором*, а если вогнутое зеркало, то *рефлектором*. В рефракторе свет проходит через объектив, в рефлекторе отражается от его зеркальной поверхности (рис. 13.1). Первый небольшой рефлектор был изготовлен И. Ньютоном.

Самый крупный в мире рефрактор установлен на Йеркской обсерватории близ Чикаго. Диаметр его объектива около 1 м. Очень большие тяжелые линзы поглощают много света и сильно деформируются под действием своего веса, что сказывается на качестве изображения. Поэтому объективы с диаметром более 0,5 м обычно делаются зеркальными. Самый крупный рефлектор, построенный в нашей стране, имеет диаметр объектива 6 м (рис. 13.2). Диаметр зеркального объектива са-

мого крупного в мире телескопа (США) составляет 10 м.

В настоящее время в мире имеется более десятка телескопов с зеркалами, превышающими в диаметре 3,5 м.

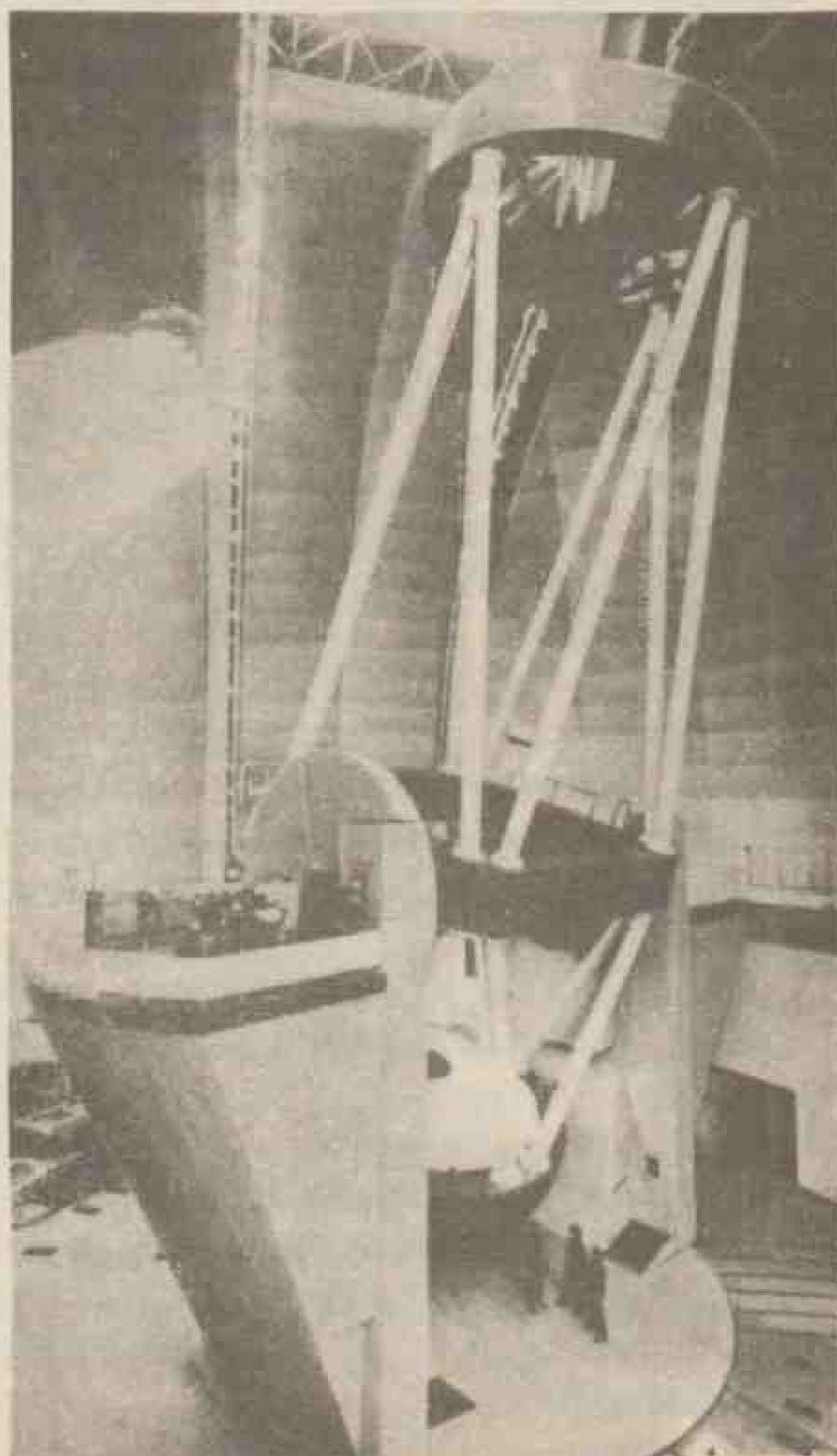
Если наблюдения проводятся в телескоп глазом, то называются *визуальными*. Глаз, рассматривающий изображение (построенное объективом) через линзу (окуляр), видит его увеличенным. При этом под *увеличением* понимают отношение видимых угловых размеров объекта при наблюдении в телескоп и без него. **Увеличение равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.** Меняя окуляры, можно с одним и тем же телескопом получать самые различные увеличения. На практике даже с крупными инструментами редко используют увеличения более чем в 200—300 раз, главным образом из-за размывания изображения воздушными потоками, так как неоднородности воздушной среды нарушают прямолинейное распространение световых лучей, делая изображение нерезким.

Вплоть до конца XIX в. практически все наблюдения в телескоп проводились визуально. Лишь с появлением фотопластинок, а затем и других приемников излучения астрономы перешли к объективной регистрации излучения при помощи тех или иных приборов. В настоящее время с научной целью визуальные наблюдения почти не производятся. Их недостатки очевидны. Во-первых, глазом нельзя точно измерить световую энергию, во-вторых, глаз, в отличие от фотоэмульсии и других приемников излучения, не обладает способностью накапливать энергию света. Например, на фотопластинке за несколько десятков минут получают изображения гораздо

более слабых звезд, чем можно увидеть в тот же телескоп глазом.

Помимо фотоэмульсии, для регистрации света, собранного телескопом, используются приборы различных типов, превращающие световую энергию в энергию электрического тока. Такие приемники излучения называют *фотоэлектрическими*. Они более чувствительны к свету, чем фотоэмульсия. Электрические сигналы на выходе этих приемников многократно усиливаются и регистрируются специальными приемниками или вводятся в память

Рис. 13.2. Рефлектор с зеркальным объективом диаметром 6 м (Северный Кавказ)



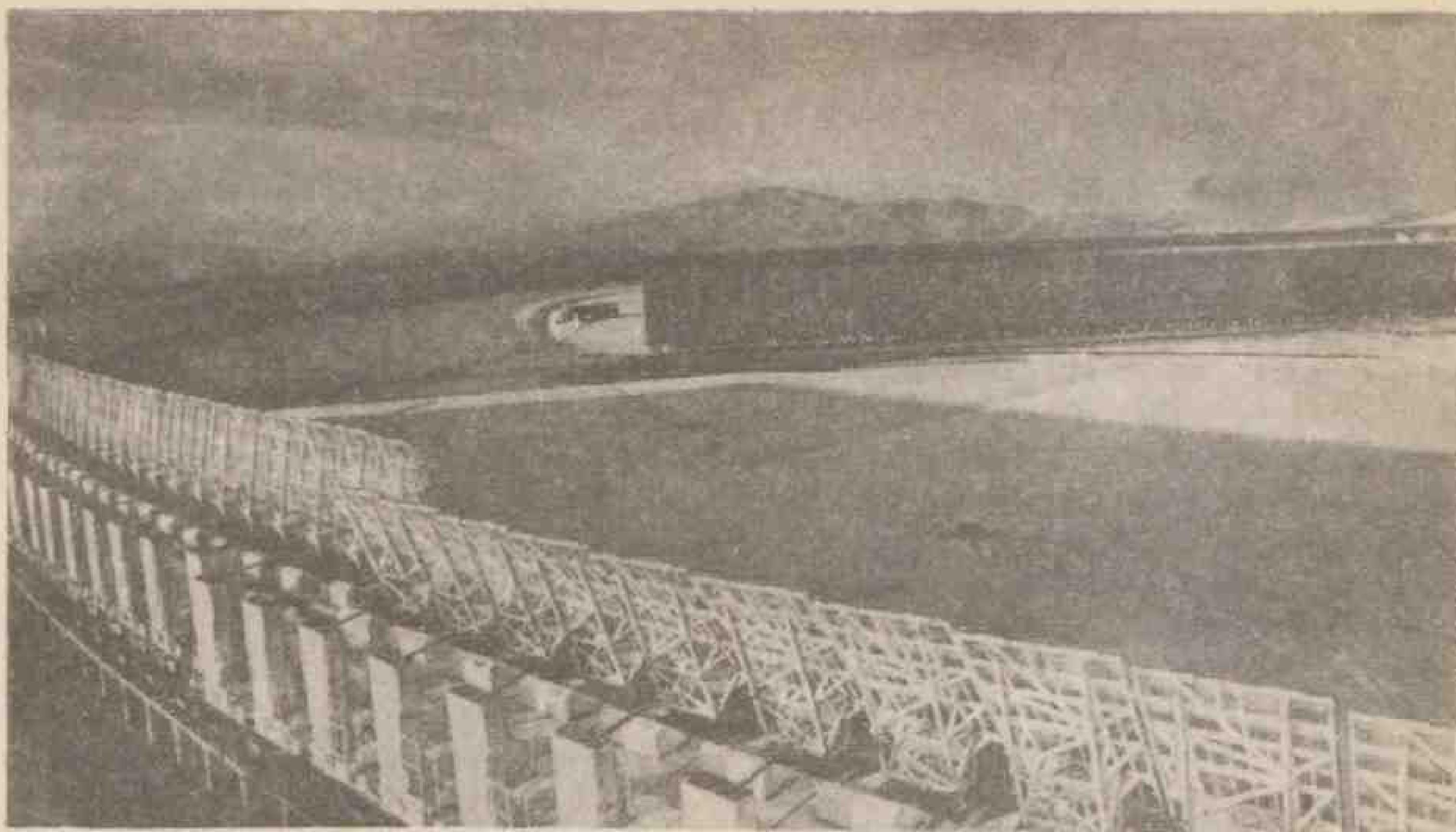


Рис. 13.3. Антенна радиотелескопа
РАТАН-600

ЭВМ для дальнейшей математической обработки.

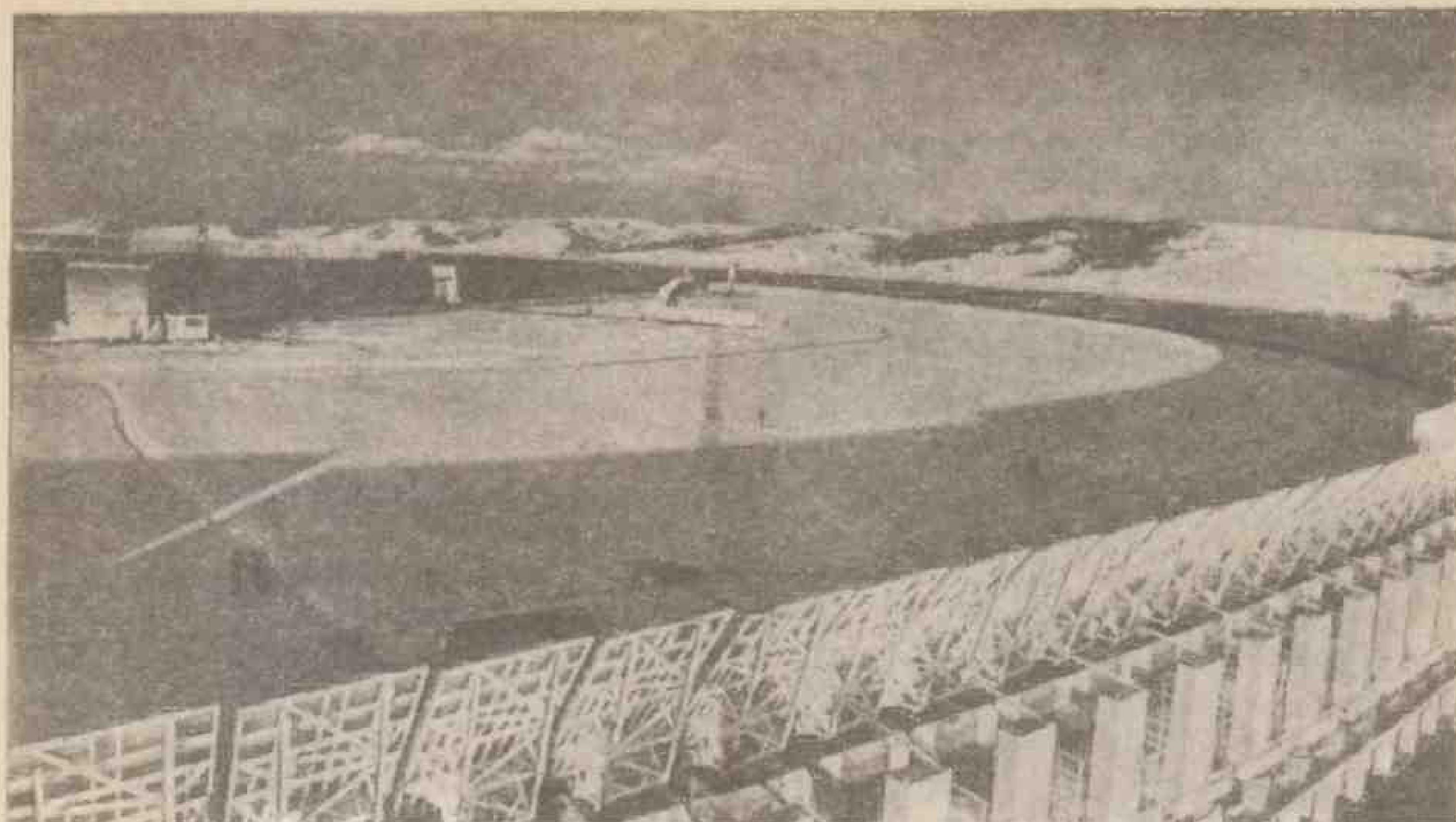
Чувствительность современных фотоэлектрических приемников излучения настолько велика, что можно как бы «поштучно» регистрировать отдельные кванты света, подействовавшие на светочувствительные элементы. Большие телескопы позволяют измерять потоки излучения от звезд, в сотни миллионов раз более слабых, чем те, которые едва заметны на ночном небе невооруженным глазом.

13.3. Угловое разрешение телескопов. Важной задачей оптического телескопа является получение как можно более резкого изображения исследуемого объекта. Чем резче изображение, тем более мелкие детали объекта можно исследовать и тем более слабые звезды доступны наблюдениям.

Качество изображения в теле-

скопе характеризуется его *угловым разрешением*. Угловое разрешение телескопа определяется как минимальное угловое расстояние β между двумя звездами, при котором их изображения не сливаются в одно. Чем выше качество объектива данного телескопа и чем спокойнее земная атмосфера, тем лучше разрешение, т. е. меньше угол β .

Человек с нормальным зрением без большого напряжения различает детали с размерами 100—200 секунд дуги (2—3 угловые минуты). Современная технология изготовления больших объективов позволяет добиться разрешения в сотни раз лучше, чем у самого зоркого глаза. Однако, как уже говорилось, при наблюдениях с Земли неоднородности воздушной среды приводят к заметному размыванию изображения. В итоге наземные телескопы, как правило, дают разрешение около 1", и только в редких случаях при очень хороших атмосферных условиях удается получить разре-



шение в несколько десятых долей секунды дуги. Угловые размеры звезд, даже самых близких, во много раз меньше. Поэтому их диски увидеть в телескоп ни при каком увеличении нельзя.

Какое предельное увеличение n целесообразно применять при визуальных наблюдениях, если $\beta = 2''$?

Помимо земной атмосферы и качества изготовления объектива, есть еще одна причина, ограничивающая разрешение телескопа. Эта причина имеет принципиальный характер и связана с волновой природой света. Обусловленное ею наименьшее возможное значение β , которое мы обозначим через β_0 , называется *теоретическим разрешением*. В радианах оно приблизительно равно отношению длины волны излучения к диаметру объектива телескопа:

$$\beta_0 \approx \frac{\lambda}{D}.$$

Современное оптическое производство, как правило, обеспечивает

достижение разрешений, близких к теоретическим. Но если β_0 значительно меньше угловой секунды, то полностью реализовать такое высокое разрешение можно, лишь проводя наблюдения за пределами атмосферы. Самый большой космический телескоп, созданный для наблюдения в оптическом диапазоне, имеет зеркало диаметром 2,4 м (США).

Выразите β в приведенной выше формуле в секундах дуги.

13.4. Радиотелескопы. Для приема космического радиоизлучения предназначены специальные *радиотелескопы*. Как правило, они имеют очень большие радиоантенны, подключенные к чувствительным приемникам, от которых усиленный сигнал попадает в регистрирующую аппаратуру, связанную с ЭВМ. Антенна радиотелескопа отличается от обычных антенн радиосвязи высокой *направленностью*, т. е. способностью выделить радиоизлучение небольшого участка неба. Поскольку пре-

дельное угловое разрешение радиотелескопа определяется так же, как и у оптического, и составляет λ/D , а длина волны в радиодиапазоне в миллионы раз больше, чем для видимых лучей, ясно, почему антенны радиотелескопов стремятся делать очень большими. Так, например, один из крупнейших в Европе радиотелескопов РАТАН-600, установленный в нашей стране, имеет антенну, состоящую из множества металлических щитов, расположенных по кругу диаметром 600 м (рис. 13.3).

Используя системы далеко расставленных антенн (*радиоинтерферометры*), удастся получить разрешение даже лучшее, чем для оптических телескопов. Для этого проводятся одновременные наблюдения радиоисточников двумя или несколькими антеннами, установленными на больших расстояниях, иногда даже на различных континентах. В этом случае в формуле для теоретического разрешения величина D уже будет относиться не к диаметру отдельных антенн, а к расстоянию между ними.

13.5. Типовая задача. Определение параметров телескопа.

Условие. Диаметр объектива рефрактора $D=20$ см, а фокусное расстояние $F=3$ м. Каково теоретическое разрешение β_0 для визуальных наблюдений?

Какое увеличение получается при работе с окуляром, если его фокусное расстояние $f=10$ мм?

Решение. По формуле для разрешения имеем $\beta_0 \approx \lambda/D$. Принимая для визуальных лучей $\lambda=500$ нм, получаем $\beta_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м} : 0,2 \text{ м} = 2,5 \cdot 10^{-6}$ (радиан). $1 \text{ радиан} = 57,3^\circ = 3438' = 206\,265''$. Следовательно, $\beta_0 = 0,5''$. Отсюда увеличение $n = \frac{F}{f} = \frac{3 \text{ м}}{0,01 \text{ м}} = 300$ раз.

13. 6. Вопросы

1. Что такое телескоп и для чего он предназначен? 2. Чем отличаются рефлекторы от рефракторов? Кто впервые применил их в астрономии? 3. Что такое увеличение телескопа? Разрешение? 4. Чем различаются оптические и радиотелескопы?

13.7. Упражнения

1. Луч, проходящий через центр линзы, не меняет своего направления. Пользуясь этим свойством, покажите, что в телескопе изображения двух звезд видны из центра объектива под тем же углом, что и на небе без телескопа.

2*. Докажите, что угловое увеличение телескопа при визуальных наблюдениях равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

3*. При каком условии весь свет, прошедший от звезды через объектив телескопа диаметром D и фокусным расстоянием F , может попасть в глаз наблюдателя, если диаметр зрачка глаза равен d ? Какое ограничение это накладывает на используемое увеличение?

4*. Диаметр объектива телескопа 14 см, его разрешение при данных метеоусловиях равно $3''$, диаметр зрачка глаза наблюдателя 7 мм, а разрешение глаза $2'$. В каких пределах целесообразно выбирать увеличение телескопа?

5. Каково (примерно) теоретическое разрешение глаза, если диаметр зрачка 5 мм? Как оно отличается от фактического для нормального глаза?

6. С каким разрешением работает радиотелескоп РАТАН-600 при наблюдении на волне 30 см?

7. Каково теоретическое разрешение межконтинентального радиоинтерферометра, работающего на волне 1 см, если расстояние между антеннами равно радиусу Земли?

14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ПО ИХ СПЕКТРАМ

14.1. Спектры небесных тел. Если перед объективом телескопа поместить стеклянную призму, то после прохождения призмы направление световых лучей несколько изменится, причем тем сильнее, чем короче длина световой волны. Происходит это потому, что призма по-разному преломляет лучи различных длин волн. В результате изображение звезды в фокальной плоскости «растянется» в разноцветную полоску — *спектр*. В современных телескопах для получения спектра обычно используют специальные приборы — *спектрографы*, устанавливаемые за фокусом объектива телескопа. Спектр в них получается при помощи дифракционных решеток, пришедших на смену стеклянным призмам.

Спектр содержит важнейшую информацию об излучении. В каждой точке спектра собирается излучение с определенной длиной волны. По виду спектра сразу можно сказать, на каких длинах волн излучение сильнее, а на каких слабее. Общий вид спектра и детальное распределение энергии в нем зависят от температуры, химического состава и физических свойств источника, а также от скорости его движения.

Анализ спектров — это основной метод изучения физической природы астрономических объектов, который используется в *астрофизике*.

Почти во всех случаях свет и другие электромагнитные волны, приходящие от астрономических объектов, возникают вследствие того, что излучающие их тела нагреты. Такое излучение называется *тепловым*. Наблюдаются три разновидности спектров излучения.

1. *Линейчатый спектр испускания*. Он состоит из отдельных спектральных линий, т. е. длины волн излучений имеют ряд строго определенных значений. Такой спектр дает любой разреженный газ.

2. *Непрерывный спектр*. Полоса спектра непрерывна, а не разбита на отдельные линии, как в предыдущем случае. Такой спектр возникает, если источник представляет собой твердое или жидкое тело или плотный непрозрачный газ. Длина волны, на которую приходится самая яркая часть спектра, зависит от температуры тела. С повышением температуры она перемещается в сторону более коротких длин волн.

3. *Линейчатый спектр поглощения*. Это тот же непрерывный спектр, только на его фоне заметны темные линии, соответствующие различным длинам волн. Эти темные линии образуются, когда излучение горячего тела, имеющего непрерывный спектр, проходит через более холодную разреженную среду, которая поглощает свет в определенных местах спектра.

Спектр поглощения имеет Солнце и большинство звезд (рис. 14.1). Темные линии возникают при прохождении света через их газовые атмосферы.

Свойство излучать и поглощать свет только определенных длин волн присуще всем атомам. Оно было

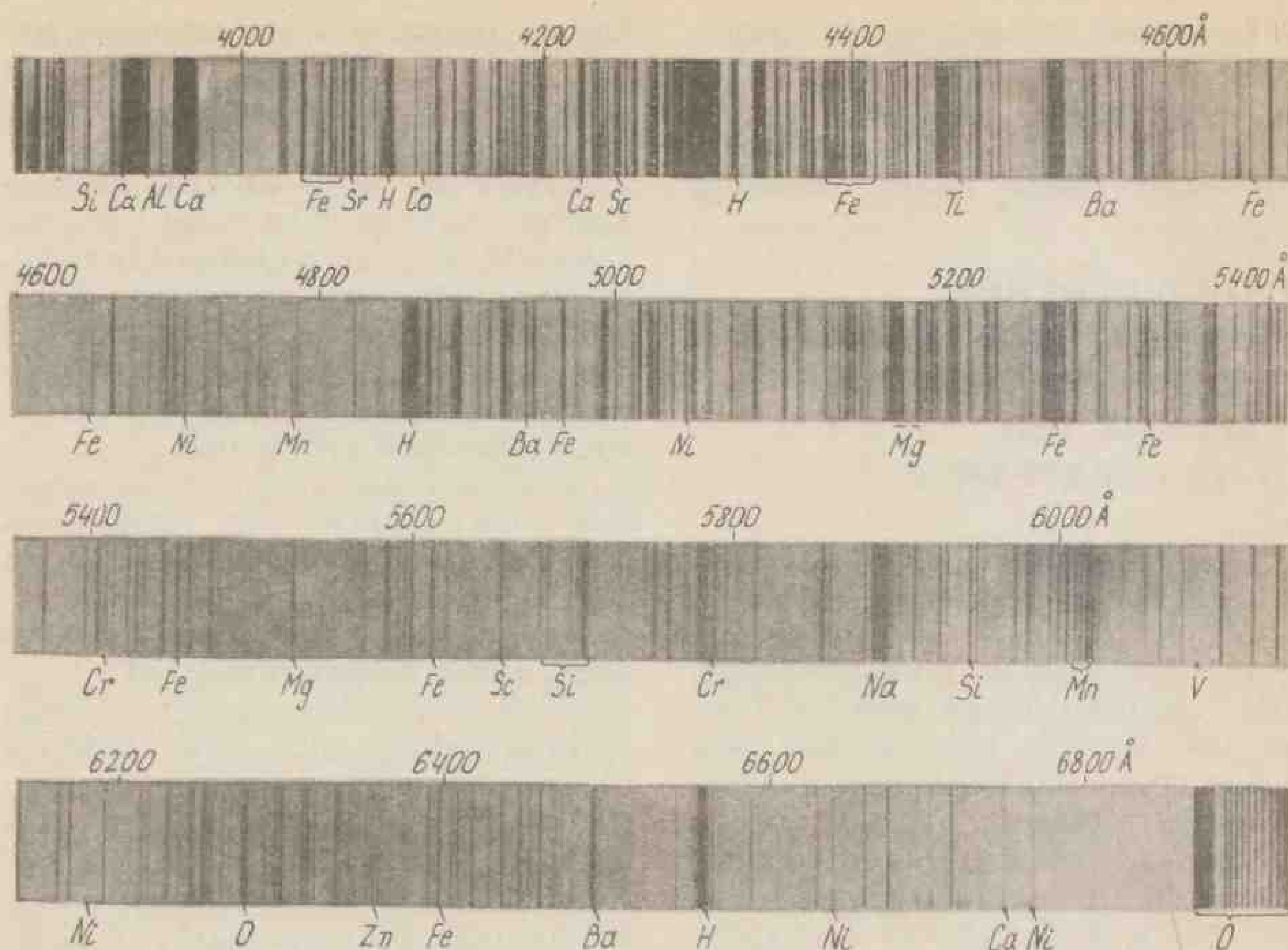


Рис. 14.1. Спектр Солнца с обозначениями спектральных линий некоторых химических элементов. Приведена шкала длин волн в ангстремах ($1 \text{ ангстрем (Å)} = 10^{-10} \text{ м}$)

объяснено физикой в первой половине нашего века и связано с тем, что атомы любого химического элемента могут обладать только определенными значениями внутренней энергии связи между положительным ядром атома и окружающими его электронами.

Когда атом поглощает квант света, энергия системы увеличивается и один из его электронов переходит на более далекую от ядра орбиту. После этого электрон может вернуться на более близкую орбиту, и тогда произойдет излучение кванта, который унесет высвободившуюся энергию. Важно, что внут-

ренняя энергия атома может принимать не любые значения, а только определенные. Поэтому атомы поглощают или испускают лишь кванты, которым соответствуют некоторые фиксированные значения длин волн.

Конкретный «набор» длин волн, которые могут излучаться или поглощаться атомами, зависит от того, к какому химическому элементу они относятся. Тщательные измерения и изучение спектров позволяют расшифровать содержащуюся в них информацию о химическом составе и природе небесных объектов.

Химический состав небесных тел определяется на основании сравнения наблюдаемых спектров со спектрами известных химических элементов, полученных в лабораторных условиях. Измеряя и сравнивая

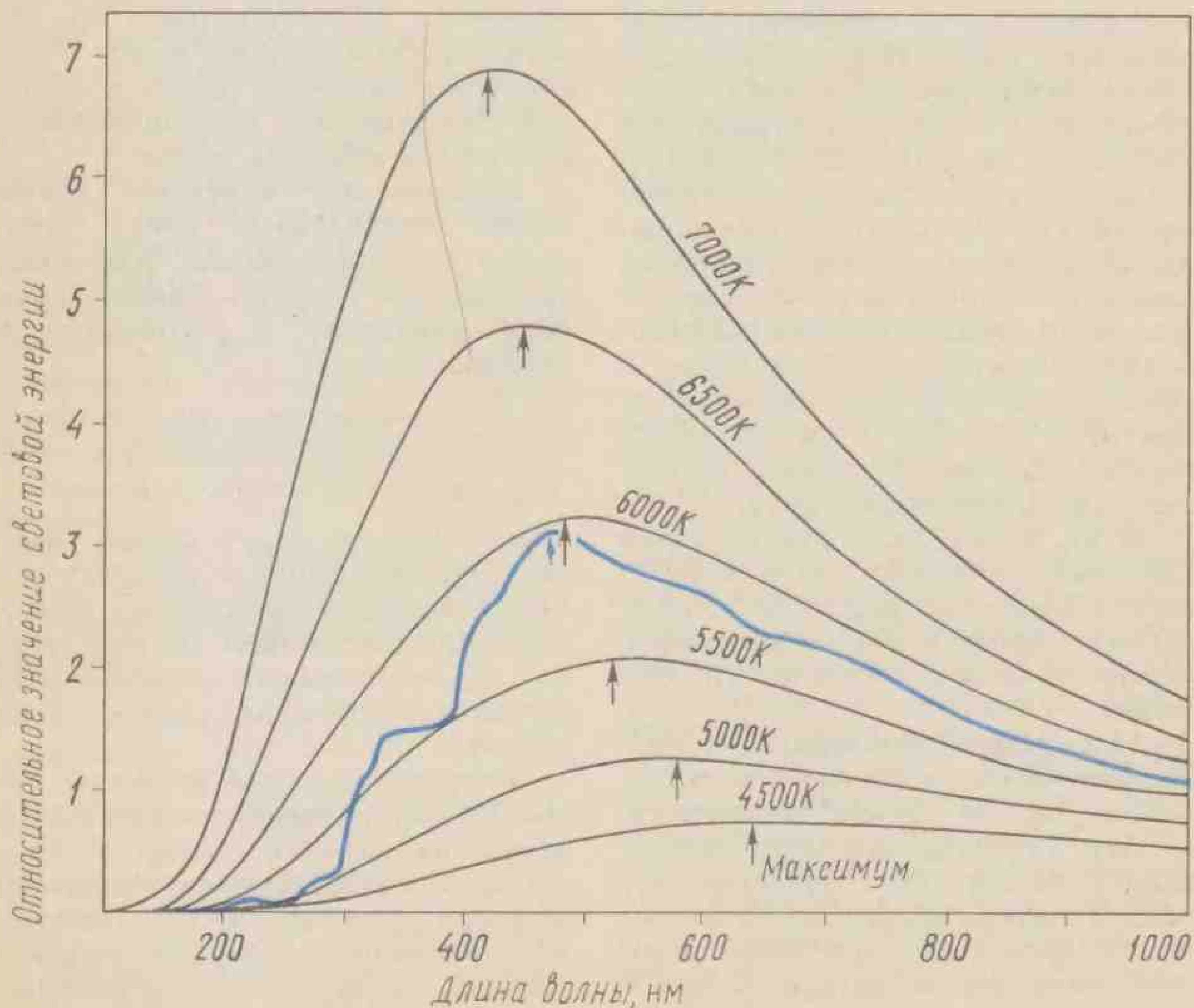
энергию, излученную или поглощенную в отдельных спектральных линиях, можно провести не только качественный, но и количественный химический анализ небесных тел, т. е. узнать о процентном содержании различных химических элементов в излучающем газе. Разработаны и методы, позволяющие по относительной яркости линий в спектре судить о температуре и плотности газа.

Температура небесных тел, имеющих непрерывный спектр, может быть измерена по распределению энергии (яркости) в спектре. От распределения энергии в спектре зависит цвет источника. Поэтому

цвет оказывается связанным с температурой. Так, по цвету расплавленного металла сталевар определяет температуру плавки, а по цвету звезд астроном узнает их температуру.

Распределение энергии в непрерывном спектре тел различной температуры графически показано на рисунке 14.2. Длина волны λ_{max} , которой соответствует максимум в распределении энергии, связана с абсолютной температурой простым со-

Рис. 14.2. Распределение энергии в непрерывных спектрах тел, нагретых до различных температур, и в спектре Солнца (синяя линия)



отношением:

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

Если T выражать в кельвинах, а λ — в микрометрах, то $b = 2900 \text{ К} \cdot \text{мкм}$. Этот закон пригоден не только для оптического, но и для любого другого диапазона электромагнитного излучения. В честь немецкого ученого В. Вина он называется *законом Вина*.

Рассчитайте, на какую область спектра приходится максимум излучения тела, нагретого до комнатной (20°C) температуры.

Анализ спектров астрономических объектов показал, что подавляющая часть вещества во Вселенной находится в состоянии сильно нагретого газа. При температуре, превышающей несколько тысяч кельвинов, от атомов газа отрываются электроны, а сами атомы становятся электрически заряженными частицами — положительными *ионами*. Оторванные от атома электроны движутся в таком газе как свободные частицы. Газ, содержащий свободно движущиеся электроны и ионы, называется *ионизованным газом* или *плазмой*. Если плотность горячей плазмы не очень велика, она дает линейчатый спектр.

Итак, мы видим, что по спектрам небесных тел можно узнать о физических свойствах вещества во Вселенной. Кроме этого, оказывается, можно узнать и скорость его движения.

14.2. Эффект Доплера. Если волна излучается движущимся источником, то ее длина изменяется. С этим явлением мы часто сталкиваемся в акустике. Известно, что высота звука определяется длиной волны колебания: чем ниже звук, тем длина волны больше. Стоя на

платформе, мимо которой проносится гудящий локомотив, можно заметить, что, пока поезд приближался, звук гудка был более высоким, а когда стал удаляться, высота звука сразу упала. Аналогичное явление есть и в оптике: свет от приближающегося источника становится как бы синее (т. е. длина волны излучения уменьшается), а от удаляющегося — краснее. Это изменение длин волн сказывается на положении спектральных линий: они смещаются в синюю или красную сторону спектра. Такое явление называется *эффектом Доплера*.

При скоростях в десятки и даже в сотни километров в секунду изменение длины волны настолько мало, что по изменению цвета его обнаружить невозможно. А вот относительное смещение линий в спектрах движущегося и неподвижного источников измерить можно.

Доплеровское изменение длины волны спектральных линий относится к длине волны излучения так же, как скорость приближения (или удаления) $v_{\text{отн}}$ относится к скорости света c :

$$\frac{(\lambda_{\text{ист}} - \lambda_{\text{лаб}})}{\lambda_{\text{лаб}}} = \frac{v_{\text{отн}}}{c}.$$

Здесь $\lambda_{\text{ист}}$ и $\lambda_{\text{лаб}}$ — длины волн спектральной линии в спектрах наблюдаемого и неподвижного (лабораторного) источника соответственно, $v_{\text{отн}}$ — компонент относительной скорости источника вдоль луча зрения.

Как видно из этой формулы, относительное изменение длины волны излучения зависит только от скорости, а следовательно, одинаково для всех областей спектра. Поэтому в астрономии с помощью эффекта Доплера измеряют относительные

скорости не только оптических источников, но и радио, и рентгеновских источников — по смещению спектральных линий в этих диапазонах длин волн (если линии присутствуют в спектре). Если линии смещены в красную часть — объект удаляется от нас, если в синюю — приближается.

Для измерения доплеровского смещения спектральных линий в оптическом диапазоне на одну и ту же фотопластинку вместе со спектром изучаемого объекта (например, звезды) обычно фотографируют и спектр лабораторного источника, длины волн спектральных линий которого хорошо известны. Относительно них измеряют смещение линий астрономического источника. Затем по приведенной выше формуле вычисляют скорость приближения или удаления источника света относительно наблюдателя.

14.3. Типовая задача. Использование эффекта Доплера.

Условие. Измерение спектрограммы звезды показало, что линия железа ($\lambda = 530,2$ нм) в ее спектре смещена по сравнению с линиями лабораторного источника в сторону более коротких волн на $0,02$ нм.

Какова скорость звезды по лучу зрения?

Решение. По условию $\lambda_{\text{ист}} < \lambda_{\text{лаб}}$ (синее смещение). Используя формулу доплеровского смещения, имеем

$$v_{\text{отн}} = \frac{c}{\lambda_{\text{лаб}}} (\lambda_{\text{ист}} - \lambda_{\text{лаб}}),$$

$$v_{\text{отн}} = - \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}}{5 \cdot 302 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \approx$$

$$\approx -11 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Знак «—» означает, что расстояние до звезды уменьшается, т. е. она приближается со скоростью 11 км/с.

14.4. Вопросы

1. Что такое спектр? Какие явления доказывают сложный состав света?
2. Что можно узнать, изучая спектр небесного объекта?
3. Как можно использовать эффект Доплера для измерения периода обращения одной звезды относительно другой, если телескоп не разделяет изображений звезд?
4. Какую скорость надо использовать вместо скорости света в формуле эффекта Доплера для изменения длины звуковых волн? Чему она равна?
5. Эффект Доплера во многих случаях позволяет обнаружить звезды с очень быстрым вращением. При быстром вращении звезды все ее спектральные линии становятся более широкими. Объясните почему.
6. В каком случае смещения линий не происходит, несмотря на движение объекта?

14.5. Упражнения

1. Какую температуру должна иметь звезда, чтобы максимум в ее спектре приходился на область ультрафиолетового излучения?

2. Считая, что глаз в области $\lambda = 600$ нм замечает изменение цвета при изменении λ на 50 нм, определите, при какой скорости источника монохроматического (одноцветного) излучения изменение цвета будет заметно на глаз.

- 3*. Где на небе расположены звезды, у которых доплеровское смещение спектральных линий, обусловленное обращением Земли вокруг Солнца, максимально? Чему оно равно для зеленых лучей? (Орбитальную скорость Земли принять равной 30 км/с.)

15. МАССЫ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

15.1. Определение масс небесных тел. Важнейшая физическая характеристика астрономических объектов — масса — определяется на основании закона всемирного тяготения.

Используя третий закон Кеплера в форме, уточненной Ньютоном (см. формулу 10.13), можно вычислить сумму масс центрального тела и обращающегося вокруг него спутника, если известна большая полуось его орбиты A и период обращения T :

$$M + m = \frac{4\pi^2}{G} \frac{A^3}{T^2}. \quad (15.1)$$

Обозначив постоянный множитель $4\pi^2/G = 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3$ через B , получим

$$M + m = B \frac{A^3}{T^2}. \quad (15.2)$$

При $m \ll M$ данная формула определяет массу центрального тела:

$$M = B \frac{A^3}{T^2}. \quad (15.3)$$

Например, если в качестве A и T взять радиус орбиты Земли и период ее обращения вокруг Солнца, то можно вычислить массу Солнца $M_\odot$. Подставляя в формулу значения $T = 1 \text{ год} = 3,2 \cdot 10^7 \text{ с}$ и $A = 1 \text{ а.е.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$, находим, что

$$\begin{aligned} M_\odot &= B \frac{(1 \text{ а.е.})^3}{(1 \text{ год})^2} = \\ &= 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3 \cdot \frac{(1,5 \cdot 10^{11} \text{ м})^3}{(3,2 \cdot 10^7 \text{ с})^2} = \\ &= 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Используя выражение для мас-

сы Солнца, записанное в виде $M_\odot = B \frac{(1 \text{ а.е.})^3}{(1 \text{ год})^2}$, удобно вычислять массу M любого тела, когда период обращения T его спутника выражен в годах, а большая полуось орбиты A — в астрономических единицах. В этом случае

$$M = M_\odot \frac{A^3}{T^2}. \quad (15.4)$$

Если спутник обращается вокруг центрального тела M по круговой орбите и известны его орбитальная скорость и радиус орбиты, то массу M можно найти из формулы (10.5) для круговой скорости.

В случае, когда у планеты нет спутника, ее массу M определяют, измеряя ускорение, которое она сообщает, притягивая другие тела, например ближайшие планеты или космические аппараты. Аналогичным образом определяют и массы звезд, если они образуют двойные системы.

15.2. Типовая задача. Определение массы планеты.

Условие. Определить массу Юпитера $M_{\text{Ю}}$, если известно, что один из его спутников (Ганимед) удален от его центра на $A = 1\,070\,000 \text{ км}$ и обращается с периодом $T = 7,2 \text{ сут.}$

Решение. По формуле (15.3), выражающей III закон Кеплера, масса центрального тела

$$M_{\text{Ю}} = B \frac{A^3}{T^2}.$$

Подставляя значения величин в формулу, получим

$$\begin{aligned} M_{\text{Ю}} &= 5,9 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3 \frac{(1,07 \cdot 10^9 \text{ м})^3}{(6,22 \cdot 10^5 \text{ с})^2} = \\ &= 1,9 \cdot 10^{27} \text{ кг}. \end{aligned}$$

15.3. Упражнения

1. Определите массу Сатурна (выразив ее в массах Земли и в килограммах), если один из его спутников отстоит от центра планеты на 185 000 км и имеет период обращения 0,94 сут.

Указание. Используйте сравнение с системой Земля — Луна.

2*. Две звезды одинаковой массы M движутся по круговой орбите вокруг центра, находящегося на половине расстояния A между ними. Найдите массы звезд, если $A = 100$ а.е., $T = 10^3$ лет.

3. Докажите, что формулы (15.2) и (10.4) эквивалентны в случае, если спутник массой $m \ll M$ обращается по круговой орбите.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА IV

В настоящее время астрономия стала всеволновой, т. е. ей доступно исследование практически всех видов электромагнитного излучения, испускаемого различными космическими объектами, — от очень коротковолновых колебаний — гамма-лучей — до длинноволновых радиоволн. Это стало возможным во мно-

гом благодаря успехам в развитии космической техники, позволившим осуществлять астрономические исследования за пределами атмосферы.

Астрономические наблюдения проводятся при помощи телескопов, улавливающих и регистрирующих электромагнитное излучение космических источников. Важнейшими характеристиками, определяющими возможности телескопа и решаемые им задачи, являются диаметр объектива, угловое разрешение и диапазон спектра, на работу в котором он рассчитан.

В астрономических исследованиях важное место занимает анализ спектрального состава излучения (спектральный анализ). С его помощью оказалось возможным определять физические свойства, температуру и химический состав вещества независимо от расстояния до источника, а также измерять скорость приближения или удаления астрономических объектов.

Измерение периодов обращения тел или ускорений, с которыми движутся тела под действием взаимного притяжения, дает возможность вычислить массы астрономических объектов.

V. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

16. СОСТАВ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В центре Солнечной системы находится наша дневная звезда — Солнце. Вокруг него вместе со своими спутниками обращаются 9 больших планет: *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон* (рис. 16.1).

Плутон удален от Солнца на расстояние в среднем 39,5 а.е. Однако из-за эллиптичности орбиты это расстояние заметно меняется, и иногда он бывает к Солнцу и Земле ближе, чем Нептун. Это имеет место и в настоящее время. Вновь самой далекой от Солнца планетой Плутон станет с 1999 г.

Помимо больших планет и их спутников, в состав Солнечной системы входят тысячи *малых планет* — *астероидов*, находящихся в основном между орбитами Марса и Юпитера, где они образуют так называемый *пояс астероидов*. Кроме того, в межпланетном пространстве движутся твердые ледяные тела, окруженные газовой оболочкой, — *кометы* — и множество камней и частиц самых различных размеров (*метеоритное вещество*).

Солнечная система обладает рядом важных особенностей. Перечислим основные из них.

1. Подавляющая часть полной массы Солнечной системы принадлежит Солнцу, т. е. центральному телу. На долю планет и остальных тел приходится чуть более 0,1%.

Поэтому Солнце своим притяжением управляет движением всех тел Солнечной системы, которые обращаются вокруг него по орбитам, близким к эллипсам.

2. Орбиты всех планет и большинства астероидов близки к окружностям и лежат приблизительно в плоскости эклиптики. Наибольшим наклоном к эклиптике (равно как и наибольшей вытянутостью) обладают орбиты Плутона (17°) и Меркурия (7°).

3. По размерам, массе и общему строению большие планеты делятся на две группы: на планеты типа Земля (или планеты земной группы), расположенные внутри пояса астероидов, и планеты-гиганты (вне его). Плутон занимает особое положение, отличаясь от планет обеих групп.

Планеты типа Земля значительно меньше гигантов по массе и размерам. Они обладают большей средней плотностью вещества и сравнительно медленным вращением.

Планеты-гиганты в десятки и сотни раз массивнее планет земной группы. Они окружены сравнительно плотными протяженными атмосферами. В основном планеты-гиганты состоят из водорода и гелия; доля всех других элементов в них значительно меньше, чем у планет земной группы.

4. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одну сторону, причем направление их осевого вращения, как правило, совпадает с направлением движения по орбите. Ис-

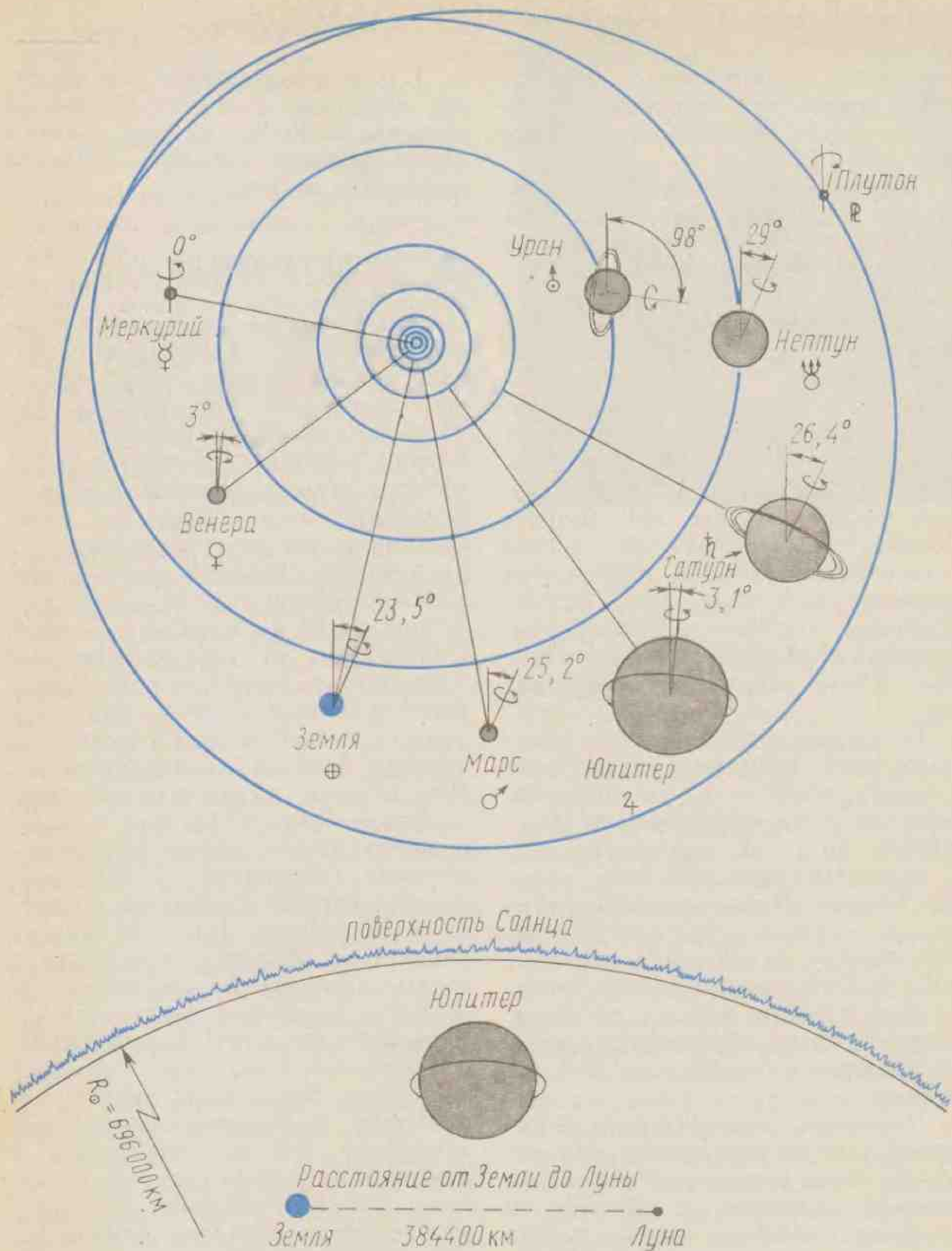


Рис. 16.1. Строение Солнечной системы и сравнительные размеры планет

ключение составляют лишь Венера, Уран и, возможно, Плутон, которые вращаются в противоположную сторону, причем ось вращения Урана почти лежит в плоскости орбиты (см. рис. 16.1).

Перечисленные особенности связаны с теми условиями, в которых происходило формирование планет миллиарды лет тому назад.

Возраст Солнечной системы был определен учеными на основании лабораторного изотопного анализа земных скальных пород, а также метеоритов и доставленных на Землю космическими аппаратами образцов лунного грунта. Оказалось, что наиболее старые из них имеют возраст около 4,5 млрд. лет. Возраст Солнца, полученный на основе теории эволюции звезд, оценивается примерно в 5 млрд. лет. Поэтому считается, что все планеты сформировались приблизительно в одно время — 4,5—5 млрд. лет тому назад.

Согласно существующим представлениям, вещество, из которого возникли планеты и их спутники, первоначально образовывало массивный диск из холодного газа и пыли, окружавший еще молодое Солнце. Планеты сформировались в результате роста сгущений, возникших под действием сил гравитации в этом вращавшемся диске. Поэтому и сейчас все они, сохраняя движения диска, обращаются вокруг направления Солнца в одну и ту же сторону.

Плотность, температура и химический состав протопланетного вещества были весьма различными во внешних, далеких от Солнца, и внутренних, близких к нему, частях диска. Это привело к сильному различию двух групп планет — внутренних и внешних.

16.1. Вопросы

1. Перечислите важнейшие объекты, входящие в состав Солнечной системы. 2. Когда, из чего и каким путем предположительно возникла Солнечная система?

17. ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Землю, изучением строения которой занимаются геология и геофизика, мы, естественно, знаем лучше, чем другие планеты. Центральная часть земного шара примерно до половины радиуса представляет собой плотное железно-никелевое *ядро* с температурой в несколько тысяч кельвинов, внешняя часть которого расплавлена. Верхняя твердая оболочка толщиной от нескольких километров до 60 км называется *корой*. Она состоит из хорошо известных минералов и горных пород. Между корой и земным ядром вещество находится в особом пластическом состоянии, близком к расплавленному. Эта область называется *мантией*.

Земля (рис. 17.1), как и большинство других планет, окружена газовой оболочкой — *атмосферой*; которая состоит в основном из азота и кислорода. Ни одна другая планета не обладает атмосферой с таким химическим составом. Он возник в результате длительной химической и биологической эволюции.

Несколько миллиардов лет назад атмосфера Земли была иной и, по видимому, напоминала современную атмосферу Венеры, состоящую в основном из углекислого газа вулканического происхождения. Постепенно атмосфера менялась. Химическое взаимодействие CO_2 с твердыми породами и образование мощных осадочных пород (известняков), кото-

рое происходило с участием древних микроорганизмов, перевели в связанное состояние почти весь углекислый газ атмосферы. Климат Земли изменился. За счет жизнедеятельности зеленых растений атмосфера обогатилась кислородом и постепенно приобрела современные свойства.

В настоящее время интенсивная хозяйственная деятельность человека достигла такого развития, что может существенно повлиять как на химический состав атмосферы, так и на всю планету в целом. Растет запыленность атмосферы, уменьшая количество солнечной энергии, достигающей поверхности Земли. Постепенно увеличивается содержание углекислого газа в воздухе и различных кислот в атмосферной влаге. Уменьшается площадь лесов, которые играют важную роль в поддержании кислородного баланса, загрязняется поверхность морей и океанов.

Плохо управляемая и не всегда продуманная хозяйственная деятельность людей в масштабах планеты может в конце концов привести к катастрофическому глобальному изменению климата на Земле. Уже сейчас это вызывает серьезное беспокойство. Чтобы предотвратить подобное бедствие, требуются объединенные усилия по защите окружающей среды, предпринимаемые во всех промышленно и культурно развитых странах.

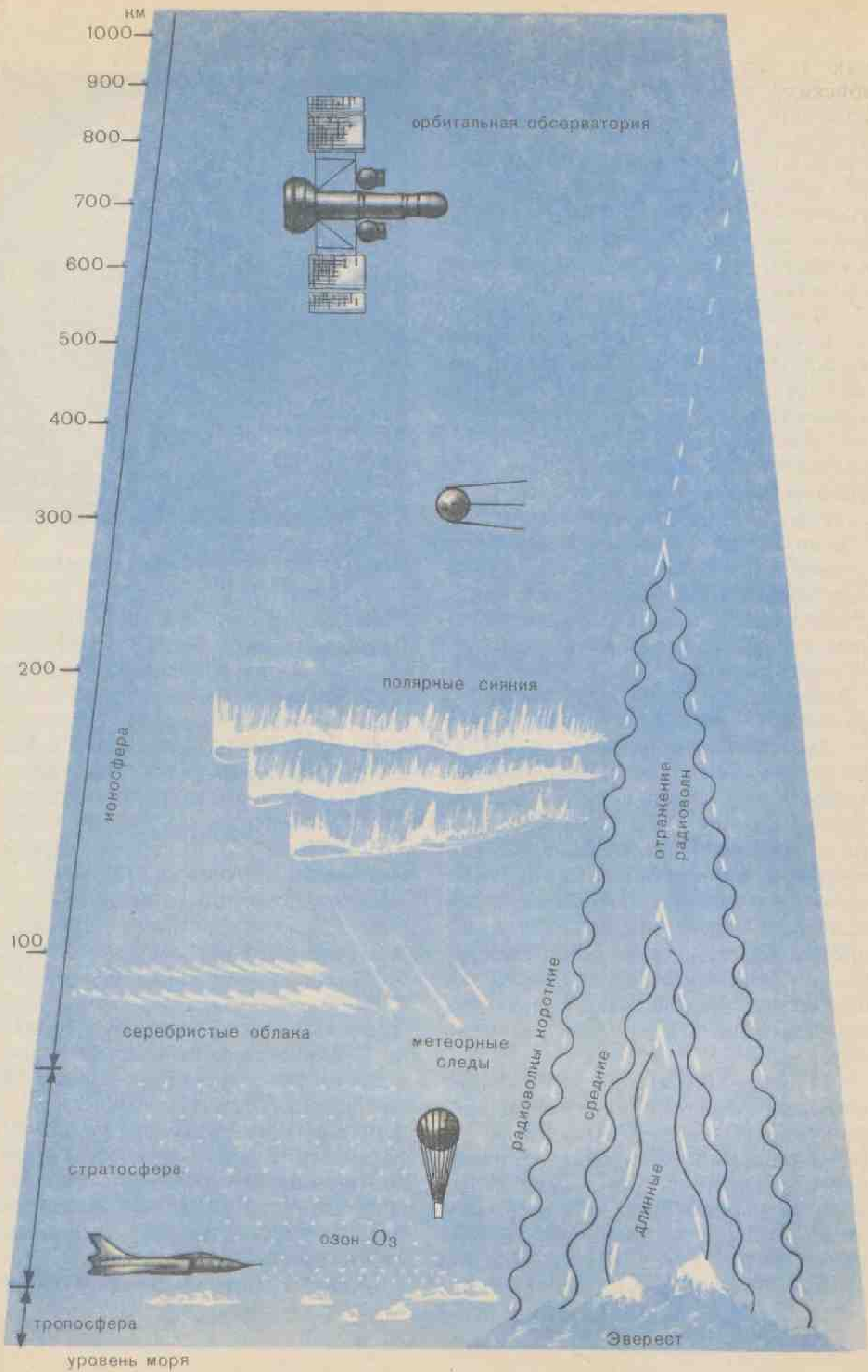
Плотные, пригодные для дыхания слои земной атмосферы имеют толщину не более 4—5 км. Выше атмосфера очень разрежена: ее плотность уменьшается примерно в три раза на каждые 8 км подъема. При этом температура воздуха сначала уменьшается (*тропосфера*), однако на высоте в несколько десятков ки-



Рис. 17.1. Фотография Земли из космоса

лометров начинается ее рост (*стратосфера*) (рис. 17.2). Происходит это из-за нагревающего действия поглощаемого здесь ультрафиолетового и рентгеновского солнечного излучения, не проникающего в нижние слои атмосферы. На высоте 20—25 км располагается *озонный слой*. Молекулы озона O_3 легко разрушаются под действием коротковолнового излучения. Поэтому, несмотря на свою разреженность, озонный слой эффективно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, прошедшее сквозь более высокие и прозрачные атмосферные слои. Благодаря этому живые организмы на Земле защищены от губительного воздействия ультрафиолетового света Солнца. Существует опасение, что непродуманная индустриальная деятельность человека может привести к частичному химическому разрушению озонного слоя, что неизбежно вызовет нежелательные последствия для здоровья людей.

Кванты солнечных коротковолно-



км

1000

900

800

700

600

500

400

300

200

100

ионосфера

орбитальная обсерватория

полярные сияния

отражение
радиоволн

серебристые облака

метеорные
следы

радиоволны короткие

средние

длинные

стратосфера

озон O_3

тропосфера

уровень моря

Эверест

вых (ультрафиолетовых и рентгеновских) лучей ионизуют атомы и молекулы воздуха. Верхние ионизованные слои земной атмосферы называются *ионосферой*. Поглощая излучение Солнца, ионосфера нагревается до нескольких тысяч кельвинов. Большое количество заряженных частиц (ионов и электронов, «оторванных» от атомов) делает ионосферу способной отражать радиоволны (см. рис. 1.2). Именно благодаря этому передачи коротковолновых радиостанций можно принимать с больших расстояний.

На высотах от нескольких сотен до нескольких тысяч километров от поверхности Земли располагаются *радиационные пояса*, окружающие нашу планету. Их образуют потоки электрически заряженных элементарных частиц — электронов и протонов, которые движутся по винтовым траекториям вокруг линий индукции магнитного поля Земли.

Частицы эти обладают энергиями до сотен мегаэлектронвольт (МэВ) (1 МэВ равен $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). Многие из них имеют солнечное происхождение: разреженные внешние плазменные слои атмосферы Солнца, расширяясь в межпланетное пространство, образуют *солнечный ветер*, «обдувающий» Землю. Его частицы захватываются магнитным полем Земли, «пополняя» запасы частиц в радиационных поясах.

17.1. Вопросы

1. Опишите строение Земли и ее атмосферы. 2. Каковы возможные последствия нарушения химического

состава атмосферы Земли, а также увеличения ее запыленности и ослабления защитных свойств ионосферы?

18. СИСТЕМА ЗЕМЛЯ — ЛУНА

18.1. Движение Луны относительно Земли. Земля вместе со своим естественным спутником Луной образует самую знакомую нам и хорошо изученную систему астрономических тел. Расстояние между центрами Земли и Луны в среднем составляет около 384 000 км — свыше 60 радиусов Земли. Луна — сравнительно крупное тело Солнечной системы, хотя она уступает Земле по размеру вчетверо, а по массе — в 81 раз.

Земля и Луна притягивают друг друга. Под действием этого притяжения они движутся по орбитам, близким к окружностям, вокруг общего центра масс. Он находится на прямой, соединяющей центры Луны и Земли, на расстоянии около 4700 км от центра Земли (внутри Земли). Таким образом, Земля не только обращается вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси: ее центр описывает еще одну окружность радиусом, немного меньшим радиуса Земли. Строго говоря, именно центр масс системы Земля — Луна, а не центр Земли движется по эллипсу вокруг Солнца. В то же время центры Земли и Луны описывают в пространстве более сложную линию (рис. 18.1).

Период обращения Луны вокруг Земли (точнее, вокруг центра масс системы Земля — Луна) составляет $27 \frac{1}{3}$ сут, что приблизительно на двое суток короче, чем период смены лунных фаз, с которым изменяется видимое положение Луны относительно Солнца (§ 4.1).

← Рис. 17.2. Строение атмосферы Земли и уровни, на которых происходит отражение радиоволн



Рис. 18.1. Движение Земли и Луны относительно Солнца (масштаб не соблюден)

С чем связано это различие?

Луна, как и Земля, вращается вокруг своей оси. Ее звездный период вращения (в инерциальной системе координат) равен периоду обращения вокруг Земли — $27\frac{1}{3}$ земных суток. Таким образом, сутки на Луне продолжаются почти месяц.

Если бы Луна совсем не вращалась вокруг своей оси, то она, обращаясь вокруг Земли, поворачивалась бы к ней разными сторонами. Но из-за осевого вращения, происходящего в ту же сторону и с тем же периодом, что и орбитальное движение, Луна оказывается все время повернутой к Земле одной и той же стороной. Сфотографировать противоположную сторону Луны удалось только при ее облете космическими аппаратами. Впервые такие фотографии были получены в 1959 г. автоматической межпланетной станцией (АМС) «Луна-3».

18.2. Приливы. Притяжение Луны деформирует Землю и ее водную оболочку. Это связано с тем, что раз-

личные части Земли удалены от Луны неодинаково и она притягивает их с разной силой. Гравитационное поле Луны сообщает всем телам ускорения, направленные к центру Луны. Вещество на той стороне Земли, которая обращена к Луне, притягивается сильнее и стремится двигаться с большим ускорением, а на противоположной стороне Земли — с меньшим ускорением, чем вещество в центре Земли. Но Земля — единое твердое тело и поэтому движется как целое с одним (средним) ускорением. В результате как области Земли, расположенные со стороны Луны, так и противоположные им области стремятся под действием лунного притяжения «отойти» от центра Земли. Это приводит к тому, что Земля, и в первую очередь ее жидкая водная оболочка, растягивается вдоль направления Земля — Луна. На рисунке 18.2 в точках *A* и *B* уровень воды выше всего — там приливы, а в точках *C*, *D* — отливы. При суточном вращении Земли в полосу приливов и отливов поочередно вступают разные участки Земли. Легко понять, что за сутки должно быть два прилива и два отлива. Существуют приливы и в коре Земли, но они значительно меньше, чем в водной оболочке.

Разность ускорений, из-за кото-

рых возникает деформация планеты, убывает с расстоянием от притягивающего тела быстрее, чем гравитационная сила: она обратно пропорциональна не квадрату, а кубу расстояния. Поэтому, хотя Солнце притягивает Землю значительно сильнее, чем Луна, его приливное воздействие на Землю почти вдвое меньше, чем от Луны. В этом нетрудно убедиться, если учесть, что расстояние до Луны в 400 раз меньше, чем до Солнца ($400^3 = 6,4 \cdot 10^7$), а масса Луны примерно в $2,7 \cdot 10^7$ раз меньше, чем Солнца.

В приливах участвует колоссальная масса воды. Если бы удалось использовать существенную долю энергии движения воды, связанной с приливами, то ее хватило бы для удовлетворения всех энергетических потребностей человека.

Ось приливных выступов всегда близка к линии, проходящей через центры Земли и Луны. Вращаясь,

Земля как бы проворачивается под водяными горбами, стремясь повернуть их вместе с собой. Притяжение Луны препятствует этому. Силы трения между перемещающимися массами воды и твердыми породами Земли приводят к медленному торможению вращения земного шара. Как следствие период осевого вращения Земли медленно растет, а сутки каждую тысячу лет становятся длиннее примерно на $1/100$ с. Сотни миллионов лет тому назад сутки были на несколько часов короче, и поэтому год длился не 365, а более четырехсот суток.

Таким образом, часы, идущие «по Солнцу», т. е. связанные с осевым вращением Земли, медленно, но неуклонно замедляют свой ход. В системе счета точного времени это замедление учитывается систематическим введением секундных попра-

Рис. 18.2. Схема возникновения приливов



вок к равномерно идущим атомным часам (§ 6.1).

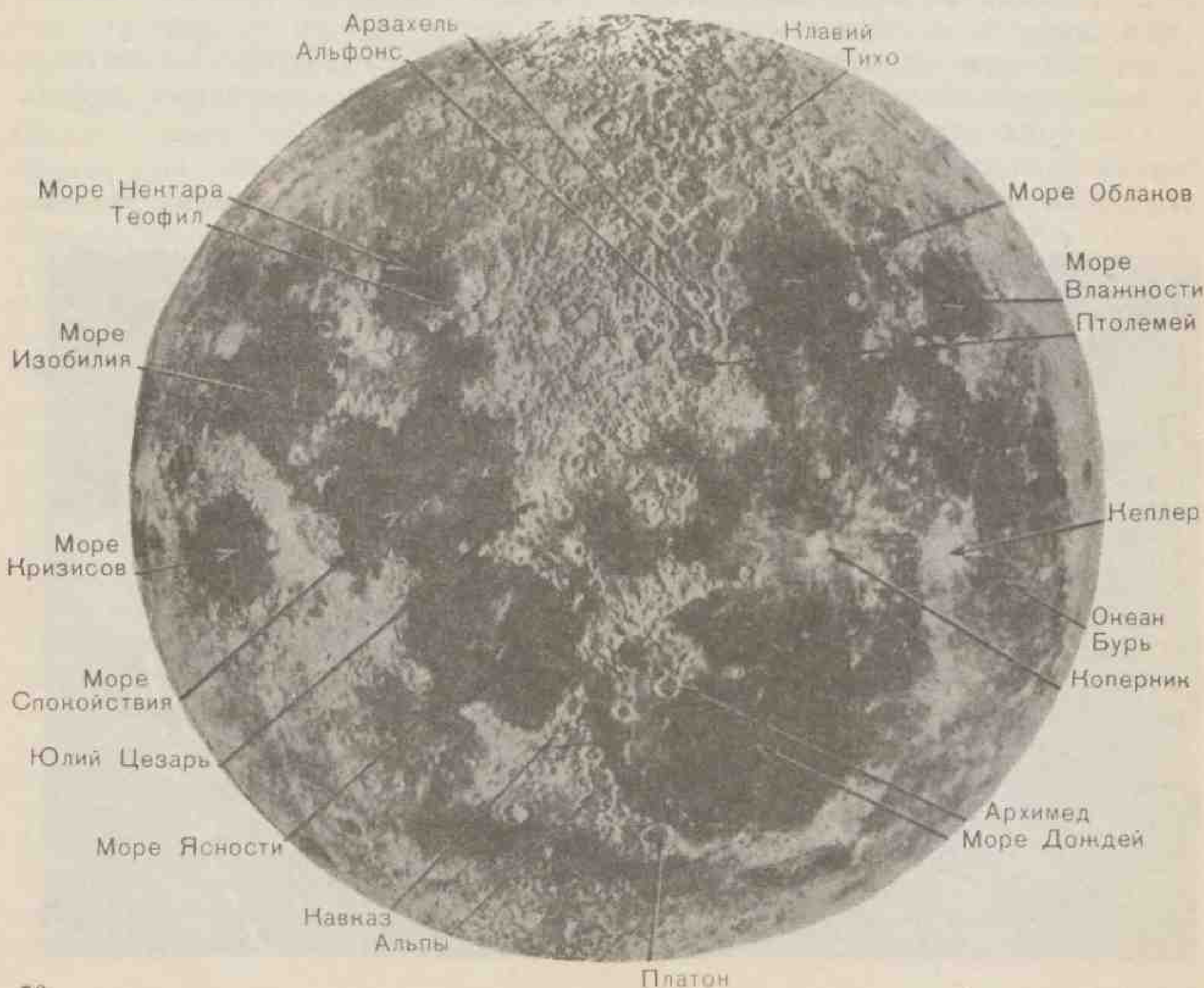
Влияние приливов на вращение других небесных тел может быть очень сильным. Так, приливы, вызываемые Землей, настолько затормозили вращение Луны, что период этого вращения сравнялся с периодом обращения вокруг Земли. Мы уже знаем, что из-за этого Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Через миллиарды лет подобное должно произойти и с Землей: длина суток увеличится до месяца.

Влияние приливов на форму и скорость вращения наблюдается не

только в случае планет и их спутников, но и у близких друг к другу звезд и даже целых галактик.

18.3. Физическая природа Луны. Луна — ближайшее к Земле небесное тело, ее естественный спутник. Она практически лишена атмосферы и магнитного поля. При наблюдении с Земли на ней удастся различить детали размером до нескольких километров. Поэтому обращенная к Земле сторона Луны хорошо изучена (рис. 18.3). Камеры, установленные на космических аппаратах, позволили получить снимки Луны с близкого расстояния (рис. 18.4), а также исследовать не наблюдаемую с Земли обратную сторону Луны.

Рис. 18.3. Луна в полнолуние



Луна — пока единственное космическое тело, на котором побывали люди. Всего было проведено шесть экспедиций американских астронавтов. Первыми на поверхность Луны ступили Н. Армстронг и Э. Олдрин («Аполлон-11», июль 1969 г.). Высадка человека на Луну позволила непосредственно провести исследование ее поверхности и собрать образцы лунных пород. Пробы лунного грунта были также доставлены на Землю несколькими АМС, запущенными в нашей стране. Лабораторный анализ лунного вещества показал, что оно похоже на вулканические земные породы — базальты, но в нем почти нет связанных молекул воды. Нет в лунных породах и каких-либо следов органических соединений.

Около 60% поверхности Луны представляют собой обширные светлые неровные и гористые области (см. рис. 18.3), называемые *материками*. Они пересечены многочисленными *горными хребтами*. Вершины наиболее высоких гор поднимаются до 9 км. Горные хребты и материки окружают более темные крупные области лунной поверхности, еще со времен первых телескопических наблюдений Галилея условно называемые *морями*, хотя хорошо известно, что воды на Луне нет. Темная окраска морей связана с содержанием в «морских» базальтах темного минерала — *ильменита*, хорошо известного на Земле. Лунные моря возникли позднее материков в результате извержений лавы из недр Луны, происходивших несколько миллиардов лет назад. Лава затем застыла и образовала обширные равнины.

В настоящее время вулканическая деятельность на Луне если и есть, то очень слабая.

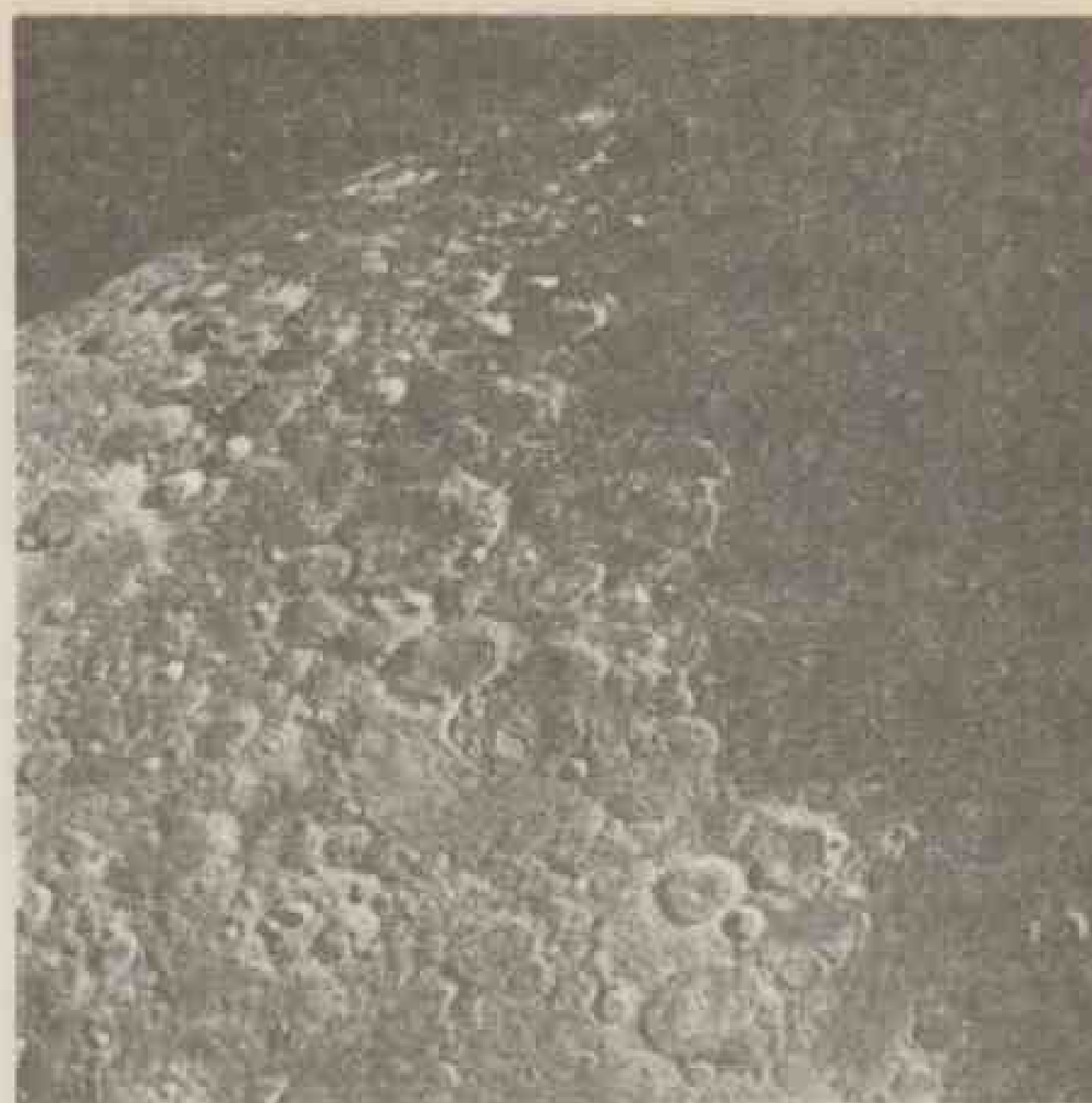


Рис. 18.4. Поверхность Луны (фото с автоматической станции «Зонд-7»)

Самыми заметными деталями на поверхности Луны являются многочисленные кольцевые образования — *кратеры*. Некоторые из них можно видеть в телескоп или бинокль даже при небольшом увеличении. Кратер обычно представляет собой кольцевой вал, окружающий ровный участок, в центре которого расположены одна или несколько небольших горок. Крупнейшие кратеры превышают в диаметре 100 км, но в основном они очень мелкие. Большинство кратеров возникло в результате ударов космических камней — *метеоритов* — о твердую поверхность Луны.

День и ночь на Луне длятся примерно по две земные недели. Так как атмосфера на Луне отсутствует, то за день под лучами Солнца поверхность Луны нагревается до 100—130 °С, а за ночь температура может упасть ниже — 150 °С. Резкие смены температур характерны для всех тел Солнечной системы, лишенных атмосферы.

18.4. Вопросы

1. Какие детали на Луне видны: а) невооруженным глазом; б) в телескоп? 2. Опишите, каким выглядит небо с Луны, чем оно отличается от земного неба. 3. Через какие промежутки времени в среднем должны наступать приливы и отливы в каждом данном месте на Земле? 4. В какие фазы Луны можно ожидать наиболее сильные приливы (учесть приливное влияние Солнца)? 5. Почему на поверхности Земли метеоритные кратеры встречаются редко, а на Луне их очень много? 6. Почему горы и кратеры на Луне плохо заметны в телескоп вблизи полнолуния?

18.5. Упражнения

1*. С какой скоростью движется центр Земли вокруг центра масс системы Земля — Луна?

2. Чему равна угловая скорость вращения Луны вокруг Земли?

3. Зная угловую скорость движения Луны относительно Земли и Земли относительно Солнца, свяжите период смены фаз Луны и период ее осевого вращения.

4. Зная размер и массу Луны, вычислите, во сколько раз все тела на ее поверхности весят меньше, чем на Земле.

5. Рассчитайте первую и вторую космические скорости для Луны.

19. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ

19.1. Меркурий. Поперечник ближайшей к Солнцу планеты Меркурий превышает лунный менее чем в 1,5 раза. Объем и масса планеты примерно в 20 раз меньше, чем у

Земли. Скорость осевого вращения Меркурия была измерена по доплеровскому изменению частоты радиопульсов, отраженных при радиолокации планеты. Оказалось, что он вращается вокруг оси с периодом $T_s = 58,6$ земных суток. Это ненамного меньше года на Меркурии, продолжающегося около 88 земных суток. Орбитальное и осевое вращения планеты происходят в одну и ту же сторону. Сложение этих движений приводит к тому, что солнечные сутки на Меркурии, как и на Земле (см. § 6.1), оказываются длиннее, чем период вращения вокруг оси (звездные сутки). Чтобы найти продолжительность солнечных суток T_c , надо вычислить угловую скорость $(2\pi/T_c)$ вращения планеты относительно Солнца, которая будет равна разности угловых скоростей осевого $(2\pi/T_s)$ и орбитального $(2\pi/T_o)$ движения планеты:

$$\frac{2\pi}{T_c} = \frac{2\pi}{T_s} - \frac{2\pi}{T_o}$$

Отсюда $T_c = \frac{T_o T_s}{T_o - T_s} \approx 176$ земным суткам. Меркурий оказывается уникальной планетой: солнечные сутки на нем продолжаются два его года!

Наблюдения показали, что Меркурий практически лишен атмосферы. За день его поверхность нагревается до температуры $\sim 400^\circ\text{C}$, а за долгую ночь падает более чем на 500°C . Это — рекордный перепад суточных температур для тел Солнечной системы.

Подробные телевизионные изображения поверхности Меркурия были получены американской космической станцией «Маринер-10» в 70-х годах. Поверхность планеты оказалась удивительно похожей на лунную (рис. 19.1), хотя там нет

таких высоких гор, как на Луне. На ней также имеются следы древней космической бомбардировки: кратеры различных размеров, самые крупные из которых достигают 300 км.

У Меркурия обнаружено магнитное поле, которое в десятки раз слабее, чем у Земли.

19.2. Венера. По своим размерам и массе вторая от Солнца планета — Венера — лишь немного уступает Земле. Поэтому средняя плотность ее вещества и ускорение силы тяжести на поверхности почти такие же, как и у Земли.

Период обращения Венеры вокруг Солнца составляет 225 земных суток. Радиолокационные измерения показали, что вращение вокруг оси происходит за 243 земных суток, причем в противоположную сторону по отношению к направлению вращения всех планет вокруг Солнца (*обратное вращение*). Медленное обратное вращение Венеры связано с приливным воздействием на эту планету гравитационного поля Солнца и Земли. В результате сложения осевого и орбитального движений Венеры за один оборот вокруг Солнца происходит два восхода и два захода Солнца, а длительность солнечных суток составляет 116 земных суток.

Проверьте эти выводы, выполнив вычисления, аналогичные проведенным для Меркурия (§ 19.1).

Венера — ближайшая к Земле планета и может наблюдаться как очень яркий объект на утреннем или вечернем небе. Среди звезд и других планет ей нет равных по яркости. Даже в небольшой телескоп виден диск Венеры и можно наблюдать ее фазы. Следя за прохождением Венеры по диску Солнца, М. В. Ломоносов открыл, что она окружена

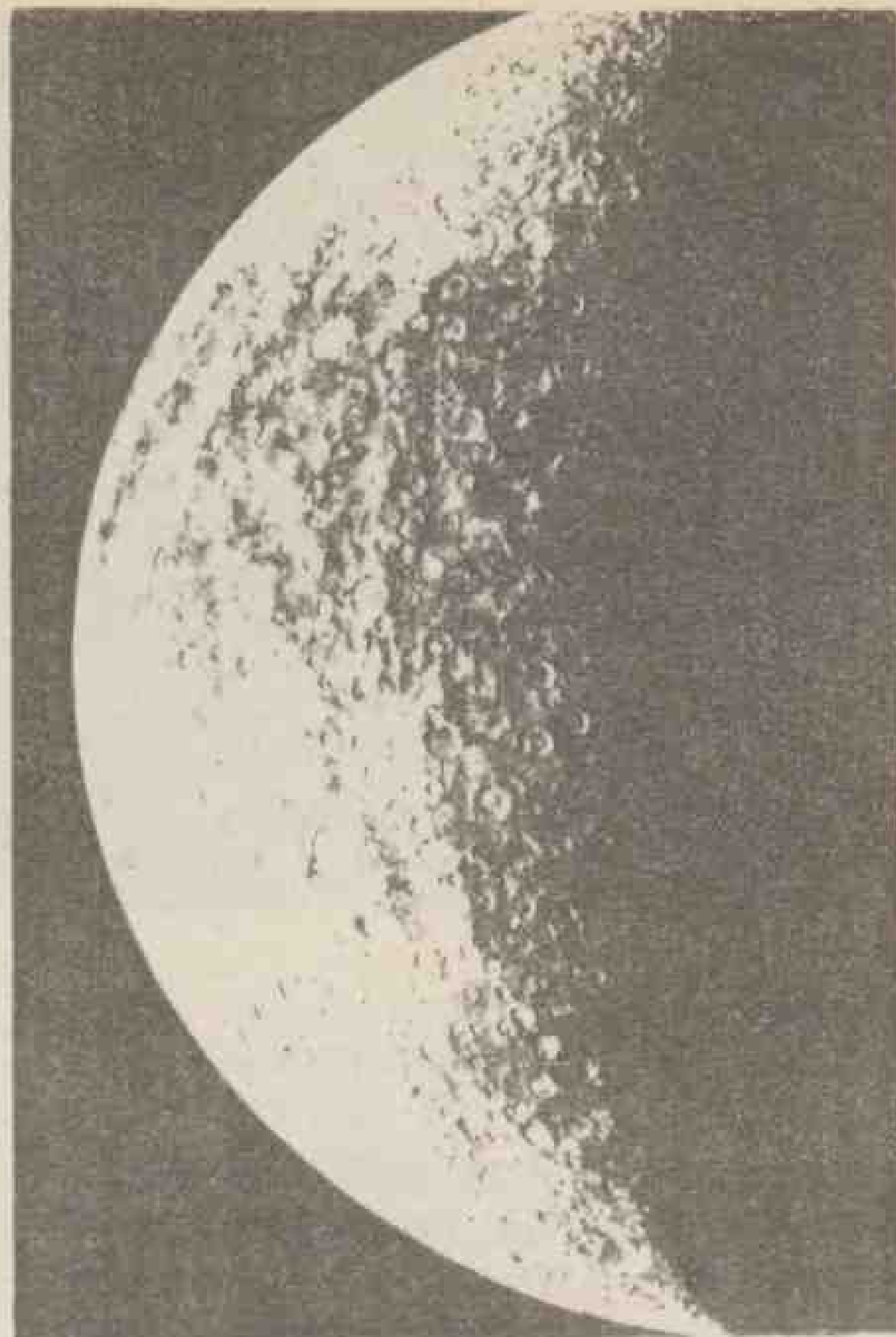


Рис. 19.1. Фотография Меркурия (АМС «Маринер-9»)

мощной атмосферой. Эта атмосфера полностью скрывает от нас поверхность планеты.

Увидеть и подвергнуть исследованиям поверхность Венеры оказалось возможным только с помощью радиолокации (радиоволны свободно проходят сквозь атмосферу планеты), а также используя спускаемые космические аппараты. Венера исторически была первой планетой, с поверхности которой спускаемые аппараты станций «Венера-9» и «Венера-10» в 1975 г. передали на Землю телевизионные изображения. На рисунке 19.2 изображена панорама поверхности Венеры в месте посадки аппарата «Венера-14» (1982 г.).

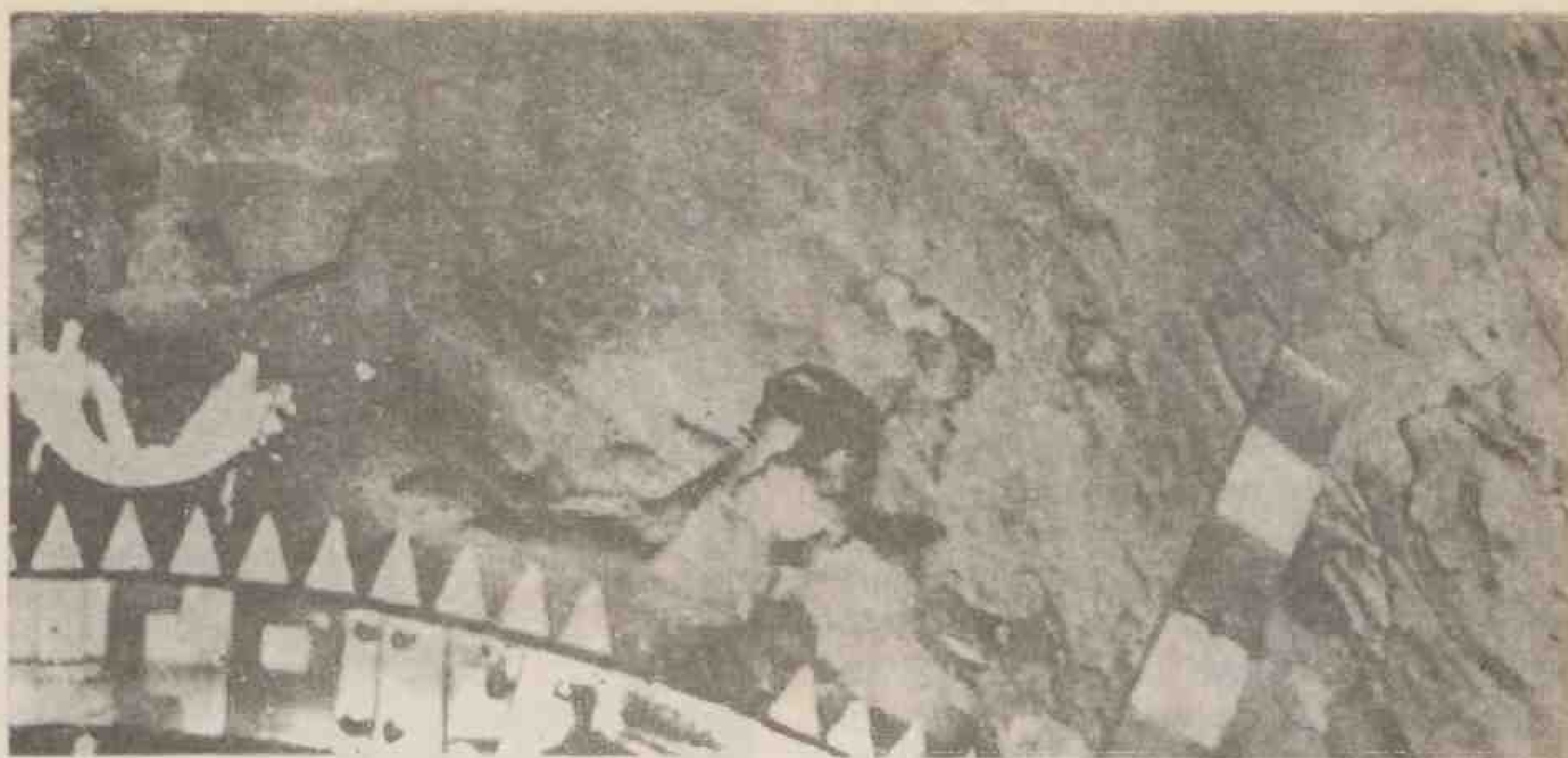


Рис. 19.2. Часть панорамы Венеры, переданной спускаемым аппаратом «Венера-14»

Подробные карты Венеры удалось получить при помощи радиолокации как с Земли, так и с борта искусственных спутников Венеры (рис. 19.3). Поверхность планеты оказалась более гладкой, чем у Земли, хотя и на ней найдено несколько горных областей. Самый большой горный район — Иштар — по площади вдвое превышает Тибет. В центре его на высоту 11 км поднимается гигантский вулканический конус. Имеются на планете и кольцевые кратеры, по-видимому, метеоритного происхождения.

В результате проведения экспериментов на спускаемых аппаратах был сделан химический анализ венерианского грунта. По составу он оказался похожим на земные базальты.

Атмосфера Венеры на различных высотах была изучена при помощи советских и американских АМС. Выяснилось, что она содержит очень мало кислорода, почти лишена воды и состоит в основном из углекислого

газа. На высотах 50—70 км располагаются мощные облачные слои и дуют ураганные ветры. У поверхности Венеры атмосфера очень плотная (всего лишь в 10 раз меньше плотности воды). Атмосферное давление примерно в 90 раз больше, чем у поверхности Земли.

В отличие от земных облаков облака на Венере не содержат воды. Зато в них много концентрированной серной кислоты с различными химическими примесями.

Плотный углекислый газ (CO_2), из которого в основном состоит атмосфера, играет роль одеяла, укутывающего планету, и сохраняет ее тепло. Это объясняется тем, что CO_2 сравнительно хорошо пропускает солнечные лучи в видимой области спектра и плохо — инфракрасное тепловое излучение планеты. Благодаря этому, как в оранжерейном парнике, вблизи поверхности Венеры накапливается энергия, приносимая солнечными лучами, и температура достигает 500°C . Суточные и сезонные изменения температуры на Венере очень малы.



Определите по закону Вина, на какую длину волны приходится максимум в спектре излучения горячей поверхности Венеры.

19.3. Марс. Марс примерно вдвое меньше Земли по диаметру и в 9 раз — по массе. Год на Марсе длится около двух земных лет ($T_o \approx 687$ сут), но период вращения планеты вокруг оси почти такой же, как у Земли, и примерно на тот же угол ось вращения наклонена к плоскости орбиты. Поэтому смена дня и ночи и времен года на Марсе происходит так же, как и на Земле.

В телескоп на Марсе видны темные и светлые участки поверхности и белые полярные области — *полярные шапки*. Более мелкие детали поверхности стали известны только в результате полетов АМС к этой планете. Полученные телевизионные изображения показывают, что поверхность Марса — безжизненная пустыня (рис. 19.4), значительная часть которой покрыта красноватым песком. На Марсе сохранились и многочисленные кратеры метеоритного происхождения, хотя они сильно

сглажены ветрами. Есть на планете и горные районы. Несколько гор очень большой высоты представляют собой давно потухшие вулканы. Самая большая из них — гора Олимп — имеет высоту около 27 км — втрое выше Эвереста! Это самая высокая гора, известная во всей Солнечной системе.

Температура на Марсе в среднем составляет около -70°C . Днем

Рис. 19.3. Изображение поверхности Венеры, полученное радиолокацией с борта ее искусственного спутника





Рис. 19.4. Поверхность Марса (спускаемый аппарат «Викинг-1»)

вблизи экватора она бывает от -10 до -30°C и только изредка может подниматься выше 0°C . Ночью температура обычно падает ниже -100°C . В околополярных областях еще холоднее. Углекислый газ, из которого в основном состоит атмосфера, и водяные пары вымерзают, образуя полярные шапки. Летом размер полярных шапок уменьшается, зимой, с усилением холодов, возрастает.

Открытых водоемов на Марсе нет. Считается, что вода на планете существует в замерзшем состоянии в форме вечной мерзлоты.

На поверхности Марса заметны длинные извилистые долины, похожие на русла высохших рек или системы оврагов. Возможно, климат на Марсе подвержен изменениям и в далеком прошлом был более теплым. Тогда на Марсе могли существовать озера и реки.

Атмосфера Марса в сотни раз разреженнее земной. Помимо углекислого газа, в ее состав входит азот и немного водяных паров. Силь-

ные перепады температуры на планете иногда приводят к возникновению ураганных ветров и охватывающих всю планету пылевых бурь, при которых пыль и песок поднимаются на много километров над поверхностью. Это — типично марсианские явления.

Две американские станции («Викинг-1» и «Викинг-2») провели ряд экспериментов по изучению марсианского грунта и поиску в нем следов живых микроорганизмов. Исследования дали отрицательный результат: признаков жизни на Марсе не обнаружено.

У Марса два небольших спутника — Фобос и Деймос. Изображения, полученные космическими аппаратами, показывают, что они представляют собой каменные глыбы неправильной формы размерами 15—20 км с хорошо заметными следами ударов метеоритов. (Изображение Фобоса дано на вклейке III.)

19.4. Юпитер. Это самая крупная планета Солнечной системы. Диаметр Юпитера в 11 раз превышает поперечник Земли. Планета очень быстро вращается вокруг оси:



сутки на ней длятся менее 10 земных часов. Время обращения Юпитера вокруг Солнца составляет почти 12 лет.

Юпитер обладает плотной атмосферой и толстым облачным слоем. Облака на Юпитере состоят в основном из кристалликов аммиака, а «воздух» — это водородно-гелиевая смесь с небольшой примесью метана и аммиака. Облака образуют вытянутые вдоль экватора полосы, что и определяет внешний вид планеты (см. вкл. I).

Как и в земной атмосфере, на Юпитере возникают вихревые движения вещества (циклоны и антициклоны). Эти образования в атмосфере могут сохраняться в течение столетий. Хорошо известным примером является *Большое красное пятно* — красноватое газовое образование эллиптической формы, по размерам превышающее земной шар.

Юпитер, как и другие планеты-гиганты, состоит в основном из легких газов — водорода и гелия — и не имеет твердой поверхности. Средняя плотность Юпитера лишь ненамного превышает плотность воды. Предполагается, что его протя-

женная атмосфера постепенно переходит в оболочку из молекулярного водорода, сжиженного под большим давлением, а еще глубже водород переходит в особое, очень плотное, металлизированное состояние. Центральная часть Юпитера — ядро — возможно, состоит уже не из водорода и гелия, а из расплавленных каменных пород.

Юпитер обладает магнитным полем, примерно в 10 раз более сильным, чем у Земли. Захваченные этим полем быстрые заряженные частицы, летящие от Солнца, образуют радиационные пояса, более мощные, чем существующие вокруг нашей планеты (см. § 17).

У Юпитера много спутников. Четыре самые крупные из них — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто — были обнаружены еще Галилеем и называются *галилеевыми* (см. вкл. II). Два первых по размерам близки к Луне, два последних — к Меркурию. По внешнему виду каждый из этих спутников непохож на остальные. Галилеевы спутники движутся в плоскости экватора планеты в ту же сторону, в какую вращается сам Юпитер.

Во время пролета двух американских космических аппаратов мимо Ио на нем были обнаружены действующие вулканы. Продукты вулканических извержений покрывают всю поверхность спутника. Считается, что разогрев недр Ио, приводящий к извержениям, связан с его близостью к Юпитеру: притяжение Юпитера производит мощные приливы в недрах спутника, что сопряжено с внутренним трением и выделением большого количества теплоты.

Необычный вид имеет спутник Европа. Его удивительно гладкая поверхность (ни одной возвышенности!) покрыта лабиринтом тонких кривых линий. Предполагается, что это трещины в толстой ледяной коре.

Поверхность Ганимеда испещрена длинными бороздами, происхождение которых не выяснено. Ледяная поверхность Каллисто усыпана метеоритными кратерами всевозможных размеров.

Космические аппараты выявили существование узкого кольца, окружающего Юпитер и состоящего из мелких пылевых частиц.

19.5. Сатурн, Уран, Нептун. Эти большие планеты в общем подобны Юпитеру, хотя и уступают ему по размерам. Как и Юпитер, они состоят в основном из легких газов и поэтому имеют низкую среднюю плотность, хотя не исключено, что в

центре у них существуют плотные твердые ядра из более тяжелых химических элементов.

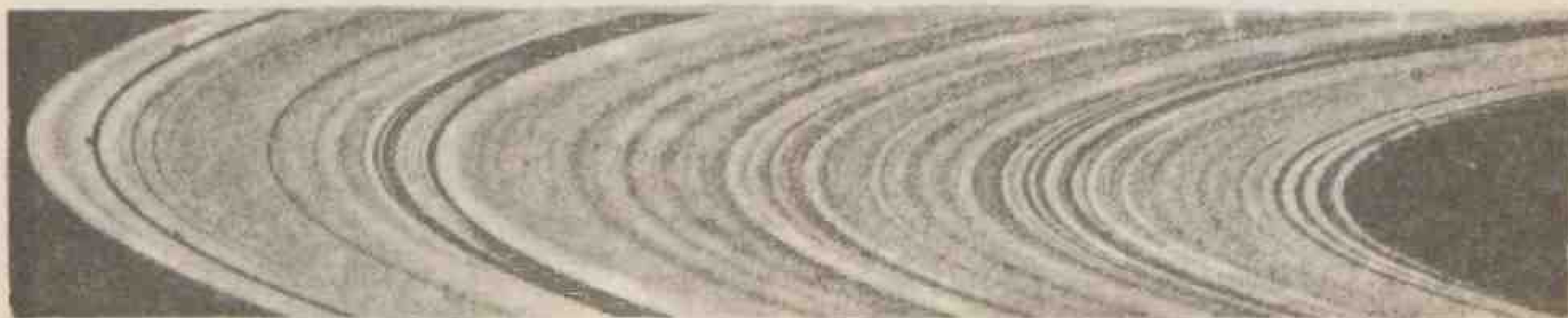
Сатурн отличается от других планет тем, что окружен ярким кольцом (вкл. I). Впервые его следы заметил Галилей, хотя он и не смог установить, что это кольцо. Телевизионные изображения, полученные межпланетными станциями, показали, что в действительности кольцо Сатурна разделяется на тысячи узких колечек (рис. 19.5). Их толщина оказалась удивительно маленькой (менее 100 м) по сравнению с гигантским радиусом, составляющим более 150 000 км.

Когда кольцо располагается вдоль направления к Земле, его не видно ни в какие телескопы, так оно тонко! Кольцо состоит из твердых и рыхлых частиц (комков) небольшого размера, обращающихся вокруг Сатурна в его экваториальной плоскости.

Уран (вкл. III) — более далекая от Солнца и более скромная по размерам планета по сравнению с Сатурном. Ось ее вращения наклонена более чем на 90° к плоскости орбиты, так что она вращается как бы лежа на боку.

У планеты Уран также были обнаружены кольца. Это удалось сделать, наблюдая с Земли покрытия звезд Ураном. До того как звезда заходит за диск планеты, ее свет на короткое время прерывается из-за наличия колец. Кольца Урана тоже оказались очень тонкими.

Рис. 19.5. Структура колец Сатурна



Нептун (вкл. III) — мало изученная планета, по размеру и массе похожая на Уран, но более холодная: эта планета находится в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля.

Американская АМС «Вояджер-2», пролетевшая мимо этой планеты в 1991 г., значительно обогатила наши представления о ней. В частности, были получены изображения кольца вокруг Нептуна, содержащего чередующиеся более яркие и более темные участки.

Все три планеты имеют спутники. Больше всего их у Сатурна. Детальные изображения многих из них были получены космическими станциями. Самый крупный спутник Сатурна — Титан — уникален тем, что обладает плотной азотной атмосферой, давление которой у поверхности около 10^5 Па (т. е. ≈ 1 атм).

У Сатурна обнаружено сильное магнитное поле.

19.6. Система Плутон — Харон.

Плутон — самая маленькая планета Солнечной системы, сравнимая по размеру с Луной. Она была открыта в 1930 г. Орбита Плутона имеет наибольший наклон к плоскости эклиптики (17°) и заметно отличается от круговой.

Недавно было обнаружено, что Плутон — двойная планета. Спутник Плутона, получивший название Харон, по размеру всего в 2—3 раза меньше самой планеты. Поэтому обычно говорят о системе Плутон — Харон. По периоду движения спутника можно оценить массу планеты (см. § 10.1). Она оказалась очень маленькой — менее $1/500$ массы Земли. Пока еще о Плуtone и его атмосфере известно очень мало.

19.7. Основные причины различия физических свойств больших планет. Планеты очень сильно отличаются друг от друга. Особенно велико раз-

личие между планетами земной группы и планетами-гигантами. Рассмотрим, с чем это связано.

Две основные причины, определяющие важнейшие свойства каждой планеты, — это ее расстояние от Солнца и масса. Чем больше среднее расстояние планеты от Солнца, тем меньше энергии от него она получает. По этой причине температура планет быстро падает с увеличением расстояния от Солнца.

Напомним, что, в отличие от далеких планет, планеты земной группы, расположенные ближе к Солнцу, содержат очень мало легких газов, зато много тугоплавких элементов (кремний, железо и др.). По-видимому, это отражает особенности химического состава того протопланетного газопылевого диска, из вещества которого сформировались планеты: чем дальше от Солнца, тем больше легких газов содержалось в протопланетном диске. Причина этого в том, что на больших расстояниях от Солнца при более низких температурах молекулы легких газов могли замерзать на пылинки, в то время как вблизи Солнца легкие газы нагревались и покидали протопланетный диск.

Масса планеты определяет ее способность удерживать вокруг себя атмосферу. Газ всегда стремится к расширению, и газовые атмосферы удерживаются вокруг планет только благодаря гравитационному притяжению к ним. Но из атмосферы любой планеты непрерывно происходит утечка вещества в межпланетное пространство. Причина этого понятна: тепловое движение молекул газа. Скорость каждой молекулы постоянно меняется из-за столкновений с другими молекулами. Если скорость случайно превысит вторую космическую, то такая моле-

кула навсегда может покинуть разреженные внешние слои атмосферы планеты. Чем меньше масса планеты, тем слабее ее гравитационное притяжение и тем быстрее она теряет свою атмосферу, поскольку наиболее «быстрым» молекулам легче покинуть ее.

Из физики известно, что средняя скорость теплового движения молекул и атомов пропорциональна $\sqrt{T/m_0}$, где T — абсолютная температура газа, а m_0 — масса его молекул (или атомов). Поэтому при любой температуре быстрее всего покидают атмосферу молекулы легких газов, имеющие более высокую среднюю скорость. Следовательно, со временем масса атмосферы и ее химический состав должны меняться. В атмосферах планет земной группы осталось очень мало легких газов (водорода и гелия). Меркурий из-за небольшой массы и высокой температуры, обусловленной близостью к Солнцу, практически вовсе лишен атмосферы. Атмосфера Марса из-за слабости его гравитационного поля сильно разрежена, а Луна и спутники планет вообще не смогли удержать вблизи себя газовую оболочку. Исключение составляет массивный и холодный спутник Сатурна — Титан, имеющий атмосферу, содержащую много достаточно тяжелого газа — азота, и небольшой спутник Юпитера Ио. Последний теряет атмосферу непрерывно, но она постоянно пополняется за счет извержения вулканов, которые вместе с выбросом лавы выделяют много газа. По-видимому, и у планет земной группы (в том числе и у Земли) вулканические извержения и выделения газов из недр сыграли решающую роль в образовании атмосфер, когда планеты были еще молодыми.

На твердой поверхности боль-

ших планет (особенно не обладающих атмосферой) и их спутников наблюдаются многочисленные кратеры — результат метеоритной бомбардировки. Она происходит и в наше время. Однако наиболее интенсивной она была миллиарды лет тому назад. Такие тела, как Луна, Меркурий, спутник Юпитера Каллисто и другие, где кратеров очень много и где они мало разрушались, сохранили большую часть своей поверхности в том виде, какой она была миллиарды лет назад. На Венере, Марсе и на некоторых спутниках (частично и на Луне) происходил процесс постепенного исчезновения старых кратеров. Они могли затопляться лавой (на Луне), разрушаться под действием ветра (как, например, на Марсе) или воды (как на Земле). Поэтому изучение поверхностей различных планет и спутников дает возможность узнать о далекой их истории и путях эволюции.

Сильные магнитные поля обнаружены пока у трех планет: Земли, Юпитера и Сатурна. По-видимому, они связаны с существованием электрических токов в расплавленных недрах этих планет.

19.8. Вопросы

1. На поверхности каких планет Солнечной системы могла бы находиться вода в жидком состоянии?
2. На каких телах и в какой форме наблюдаются следы: а) вулканической деятельности; б) метеоритной бомбардировки?

19.9. Упражнения

1. Рассчитайте ускорение свободного падения на поверхности Меркурия, Венеры, Марса. (Воспользо-

ваться данными о размерах и массах этих планет в сравнении с Землей, табл. II.)

2. Под каким углом видны с Земли Венера, Юпитер и Сатурн, когда они находятся на минимальных расстояниях от нее? (Воспользоваться данными о радиусах планет и их орбит.)

3. Во сколько раз меньше солнечной энергии получают участки одинаковой площади, ориентированные перпендикулярно солнечным лучам, на поверхности Марса, чем на Земле? А на поверхности Плутона?

4. Какой угловой размер имело бы Солнце для наблюдателя на Плутоне?

20. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА

20.1. Астероиды. К настоящему времени в Солнечной системе обнаружено более пяти тысяч тел небольших размеров — от километра и выше, которые не являются спутниками планет, а движутся вокруг Солнца самостоятельно. Они называются *астероидами*, что означает «подобные звездам». На фотографиях их можно отличить от звезд только по медленному перемещению: если телескоп непрерывно поворачивается за звездами, отслеживая их суточные движения, то при длительных экспозициях изображение астероида получается в виде черточки.

Большая часть астероидов движется между орбитами Марса и Юпитера. Орбиты их, как правило, не слишком сильно отличаются от окружностей, поэтому астероиды не заходят во внутреннюю часть Солнечной системы. Однако есть исклю-

чения. Например, у астероида И к а р орбита сильно вытянута: его расстояние от Солнца при движении по орбите меняется более чем в десять раз. Подобные астероиды могут близко подходить к Земле и даже сталкиваться с ней, хотя таких столкновений за историю Земли было немного.

Самый крупный астероид — Церера — имеет размер около 1000 км, на втором месте Паллада — около 500 км, но большинство их значительно меньше. Самые маленькие из известных астероидов имеют размер около 1 км. Без сомнения, существует и множество более мелких астероидов, которые невозможно увидеть с больших расстояний.

Периодические изменения яркости, наблюдаемые у некоторых астероидов, говорят о том, что они обладают неправильной формой, неровной поверхностью и вращаются вокруг своих осей. Поверхности астероидов, как и спутников планет, должны нести следы ударов более мелких тел.

Атмосфер у астероидов нет.

20.2. Кометы. О существовании комет людям известно с глубокой древности. Туманные хвостатые светила, очень медленно перемещающиеся по звездному небу, считались посланцами богов, как правило, связанными с дурными предзнаменованиями.

Природа комет долгое время была совершенно неизвестной. Правда, в XVI в. Тихо Браге показал, что кометы дальше Луны. В XVII в. современник и друг И. Ньютона Э. Галлей доказал периодичность появления одной из комет, получившей впоследствии его имя. Он точно рассчитал ее движение под действием солнечного притяжения. Орбита кометы вокруг Солнца ока-

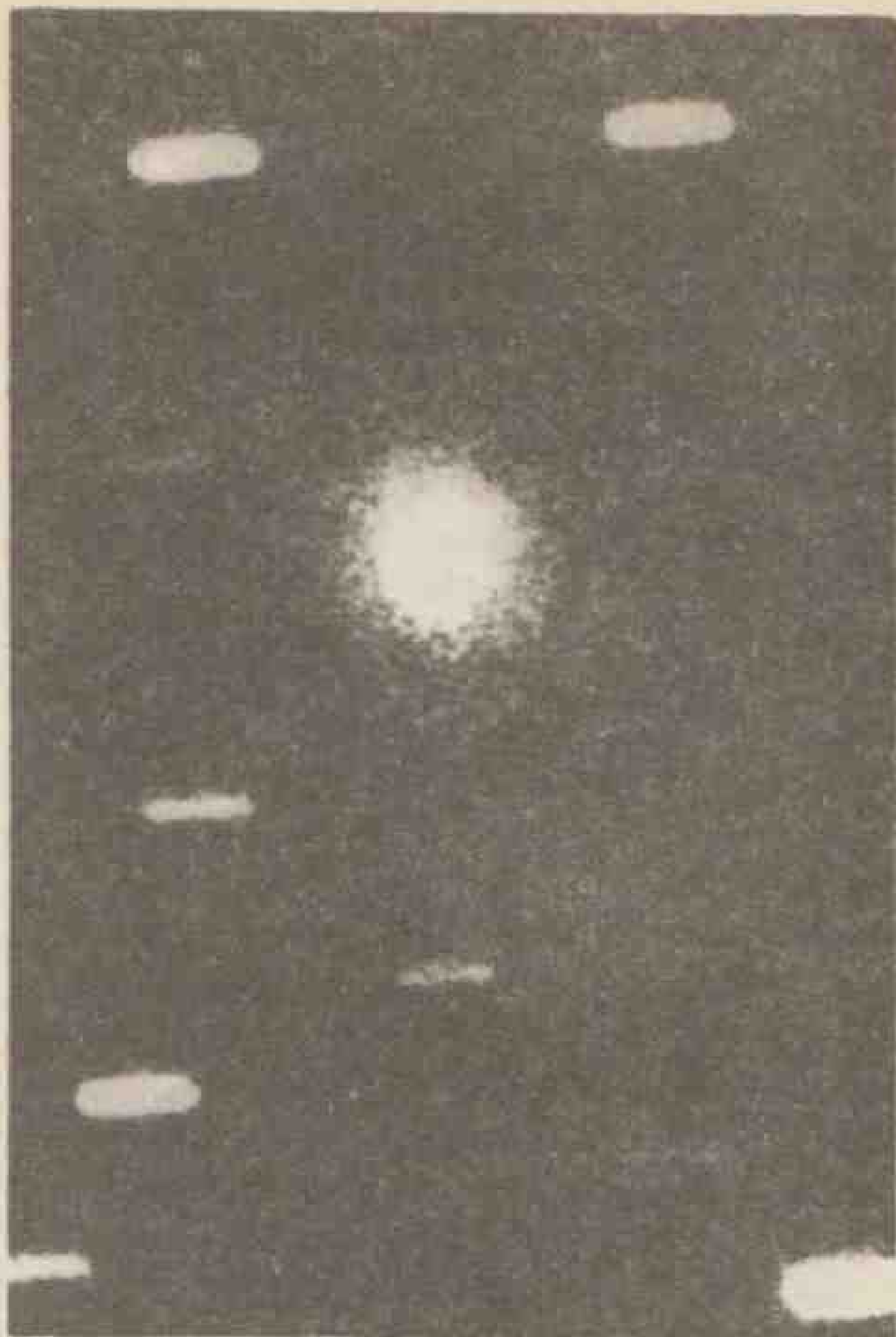


Рис. 20.1. Комета Галлея: а) 1985 г. (с расстояния 360 млн. км; хвост кометы еще не заметен). Изображения звезд «растянуты» в черточки, так как при фотографировании телескоп «следит» за медленно перемещающейся кометой; б) начало 1986 г.

залась сильно вытянутой. Период ее обращения — около 75 лет. В конце 1985 — начале 1986 г. эта комета очередной раз прошла вблизи Солнца. Ее можно было наблюдать с Земли при помощи бинокля.

Кометы, хорошо заметные невооруженным глазом, появляются на небе довольно редко. Однако при помощи телескопов ежегодно астрономы открывают несколько новых комет. Они видны как слабые туманные пятнышки на темном небе,



медленно перемещающиеся на фоне далеких звезд.

Основная масса кометы сосредоточена в ее *ядре*, состоящем из обычного льда, смерзшихся газов и твердых частиц. Ядро может иметь размеры до нескольких километров. Когда комета приближается к Солнцу, ядро начинает испаряться и разрушаться. Вокруг него возникает светящаяся под действием солнечных лучей газовая оболочка — *кома*. Поток частиц ионизированного газа, непрерывно летящих от Солнца (*солнечного ветра*), взаимодействует с газом кометы посредством своего магнитного поля и «сдувает» его в сторону, противоположную Солнцу. На пылинки, покидающие ядро кометы вместе с газом, действует давление солнечных лучей. В итоге у кометы развивается длинный *хвост* (рис. 20.1, вкл. IV), состоящий из ионизированных газов и мелкой пыли. Размеры хвоста иногда превышают сотни миллионов километ-

ров. Он направлен в сторону, противоположную Солнцу. Вещество хвоста очень разрежено: через него без поглощения проходит свет звезд. С удалением кометы от Солнца хвост постепенно исчезает. Большинство комет не подходит близко к Солнцу, поэтому у них вообще не наблюдается хвостов.

Кометы, которые попадают во внутреннюю область Солнечной системы, под действием солнечного тепла со временем разрушаются; вещество ядра превращается в межпланетный газ, а твердые части распадаются на множество мелких метеоритных частиц, которые постепенно рассеиваются в широкий поток вдоль орбиты кометы. Когда Земля пересекает такой поток, мелкие частицы со скоростью более 11 км/с влетают в ее атмосферу, быстро раскаляются и разрушаются на высоте в несколько десятков километров. Выделяющаяся при их торможении энергия возбуждает свечение воздуха, и с Земли виден вспыхнувший на короткое время след частицы. Это явление называют *метеором*. Метеоры можно наблюдать в любую ясную ночь. Каждый год около 21 октября наблюдается не очень сильный метеорный поток, связанный с кометой Галлея. Направление движения потока таково, что метеоры кажутся вылетающими из созвездия Ориона. Но больше всего метеоров можно наблюдать в августовские ночи, когда Земля пересекает поток *персеид* (пути этих метеоров как бы исходят из созвездия Персея).

Метеорные потоки — остатки разрушившихся комет.

На место комет, распадающихся под воздействием Солнца, постоянно приходят новые. Полагают, что

большинство кометных тел движется далеко за пределами орбиты Плутона. Притяжение больших планет может изменять их орбиты, заставляя кометы приближаться к Солнцу. Считается, что кометы представляют собой «первичное» вещество, сохранившееся почти без изменения в течение миллиардов лет. Из него в свое время состоял протопланетный диск и образовались планеты. Отсюда видно, сколь важны исследования комет для изучения ранней истории Солнечной системы.

Наблюдения комет осуществляются как наземными, так и космическими методами. В 1984—1985 гг. впервые в истории были проведены запуски нескольких АМС для встречи с кометой Галлея и ее исследования с близкого расстояния; две самые крупные из них запущены в СССР (проект «Венера — Галлей», сокращенно — «Вега»), одна — западноевропейскими странами («Джотто»).

20.3. Метеориты. На самых различных расстояниях от Солнца должны встречаться мелкие астероиды и их обломки — от пылинок массой в доли грамма до тел с массой в миллионы тонн.

Случайно встречаясь с Землей, мелкие тела вспыхивают в атмосфере, вызывая, как и твердые частицы комет, явления метеора. Тела с массой в десятки граммов вспыхивают как очень яркие метеоры, оставляющие за собой хвост. Их называют *болидами*. Если масса метеоритного тела превышает несколько килограммов, то оно не успевает полностью разрушиться в полете и может упасть на Землю. Упавшие на Землю космические тела называются *метеоритами*. Метеориты обычно представляют собой либо камни со специфическим составом, отличающимся от состава земных

камней, либо металлические тела, состоящие в основном из железа с примесью никеля.

Метеориты — это образцы космического вещества, и их исследование представляет большую ценность для науки. Поэтому каждый, кто нашел метеорит или наблюдал его падение, должен сообщить об этом в научные организации.

Падение крупных метеоритов оставило свои следы на твердых поверхностях всех планет и их спутников. Ряд крупных кратеров сохранился и на Земле. Хорошо известен метеоритный кратер в Эстонии (о. Сааремаа). Прекрасно сохранился гигантский кратер диаметром 1,4 км в США (штат Аризона), образованный падением метеорита тысячи лет назад, масса которого составляла, по расчетам, около миллиона тонн.

В 1908 г. в глухой сибирской тайге произошло падение *Тунгусского метеорита*. Он взорвался, не долетев до Земли, повалил леса на огромной площади и вызвал большой лесной пожар. Никаких кратеров или метеоритных осколков на месте падения не обнаружено. Полагают, что метеорит распался на мелкие частицы, распыленные на обширной территории. Возможно, Тунгусский метеорит был ледяным ядром небольшой кометы.

В 1947 г. на Дальнем Востоке в отрогах хребта Сихотэ-Алинь упал расколовшийся на множество частей железный метеорит. С площади более трех квадратных километров удалось собрать космическое вещество массой более 27 т. Общая масса выпавшего вещества оценивается примерно в 70 т.

Мелкие метеориты падают на Землю ежедневно. Полная масса вещества, выпадающего на Землю из

космического пространства за сутки (главным образом в виде очень мелких частиц), достигает нескольких сотен тонн.

Таким образом, межпланетное пространство непрерывно пронизывается летящими пылинками, крупными и мелкими метеоритными телами. Помимо этого твердого вещества, межпланетная среда включает сильно разреженный ионизованный газ, движущийся от Солнца, — *солнечный ветер*. Скорость этого потока составляет сотни километров в секунду, но его плотность настолько мала, что он не оказывает практически никакого влияния на движение твердых тел.

20.4. Вопросы

1. Чем астероиды отличаются от комет? 2. Как можно узнать химический состав метеорных частиц? 3. Почему на астероидах отсутствует атмосфера? 4. Как можно по спектру кометного хвоста узнать о содержании в нем газа? А пыли? 5. Почему все метеориты входят в атмосферу со скоростью не меньшей чем 11 км/с? 6. Можно ли наблюдать метеоры на Луне?

20.5. Упражнения

1. Как по скорости орбитального движения астероида можно узнать его расстояние от Солнца? (Считать, что его орбита близка к круговой.)

2. Какая энергия выделится при ударе о Землю метеорита массой 100 кг, имеющего скорость у поверхности Земли 2 км/с? Почему скорость удара меньше второй космической скорости?

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА V

Наша планетная система включает в себя множество самых различных тел, обращающихся вокруг Солнца: девять больших планет с их спутниками, астероиды, кометы, метеоритное вещество, мелкую пыль и разреженный газ, движущийся от Солнца (солнечный ветер).

Солнечная система обладает рядом общих закономерностей, представляющих собой результат единого процесса образования Солнца

и планет, происходившего 4—5 млрд. лет тому назад.

Важной особенностью является разделение планет на две группы: планеты типа Земля и планеты-гиганты. Они отличаются по размерам, массе, плотности вещества и химическому составу, составу атмосфер, скорости вращения и т. д. Физические свойства больших и малых планет солнечной системы весьма разнообразны и определяются в первую очередь массой и расстоянием от Солнца.

21. ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

21.1. Шкала звездных величин. После Солнца самая яркая звезда на небе — Сириус. По сравнению с ней звезды, едва заметные невооруженному глазу, примерно в тысячу раз слабее, а телескопу доступны звезды, от которых света приходит меньше еще в десятки миллионов раз. Важнейшая наблюдаемая характеристика звезд — количество приходящей от них световой энергии. Для оценки величины этой энергии древнегреческий астроном Гиппарх во II в. до н. э. впервые ввел так называемую шкалу звездных величин. Самые яркие звезды он отнес к первой величине, а едва заметные невооруженным глазом — к шестой. Шкала звездных величин широко используется и в настоящее время. Звездные величины обозначаются индексом m (по латыни *magnitudo* — величина), который ставят сверху после числового значения (например, 5^m).

Глаз реагирует на энергию света, прошедшую через зрачок. Независимой от размера зрачка остается его *освещенность* (количество световой энергии, попадающей на поверхность единичной площади за единицу времени). Поэтому звездную величину можно рассматривать как меру освещенности, создаваемой наблюдаемым источником. Но измерить эту освещенность в абсолютных единицах (например, в Вт/м²) очень сложно. Оценки звездных величин, как правило, относительны: измеряемая звезда сравнивается с теми звездами,

звездные величины которых считаются известными.

Оценки, полученные Гиппархом для нескольких сотен звезд, были очень грубыми. Измерения, выполненные в середине XIX в., показали, что разности в 5^m в шкале Гиппарха соответствует отношение освещенностей почти 1:100. Тогда было решено создать новую шкалу, в которой оно в точности равно 1:100. Поэтому различие в 1^m соответствует отношению освещенностей, равному $\sqrt[5]{100} \approx 2,512 \dots$, а в m звездных величин — отношению $(2,512 \dots)^m$.

Следуя Гиппарху, звездную величину источника условились считать тем большей, чем он слабее.

Следовательно, освещенности от двух объектов, звездные величины которых равны m_1 и m_2 , связаны простым соотношением:

$$\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 2,512 \dots^{-(m_1 - m_2)}, \text{ или}$$

$$\lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = -0,4(m_1 - m_2). \quad (21.2)$$

Из последнего равенства следует, что разность звездных величин двух объектов равна десятичному логарифму отношения создаваемых ими освещенностей, умноженному на коэффициент, равный $-1/0,4 = -2,5$.

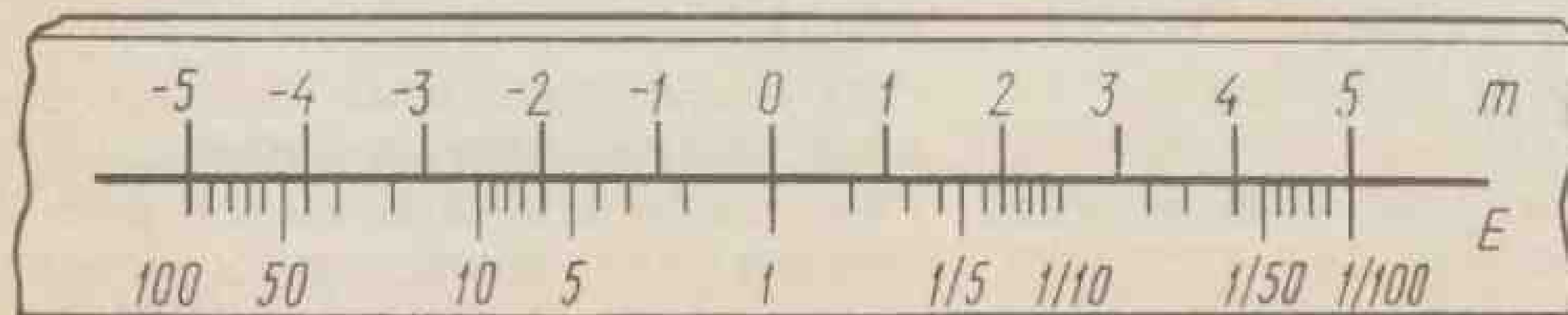
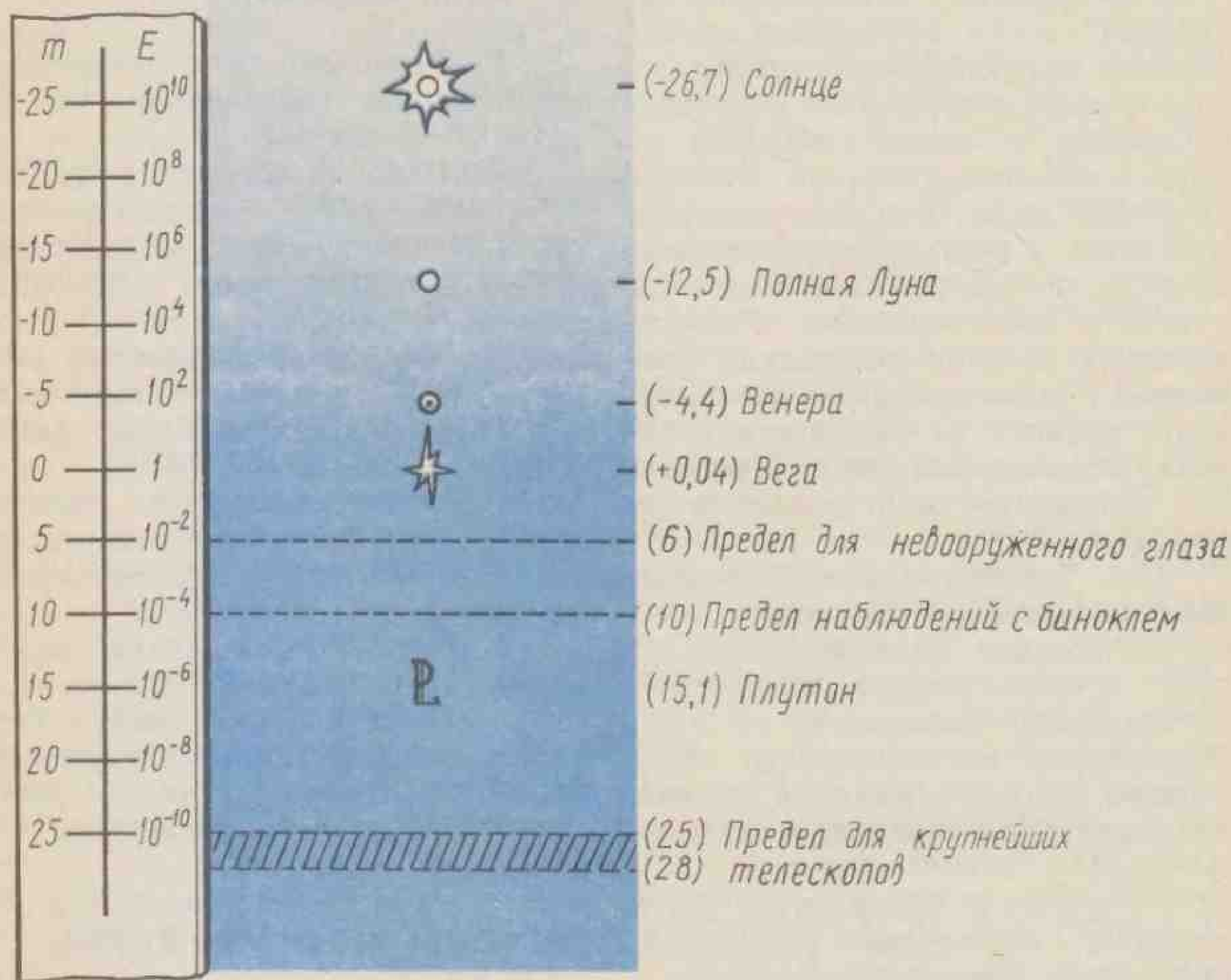
Таким образом, шкала звездных величин — это логарифмическая шкала, в которой сравниваются освещенности, создаваемые наблюдаемыми источниками (необязательно звездами).

Формула (21.1) позволяет опре-

делять звездные величины не только более слабых звезд, но и объектов более ярких, чем с $m=1$; для них m может принимать нулевое или отрицательные значения. Так, Луна в полнолуние имеет звездную величину $-12,5^m$. Получающаяся таким путем шкала звездных величин изображена на рисунке 21.1. У звезды Вега $m=0,04$, звездная величина Сириуса равна $-1,46^m$, а у Полярной $+2,3^m$.

Звездные величины определяют при помощи точных фотоэлектрических приборов — электрофотометров, в которых энергия фотонов уходит на «выбивание» свободных электронов из специальной металлизированной пленки. Фактически прибор измеряет число свободных электронов, появившихся за данный интервал времени под действием све-

Рис. 21.1. Шкала звездных величин



та. Специальные исследования показали, что в видимой области спектра от звезды 0-й звездной величины приходит примерно 10^{10} фотонов за 1 с на площадь поверхности 1 м^2 . Отсюда можно получить, что число фотонов, приходящих от звезды 25^m , в $10^{0,4 \cdot 25} = 10^{10}$ раз меньше, или всего лишь 1 фотон на 1 м^2 за 1 с. Наблюдения со специальной аппаратурой позволяют зарегистрировать излучение объектов еще на 2^m — 3^m более слабых.

В астрономии используется несколько систем звездных величин. Каждая характеризуется своим определенным интервалом длин волн (областью спектра), в котором измеряется световая энергия. Все приведенные выше звездные величины относятся к желто-зеленой области спектра, в которой наиболее чувствителен глаз человека. Разность звездных величин источника, измеряемых в различных интервалах длин волн, зависит от его цвета и поэтому используется для количественной оценки цвета астрономических объектов.

21.2. Типовая задача. Суммарная звездная величина объектов.

Условие. Двойная звезда состоит из двух близких компонентов со звездными величинами m_1 и m_2 . Компоненты по отдельности неразличимы. Какова суммарная звездная величина этого объекта, если $m_1 = 2$ и $m_2 = 3$?

Решение. По формуле (21.1) находим отношение освещенностей обоих компонентов двойной звезды

$$\lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = -0,4(m_1 - m_2);$$

$$\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 10^{-0,4(m_1 - m_2)},$$

а затем — суммарную освещенность от них

$$E = E_{m_1} + E_{m_2} =$$

$$= E_{m_1} + E_{m_1} \cdot 10^{0,4(m_1 - m_2)}.$$

Наконец, по формуле (21.2) определим искомую звездную величину всего объекта

$$m = m_1 - 2,5 \lg \frac{E_{m_1} + E_{m_2}}{E_{m_1}} =$$

$$= m_1 - 2,5 \lg [1 + 10^{0,4(m_1 - m_2)}] =$$

$$= 1,64^m.$$

21.3. Упражнения

1. Во сколько раз отличаются освещенности, создаваемые Вегой и Полярной звездой?

2. Звездная величина полной Луны равна $-12,5^m$. Определите звездную величину Солнца, если освещенность, создаваемая им, в 400 000 раз выше, чем Луной.

3. На сколько отличаются звездные величины звезд, если освещенности от них относятся как 1/1000, 1/100, 1/10, 10, 100, 1000?

4. Какую звездную величину имеет скопление из n звезд, если звездная величина каждой из них равна m ?

5. Телескопу с диаметром зеркала 6 м доступны звезды $23,5^m$. Во сколько раз они слабее звезд, едва различимых невооруженным глазом? Сколько фотонов от звезды падает на объектив телескопа ежесекундно?

22. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЗВЕЗД

22.1. Звезды — важнейшие объекты Вселенной. Напомним, что звезды — это массивные горячие газовые шары. Они подобны Солнцу, но настолько удалены от нас, что видны лишь как слабосветящиеся

точки на фоне темного ночного неба. С помощью телескопов на всем небе можно наблюдать сотни миллионов отдельных звезд.

Звезды — важнейшие астрономические объекты: в них сосредоточено более 95% всего вещества, наблюдаемого в природе. Изучая, как распределены в пространстве звезды и их скопления, астрономы исследуют тем самым строение окружающего нас мира, структуру Вселенной.

Звезды кажутся неизменными. Их видимая яркость и относительное расположение долгое время считались постоянными. Однако это не так: очень медленно с точки зрения земных масштабов времени они меняются, перемещаются в пространстве, стареют, могут потерять часть своего вещества и, наконец, «умирают», перестав излучать свет. Со временем меняется даже химический состав звезд: новые химические элементы рождаются в них самих. В звездах произошло и происходит образование большинства химических элементов, из которых состоит вещество окружающего нас мира. Атомы любого вещества на Земле, включая и те, из которых состоим мы сами, когда-то, еще до того, как возникла Солнечная система, родились или побывали в недрах звезд.

При определенных условиях вместе со звездами могут возникать обращающиеся вокруг них планеты. Изучение эволюции звезд помогает понять, как могла возникнуть наша планетная система, как рождаются новые поколения звезд и какие изменения постепенно происходят в окружающей нас Вселенной. Это делает исследование природы звезд, их образования и эволюции важнейшей задачей современной астрономии.

Изучение звезд во многом облегчается тем обстоятельством, что одна из них, а именно наше Солнце, по астрономическим масштабам очень близка к нам. С Земли можно исследовать не только Солнце в целом, но и отдельные детали его атмосферы. Солнце — это наиболее изученная звезда. Для нас оно играет особую роль, потому что вся жизнь на Земле существует только благодаря его свету и теплу. Солнце — одна из типичных, рядовых звезд. Но это стало очевидным лишь после того, как научились оценивать расстояния до звезд и измерять их температуры.

22.2. Расстояния до звезд. Расстояния до относительно близких звезд оценивают методом тригонометрического параллакса (см. § 8.5). Для этого тщательно измеряют, как меняется направление от Земли на звезду в течение года вследствие движения Земли вокруг Солнца. Впервые попытка определить параллактическое смещение звезд была предпринята еще Коперником. Он хорошо понимал, что обнаружение такого смещения будет служить доказательством обращения Земли вокруг Солнца и подтверждением гелиоцентрической системы мира. Но в те времена точность измерений была слишком низкой для того, чтобы обнаружить параллактическое смещение звезд. Коперник смог лишь сделать вывод, что звезды находятся от нас по крайней мере в 1000 раз дальше, чем Солнце.

Впервые параллакс нескольких звезд удалось обнаружить в прошлом веке. Измерялись кажущиеся перемещения выбранной яркой звезды на фоне слабых, значительно более далеких звезд, направления на которые из-за большого расстояния остаются практически неизменными

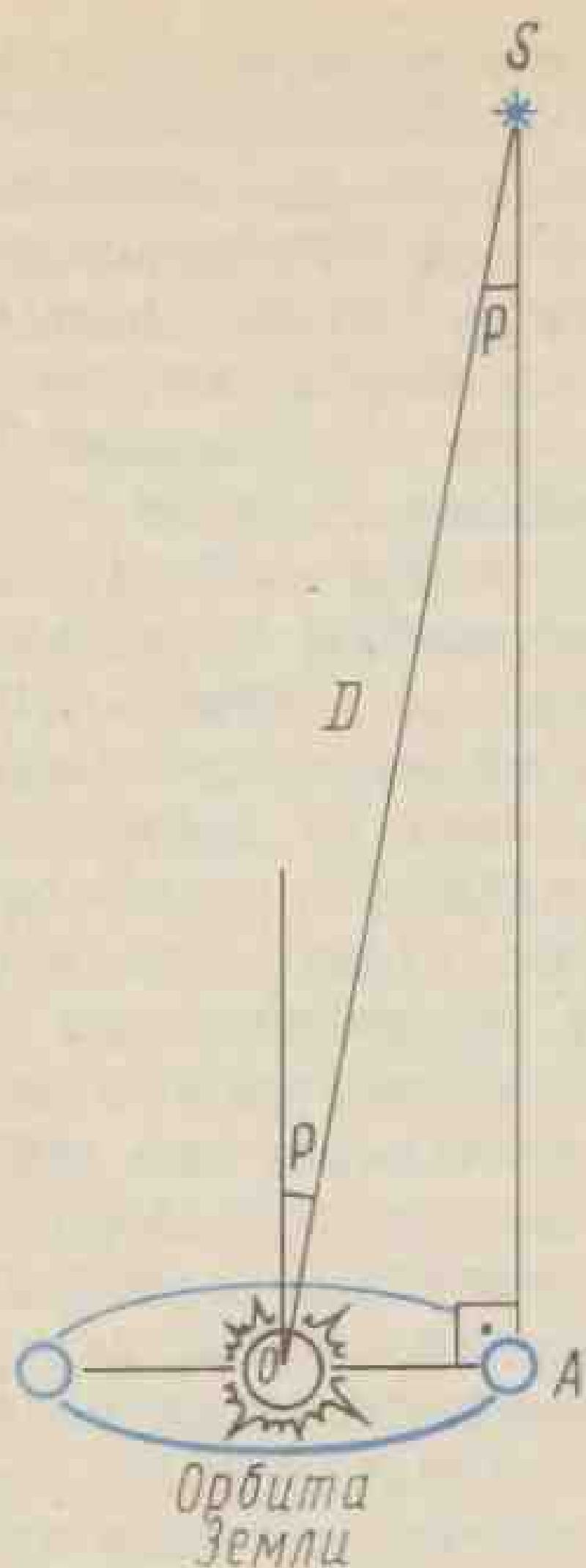


Рис. 22.1. Параллаксы звезд

в течение года. Кажущееся перемещение более близкой звезды на фоне очень далеких звезд происходит по эллипсу с периодом в 1 год и отражает движение наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца. Большая полуось эллипса называется *годовым параллаксом* (или просто *параллаксом*) звезды. Его обычно измеряют в долях секунды дуги. Даже у самых близких к Солнцу звезд параллакс ничтожно мал, меньше $1''$.

Рассчитайте, на каком расстоянии надо установить монету диаметром 20 мм, чтобы она была видна под углом $1''$.

Параллаксом p называется угол (рис. 22.1), под которым со звезды была бы видна большая полуось

земной орбиты, развернутая перпендикулярно направлению на звезду.

Если значение параллакса известно, то из $\triangle AOS$ легко получить расстояние D , выраженное в тех же единицах, что и длина AO полуоси орбиты:

$$D = \frac{AO}{\sin p}. \quad (22.1)$$

В астрономических единицах:

$$D_{\text{а.е.}} = 1 / \sin p. \quad (22.2)$$

Параллакс звезды всегда ничтожно мал (меньше $1''$), поэтому можно использовать формулу для малых углов: $\sin p = p \sin 1''$, где p выражено в секундах дуги. Поскольку $\sin 1'' = \frac{1}{206\,265}$, формулу (22.2) можно записать иначе:

$$D_{\text{а.е.}} = \frac{206\,265''}{p}. \quad (22.2a)$$

Зная соотношение между световым годом и астрономической единицей ($1 \text{ св. год} = 63\,240 \text{ а.е.}$), легко выразить полученное расстояние в световых годах:

$$D_{\text{св. г.}} = \frac{3.26}{p''}. \quad (22.3)$$

Измерения параллаксов звезд привели к появлению еще одной единицы расстояний, очень часто используемой в астрономии, — **парсек (пк)**. 1 **пк** — это расстояние, которому соответствует параллакс в $1''$. Чем меньше параллакс, тем дальше находится звезда. Если, например, $p = 0.1''$, то расстояние до звезды в десять раз больше, чем при $p = 1''$, т. е. оно равно 10 **пк**. Таким образом, расстояние, выраженное в парсеках, равно обратному значению параллакса, выра-

Вклейка I



1. Изображение Юпитера, полученное с близкого расстояния АМС «Вояджер-2». На фоне диска планеты видны два его спутника. Один из них проектируется на Большое красное пятно.



2. Сатурн и его кольца (АМС «Вояджер-2»).

Вклейка II

Галилеевы спутники Юпитера (АМС «Вояджер-1»):



а) Ио.



б) Европа;



в) Ганимед.



г) Каллисто.

Вклейка III



Уран: а) изображение планеты, переданное АМС «Вояджер-2»;
б) то же изображение после обработки, усиливающей цветовые контрасты;

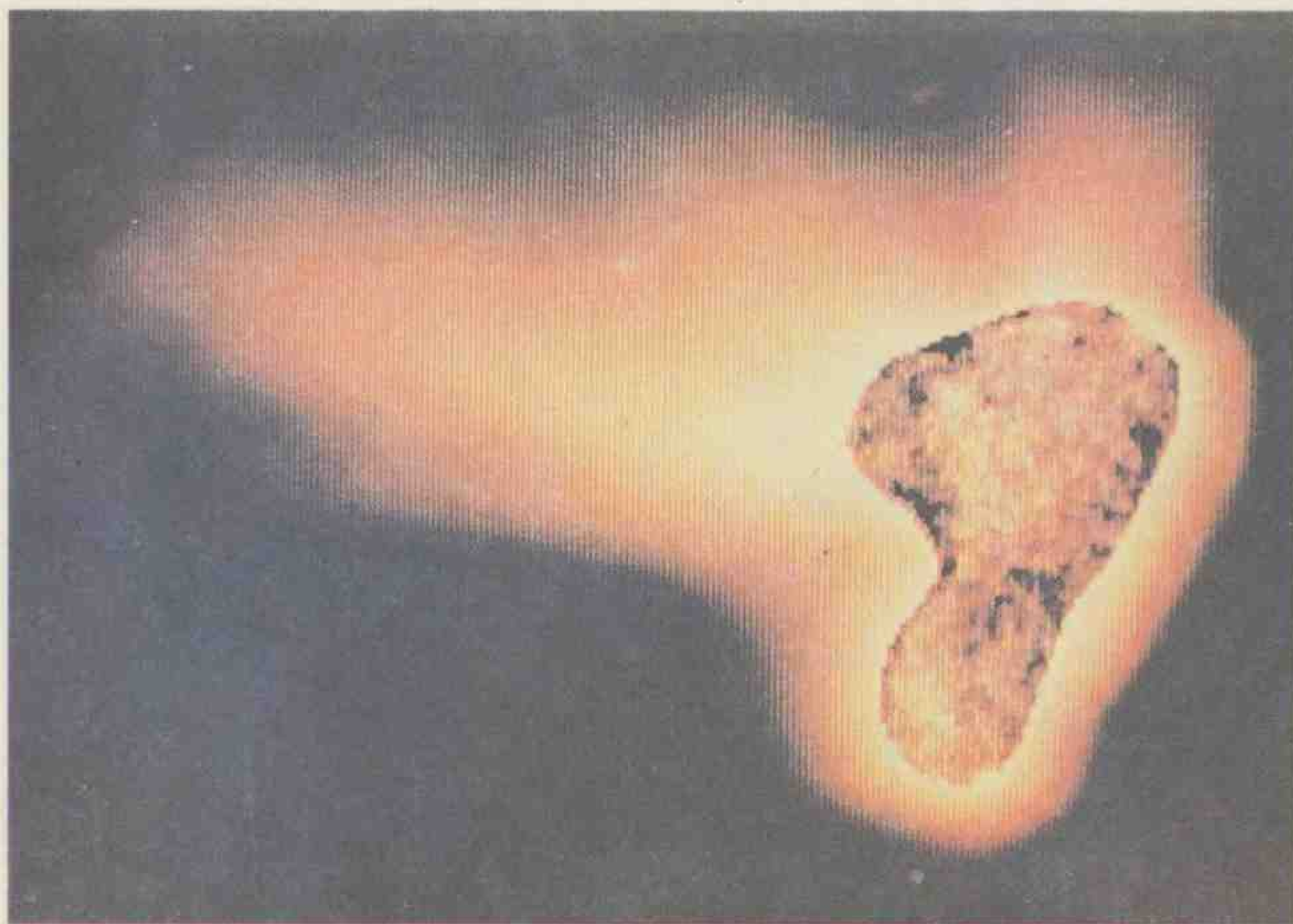


в) Нептун («Вояджер-2»). Цветовые контрасты усилены. Красный цвет связан с рассеянием света в слое дымки, окутывающей планету.

Вклейка IV



а) Поверхность Фобоса (слева — общий вид спутника) (АМС «Фобос-1»);



б) ядро кометы Галлея (АМС «Вега-2»).

Вклейка V

Газовые туманности:



а) туманность Ориона;



б) туманность вокруг звезды η Киля.

Вклейка VI



Область Млечного Пути в направлении на центральную часть Галактики.

Вклейка VII



а) туманность Андромеды;



б) спиральная галактика «Сомbrero» в созвездии Девы, наблюдаемая с «ребра».

Вклейка VIII



а) гигантская эллиптическая галактика в созвездии Девы;



б) радиогалактика «Центавр А».

женному в секундах дуги:

$$D_{\text{пк}} = \frac{1}{p''}. \quad (22.4)$$

Сравнение этого выражения с (22.2а) и (22.3) показывает, что $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3,26 \text{ св. год.}$

Расстояние до ближайших к Солнцу звезд измеряется несколькими парсеками (см. приложение III). Самыми близкими к Солнцу звездами считаются Проксима Центавра и находящаяся рядом с ней α Центавра. Расстояние до них — 1,3 пк.

Для выражения очень больших расстояний обычно используют килопарсеки ($1 \text{ кпк} = 10^3 \text{ пк}$) и мегапарсеки ($1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$).

Современные телескопы позволяют наблюдать наиболее яркие звезды даже в других галактиках. Но определить расстояния до далеких звезд методом тригонометрического параллакса нельзя — слишком малы их параллактические смещения. Параллаксы можно измерить лишь у звезд, находящихся на расстояниях, не превышающих несколько сотен парсеков. Для более далеких звезд используются другие, косвенные методы определения расстояний. Об одном из них вы узнаете в разделе 22.4.

22.3. Температуры звезд. Солнце и другие звезды излучают свет потому, что их наружные слои сильно нагреты и имеют температуру, равную многим тысячам градусов по шкале Кельвина (*кельвинов*). Звезда излучает свет так же, как и любое нагретое тело, например нить накаливания в электрической лампе. Из физики известно, что излучение — неотъемлемое свойство всех нагретых тел, независимо от их природы.

Каждая звезда излучает свет во

всех спектральных диапазонах — от ультрафиолетового до инфракрасного. При этом, чем выше ее температура, тем большая часть световой энергии приходится на синюю, коротковолновую часть спектра (см. § 14.1). Поэтому горячие звезды всегда выглядят голубоватыми. Наименее холодные звезды с $T \approx 3\text{—}4$ тыс. К, наоборот, излучают преимущественно в красной и инфракрасной области спектра и кажутся на глаз красноватыми. Это хорошо заметно, например, у таких звезд, как Бетельгейзе (α Ориона), Антарес (α Скорпиона). Их температура менее 4000 К.

Глаз может различать цветовые оттенки лишь у наиболее ярких звезд, однако слабые звезды также имеют свой цвет. Астрономические наблюдения позволяют с большой точностью определять цвет звезд. Для этого с помощью специальных светофильтров сравнивают энергию излучения (звездные величины) звезды в различных областях спектра. По цвету, как и по распределению энергии в непрерывном спектре, можно определить температуру звезды. Более голубой цвет означает более высокую температуру. Наиболее точно температуру звезд определяют путем анализа их линейчатых спектров (по спектральным линиям) (см. § 15). Оказалось, что почти у всех известных звезд она составляет от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч кельвинов и лишь в очень редких случаях превышает 100 000 К. Температура Солнца близка к 6000 К.

Определенные таким путем температуры звезд относятся лишь к их внешним слоям, откуда излучение доходит до нас непосредственно. В недрах звезд температура значительно выше и составляет мил-

лионы кельвинов. Но непосредственно измерить ее нельзя. Температуры внутри звезд оцениваются путем теоретических расчетов.

22.4. Светимость звезд. Звезды сильно различаются по своей кажущейся яркости. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, они находятся на самых различных расстояниях от нас. Во-вторых, одни звезды являются более мощными, другие — менее мощными источниками энергии.

Мощность излучения звезды называется *светимостью*. Иными словами, светимость — это полная энергия, излучаемая звездой за 1 с.

Светимость звезд можно выразить в ваттах, но чаще всего ее выражают в единицах светимости Солнца.

Рассчитайте светимость Солнца, если известно, что за пределами земной атмосферы на поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам, ежесекундно от Солнца приходит энергия 1360 Дж. Расстояние до Солнца принять в $1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$.

Светимость Солнца измеряется по приходящей от него энергии и составляет $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Звездная величина Солнца $m_{\odot} = -26,6^m$. Зная $m_{\odot}$, легко найти светимость любой звезды, если известны ее звездная величина m и расстояние $D_{\text{а.е.}}$ (в астрономических единицах).

Учтем, что освещенность, создаваемая звездой, обратно пропорциональна квадрату расстояния до нее (т. е. если бы звезда находилась в 10 раз дальше, она выглядела бы в 100 раз слабее).

Расстояние до Солнца равно 1 а.е. Отнесем мысленно Солнце на то же расстояние $D_{\text{а.е.}}$, на каком

находится звезда. Тогда его наблюдаемое излучение станет слабее в $D_{\text{а.е.}}^2$ раз, звездная величина возрастет на $2,5 \lg D_{\text{а.е.}}^2 = 5 \lg D_{\text{а.е.}}$ (см. формулу 2.4) и станет равной

$$m' = m_{\odot} + 5 \lg D_{\text{а.е.}} \quad (22.5)$$

Разность звездных величин звезды m и Солнца $m'_{\odot}$ на том же расстоянии позволяет узнать, во сколько раз звезда излучает больше (или меньше) световой энергии, чем Солнце, т. е. как относятся светимости звезды L и Солнца $L_{\odot}$:

$$m'_{\odot} - m = 2,5 \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right), \quad (22.6.)$$

откуда

$$\begin{aligned} \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) &= 0,4 (m'_{\odot} - m) = \\ &= 0,4 (m_{\odot} - m + 5 \lg D_{\text{а.е.}}). \end{aligned} \quad (22.7)$$

Полученная формула может быть использована для определения расстояния до звезды, если известна ее светимость и звездная величина. Для этого формулу удобно переписать в таком виде:

$$\begin{aligned} \lg D_{\text{а.е.}} &= 0,5 \lg \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) + \\ &+ 0,2 (m - m_{\odot}). \end{aligned} \quad (22.8)$$

Измерения показали, что звезды очень сильно различаются по светимости — от $10^{-4} L_{\odot}$ вплоть до (в редких случаях) $10^6 L_{\odot}$! Большинство звезд, которые хорошо видны на небе невооруженным глазом, имеют более высокую светимость, чем Солнце (см. приложение III).

Среди звезд очень высокой светимости выделяют *гиганты* и *сверхгиганты*. Большинство гигантов имеет невысокую температуру (3—4 тыс. К), и поэтому их называют *красными гигантами*. Светимость красных гигантов — около $100 L_{\odot}$. Примером таких звезд могут служить Альдебаран (α Тельца), Арктур

(α Волопаса). Сверхгиганты — это самые мощные источники света среди всех звезд (кроме взрывающихся). Их светимость в десятки тысяч раз выше солнечной. Они могут иметь различный цвет. Из ярких звезд, наблюдаемых на небе, примером голубого сверхгиганта может служить Ригель (β Ориона), а красного сверхгиганта — Антарес (α Скорпиона) или Бетельгейзе (α Ориона).

Тщательное сравнение спектров звезд высокой и низкой светимости показало, что даже при одной и той же температуре звезд их спектры немного различаются: некоторые спектральные линии усилены, а некоторые ослаблены в зависимости от светимости. Поэтому по спектральным линиям также можно оценить светимость звезды. Тогда, зная звездную величину звезды, по формуле (22.8) легко найти $D_{\text{в.е.}}$. Этот метод определения расстояний до звезд называют методом *спектрального параллакса*.

22.5. Размеры звезд. Из-за очень большого расстояния до звезд их диски нельзя разглядеть ни в какие телескопы. Угловые размеры небольшого числа звезд удалось измерить лишь при помощи специальных оптических приборов — *звездных интерферометров*. В большинстве случаев диаметры звезд оценивают лишь теоретически по известной температуре и светимости.

Из физики известно, что мощность излучения горячего тела (его светимость) L пропорциональна произведению абсолютной температуры T в четвертой степени на площадь поверхности S . Этот закон носит название *закона Стефана — Больцмана*. Для шара $S = 4\pi R^2$, где R — радиус. Поэтому выражение для светимости звезды можно записать сле-

дующим образом:

$$L = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2. \quad (22.9)$$

Здесь σ — коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной Стефана — Больцмана*. Он определен опытным путем и равен $5,7 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). Если температуру Солнца обозначить $T_{\odot}$, а радиус — $R_{\odot}$, то для светимости Солнца можно записать аналогичное выражение:

$$L_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 \cdot 4\pi R_{\odot}^2. \quad (22.10)$$

Из этих двух выражений следует:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2. \quad (22.11)$$

Отсюда, зная L и T звезды, легко найти ее радиус, выраженный в радиусах Солнца.

Радиус Солнца $R_{\odot}$ определяется непосредственно из наблюдений — по его видимому угловому радиусу α , составляющему 16'. Принимая расстояние до Солнца $A = 1,5 \cdot 10^{11}$ м, находим

$$R_{\odot} = A \operatorname{tg} \alpha \approx 7 \cdot 10^8 \text{ м}, \quad (22.12)$$

или около 700 000 км.

Таким образом, Солнце представляет собой шар диаметром около полутора миллиона километров. Для звезд это довольно скромный размер. Среди звезд-гигантов и сверхгигантов встречаются такие, диаметр которых в тысячи раз больше. У некоторых он столь велик, что, будь эти звезды на месте Солнца, внутри их оказалась бы орбита Юпитера! Рядом с такими звездами Солнце выглядело бы меньше, чем Земля по сравнению с Солнцем (рис. 22.2).

Но большинство наблюдаемых звезд по размерам сопоставимо с Солнцем. Немало и таких, размеры которых во много раз меньше солнечных. Например, звезды, называе-

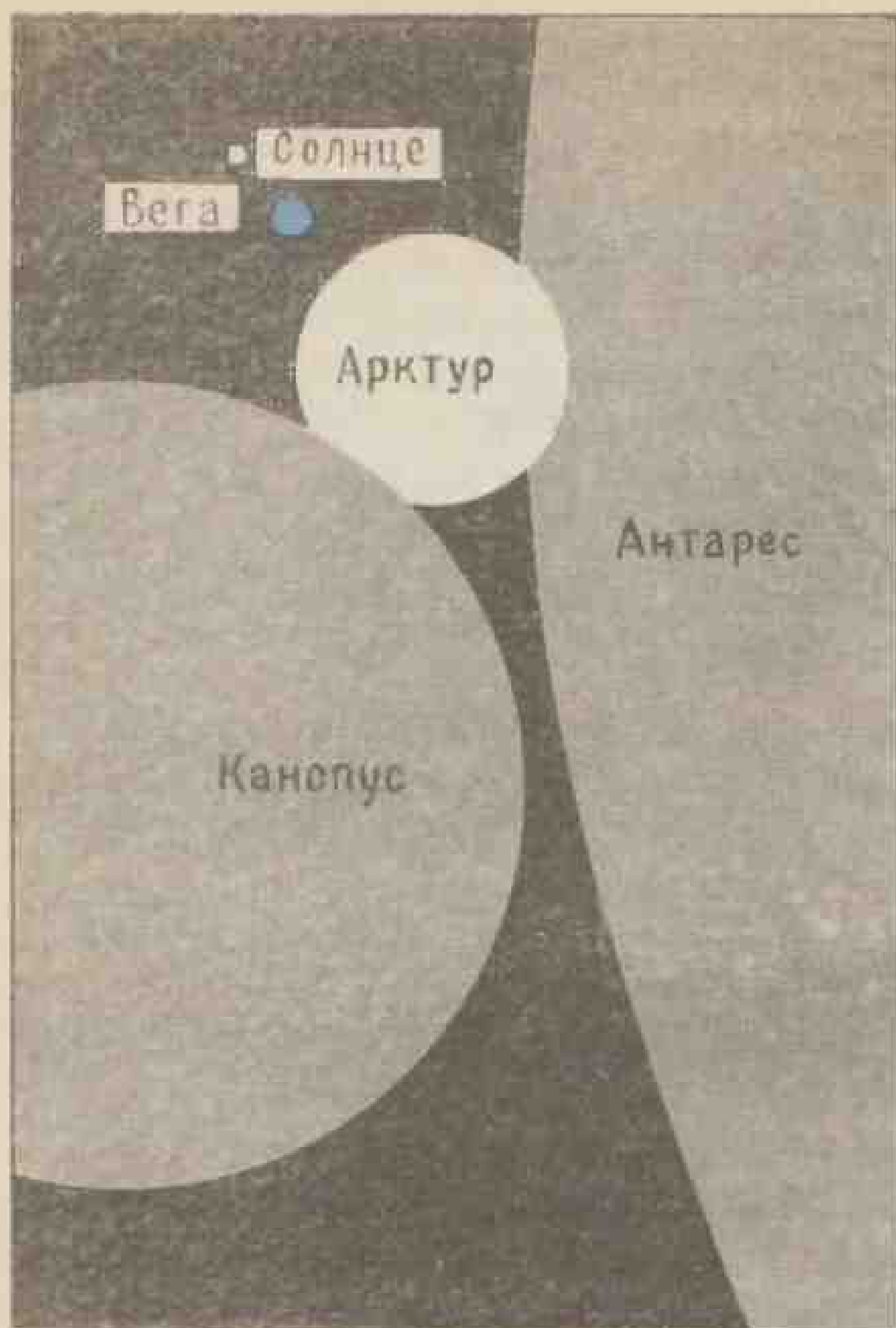


Рис. 22.2. Сравнительные размеры звезд

мые белыми карликами, имеют диаметр, типичный для планет Солнечной системы, — всего несколько тысяч километров.

22.6. Типовая задача. Определение радиуса звезды.

Условие. Найти радиус звезды, излучающей в 100 раз больше энергии, чем Солнце, если ее температура $T = 12000$ К.

Решение. По условию задачи $L = 100L_{\odot}$, а $T = 2T_{\odot}$ (так как $T_{\odot} \approx 6000$ К). Из формулы (22.11) получаем, что

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}} : \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4}.$$

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \frac{100^{1/2}}{2^2} \approx 2,5;$$

$$R = 2,5R_{\odot} = 1\,750\,000 \text{ км.}$$

22.7. Массы и плотность звезд. Наиболее важной характеристикой каждой звезды является ее масса. В той или иной степени от массы зависят все остальные свойства звезд. Измерение звездных масс представляет сложную задачу. Непосредственно массу можно оценить только по гравитационному воздействию звезды на окружающие тела. Массу Солнца, например, определяют по известным периодам обращения планет (см. § 15). Она примерно равна $2 \cdot 10^{30}$ кг. У других звезд планеты не видны, и подобным образом оценить их массу нельзя. Но во многих случаях звезды образуют пары, и тогда для оценки массы можно воспользоваться третьим законом Кеплера (§ 15.1), зная из наблюдений большие полуоси их орбит и скорости движения.

Для двойных звезд измерения масс показали, что почти во всех случаях они заключены в пределах от 0,1 до 10 масс Солнца ($M_{\odot}$). Более массивные звезды, имеющие массу 10 — $50M_{\odot}$, в природе крайне редки. Звезды массой меньше $0,1M_{\odot}$ из-за низкой температуры и малого размера почти не излучают света. Поэтому еще неясно, как часто они встречаются в природе.

Самые малые по массе звезды значительно массивнее любой планеты Солнечной системы. Именно большой массой звезд и определяется их способность разогреваться и излучать свет. Даже у самой большой планеты Солнечной системы — Юпитера — масса составляет около $\frac{1}{1000}M_{\odot}$. Если бы можно было в сотни раз увеличить массу этой планеты, Юпитер превратился бы в звезду.

Независимые измерения масс и светимостей звезд показали, что для

большинства из них эти величины связаны друг с другом: светимость приблизительно пропорциональна четвертой степени массы. Иными словами, выполняется примерное равенство:

$$\frac{L}{L_{\odot}} \approx \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4. \quad (22.13)$$

Это означает, что, если звезда имеет массу, вдвое большую, чем Солнце, она излучает примерно в 16 раз больше света.

Используя соотношение между массой и светимостью, можно по известной светимости примерно оценить массу звезды. Для одиночных звезд этот косвенный метод определения массы является практически единственным.

Измерения показали, что звезды не так сильно отличаются друг от друга по массам, как по размерам или светимостям. По этой причине звезды очень большого размера, имея примерно такую же массу, как и остальные, обладают очень низкой средней плотностью вещества. У таких звезд, как Солнце, средняя плотность близка к плотности воды. У звезд-гигантов и сверхгигантов из-за их больших размеров она ничтожно мала — часто значительно ниже, чем плотность воздуха на уровне моря. Но и при такой плотности звезда представляет собой непрозрачный газовый шар.

Из сказанного ясно, что **самой высокой средней плотностью должны обладать звезды малых размеров.** О них будет рассказано в § 24.

22.8. Положение звезд на диаграмме температура — светимость.

Температуры и светимости звезд заключены в очень широких пределах. Как горячие, так и сравнительно холодные звезды могут иметь и очень высокую, и очень низкую

светимость. Но оказалось, что эти параметры не являются независимыми. В этом можно убедиться, если нанести положение звезд на *диаграмму температура — светимость* (рис. 22.3). При построении диаграммы обычно используют логарифмический масштаб шкал. Горизонтальную ось шкалы температур принято направлять не как обычно, слева направо, а справа налево, так что температура влево растет. Это — дань традиции, чтобы график выглядел таким, каким его в начале столетия получили голландский астроном Герцшпрунг и американский астрофизик Рессел. Правда, не имея возможности получить оценки температур для большого числа звезд, они расположили их по спектрам, но спектр, как мы знаем, зависит от температуры звезды. Диаграмму температура — светимость для звезд часто называют *диаграммой Герцшпрунга — Рессела*.

Около 90% всех звезд располагаются на диаграмме вдоль длинной полосы, называемой *главной последовательностью*. Ниже ее находятся звезды очень низкой светимости — белые карлики. Правее главной последовательности в верхней части диаграммы имеются последовательности *звезд-гигантов* и *сверхгигантов*.

Диаграмма температура — светимость имеет глубокий смысл. Выяснилось, что *главная последовательность* — это последовательность звезд различных масс. Самые массивные находятся в ее верхней части, менее массивные — внизу, в области низких температур. Положение звезд на диаграмме зависит не только от их массы, но и от возраста. Большую часть своей жизни любая звезда находится на главной последовательности, в той ее об-

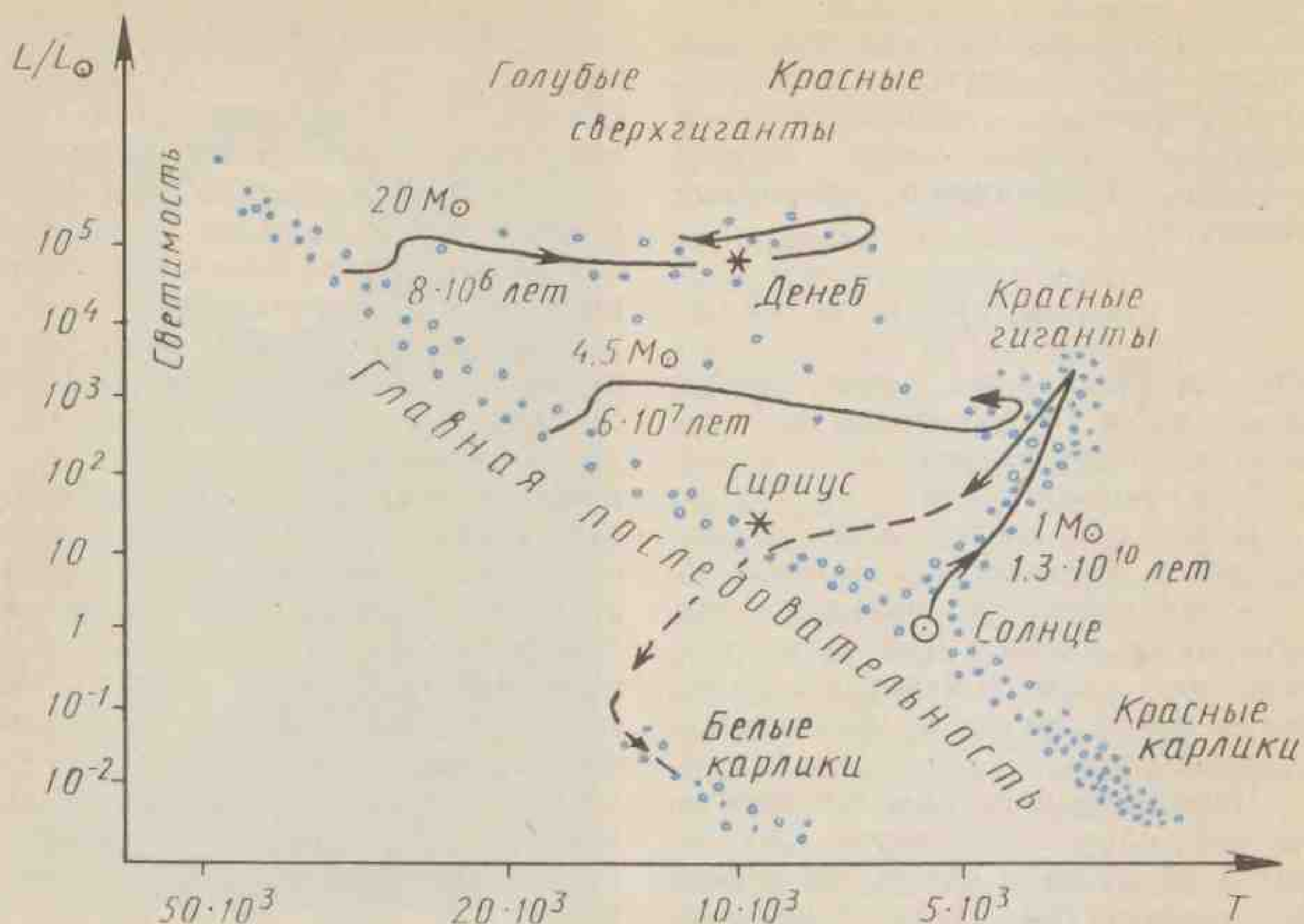


Рис. 22.3. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела. Линии показывают эволюционные перемещения на диаграмме звезд различных масс. Цифры дают представление о времени пребывания звезды данной массы на Главной последовательности, после которого звезда начинает быстро «стареть».

ласти, которая соответствует массе звезды. Постепенно старея, звезда перемещается в область гигантов, а очень массивные звезды — в область сверхгигантов. Для иллюстрации на диаграмме (рис. 22.3) линиями показаны теоретически рассчитанные эволюционные пути для звезды типа Солнца и более массивных звезд с массой 4,5 и $20 M_{\odot}$.

Приведенные цифры дают представление, через сколько лет после рождения звезда покидает главную последовательность и начинает свое перемещение вдоль линии, показан-

ной на диаграмме. **Чем массивнее звезда, тем короче ее жизненный путь.**

Таким образом, положение звезды на диаграмме Герцшпрунга — Рессела характеризует ее массу и возраст.

Подробнее эволюция звезд будет рассмотрена в § 27.

22.9. Вопросы

1. Что представляют собой звезды как физические тела?
2. Как оценивают расстояния до звезд?
3. Перечислите единицы расстояний, используемые в астрономии.
4. Как на диаграмме Герцшпрунга — Рессела располагаются звезды различного размера?

22.10. Упражнения

1. Если принять масштаб 1 см — 1 000 000 км, то каким окажется расстояние до ближайшей к Солнцу звезды?

2. Пользуясь законом Вина (см. § 14.1), определите температуру звезды, максимум излучения которой приходится на область спектра около 0,1 мкм.

3. Оцените радиус Солнца по его температуре (5800 К) и светимости и сравните с оценкой радиуса, полученной по его угловому размеру и расстоянию.

4. Чему равен диаметр звезды, если ее температура 10 000 К, а светимость $6 \cdot 10^3 L_{\odot}$?

5. Как будут выглядеть линии на диаграмме Герцшпрунга — Рессела, вдоль которых располагают звезды одинакового радиуса?

6. Какую светимость будет иметь звезда радиусом, равным радиусу орбиты Сатурна, и температурой 3000 К?

7*. В астрономии светимость звезд часто характеризуют так называемой *абсолютной величиной* M . Она равна видимой звездной величине, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10 пк. Чему равна M у звезд со светимостью: а) $1 L_{\odot}$; б) $100 L_{\odot}$; в) $0,1 L_{\odot}$? Видимую звездную величину Солнца примите равной $m_{\odot} = -27^m$.

23. ФИЗИКА ЗВЕЗД

23.1. Физическое состояние и химический состав звездного вещества. Звезды состоят из горячего газа, содержащего огромное число заряженных частиц — ионизованных атомов и «оторванных» от них свободных электронов. Об этом прежде всего говорит высокая температура

звезд, при которой существование твердого или жидкого состояния невозможно. Спектр звезд также свидетельствует об их газовом составе — ведь спектральные линии могут возникать только в газовой среде.

До открытия в середине прошлого века спектрального анализа определение химического состава небесных тел казалось принципиально невозможным. Получение спектров звезд и их сравнение со спектрами лабораторных газовых источников сразу же позволили сделать вывод о том, что звезды состоят из известных на Земле химических элементов. В Солнце и звездах были найдены практически все элементы периодической системы элементов Менделеева, кроме неустойчивых изотопов и самых тяжелых атомов. **У большинства звезд около 98% массы приходится на водород и гелий** — самые легкие элементы, причем по массе водорода примерно в 2,5 раза больше, чем гелия. **На долю всех остальных более тяжелых элементов приходится менее 2% массы.**

Хотя звезды состоят из знакомых нам химических элементов, звездный газ обладает двумя важными особенностями. Во-первых, если в обычных, «земных» условиях газ состоит из молекул, то в звездах из-за высокой температуры молекулы распадаются (диссоциируют) на отдельные атомы, так что звездный газ — атомарный. Лишь во внешних слоях наиболее холодных звезд, где температура не превышает 4000 К, имеются наиболее устойчивые радикалы или молекулы, например CN, CH, OH, TiO. Эти молекулы дают очень много широких линий («полос») в спектрах наиболее холодных звезд. Во-вторых, основная масса звездного газа ионизована. Это также вызвано высокой температурой газа.

Несмотря на эти особенности, вещество большинства звезд обладает свойствами идеального газа. Даже в недрах звезд, где газ во много раз плотнее любого вещества, встречающегося на Земле, он подчиняется тем же газовым законам (Бойля — Мариотта, Гей-Люссака, Шарля), что и разреженные газы. На первый взгляд кажется странным, как газ может быть таким плотным. Вспомним, чем газ отличается от твердых тел или жидкостей. Частицы газа не связаны друг с другом, среднее расстояние между ними значительно больше их размеров. Для звездного вещества это условие выполняется даже при очень высокой плотности, потому что газ ионизован и состоит из частиц значительно меньших, чем обычные молекулы, — электронов и ядер атомов. По размеру они во много тысяч раз меньше, чем нейтральные атомы.

23.2. Равновесие звезд. Газ в недрах звезд находится под большим давлением. Нетрудно оценить его примерное значение.

Вспомним, что из уравнения состояния идеального газа и опре-

деления температуры следует простое соотношение между газовым давлением p , концентрацией частиц n и температурой T :

$$p = nkT, \quad (23.1)$$

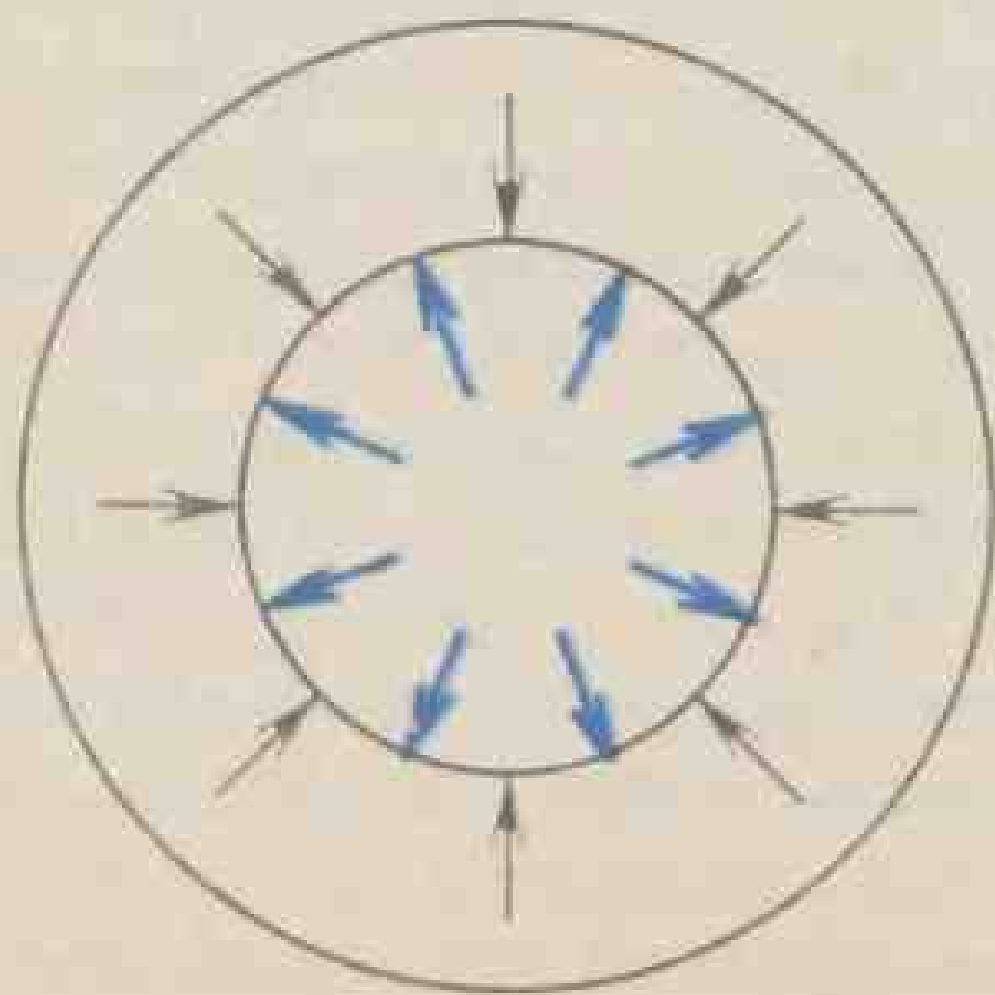
где k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Среднее значение концентрации частиц в звезде массой $M_{\text{зв}}$ и радиусом $R_{\text{зв}}$ при средней массе частиц $\bar{m}$ равно

$$n = \frac{M_{\text{зв}}/\bar{m}}{4/3\pi R_{\text{зв}}^3}. \quad (23.2)$$

Здесь числитель представляет полное число частиц, а знаменатель — объем звезды.

Звезды, состоящие в основном из ионизованного водорода, содержат примерно одинаковое число протонов массой $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг и электронов. Масса электрона во много раз меньше m_p , поэтому средняя масса частиц в звезде $\bar{m} \approx m_p/2$. Для оценки давления по формуле 23.1 требуется задать T . Расчеты показывают, что температура в звездах растет к центру, причем характерное значение T в средних слоях звезды типа Солнца составляет около $3 \cdot 10^6$ К. Используя «солнечные» значения $M_{\text{зв}} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, $R_{\text{зв}} = 7 \cdot 10^8$ м, получаем из формул 23.1 и 23.2, что давление в средних слоях звезды составляет $7 \cdot 10^{13}$ Н/м², или около $7 \cdot 10^8$ атмосфер! Столь большое давление способно буквально «взорвать» звезду и за несколько дней превратить ее в расширяющееся газовое облако. Но этого не происходит, потому что существует сила, сдерживающая силу давления горячего газа. Это — сила гравитационного (взаимного) притяжения частиц звезды друг к другу (рис. 23.1). Гравитация стремится сжать звезду. Внешние слои звезды, притягиваясь

Рис. 23.1. Схема равновесия внутренних сил в звезде: силы газового давления (синие стрелки) уравновешивают силы гравитационного притяжения (черные стрелки)



к центру, давят своим весом на те, что расположены ближе к центру, и, если бы силы давления газа не препятствовали сжатию, звезда типа нашего Солнца менее чем за час сжалась бы до ничтожных размеров. Так как звезды заметно не меняют своих размеров, можно считать, что их вещество находится в равновесии: газовое давление внутри звезды само устанавливается как раз таким, чтобы удержать звезду от гравитационного сжатия. Это равновесие устойчиво, в противном случае ни звезд, ни Солнца в природе не существовало бы. Любое нарушение равновесия тут же приведет к движению вещества звезды к центру или от центра назад к положению равновесия. Размер звезды, при котором установится равновесие, зависит от мощности источников энергии, поддерживающих тепловое движение частиц газа. Поэтому звезды, в отличие от твердых тел, могут менять свои размеры, а так же и светимость. Если выделится больше энергии, звезда увеличит свой радиус, если меньше — равновесие звезды наступит при меньших размерах.

Исходя из условий равновесия, можно рассчитать плотность, давление и температуру вещества в недрах звезд. Такие расчеты довольно сложны и выполняются при помощи ЭВМ. Оказалось, что температура и плотность газа внутри звезд быстро возрастает вглубь. Так, в центре Солнца температура составляет около 14 млн. кельвинов, а плотность газа примерно в 150 раз больше, чем у воды.

Вещество в недрах звезд отличается от вещества внешних слоев не только количественно, т. е. большими значениями плотности, давления и температуры. Количественные

изменения приводят к качественному различию: вещество вблизи центра звезд в условиях высокого давления и температуры может самопроизвольно выделять ядерную энергию, за счет которой звезда излучает свет и тепло.

23.3. Источники энергии звезд. По существующим оценкам, большинство звезд может светить, не переставая, многие миллиарды лет. Наше Солнце излучает свет уже около $5 \cdot 10^9$ лет. Это в несколько раз больше возраста самых древних ископаемых растений.

Откуда звезды черпают излучаемую ими энергию? Ответ на этот вопрос был получен лишь после открытия ядерных реакций превращения одних химических элементов в другие. Основным источником энергии звезд считается взаимодействие между атомными ядрами. Из физики известно, что заключенная в атомных ядрах энергия может освобождаться в двух случаях: когда ядра тяжелых элементов распадаются на более легкие (этот процесс осуществляется в ядерных реакторах атомных электростанций) или когда происходит слияние (*синтез*) легких ядер в более тяжелые. Поскольку звезды состоят в основном из самых легких элементов — водорода и гелия, для них возможен лишь второй вариант освобождения энергии, заключенной в атомных ядрах.

В недрах звезд происходит взаимодействие между ядрами водорода — протонами.

Протоны, как и другие атомные ядра, имеют положительный электрический заряд и поэтому отталкиваются друг от друга. Чтобы два ядра вступили в тесное взаимодействие между собой, они должны, преодолев электростатические силы отталкивания, сблизиться до рас-

стояния порядка своих размеров (около 10^{-15} м). Уже на расстоянии в 10 раз большем (10^{-14} м) протоны отталкиваются друг от друга с силой, которая, согласно закону Кулона, составляет около 2Н! Лишь большая кинетическая энергия быстрых частиц может помочь им сблизиться. Но, как известно, кинетическая энергия хаотического движения частиц пропорциональна температуре среды. Вот почему ядерные реакции синтеза могут происходить только в горячем газе.

При температуре 10—30 млн. кельвинов, существующей в центральных областях большинства звезд, средняя скорость движения протонов составляет несколько сотен километров в секунду. Наиболее энергичные протоны, сталкиваясь, взаимодействуют между собой довольно сложным образом. В результате этого взаимодействия четыре протона могут образовать одно ядро атома гелия. Такая реакция сопровождается выделением энергии. Это поддерживает высокую температуру в недрах звезды. Получается, что звезды как бы «подогреваются» из центра. Реакцию превращения водорода в гелий можно представить так:



Масса ядра гелия равна $6,63 \times 10^{-27}$ кг, масса одного протона — $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса четырех протонов отличается от массы ядра гелия на $4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — $6,63 \times 10^{-27}$ кг = $5 \cdot 10^{-29}$ кг. Этот избыток массы и уносится квантами излучения и нейтрино. Звезды типа Солнца каждую секунду теряют на излучение массу в миллионы тонн. При этом сотни миллионов тонн водорода ежесекундно превращаются в гелий.

У звезд, температура которых в центре существенно выше, чем у Солнца, может происходить синтез более тяжелых элементов из гелия. Эти реакции также сопровождаются выделением энергии, способной поддерживать излучение звезд. Так, в красных гигантах и сверхгигантах, в недрах которых температура превышает 10^8 К, могут идти реакции слияния ядер гелия, приводящие к образованию ядер углерода и кислорода (из трех и четырех ядер гелия соответственно). Большая часть углерода и кислорода, существующих в природе, возникла в недрах таких звезд.

Итак, в звездах путем слияния атомных ядер возникают новые химические элементы, которых, таким образом, в природе становится все больше и больше. Химические элементы, составляющие нашу Землю и все, что на ней существует, в большинстве своем также сформировались в недрах звезд миллиарды лет назад, когда еще не существовало ни Земли, ни Солнца.

На определенных этапах жизни звезды, например при ее образовании, большую роль может играть еще один источник энергии — сжатие звезды под действием собственной гравитации. При сжатии потенциальная энергия звездного вещества переходит во внутреннюю энергию и температура звезды возрастает.

23.4. Вопросы

1. Что свидетельствует о том, что звезды состоят из горячего газа?
2. Почему термоядерные реакции могут происходить в недрах звезд и не могут в недрах планет?
3. Как известно из физики, если газ не заключен в герметический

сосуд, он быстро расширяется в окружающее пространство. Почему тогда не разлетается газ, образующий звезды?

23.5. Упражнения

1. Масса протона равна $1,7 \times 10^{-27}$ кг. Оцените примерно среднее расстояние между протонами в солнечном веществе (плотность $\rho_{\odot} = 1,4 \text{ г/см}^3$) и в веществе белого карлика (плотность $\rho_{\text{бк}} = 100 \text{ кг/см}^3$). (Считать, что вся масса заключена в протонах.)

2. Чему равно давление газа в центре Солнца ($T = 1,4 \cdot 10^7 \text{ К}$, плотность $\rho = 1,5 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$)?

3. С какой средней скоростью движутся атомы водорода массой $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг в центре Солнца ($T = 1,4 \cdot 10^7 \text{ К}$) и в его атмосфере ($T = 6000 \text{ К}$)?

4. Какую массу теряет Солнце каждую секунду за счет излучения света? Светимость Солнца равна $4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. На сколько процентов уменьшится масса Солнца за 1 млрд. лет? (Воспользоваться формулой: $E = mc^2$.)

5. Почему для ядерной реакции между ядрами атомов гелия требуется более высокая температура, чем для реакции между ядрами атомов водорода? (*Указание.* Ядра He имеют электрический заряд вдвое больше, чем ядра H.)

6. Используя значение светимости Солнца, оцените, на сколько килограммов уменьшается масса водорода в Солнце каждую секунду.

24. НЕОБЫЧНЫЕ ЗВЕЗДЫ

24.1. Белые карлики. Абсолютное большинство известных звезд и все без исключения звезды, которые вид-

ны на небе невооруженным глазом, состоят из газа, который можно считать идеальным. При помощи телескопов удалось открыть звезды, вещество которых так сильно сжато, что приобретает свойства, отличные от свойств идеального газа.

Наблюдается два типа таких звезд очень высокой плотности: *белые карлики* и *нейтронные звезды*. Первыми были открыты белые карлики. Самая близкая звезда такого типа — это Сириус В, звезда-спутник ярчайшей звезды всего неба — Сириуса. Расстояние до него 8,8 св. лет. С такого расстояния Солнце выглядело бы довольно яркой звездой 2-й звездной величины. Однако Сириус В кажется примерно в 500 раз слабее. Анализ спектра показывает, что температура этой звезды довольно высока — около 10 000 К. Поэтому ее низкая светимость говорит о малых размерах: радиус звезды должен быть почти в 50 раз меньше, чем у Солнца.

Пользуясь формулой (22.11), рассчитайте радиус Сириуса В.

Поскольку Сириус и Сириус В — это две близкие друг к другу звезды, обращающиеся вокруг общего центра масс, по их видимому движению можно найти массу каждой звезды (см. § 15.1). Оказалось, что у Сириуса В масса примерно такая же, как у Солнца, несмотря на очень малый размер. Зная диаметр и массу звезды, нетрудно оценить ее среднюю плотность. Она составляет около 10^8 кг/м^3 , или в 100 000 раз больше, чем у воды. На Земле вещество такой плотности получить невозможно.

С помощью одной из фундаментальных физических теорий — *общей теории относительности* — удалось наглядно продемонстриро-

вать реальность существования таких сверхплотных звезд. Согласно этой теории, в мощном гравитационном поле, которое должно существовать на поверхности белого карлика, темп течения времени немного замедляется и как следствие этого длины волн спектральных линий всех элементов слегка возрастают. Это гравитационное изменение длин волн было обнаружено, и оно совпало с ожидаемым.

Сейчас известно несколько тысяч белых карликов. Их исследование представляет большой научный интерес. Газ, из которого состоят эти звезды, не подчиняется изучаемым в школьном курсе физики газовым законам. Например, давление этого газа не пропорционально температуре, как у обычного газа, а почти не зависит от него. Газ, из которого состоят белые карлики, называется *вырожденным*. Поэтому эти звезды часто называют *вырожденными звездами*. По-видимому, внутренних источников энергии в белых карликах нет, и они светятся, медленно остывая, просто за счет запасенного в них тепла. Через десятки миллиардов лет белые карлики превратятся в темные и холодные шары из вырожденного газа.

Даже если белый карлик остынет до абсолютного нуля, давление сверхплотного газа останется большим и гравитационные силы не смогут его сжать до еще меньших размеров.

24.2. Нейтронные звезды. В 60-х годах были найдены звезды, в которых плотность и давление вещества несравнимо больше, чем в белых карликах. Это *нейтронные звезды*. При массе, в 1,5 — 3 раза превышающей массу Солнца, они обладают размерами всего 10—20 км. Плотность вещества при этом приб-

лижается к плотности атомного ядра — в 10^{13} раз больше плотности воды!

При такой фантастической плотности в звезде, за исключением очень тонкого и, по-видимому, твердого внешнего слоя, не сохраняются даже ядра атомов химических элементов. В звездах происходит процесс «нейтронизации» вещества: протоны, взаимодействуя с электронами, превращаются в электронейтральные частицы, нейтроны. В результате «нейтронизации» звезда почти целиком оказывается состоящей уже не из газа, а из нейтронов, близко расположенных друг к другу. Эти звезды так и называются — нейтронные.

Нейтронные звезды были открыты как совершенно необычные космические радиоисточники. Их излучение состоит из отдельных очень коротких импульсов, интервалы между которыми сохраняются одинаковыми и, как правило, не превышают 1—2 с. Это казалось настолько странным и непохожим на излучение других радиоисточников, что английские радиоастрономы, открывшие их, сначала заподозрили искусственный характер сигналов — сигналы иных цивилизаций. Такие пульсирующие радиоисточники получили название *пульсаров*. Впоследствии были найдены пульсары, излучающие импульсы и в других диапазонах спектра. Исследования показали, что пульсарами могут быть только нейтронные звезды. Особенность излучения пульсаров объясняется тем, что, в отличие от обычных звезд, электромагнитные волны идут от них не по всем направлениям, а в пределах узкого конуса, наподобие луча прожектора. Кроме того, пульсары отличаются очень быстрым вращением вокруг

оси. Вместе с пульсаром поворачивается и «луч». Если на его пути попадает Солнечная система, то на Земле за каждый оборот звезды вокруг своей оси мы воспринимаем один импульс. Поэтому нам кажется, что пульсар излучает импульсы, частота следования которых равна частоте его вращения вокруг оси.

Некоторые из нейтронных звезд были найдены не по радио, а по рентгеновскому излучению. В 70-х годах на небе были обнаружены загадочные пульсирующие рентгеновские источники. На их месте на фотографиях удалось найти звезды-сверхгиганты, но они сами по себе не могут дать мощного рентгеновского излучения — для этого их температура слишком низка (вспомните закон Вина!). Отсюда следовало, что невидимые рентгеновские источники должны находиться рядом с этими сверхгигантами. И действительно, используя эффект Доплера, по периодическим смещениям линий в спектрах наблюдаемых звезд удалось показать, что они движутся под действием притяжения компактных объектов — спутников, с которыми связано пульсирующее рентгеновское излучение. Этими объектами оказались нейтронные звезды, образующие двойные системы с нормальными звездами. Находясь вблизи гигантской звезды, нейтронная звезда своим притяжением деформирует ее, вызывая очень сильные приливы. Как следствие происходит «перетекание» части вещества обычной звезды на компактный нейтронный спутник. Вокруг нейтронной звезды при этом возникает быстро вращающийся горячий газовый диск (рис. 24.1). Часть газа, ускоряясь в мощном гравитационном поле нейтронной звезды до скоро-

стей в десятки тысяч километров в секунду, падает на ее поверхность (в области магнитных полюсов). За счет кинетической энергии, приобретенной при падении, газ в окрестности нейтронной звезды нагревается до гигантских температур (сотни миллионов кельвинов и выше). В соответствии с законом Вина (см. § 14) основная часть энергии, излучаемой газом с такой температурой, приходится на рентгеновскую область спектра. Осевое вращение нейтронной звезды приводит к регулярным изменениям наблюдаемой яркости рентгеновского источника с периодом, равным периоду вращения звезды, — от нескольких минут до нескольких секунд. Так благодаря чудовищной силе тяготения вблизи поверхности нейтронных звезд эти звезды становятся рентгеновскими пульсарами. Мощность их излучения такова, что они могут наблюдаться с помощью современных рентгеновских телескопов даже в соседних галактиках.

24.3. Вопросы

1. Чем отличаются белые карлики от обычных звезд? 2. Чем различаются между собой белые карлики и нейтронные звезды? 3. Как выглядел бы с Земли белый карлик, находящийся на месте Солнца? 4. Чем отличаются радиопульсары от рентгеновских пульсаров?

24.4. Упражнения

1. До какого размера пришлось бы сжать земной шар (средняя плотность $\rho = 5 \cdot 10^3$ кг/м³), чтобы плотность вещества в нем стала примерно такой же, как в белых карликах? А в нейтронных звездах?

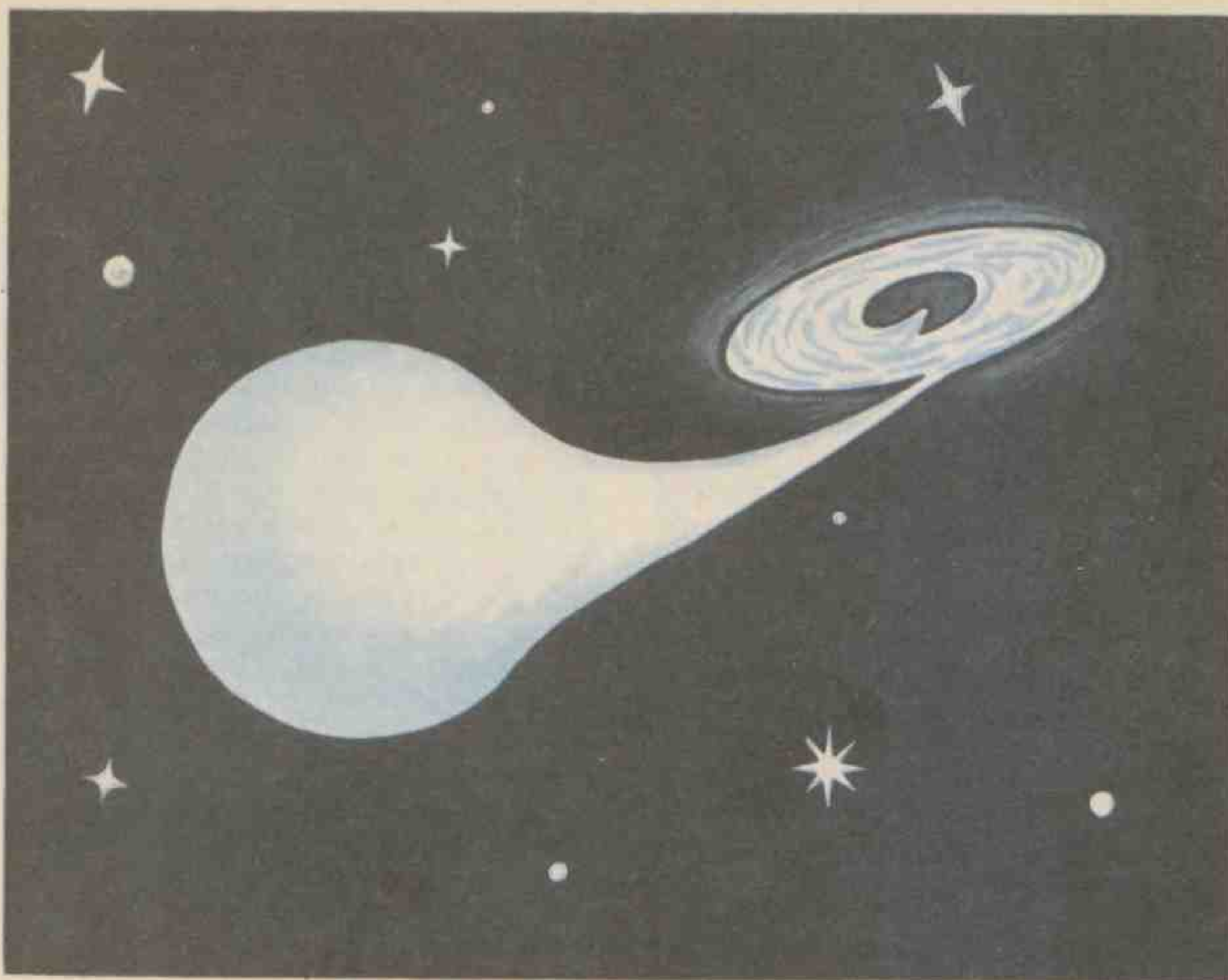


Рис. 24.1. Образование рентгеновского источника в двойной системе. Излучение возникает в горячем газовом диске вокруг маленькой плотной звезды (на рисунке не показана)

2. Какую светимость имеет белый карлик размером в 100 раз меньшим, чем у Солнца, если его температура 30 000 К?

3. Сколько весила бы гиря массой 1 кг на поверхности нейтронной звезды, масса которой равна $2M_{\odot}$, а радиус — 10 км? (Воспользоваться законом всемирного тяготения.) Рассчитать также вторую космическую скорость для такой звезды.

4. С какой скоростью вращается вещество на экваторе нейтронной звезды-пульсара, если период между

его импульсами 0,5 с, а радиус — 10 км?

25. ЗВЕЗДЫ, МЕНЯЮЩИЕ СВЕТИМОСТЬ

25.1. Переменные звезды. Яркость всех звезд кажется не меняющейся со временем. Однако это не во всех случаях так. Еще в глубокой древности арабы заметили, что звезда β Персея от ночи к ночи меняется, становится то ярче, то слабее. Она получила название Эль-Гуль или Алголь, что означает «глаз дьявола». Убедиться в переменности этой звезды может каждый внимательный наблюдатель,

несколько ночей подряд сравнивая ее по яркости с ближайшими звездами (рис. 25.1).

Звездная величина Алголя меняется строго периодически с периодом 2 сут 20 ч 49 мин (рис. 25.2).

В конце XVIII в. английский любитель астрономии Джон Гудрайк первым установил периодический закон, по которому меняется яркость Алголя, и правильно объяснил причину ее изменения, предположив, что звезда периодически затмевается каким-то непрозрачным телом. Алголь — это не одиночная, а двойная звезда, хотя из-за близкого расстояния между звездами она воспринимается как одиночная. Обе звезды обращаются вокруг общего центра масс и периодически затмевают одна другую. Когда затмевается более яркая звезда, яркость Алголя сильно падает (точка 2 на

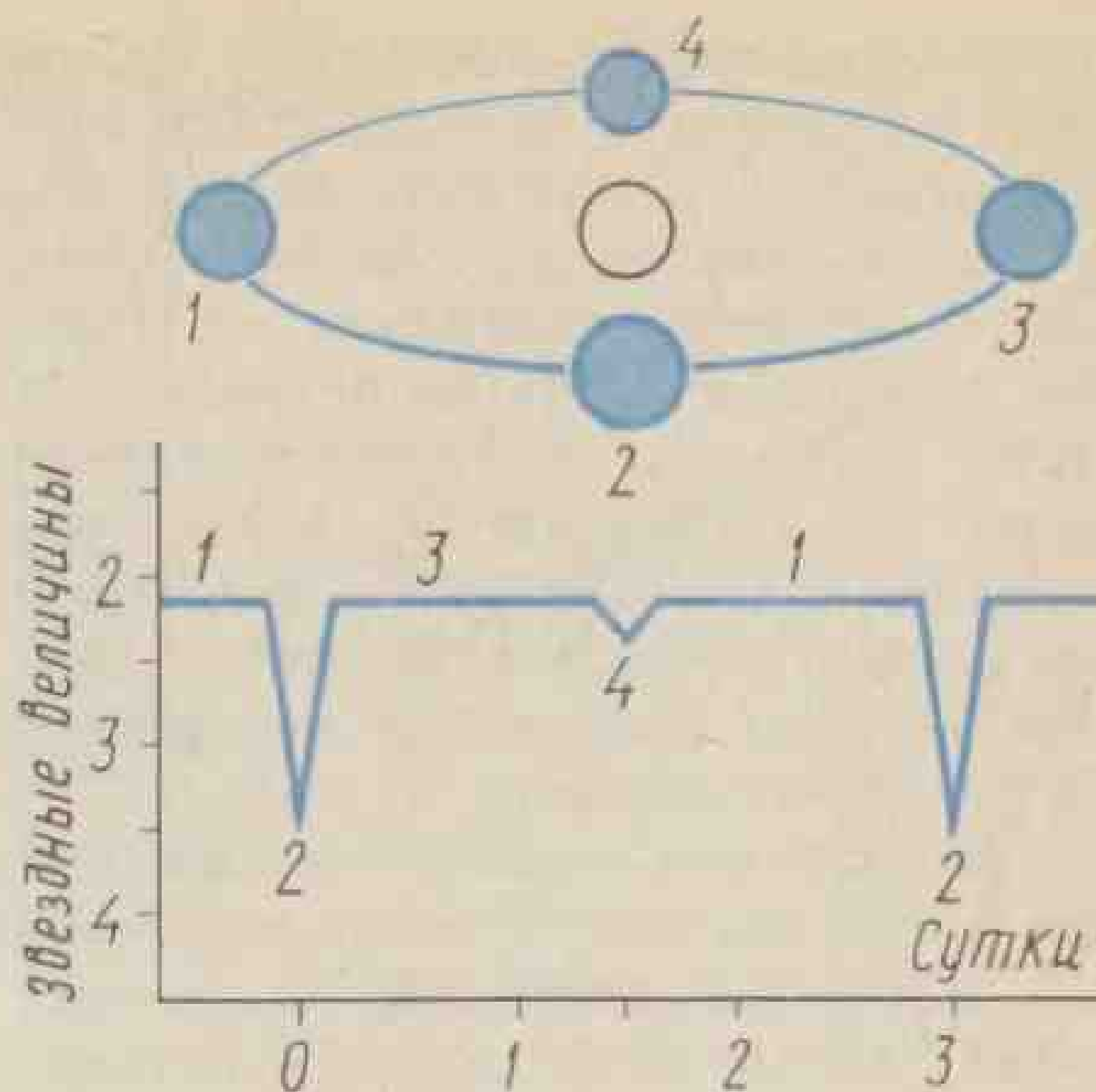
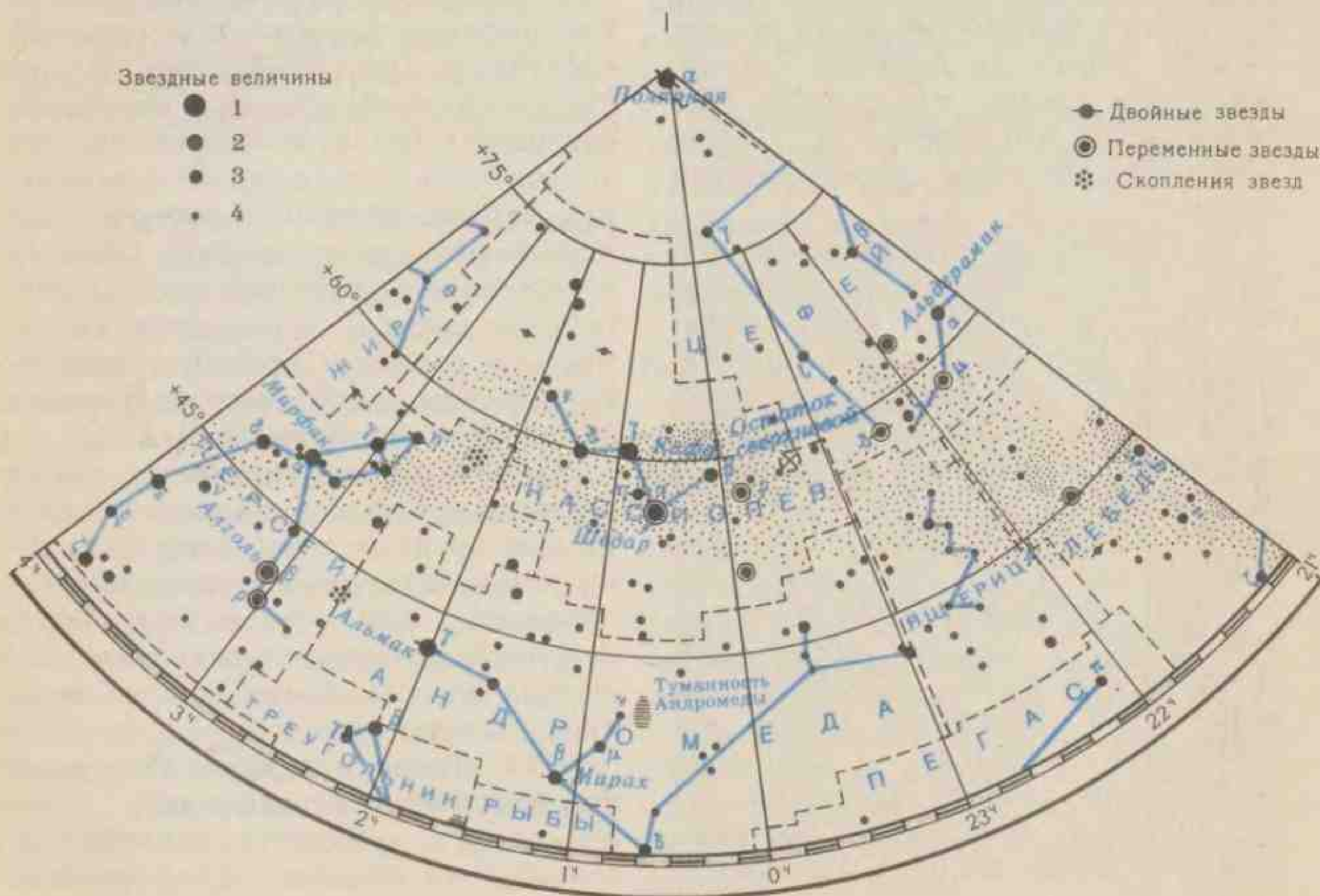


Рис. 25.1. Схема движения и кривая блеска затменно-переменной звезды

Рис. 25.2. Карта участка звездного неба. Отмечены положения некоторых интересных объектов



кривой, рис. 25.2), а когда за яркую звезду «заходит» более слабая, она уменьшается ненамного (точка 4).

Такие звезды, как Алголь, называются *затменно-переменными*. Двойные звезды в природе встречаются очень часто, но затменно-переменными они наблюдаются лишь в тех случаях, когда плоскость, в которой они движутся, составляет небольшой угол с лучом зрения, так что звезды могут затмевать одна другую.

Наблюдения затменно-переменных звезд оказались очень важными для изучения звезд. В настоящее время разработаны сложные математические методы, позволяющие по точным измерениям звездных величин и скоростей движения этих звезд определять их массу, размер, форму, температуру и даже свойства их атмосфер.

У переменных звезд другого типа — *цефеид* — совершенно иная причина изменения видимой яркости. Первая известная цефеида (от которой эти звезды и получили свое название) — это звезда δ Цефея, хорошо различимая невооруженным глазом.

В отличие от затменно-переменных звезд цефеиды — одиночные звезды. Они меняют свою светимость в силу внутренних причин. Если непрерывно измерять их лучевую скорость (по эффекту Доплера), то окажется, что она не остается постоянной, а меняется с тем же периодом, что и яркость звезды. Это говорит о том, что звезды попеременно то расширяются (тогда их атмосферы, в которых образуются спектральные линии, приближаются к нам), то сжимаются (тогда мы наблюдаем «красное» смещение спектральных линий). Цефеиды, таким образом, являются пульсирующими газовыми шарами. Изменение

размеров цефеид сопровождается изменением температуры (когда звезда больше, она холоднее). В результате меняется и их светимость, что и объясняет переменность цефеид. Периоды цефеид составляют от нескольких часов до нескольких недель.

В § 23 уже говорилось, что в звездах достигается устойчивое равновесие между силами упругости горячего газа и гравитации. Но на определенной стадии жизни звезды равновесие может нарушиться, и звезда начнет колебаться под действием этих двух противоположно направленных сил по тем же причинам, по которым происходят колебания выведенного из равновесия маятника. Цефеиды и являются такими звездами.

Изучение цефеид сыграло исключительно важную роль в астрономии. Оказалось, что период колебаний цефеиды зависит от ее средней светимости (рис. 25.3). Чем больше светимость цефеиды, тем медленнее совершает она свои пульсации. Эта зависимость дает возможность, измеряя период колебаний звезды, оценивать расстояние до нее. Сначала по известному периоду находят светимость звезды. Затем, зная светимость и среднюю звездную величину цефеиды, вычисляют расстояние до нее (см. формулу 22.8).

Цефеиды, как правило, имеют очень высокую светимость, и с помощью крупных телескопов их можно наблюдать даже в соседних галактиках. Таким путем были определены расстояния до галактик, удаленных от нас более чем на миллион световых лет.

25.2. Типовая задача. Определение расстояния до цефеиды.

Условие. Оцените (приблизительно) расстояние до звездного

скопления, в котором наблюдается цефеида, если известно, что ее звездная величина меняется от 8^m до $8,8^m$ с периодом $T=3$ сут.

Решение. По графику (см. рис. 25.3) находим, что периоду T соответствует светимость около $10^3 L_{\odot}$ ($\lg L_{\odot}=3$). Средняя звездная величина звезды $m=8,4^m$. Используя полученные значения $\lg L$ и m , из формулы (22.8) получаем:

$$\lg D = 0,5 \cdot 3 + 0,2(8,4 + 26,6) = 8,5.$$

Таким образом, $D = 10^{8,5}$ а.е. $\approx 3 \cdot 10^8$ а.е. или $\approx 1,5$ кпк.

25.3. Вспыхивающие звезды и новые звезды. Не все переменные звезды меняют свое излучение регулярно, с определенным периодом. Среди десятков тысяч известных в настоящее время звезд, меняющих свою светимость, большинство не относится ни к цефеидам, ни к затменно-переменным. Колебания их излучения носят случайный, нерегулярный характер и невелики по амплитуде. Но изредка наблюдаются звезды, которые внезапно увеличивают свою светимость во много раз. Они называются *вспыхивающими звездами*. Особенно сильные вспышки звезд получили название явления *новых*, потому что раньше такую вспышку считали свидетельством рождения действительно новой звезды. **Новые звезды** (или просто — **новые**) за несколько дней увеличивают свою светимость примерно в 10 тыс. раз.

Вспышки новых — это редкие события: на всем небе они наблюдаются в среднем один раз в несколько лет. В большинстве случаев даже во время вспышки новые звезды можно видеть только в телескоп. Но в отдельных случаях они все же бывают заметны невооруженным глазом. Напри-

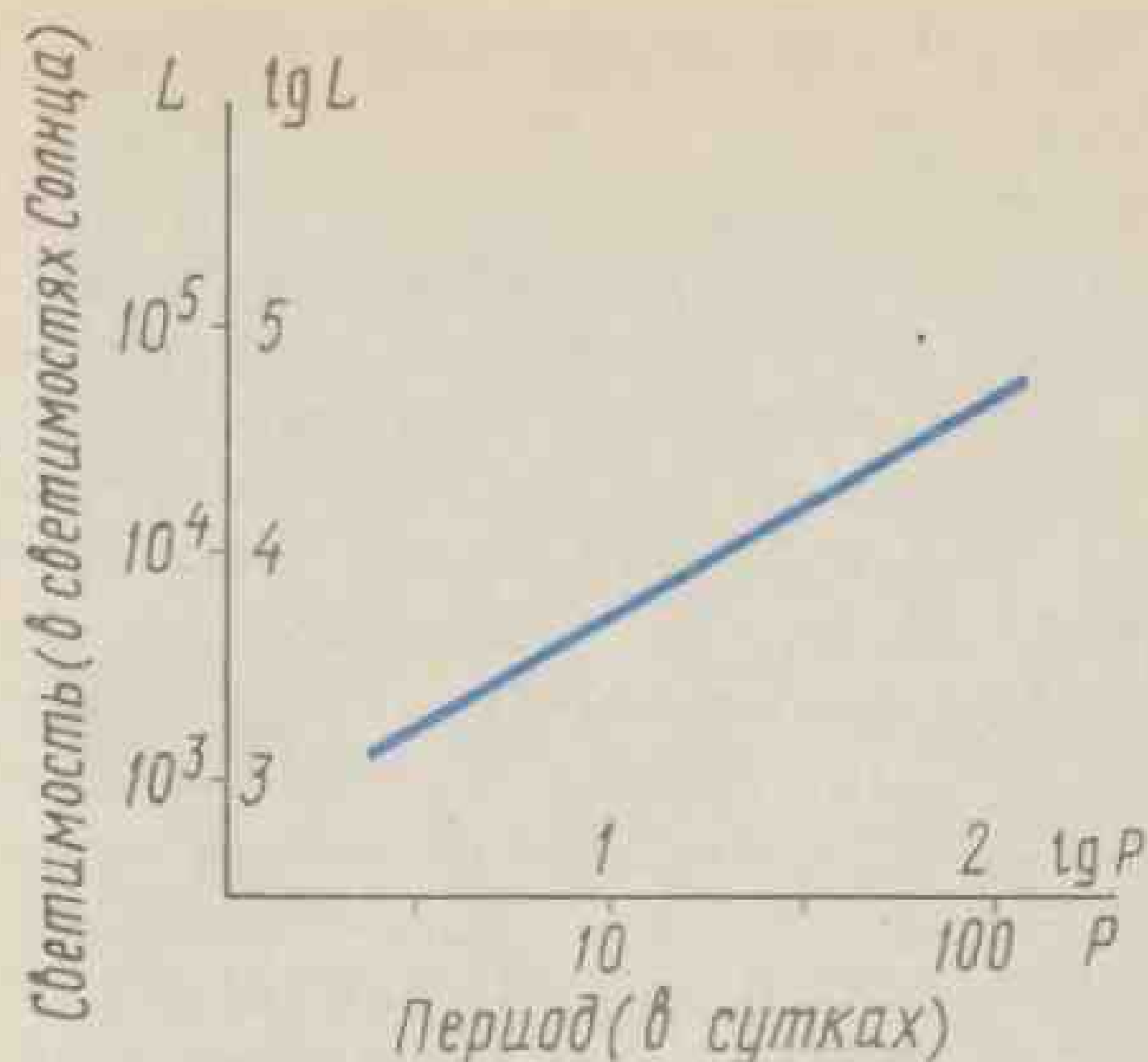


Рис. 25.3. Зависимость период — светимость для цефеид

мер, очень яркая новая вспыхнула в августе 1975 г. в созвездии Лебедя. Несколько дней звезда была в числе ярчайших звезд этого созвездия, затем светимость ее постепенно уменьшилась во много тысяч раз.

Подробное изучение новых звезд до вспышки и после нее привело к выводу о том, что они являются двойными звездами. Считается, что причина вспышки связана со взаимодействием двух очень близких друг к другу звезд, одна из которых — большая, с невысокой плотностью, другая — плотная звезда из вырожденного газа (белый карлик). Вещество гигантской звезды под действием притяжения белого карлика перетекает на него. Падая на поверхность плотной звезды, газ накапливается на ней, и это приводит к нагреву вырожденного газа звезды до такой температуры, при которой на белом карлике происходит сильный термоядерный взрыв. При взрыве часть вещества навсегда покидает звезду. Этот процесс и наблюдается как вспышка новой.

25.4. Сверхновые звезды. Очень редко наблюдаются взрывы звезд, сопровождающиеся такой мощной световой вспышкой, по сравнению с которой совершенно меркнут вспышки новых звезд. Характерная продолжительность наиболее яркой стадии вспышки обычно составляет несколько недель. Такие явления получили название взрывов *сверхновых звезд* (или просто — *сверхновых*). Невооруженным глазом они наблюдаются в среднем лишь раз в несколько сотен лет. Последний раз вспышку сверхновой звезды в нашей Галактике видели в 1604 г. — всего за несколько лет до начала телескопических наблюдений. В настоящее время с помощью телескопов находят в среднем несколько вспышек сверхновых в год, но все они происходят на очень больших расстояниях от нас, в других галактиках, и без телескопов незаметны.

Вспышки сверхновых звезд — это грандиознейшие явления в природе. При взрыве сверхновой за несколько недель может выделяться такая энергия, которую Солнце способно излучить лишь за миллиарды лет! Одна сверхновая звезда в максимуме своей яркости иногда излучает больше света, чем все вместе взятые звезды галактики, в которой она наблюдается, — ее светимость может превысить $10^{10} L_{\odot}$.

Согласно современным представлениям, вспышка сверхновой звезды вызывается взрывом ядра массивной звезды, в котором водород и гелий успели почти полностью «выгореть». При достаточно большой массе ядро теряет свою устойчивость, и происходит мощный термоядерный взрыв. Часть вещества звезды разлетается в межзвездное пространство, а часть может быстро сжаться (сколлапсировать) под действием собственной

тяжести и превратиться в нейтронную звезду. Физические расчеты показывают, что при рождении нейтронной звезды должно возникать множество легких частиц — нейтрино, которые очень слабо взаимодействуют с веществом.

Наиболее яркая сверхновая звезда, наблюдавшаяся с помощью современной техники, появилась на небе в 1987 г. Она вспыхнула в ближайшей галактике — в Большом Магеллановом Облаке, удаленной от нас примерно на 150 тыс. св. лет. В максимуме своего блеска она была видна невооруженным глазом как звезда 4-й зв. величины. На фотографиях, полученных до вспышки, впервые удалось увидеть звезду, взорвавшуюся как сверхновая. Это был голубой сверхгигант 16-й зв. величины.

После взрыва яркость сверхновой 1987 г. постепенно ослабевала, падая вдвое за несколько десятков суток. Основным источником энергии излучения после взрыва оказался распад ядер радиоактивного кобальта, при котором они превращаются в ядра атомов железа.

Одновременно с наблюдавшейся оптической вспышкой в физических лабораториях были зарегистрированы потоки нейтрино, дошедшие до Земли вместе со светом вспышки. Это подтвердило, что в соседней галактике действительно произошел коллапс ядра звезды и возникла еще одна нейтронная звезда.

При взрыве сверхновой звезды в ее недрах вещество на короткое время нагревается до очень высоких температур (миллиарды кельвинов), при которых взаимодействия между ядрами атомов приводят к образованию самых различных химических элементов, вплоть до весьма тяжелых ядер.

Часть своего вещества сверхновые звезды «сбрасывают» с себя при взрыве, и вокруг них образуются быстро расширяющиеся газовые оболочки. Эти оболочки называют *остатками сверхновых звезд*. В нашей Галактике их известно несколько десятков. Важным свойством остатков сверхновых звезд является то, что они излучают мощные потоки радиоволн.

Остатки сверхновых звезд — это своего рода гигантские радиостанции, созданные самой природой.

Анализ радиоизлучения остатков сверхновых звезд показал, что оно возникает из-за движения потоков очень быстрых электронов в магнитном поле. Излучение такой природы раньше наблюдалось лишь в созданных физиками ускорителях электронов — в *синхротронах*, и поэтому оно получило название *синхротронного излучения*.

Наиболее известный и хорошо изученный остаток сверхновой звезды — *Крабовидная туманность* (рис. 25.4), находящаяся в созвездии Тельца. Она образовалась в результате взрыва, который наблюдался на Земле более 900 лет назад — в 1054 г. В том месте неба, где сейчас находится туманность, китайские и японские летописцы того времени зарегистрировали внезапное появление звезды такой яркости, что ее можно было видеть даже днем, при свете Солнца. Через несколько недель звезда ослабла и исчезла. Об этом событии надолго забыли.

Сейчас на месте этой вспыхнувшей звезды мы наблюдаем газовое облако, которое быстро расширяется. Скорость расширения, измеренная по эффекту Доплера, составляет около 1000 км/с. Это означает, что каждую секунду размер облака



Рис. 25.4. Крабовидная туманность

возрастает на 2000 км. Но из-за большого расстояния до него кажется, что это расширение происходит очень медленно. Лишь сравнивая фотографии, сделанные с промежутками 15—20 лет, можно заметить, что размер облака слегка увеличился.

В самом центре Крабовидной туманности наблюдается «ущелеший» остаток вспыхнувшей звезды — слабая звездочка с необычным спектром, в котором нет никаких линий. Это нейтронная звезда (пульсар). Ее излучение регистрируется во всех спектральных диапазонах — от радиоволн до гамма-лучей, и на любой длине волны излучение носит прерывистый, пульсирующий характер: звезда «мигает» с частотой около 30 Гц и почти совсем исчезает между вспышками.

Не все остатки сверхновых по-

хожи на Крабовидную туманность. В созвездии Кассиопеи, в области, отмеченной пунктирным кружком на звездной карте (см. рис. 25.1), расположен очень мощный радиоисточник — Кассиопея А. От него на метровых радиоволнах приходит к нам почти такой же поток радиоволн, как и от нашего Солнца. Кассиопея А — это тоже остаток сверхновой звезды. Однако, в отличие от Крабовидной туманности, следов вспыхнувшей звезды в ней не заметно. На месте радиоисточника находится расширяющаяся газовая туманность, но значительно менее яркая и компактная, чем Крабовидная туманность.

25.5. Вопросы

1. Чем отличаются затменно-переменные звезды от цефеид?
2. Что такое синхротронное излучение?
3. Как можно доказать, что: а) затменно-переменная звезда — это двойная звезда, хотя звезды и не видны по отдельности; б) изменение светимости цефеиды связано с изменением ее размеров?
- 4*. Почему в спектре сверхновых звезд линии излучения всегда очень широкие?

25.6 Упражнения

1. Новые звезды при вспышке увеличивают свою светимость примерно в 10 000 раз. На сколько меняется звездная величина звезды при вспышке? Какую звездную величину должна иметь звезда до вспышки, чтобы она стала заметной невооруженному глазу?

2. За сколько лет Солнце излучает столько же энергии, сколько

выделяется при вспышке типичной новой звезды за один день? (Светимость новой принять равной $10^4 L_{\odot}$.)

3*. На каком расстоянии от нас должна вспыхнуть сверхновая звезда, чтобы на нашем небе она была такой же яркой, как полная Луна? (Светимость звезды $10^{10} L_{\odot}$, звездная величина Луны $m_{\zeta} = -12^m$.)

26. СОЛНЦЕ — БЛИЖАЙШАЯ К НАМ ЗВЕЗДА

26.1. Общие сведения. Солнце — рядовая, но близко расположенная к нам звезда. Его масса, размер, светимость и другие характеристики довольно типичны для звезд (см. § 22, 23).

Солнце нагревает Землю своим излучением. Мы уже знаем, что на поверхность Земли площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно лучам Солнца, каждую секунду приходит около $1,4 \cdot 10^3$ Дж энергии. Эту величину называют *солнечной постоянной*. В настоящее время в различных странах разрабатываются и осуществляются проекты солнечных электростанций (как наземных, так и космических), которые со временем будут играть большую роль в энергетике, частично заменяя невозобновляемые природные энергетические ресурсы (газ, нефть, уголь и др.).

Изучение Солнца позволило лучше понять природу звезд. Сравнительная близость Солнца дает возможность более полно исследовать его, наблюдать на нем такие детали, которые недоступны нам на других звездах.

Самые заметные объекты на *солнечном диске* — это темные пятна (рис. 26.1, 26.2). Их системати-

ческое изучение началось лишь после изобретения телескопа, хотя изредка, когда небо покрыто сильной дымкой, ослабляющей солнечный свет, большие пятна заметны и невооруженным глазом. Вид солнечных пятен не остается постоянным. Крупные пятна могут прожить несколько месяцев, после чего исчезают. Бывают периоды, когда на Солнце вообще нет пятен, а в некоторые дни их число (включая мелкие) измеряется сотнями.

Еще Галилей обратил внимание на перемещение пятен по диску Солнца и правильно объяснил это как результат вращения Солнца вокруг оси. Скорость вращения можно определить не только по перемещению пятен, но и с помощью эффекта Доплера, измеряя лучевые скорости различных частей диска. Оказалось, что период вращения Солнца относительно Земли (т. е. синодический) составляет около 29 сут. Вследствие перемещения наблюдателя, обусловленного обращением Земли вокруг Солнца, истинный период вращения Солнца (сидерический, или звездный) несколько короче наблюдаемого с Земли.

Рассчитайте, на сколько сидерический период обращения Солнца короче наблюдаемого с Земли (синодического). (Воспользуйтесь соотношениями, выведенными в § 8.2).

Как и большинство газообразных или жидких тел, Солнце вращается неоднородно, угловая скорость вращения на экваторе наибольшая, а к полюсам постепенно уменьшается. Максимальное различие угловых скоростей составляет около 20%.

В телескоп диск Солнца кажется резким. В действительности же, так

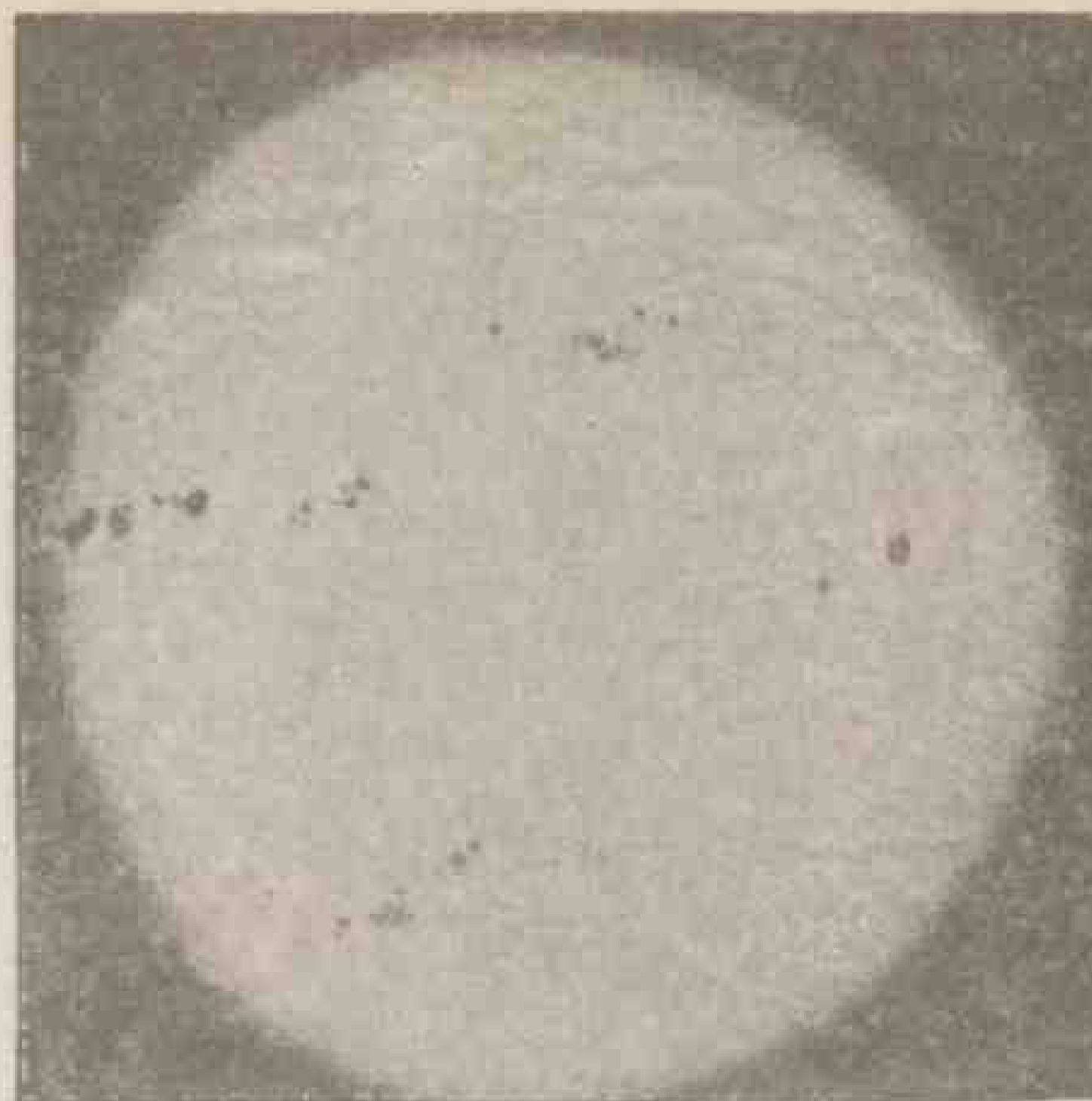


Рис. 26.1. Фотография Солнца

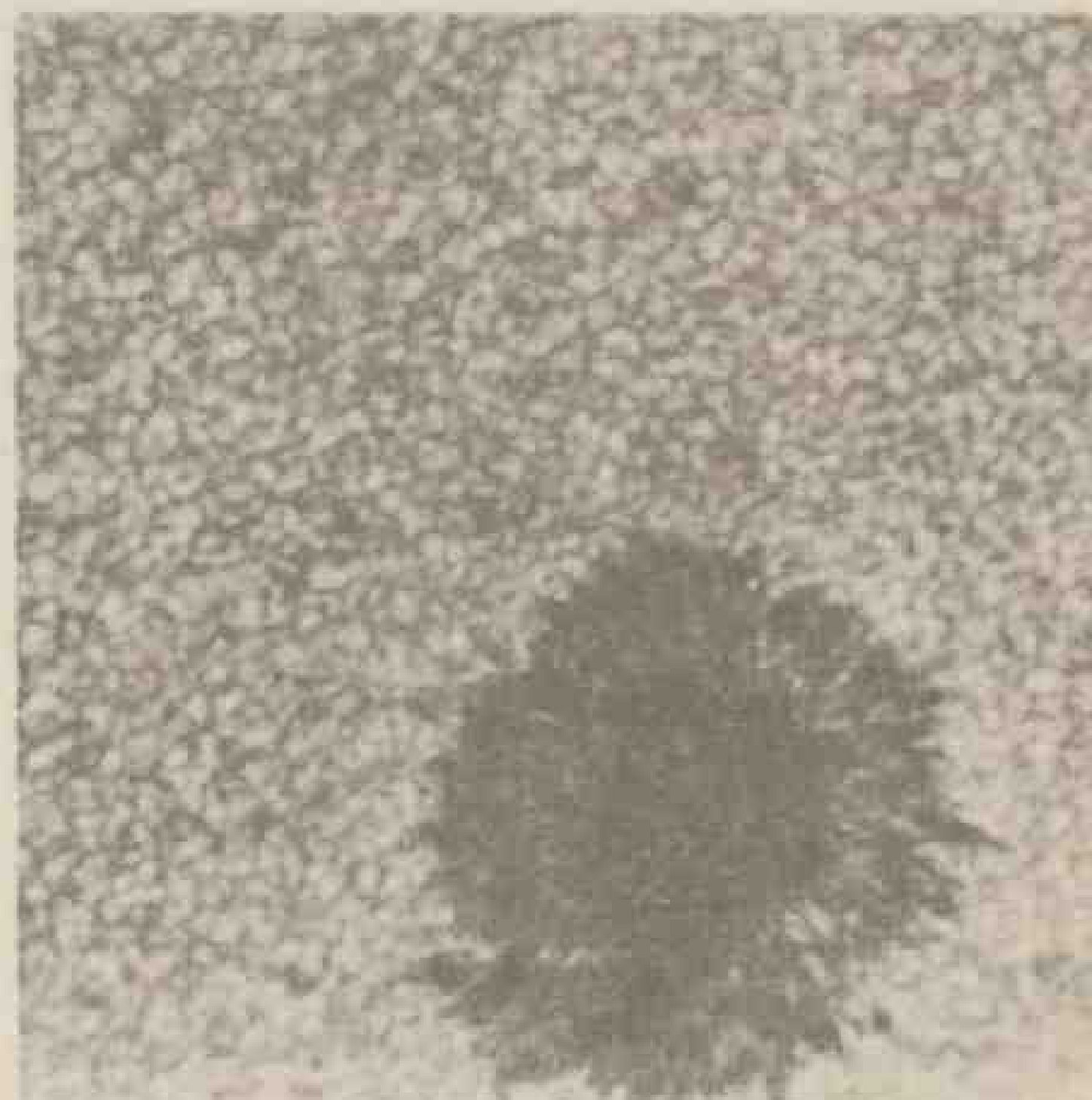


Рис. 26.2. Солнечное пятно и фотосферная грануляция

как Солнце — газовый шар, резких границ у него нет и плотность солнечного вещества возрастает вглубь постепенно. В центре Солнца, там, где происходят термоядерные реакции, температура достигает 14 млн. кельвинов. От центра наружу энергию переносит излучение, и

только во внешнем слое толщиной около 200 000 км она передается движением самого вещества. В этом слое горячий газ поднимается в наружные слои Солнца со скоростью несколько километров в секунду. Здесь, излучая свет, он охлаждается. С уменьшением температуры он становится плотнее и «тонет» в глубь Солнца, где вновь нагревается. Эти циклические движения вещества называются *конвекцией*, а тот слой Солнца, где она происходит, — *конвективной зоной*.

Наблюдаемые слои Солнца находятся непосредственно над конвективной зоной. Самый глубокий из них называется *фотосферой*, что в переводе с греческого означает «сфера света». Спектральный анализ показал, что газ в фотосфере в тысячи раз разреженнее воздуха. Его плотность составляет одну десятимиллионную часть плотности воды. На фотографиях Солнца видно (см. рис. 26.2), что вся фотосфера выглядит как совокупность ярких пятнышек — *гранул*, разделенных узкими, менее яркими промежутками. Размеры гранул в среднем около тысячи километров. Картина, образуемая гранулами, непрерывно меняется. За 5—10 мин они успевают появиться и исчезнуть, дав место новым. Гранулы связаны с конвективными потоками под фотосферой, которые выносят к поверхности все новые и новые порции горячего газа.

Солнечные пятна резко очерчены и темнее окружающей фотосферы. На ее ослепительно ярком фоне они кажутся совсем черными. В действительности же их яркость лишь раз в десять меньше, чем у фотосферы. Так как температура фотосферы около 6000 К, а яркость светящегося тела, согласно закону Стефана — Больцмана, пропорциональ-

на четвертой степени температуры, получается, что отношение температур примерно равно $\sqrt[4]{10} \approx 1,7$ и температура пятен около 3500 К.

Образование пятен связано с магнитным полем Солнца. Солнце в целом — слабо намагниченная звезда. Измерения показали, что индукция магнитного поля Солнца в среднем лишь вдвое выше, чем у поверхности Земли. Но в солнечных пятнах она оказалась в тысячи раз выше. **Солнечные пятна — это области Солнца, где магнитное поле на какое-то время становится очень сильным.** Причина понижения температуры в пятнах связана с влиянием магнитного поля на конвективное движение газа. Ведь газ фотосферы — это плазма, которая хорошо проводит электрический ток. Магнитное поле Солнца там, где оно особенно сильное, тормозит движение конвективных потоков газа, индуцируя в них электрический ток. В результате области с сильным магнитным полем получают меньше энергии и их температура оказывается пониженной. Так образуются солнечные пятна.

26.2. Внешняя атмосфера Солнца: хромосфера и корона. Газ, расположенный над фотосферой, прозрачен для света — иначе мы не видели бы сквозь него фотосферу. Этот газ образует внешние слои солнечной атмосферы — *хромосферу* и *корону*. Между ними нет резкой границы.

Слой хромосферы имеет толщину несколько тысяч километров. Спектр хромосферы не непрерывный с линиями поглощения, как у фотосферы, а линейчатый, каким и должен быть спектр прозрачного газа. Газ хромосферы неоднороден по плотности и находится в постоянном движении. Струи, петли и от-

дельные сгустки горячего газа размером в целые земные континенты непрерывно возникают и рассасываются в хромосфере за несколько минут.

Внешние слои солнечной атмосферы, расположенные над хромосферой и простирающиеся на десятки радиусов Солнца, называются *солнечной короной*. Во время полных солнечных затмений корона всегда видна как серебристое жемчужное сияние (см. фото на обложке и рис. 26.3). Ее плотность очень медленно уменьшается с расстоянием от Солнца. Вдали от него она постепенно переходит в межпланетную газовую среду.

Спектральные наблюдения, проводимые во время солнечных затмений, показали, что спектр короны очень необычен. В нем нет спектральных линий водорода или других элементов, присутствующих в спектрах фотосферы и хромосферы. Зато были обнаружены неизвестные в лабораторных условиях яркие линии, которые долгое время не могли отождествить ни с одним из известных химических элементов. Позднее установили, что эти линии принадлежат атомам железа, никеля и других химических элементов, лишенным многих электронов. Чтобы «оторвать» у этих атомов электроны, среда, в которой они находятся, должна быть нагрета до 1—2 млн. кельвинов. Следовательно, причина необычного спектра короны — высокая температура. Впоследствии измерения радиоизлучения и рентгеновского излучения короны подтвердили вывод о ее высокой температуре.

Изредка в слабо намагниченном газе хромосферы возникают сложные плазменные эффекты, приводящие к взрывному выделению в отдельных

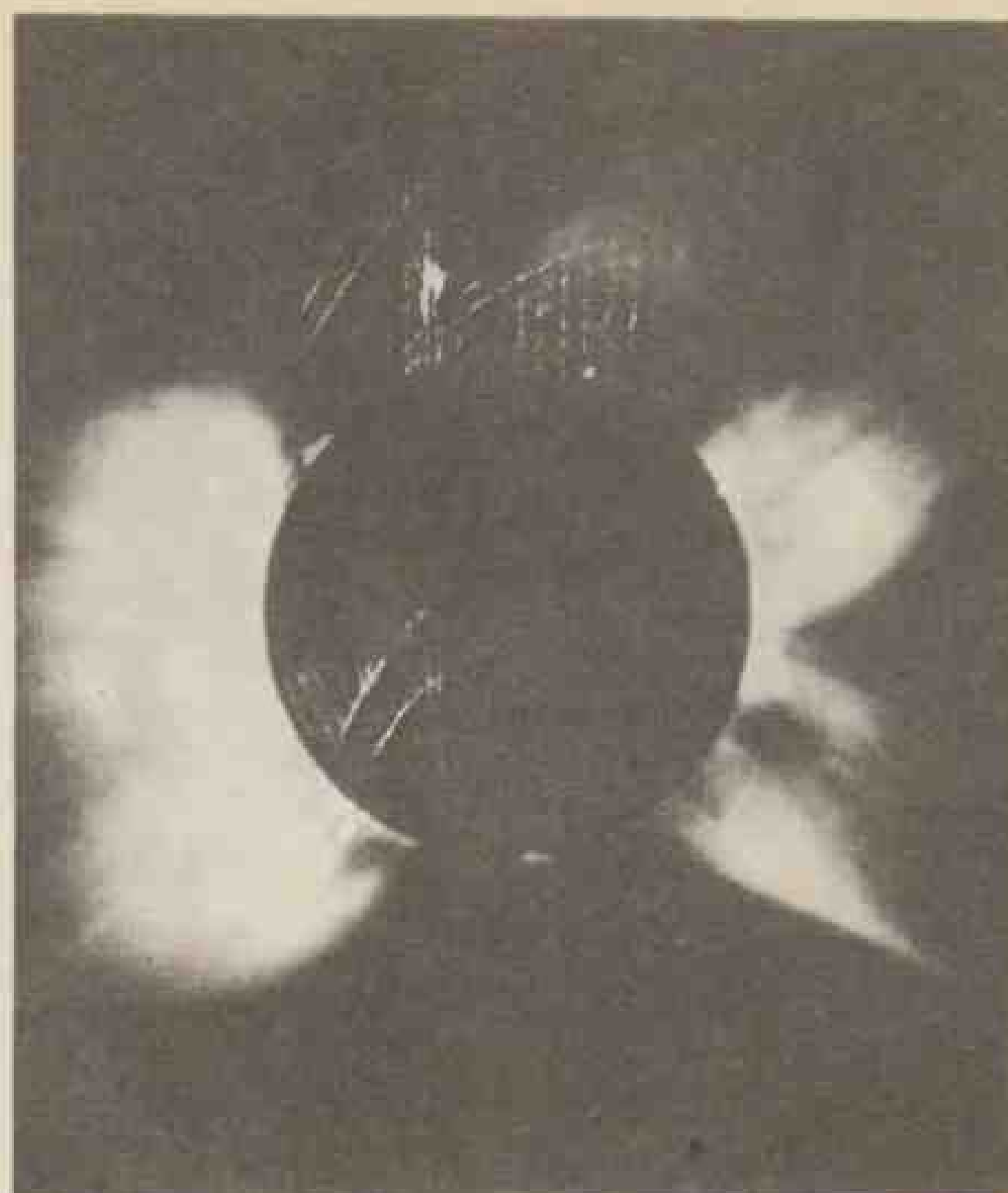


Рис. 26.3. Солнечная корона

областях колоссальной энергии — до 10^{25} Дж (это эквивалентно энергии примерно миллиарда атомных бомб). Такие явления носят название *солнечных вспышек*. Яркость Солнца в области вспышки внезапно возрастает во много раз. Появляется мощное рентгеновское излучение, говорящее о том, что газ вспышки нагревается до температуры 10—30 млн. кельвинов. Ускоряются и покидают Солнце мощные потоки заряженных частиц — протонов и электронов.

Очень мощные вспышки с энергией более 10^{25} Дж происходят редко, но более слабые наблюдаются на Солнце почти каждый день.

Самыми яркими и заметными образованиями во внутренних слоях короны являются *протуберанцы*. Они обычно выглядят как огненные дуги или языки пламени, поднимающиеся над Солнцем (рис. 26.4). **Протуберанцы** — это большие, сложные по форме облака газа, движущиеся



Рис. 26.4. Протуберанец (яркий диск Солнца закрыт черным экраном)

в короне. Они плотнее вещества короны и значительно холоднее его (их температура в сто раз ниже, чем в короне, и составляет около 10 000 К). Хотя протуберанцы могут подниматься на многие десятки тысяч километров над хромосферой, газ протуберанцев по всем своим характеристикам подобен газу хромосферы. Некоторые протуберанцы движутся так быстро, что их вещество может навсегда покинуть Солнце. Но столь быстрые протуберанцы — большая редкость. Обычно газ в них движется медленно и чаще не вверх, а вниз, т. е. в солнечную хромосферу. Такие протуберанцы представляют собою уплотнившийся и охладившийся газ короны, «стекающий» к Солнцу под действием его притяжения.

Солнечные пятна, вспышки, структурные детали хромосферы и короны — все это результат сложных взаимодействий плазмы солнечной атмосферы с магнитными полями на Солнце.

Атомы горячей короны движутся

так быстро, что гравитационное поле Солнца не может их удержать. Вещество солнечной короны, состоящее из свободных электронов, протонов и ионов, непрерывно удаляется от Солнца по всем направлениям. Со скоростью в сотни километров в секунду оно движется через всю планетную систему. Мы уже знаем, что этот поток вещества, распространяющийся от Солнца, называется *солнечным ветром*.

26.3. Активность Солнца и ее влияние на Землю. Наблюдения показывают, что в атмосфере Солнца постоянно происходят изменения. Из месяца в месяц, из года в год меняется среднее число солнечных пятен и больших протуберанцев, частота появления солнечных вспышек и связанных с ними явлений. Эти изменения характеризуют степень *активности Солнца* и обладают определенной периодичностью.

Активность Солнца достигает максимума в среднем через 11,2 года. Последний максимум был в 1991 г.

Изменение солнечной активности практически не влияет на ту световую энергию и теплоту, которые Земля получает от Солнца. И тем не менее Земля чутко реагирует на проявления солнечной активности. Самым ярким примером может служить увеличение числа полярных сияний и магнитных бурь (т. е. быстрых изменений земного магнитного поля) в годы максимума солнечной активности. Обнаружено влияние активности Солнца и на живую природу: на рост деревьев, миграцию некоторых животных и насекомых и даже на состояние здоровья людей, подверженных некоторым заболеваниям. Все это показывает, насколько большое значение должно иметь исследование и прогнозирование солнечной активности.

Механизм, связывающий активные процессы на Солнце со многими земными явлениями, еще не вполне ясен. Полярные сияния и магнитные бури, а может быть, и другие земные «проявления» активности Солнца вызваны взаимодействием магнитного поля Земли и ее атмосферы с частицами солнечного ветра. Большую роль играют и потоки очень быстрых протонов и электронов (солнечных космических лучей), которые ускоряются во время солнечных вспышек до многих тысяч километров в секунду. С повышением активности Солнца число таких частиц и их энергия возрастают. Но непосредственно до поверхности Земли они не доходят. Магнитное поле нашей планеты меняет направление их движения так, что поток частиц как бы обтекает Землю, а те частицы, которым удастся прорваться через магнитный «заслон», поглощаются в атмосфере, непроницаемой даже для самых быстрых из них. Благодаря этому все живое на Земле защищено от непосредственного губительного влияния космических лучей. Но за пределами Земли с существованием быстрых частиц приходится считаться. Они могут представлять угрозу для космонавтов, находящихся в полете, и вывести из строя сложную электронную аппаратуру, работающую в космосе. Запуски космических кораблей и аппаратов приходится проводить с учетом прогнозов солнечной активности, которые специально составляются в ряде стран.

26.4. Вопросы

1. В каком (примерно) году был последний минимум солнечной активности? Когда ожидается следующий? 2. Что можно увидеть на

Солнце в телескоп? 3. Откуда стало известно расстояние до Солнца? 4. Почему нельзя увидеть невооруженным глазом солнечную корону с Земли, загородив диск Солнца каким-нибудь непрозрачным экраном?

26.5. Упражнения

1. Зная расстояние до Солнца, оцените размер солнечного пятна, если оно видно под углом $1'$.

2. На лучших фотографиях Солнца видны детали в его атмосфере с угловым размером около $0,5''$. Каков линейный размер этих деталей?

3. Зная размер Солнца и период его осевого вращения, оцените линейную скорость его вращения на экваторе.

4. Какую скорость должно иметь вещество солнечных протуберанцев, чтобы оно никогда не упало на Солнце? (Воспользоваться значениями массы и радиуса Солнца и выражением для второй космической скорости.)

5*. Известно, что частицы солнечного ветра проходят земную орбиту со скоростью около 500 км/с , при этом концентрация его частиц примерно соответствует 5 протонам в объеме 1 см^3 . Зная массу протонов ($6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), определите, какую массу теряет Солнце каждую секунду из-за солнечного ветра. Сравните с оценкой потери массы на излучение.

27. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И СОЛНЦА

27.1. «Старение» звезд. За все время существования цивилизации на небе не исчезло и, не появилось

ни одной заметной глазу звезды (если не считать кратковременных вспышек новых и сверхновых звезд). Но это не означает, что звезды неизменны. Необратимые процессы происходят и в них. Термоядерное топливо — водород — постепенно исчерпывается, звезда «стареет». Меняется ее температура, светимость, химический состав. Процесс этот очень медленный, он может занимать миллиарды лет. Поэтому мы не в состоянии проследить за эволюцией какой-либо одной выбранной звезды. О том, как эволюционируют звезды, удалось узнать, сопоставляя между собой характеристики звезд различного возраста и массы. Ожидаемые изменения, которые должны происходить со звездами в процессе их эволюции, можно рассчитать и теоретически, основываясь на физических законах и на знании тех процессов, которые происходят внутри звезд.

Расчеты и наблюдения хорошо согласуются друг с другом. Они привели к трем важнейшим выводам, касающимся процесса эволюции звезд.

1. Чем больше масса звезды, тем быстрее происходит ее эволюция и тем короче время ее существования. Причина этого в том, что время существования любой звезды определяется запасом ее ядерного топлива и темпами его расхода (на излучение). Начальное содержание топлива — водорода — пропорционально массе звезды, а темпы его расхода пропорциональны светимости, так как ядерная энергия звезд в конечном счете превращается в энергию излучения. Поэтому время существования звезды t пропорционально отношению M/L (массы к светимости). Из § 22.7 мы знаем, что $L \sim M^4$. Таким образом,

$t \sim M/L \sim M^{-3}$. Звезды с массой, как у Солнца, «живут» 11—13 млрд. лет, а наиболее массивные из наблюдаемых звезд — всего лишь несколько миллионов лет.

2. Процесс «старения» звезд происходит неравномерно. Почти 90% своей жизни звезды остаются практически неизменными, находясь на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рессела (§ 22.8, рис. 22.3). Все это время за счет превращения водорода в гелий в их недрах вырабатывается термоядерная энергия. Как только запасы водорода в центральной области звезды оказываются исчерпанными, звезда начинает меняться сравнительно быстро.

3. Когда запасы ядерной энергии в центре звезды типа нашего Солнца подходят к концу, ее размеры и светимость начинают расти, а температура поверхности — уменьшаться. Звезда превращается в огромную красноватую звезду высокой светимости и очень низкой плотности (*красный гигант*). Расчеты показывают, что в недрах красного гиганта образуется небольшое по размеру, но плотное и горячее *гелиевое ядро*. Когда температура в нем поднимается до ста миллионов кельвинов, начинается взаимодействие между ядрами гелия, их превращение в углерод. Этот процесс также сопровождается выделением большого количества энергии. В тонком слое газа вокруг гелиевого ядра, где температура не столь высока, как в ядре, продолжается выделение энергии за счет «обычной» реакции превращения водорода в гелий. Таким образом, красные гиганты имеют иное внутреннее строение, чем звезды, из которых они возникли.

Возраст нашего Солнца — около

5 млрд. лет. Через 6—7 млрд. лет в его недрах также будет исчерпан весь водород, и примерно за 100 млн. лет Солнце превратится в красный гигант, его размеры увеличатся в десятки раз, а светимость Солнца возрастет настолько, что жизнь на Земле станет невозможной.

27.2. Конечные стадии. Что происходит со звездами после того, как они прошли стадию гигантов (для массивных звезд — стадию сверхгигантов)? Оказалось, что дальше эволюция может происходить различными путями в зависимости от массы звезды.

Звезды примерно такой же массы, как Солнце, сбрасывают с себя небольшую часть вещества, образуя расширяющуюся газовую оболочку, и сжимаются до размеров, типичных для планет. При этом они превращаются в вырожденные звезды — белые карлики, которые затем очень медленно остывают.

Менее массивные звезды живут так долго, что за время существования Галактики еще не успели «постареть». Через миллиарды лет они, как и Солнце, должны превратиться в красные гиганты, а затем — в вырожденные звезды.

Если звезда обладает массой в два-три раза больше солнечной, то сильное гравитационное поле «ста-реющей» звезды сжимает ее до ядерной плотности. Образуется нейтронная звезда.

О судьбе еще более массивных звезд узнать труднее. Она может быть разной. Часть массивных звезд взрываются как сверхновые, разбрасывая при этом свое вещество. Остаток звезды после взрыва может стать нейтронной звездой.

Теоретически была рассмотрена эволюция массивных звезд и без потери массы. Когда запасы энергии

такой звезды оказываются исчерпанными, она начинает неудержимо сжиматься под действием собственной гравитации. Мощное гравитационное поле массивной звезды так сильно сдавливает ее вещество, что звезда не может остановить свое сжатие ни на стадии белого карлика, ни на стадии нейтронной звезды. Конечным результатом такого сжатия неизбежно явится образование удивительного объекта, размер которого составляет несколько километров. Вблизи него гравитационное поле становится настолько сильным, насколько позволяют законы физики. В предельно сильном поле скорость «убегания» (вторая космическая скорость), равная $\sqrt{2GM/R}$ (см. § 10), достигает скорости света — наибольшей скорости движения, возможной в природе. Это означает, что ни свет, ни любой другой сигнал не смогут покинуть такой объект. Поэтому он и получил название *черной дыры*.

Черные дыры — тела-невидимки. Это необычные образования. Из теории гравитации следует, что вблизи них должны меняться свойства пространства и замедляться темпы течения времени. Черные дыры пока не открыты. Обнаружить такие объекты можно только по их гравитационному воздействию на окружающее вещество, например на близко расположенные звезды или разреженный газ, в котором находится черная дыра. Любое вещество, попавшее в окрестность черной дыры, будет падать на нее, образуя очень горячий газовый диск, похожий на тот, который возникает вокруг нейтронных звезд в тесных парах с нормальными звездами (§ 24.2). Среди многих обнаруженных рентгеновских источников, связанных со звездами, по-видимому, некоторые действи-

тельно возникают при перетекании газа от обычной звезды на близко расположенную черную дыру. Об этом говорит то, что масса, найденная для нескольких таких невидимых спутников, превышает теоретически возможную массу нейтронных звезд (около $3M_{\odot}$). В этом случае объекты называют кандидатами в черные дыры.

27.3. Вопросы

1. Какая судьба ожидает Солнце через многие миллиарды лет? 2. Какую (примерно) продолжительность существования можно ожидать у звезд массой $0,5M_{\odot}$? $5M_{\odot}$? $50M_{\odot}$? 3. Объясните, почему более массивные звезды эволюционируют быстрее, чем менее массивные. 4. Перечислите, какие объекты рассматриваются как конечные стадии эволюции звезд, которые: а) в 10 раз массивнее Солнца; б) в 2 раза массивнее Солнца; в) по массе равны Солнцу; г) имеют массу, равную половине массы Солнца.

27.4. Упражнения

1. Считая, что светимость Солнца остается примерно постоянной, определите, какую долю массы потеряет Солнце за свою жизнь вследствие излучения света.

2*. Определите размер и плотность, которые должна иметь черная дыра массой $30M_{\odot}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА VI

Измерения расстояний до звезд, их температур, светимостей и других характеристик показали, что звезды состоят из горячего ионизованного газа (в основном — водорода и гелия).

Излучение звезд обусловлено высокой температурой газа, которая поддерживается благодаря термоядерным реакциям, происходящим в недрах звезд. Внутри звезды устанавливается равновесие между силами гравитации, стремящимися сжать ее, и силами давления горячего газа, расширяющими звезду изнутри.

По своим характеристикам многие звезды близки к Солнцу, хотя известны и такие, которые по светимости или плотности отличаются от Солнца (в ту или другую сторону) во много тысяч раз.

Наиболее плотные из известных звезд — это белые карлики, вещество которых остается газовым, но приобретает необычные для нормального газа свойства, и нейтронные звезды, состоящие в основном из нейтронов. Плотность последних примерно равна плотности атомных ядер.

Многие звезды являются переменными. Причина изменений их яркости может быть различна: затмения звезд в двойных системах, пульсации относительно положения равновесия, а также внутренние процессы, приводящие к резкому возрастанию светимости или взрыву звезды. Наиболее мощные взрывы наблюдаются как сверхновые звезды. На месте взрыва сверхновой образуется расширяющееся газовое облако, обладающее сильным радиоизлучением.

Солнце — звезда, которую мы можем исследовать значительно подробнее остальных, в частности изучать отдельные детали в его атмосфере. Внешняя область солнечной атмосферы — корона — расширяется и представляет собой непрерывный поток вещества, уходящего от Солнца, — солнечный ветер.

Частота появления солнечных пятен и других образований на Солнце, а также вспышек в его атмосфере меняется с периодом в среднем около 11 лет (период активности). Активность Солнца отражается на многих земных явлениях.

Солнце, как и другие звезды, не может существовать вечно. Звезды рождаются, изменяются со временем (эволюционируют), вырабатывая энергию, пока в их недрах имеются запасы ядерного топлива. Время существования звезды тем короче, чем больше ее масса.

Звезды, масса которых близка к

солнечной или меньше, могут выделять термоядерную энергию, почти не меняясь при этом, миллиарды лет, после чего они сначала увеличивают свой размер, становятся красными гигантами, а затем сильно сжимаются, превращаясь в белые карлики. Более массивные звезды завершают свою эволюцию в виде нейтронных звезд, а некоторые, возможно, становятся черными дырами. Благодаря термоядерным реакциям в недрах массивных звезд и при вспышках сверхновых звезд в природе возникают тяжелые элементы.

VII. НАША ГАЛАКТИКА

28. СОСТАВ И СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

28.1. Млечный Путь и структура Галактики. Уже к началу нашего века было известно, что те звезды, которые наблюдаются невооруженным глазом или в телескоп, образуют в пространстве сплюснутый *звездный диск* громадного размера. Мы находимся внутри этого диска и поэтому вблизи его плоскости видим очень много далеких звезд. Совокупность этих звезд сливается для нас в светящуюся полосу *Млечного Пути*. Раньше думали, что Солнце расположено вблизи центра звездной системы — Галактики, потому что яркость Млечного Пути примерно одинакова во всех направлениях, хотя в нем и существуют отдельные более яркие участки (вкл. VI). Сейчас мы знаем, что свет самой яркой центральной области Галактики сильно ослабляется из-за поглощения межзвездной пылью. Лишь наблюдения в инфракрасных лучах, которые испытывают меньшее поглощение, позволили «увидеть» наиболее плотную центральную область нашей Галактики. Она расположена в созвездии Стрельца.

Эта центральная, наиболее компактная область Галактики называется ее *звездным ядром*. Солнце расположено очень далеко от ядра Галактики — на расстоянии 25—30 тыс. световых лет (8—10 кпк) — вблизи плоскости симметрии звездного диска, толщина которого составляет несколько тысяч световых лет.

Ядро находится в центре *звездного диска* Галактики.

Часть звезд нашей Галактики не входит в состав диска, а образует сферическую составляющую (рис. 28.1). Эти звезды концентрируются не к плоскости диска, а к ядру Галактики. Диск и сферическая составляющая — основные элементы структуры нашей Галактики.

Полное число звезд в Галактике можно оценить только ориентировочно. Оно составляет несколько сотен миллиардов. Лишь незначительная доля всех этих звезд доступна наблюдениям даже при помощи крупнейших телескопов.

Галактика — это огромный звездный остров, диаметр которого превышает 100 000 св. лет, объединяющий многие миллиарды самых различных звезд. Помимо звезд, в Галактике содержится много тел небольшой массы (например, планет) и очень неоднородная по плотности межзвездная среда (разреженный газ, пыль, космические лучи). Несмотря на большую массу, Галактика — очень разреженная система: расстояния между соседними звездами, как правило, измеряются световыми годами.

28.2. Звездные скопления. Хорошо известно, что звезды неравномерно распределены по небу. Например, вблизи Млечного Пути слабые звезды встречаются заметно чаще, чем вдали от него. Это не кажущийся эффект. Звезды действительно неравномерно заполняют пространство. Наиболее наглядно это

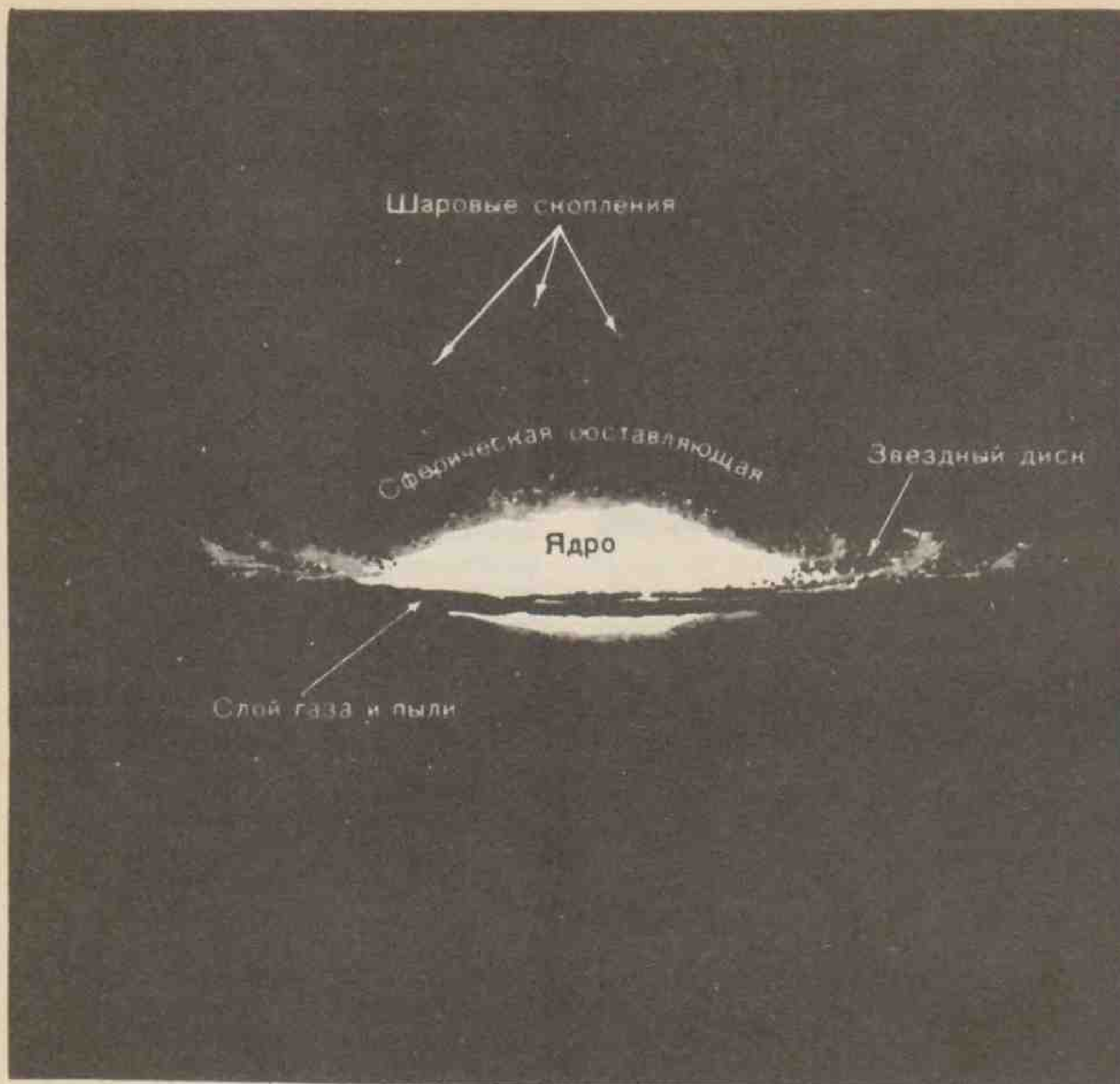


Рис. 28.1. Схема строения Галактики

проявляется в существовании групп из большого числа звезд, называемых *звездными скоплениями*.

Примером звездных скоплений, хорошо видимых невооруженным глазом, являются скопления *Плеяды* и *Гиады* (оба в созвездии Тельца). В Плеядах нормальный глаз видит 5—7 слабых звездочек, располагающихся в виде маленького ковшика (по этому скоплению

удобно проверять остроту зрения). В телескоп в Плеядах заметны сотни звезд (рис. 28.2). Гиады — скопление не столь компактное, как Плеяды, но оно содержит более яркие звезды. Рядом с Гиадами — красноватый *Альдебаран* — ярчайшая звезда в созвездии Тельца.

Невооруженным глазом на небе заметно всего несколько скоплений. Но в телескоп их можно видеть сотни. Наблюдения показали, что звездный состав скоплений различен.



Рис. 28.2. Плеяды



Рис. 28.3. Шаровые скопления

Измеряя температуру и светимость звезд скоплений и сверяя их положение на диаграмме Герцшпрунга — Рассела с теорией звездной эволюции, удается оценить возраст скоплений. Оказалось, что некоторые скопления состоят из сравнительно молодых, некоторые — из старых звезд. Звезды внутри скоп-

ления имеют близкий возраст и, следовательно, связаны общим происхождением.

Наблюдается два типа скоплений — *рассеянные* и *шаровые*. Рассеянные скопления содержат десятки, сотни, а наиболее крупные — тысячи звезд и выглядят в телескоп сверкающей россыпью. Плеяды и Гиады относятся к этому типу. Среди рассеянных скоплений встречаются как сравнительно старые, с возрастом в несколько миллиардов лет, так и очень молодые, в которых еще сохранилось много голубых горячих звезд высокой светимости. Эти звезды значительно массивнее Солнца, и поэтому (как мы уже знаем) продолжительность жизни у них более короткая, чем у звезд других типов. Существование в рассеянных скоплениях таких звезд говорит о том, что образование скоплений продолжается и в наше время. Сравнительно молодым скоплением являются Плеяды: его возраст около 10^8 лет.

Рассеянные скопления можно найти не в любой части неба. Почти все они наблюдаются вблизи Млечного Пути. Именно там, вблизи плоскости диска Галактики, наиболее активно происходит образование звезд.

Шаровые скопления по размеру, как правило, больше рассеянных и содержат сотни тысяч звезд. Все они очень далеки от нас. Лишь одно-два можно заметить невооруженным глазом или в бинокль, но даже они из-за громадного расстояния видны лишь как крошечные светящиеся пятнышки. На фотографиях шаровые скопления обычно выглядят как целый рой огромного числа звезд (рис. 28.3). Кажется, что в центре скопления звезды сливаются в сплошную светлую массу. Но на самом деле даже

там между звездами достаточно много свободного пространства, чтобы они двигались, не сталкиваясь друг с другом. В отличие от рассеянных скоплений, в шаровых мы не наблюдаем молодых звезд. Это очень старые звездные системы. Их возраст трудно точно оценить. Основываясь на теории звездной эволюции, ученые получают оценки возраста наиболее старых скоплений в 13—18 млрд. лет.

Всего в нашей Галактике известно около 150 шаровых скоплений. В отличие от рассеянных звездных скоплений, шаровые скопления слабо концентрируются к полосе Млечного Пути. Зато практически все они наблюдаются в одной половине неба, в центре которой находится созвездие Стрельца. Такая особенность распределения отражает структуру нашей звездной системы — Галактики: в созвездии Стрельца находится ее центр. Шаровые скопления, в отличие от рассеянных, относятся к сферической составляющей Галактики.

28.3. Вопросы

1. Чем отличаются шаровые скопления от рассеянных? 2. Как можно доказать, что Млечный Путь состоит из звезд? 3. Перечислите основные объекты, входящие в состав Галактики. 4. В каком созвездии находится центр Галактики? Поднимается ли он над горизонтом в той местности, где вы живете? (Склонение центра Галактики $\delta = -29^\circ$.)

28.4. Упражнение

Во сколько раз диаметр Галактики больше: а) Солнечной системы; б) расстояния до ближайшей

к Солнцу звезды; в) звездных скоплений (характерный размер последних — 10 пк)?

29. ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗД

29.1. Тангенциальные и лучевые скорости звезд. Звезды в Галактике непрерывно движутся. Если бы они хоть на мгновение остановились, то из-за взаимного притяжения начали бы падать к центру Галактики. Скорости, с которыми движутся звезды, составляют десятки и сотни километров в секунду, но из-за больших расстояний до звезд обнаружить их относительное движение по небу очень сложно.

О движении небесного тела в космическом пространстве можно узнать двумя способами.

Первый способ — наблюдение за перемещением источника на фоне очень далеких звезд. Он дает оценку не полной скорости объекта, а проекции вектора скорости на плоскость, перпендикулярную лучу зрения (рис. 29.1). Эту составляющую называют *тангенциальной скоростью* v_t . Ее можно измерить лишь для сравнительно близких звезд по медленному изменению их положения на небе.

Первый каталог, в котором были приведены относительные положения ярких звезд, был составлен еще во II в. до н. э. древнегреческим ученым Гиппархом. Этим каталогом пользовался Клавдий Птолемей — автор геоцентрической системы мира. В начале XVIII в. английский астроном Эдмонд Галлей сравнил наблюдавшиеся в его время положения звезд с теми, которые были приведены у Птолемея. Для нескольких ярких звезд он обнаружил заметное перемещение относительно осталь-

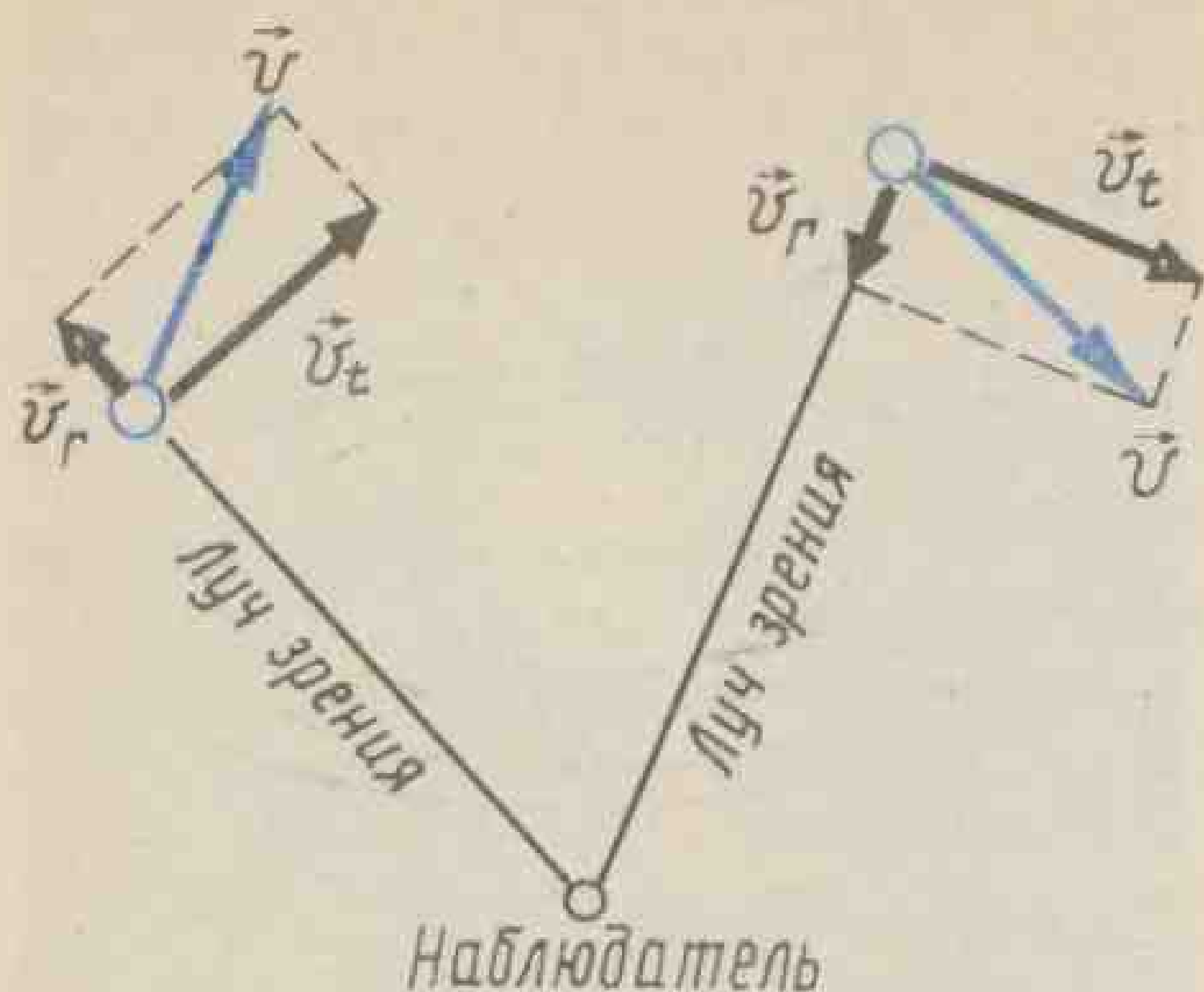


Рис. 29.1. Лучевая и тангенциальная скорости

ных. Так впервые было доказано, что звезды движутся.

Чтобы измерить тангенциальную скорость какой-нибудь звезды, при помощи специальных измерительных приборов сравнивают фотографии одного и того же участка неба, сделанные на одном и том же телескопе с промежутком времени в несколько лет или десятилетий. За этот промежуток времени близкие звезды слегка смещаются на фоне слабых, более далеких, практически неподвижных для наблюдателя звезд. Такое смещение очень мало и лишь у немногих звезд превышает одну угловую секунду в год.

Зная расстояние до звезды, легко по угловому смещению найти ее тангенциальную скорость v_t . Пусть, например, звезда, расстояние D до которой 30 св. лет, или около $3 \cdot 10^{17}$ м, перемещается на угол $\alpha = 0,2''$ в год. Следовательно, ее смещение за год равно отрезку длиной $D \sin \alpha = 3 \cdot 10^{11}$ м. Значит, тангенциальная скорость составляет $3 \cdot 10^{11}$ м в год, или около 10 км/с.

Второй способ оценки скорости звезд основан на измерении смещения линий в их спектрах, определяемого эффектом Доплера (см. § 14.2). Этот способ позволяет найти проекцию вектора скорости звезды на луч зрения, или *лучевую скорость* звезды v_r (см. рис. 29.1).

Полная скорость звезды вычисляется через тангенциальную v_t и лучевую v_r по теореме Пифагора: $v = \sqrt{v_t^2 + v_r^2}$. Измерения показали, что большинство звезд, сравнительно близких к Солнцу, движется относительно него со скоростями, не превышающими 30 км/с.

Из-за движения звезд вид звездного неба со временем должен меняться. Одни звезды приближаются к нам и в будущем станут более яркими, другие навсегда удаляются от Солнечной системы. Изменяется и их положение на небе. Но этот процесс происходит настолько медленно, что нужны многие сотни лет, чтобы перемещение даже ближайших звезд стало заметным на глаз.

29.2. Вращение Галактики. Когда были измерены скорости движения большого числа звезд — как близких, так и далеких от Солнца, — выяснилась общая картина их движения. Оказалось, что **звезды галактического диска обращаются вокруг ядра Галактики в одну и ту же сторону по орбитам, близким к круговым.** Скорость их движения вокруг ядра в окрестности Солнца составляет почти 250 км/с. Вместе с ними движется и Солнце. Разделив длину окружности радиусом, равным расстоянию до центра Галактики, на скорость, легко найти, что **полный период обращения Солнца в Галактике составляет примерно 200 млн. лет.**

Зная скорость обращения и ра-

диус круговой орбиты, можно вычислить массу внутренней части Галактики, используя формулу для круговой скорости (10.5):

$$M = \frac{v^2 R}{G} \quad (29.1)$$

Подставляя известные нам числовые значения $v = 2,5 \cdot 10^5$ м/с, $R = 3 \times 10^{20}$ м и $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², получаем, что $M = 2,8 \cdot 10^{41}$ кг, или около 140 млрд. масс Солнца. Такую массу имеет все вещество Галактики, находящееся ближе к ее центру, чем Солнце.

Звезды и скопления звезд сферической составляющей движутся по-иному, не так, как звезды диска. Их орбиты сильно вытянуты и наклонены к плоскости диска под всевозможными углами (рис. 29.2). Такие звезды имеют относительно Солнца очень большие скорости (до 200—300 км/с). Но относительно центра Галактики средние скорости звезд как сферической составляющей, так и диска приблизительно одинаковы.

Как мы видим, движение звезд в Галактике напоминает движение тел Солнечной системы. Действительно, планеты, как и звезды диска, движутся вокруг центра в одну сторону и примерно в одной плоскости, а кометы, как и звезды сферической составляющей, движутся по вытянутым орбитам в самых различных плоскостях.

29.3. Вопросы

1. Как было доказано, что звезды движутся? 2. У каких звезд (диска или сферической составляющей) наблюдается большая скорость движения относительно Солнца? 3. Как бы стало двигаться Солнце в Галактике, если бы удалось оста-

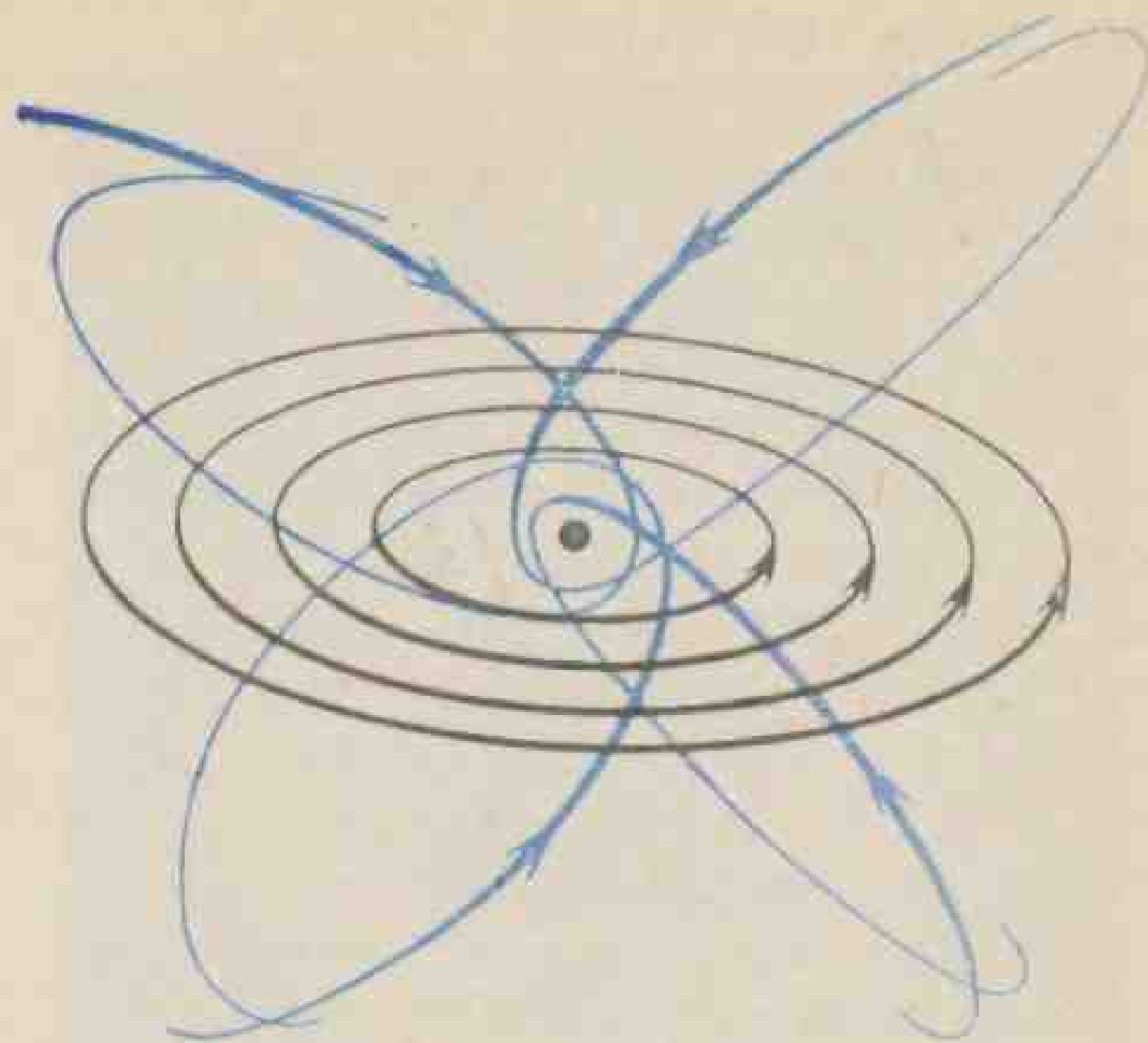


Рис. 29.2. Траектории звезд диска (черные линии) и сферической составляющей (синие)

новить его орбитальное движение вокруг галактического центра?

29.4. Упражнения

1. Звезда, находясь на расстоянии 10 пк, имеет тангенциальную скорость 20 км/с. За сколько лет она переместится по небу на угловой размер Луны ($0,5^\circ$)?

2. Найдите полную скорость звезды, лучевая скорость которой 10 км/с, а перемещение на фоне далеких звезд составляет $0,1''$ в год. Расстояние до звезды 60 св. лет.

3. Сколько раз за свою жизнь Солнце успело обернуться вокруг центра Галактики?

4. На расстоянии 15 кпк от центра Галактики скорость обращения звезд по круговым орбитам вокруг центра примерно такая же, как и в окрестности Солнца. Используя выражение для круговой скорости, оцените примерное значение массы Галактики в пределах радиуса 15 кпк.

30. МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

30.1. Межзвездный газ. В состав нашей Галактики входят не только звезды. Наблюдения показали, что межзвездное пространство нельзя считать абсолютно пустым. Основная масса *межзвездной среды* приходится на *разреженный газ*. Этот газ обладает способностью слабо светиться, если горячие звезды освещают его ультрафиолетовым светом, и излучать потоки радиоволн, которые можно уловить радиотелескопами. Межзвездный газ имеет примерно такой же химический состав, как и большинство наблюдаемых звезд. Он преимущественно состоит из легких газов (водорода и гелия).

Большая часть межзвездного газа сосредоточена в пределах диска Галактики, где межзвездная среда образует вблизи плоскости симметрии диска *газопылевой слой* толщиной в несколько сотен световых лет. В пределах этого слоя находится и наше Солнце с окружающими его звездами. Газопылевой слой вместе со звездами диска принимает участие во вращении Галактики.

Даже вблизи плоскости звездного диска концентрация частиц газа очень мала. У поверхности Земли, например, в 1 см^3 содержится $3 \cdot 10^{19}$ молекул воздуха, а в межзвездном газе на два кубических сантиметра приходится в среднем только один атом газа. Но межзвездный газ занимает такие большие объемы пространства, что его полная масса в Галактике достигает нескольких процентов от суммарной массы всех звезд.

Газ в межзвездном пространстве наблюдается в трех состояниях: ионизованном, атомарном и молекулярном.

Ионизованный газ. Горячие звез-

ды мощным ультрафиолетовым излучением нагревают и ионизуют окружающий межзвездный газ. Нагретый газ излучает свет, и поэтому области, заполненные горячим газом, наблюдаются как светящиеся облака. Они называются *светлыми газовыми туманностями*. Температура газа в них составляет около $10\,000 \text{ K}$.

Самая заметная туманность расположена в созвездии Ориона и называется *туманностью Ориона* (вкл. V). В сильный бинокль или небольшой телескоп она видна как бесформенное облачко со слабым зеленоватым свечением. Это облачко состоит из горячего ионизованного газа, масса которого оценивается примерно в тысячу масс Солнца.

Атомарный газ. Основная масса межзвездного газа в диске Галактики удалена от горячих звезд и поэтому не ионизована и не излучает свет. Но такой «невидимый» газ все же можно наблюдать радиоастрономическими методами. Было доказано (вначале теоретически, а затем подтверждено наблюдениями), что атомы водорода, входящие в состав межзвездного газа, излучают радиоволны с длиной волны $0,21 \text{ м}$ (с частотой 1420 МГц).

Радиоизлучение нейтрального межзвездного водорода было обнаружено в 1951 г. Многочисленные измерения его интенсивности позволили установить общую массу газа в Галактике.

Атомарный газ распределен в пространстве неоднородно. Он образует облака, между которыми газ более разрежен. Типичные размеры облаков достигают нескольких десятков световых лет, а средняя концентрация частиц в них — несколько атомов в 1 см^3 .

Молекулярный газ. Радионаблюдения обнаружили в межзвездном пространстве в тысячи раз более плотные облака, состоящие из очень холодного газа, температура которого не превышает 20—30 К. Из-за низкой температуры и повышенной плотности водород и другие элементы в этих облаках объединены в молекулы. Поэтому их называют *молекулярными*. В основном они состоят из молекул H_2 . Молекулы водорода, в отличие от атомов, не испускают радионизлучения. Зато многие другие молекулы, входящие в состав облаков, излучают радиоволны на определенных частотах. По радионизлучению в молекулярных облаках было найдено несколько десятков молекулярных соединений, например CO , CO_2 , H_2O , NH_3 . Имеются и более сложные молекулы — формальдегида, этилового и метилового спирта и др. Молекулы могут возникать и существовать только в наиболее плотных газовых облаках. В разреженной межзвездной среде под действием ультрафиолетового излучения звезд они быстро распадаются. Масса многих молекулярных облаков превышает 100 тыс. масс Солнца. Это самые массивные образования в диске Галактики.

Предполагают, что в молекулярных облаках происходит зарождение звезд из газа. Существует и обратный процесс — в межзвездную среду непрерывно поступает газ, «сбрасываемый» звездами. Мы уже знаем, что звезды, вспыхивающие как новые и сверхновые, теряют часть своей массы. Но и у обычных звезд, таких, как Солнце, на определенном этапе эволюции (после превращения в красный гигант) происходит отделение газовой оболочки, которая, медленно расши-

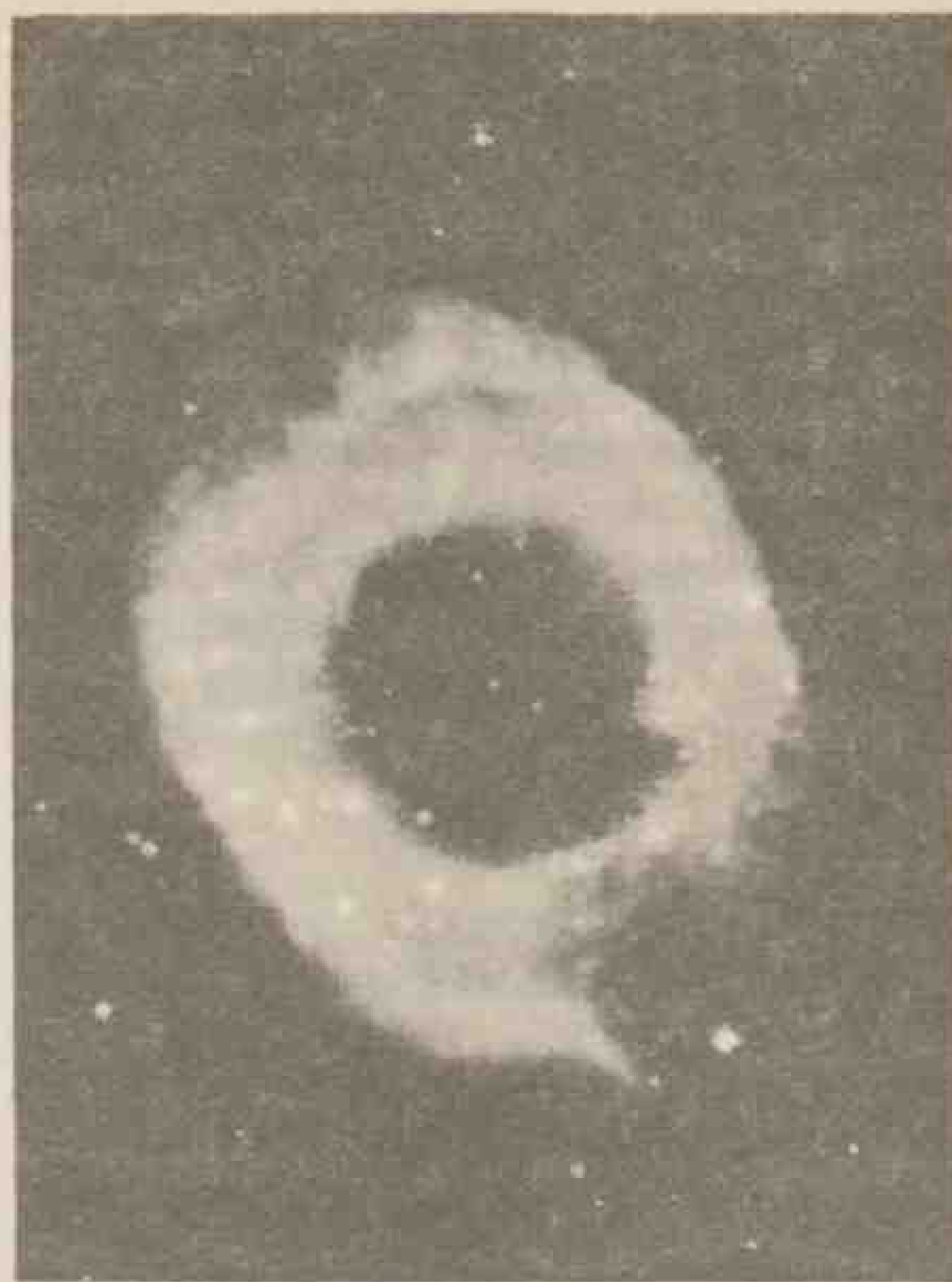


Рис. 30.1. Планетарная туманность в созвездии Водолея

ряясь, уходит в межзвездное пространство. Такие расширяющиеся оболочки известны у сотен звезд. Они называются *планетарными туманностями* (рис. 30.1). В центре планетарной туманности всегда наблюдается звезда. Причина свечения этих объектов та же, что и у светлых газовых туманностей, — ионизирующее ультрафиолетовое излучение горячей звезды.

30.2. Межзвездная пыль. В середине прошлого века известный русский астроном В. Я. Струве обосновал предположение, что межзвездное пространство не абсолютно прозрачно; свет в нем может поглощаться и рассеиваться, вследствие чего далекие звезды выглядят слабее, чем можно ожидать. Газ практически не поглощает видимого излучения. Поэтому, помимо газа, межзвездная среда должна содержать пыль.

Окончательно существование поглощения света в межзвездной среде было доказано в 30-х годах нашего века. В случае сравнительно близких звезд поглощение почти незаметно: чтобы световой поток был ослаблен межзвездной средой всего лишь на один процент, свету требуется пройти расстояние в несколько десятков световых лет. Но если расстояние до звезд измеряется тысячами световых лет, то межзвездная среда ослабляет приходящий от них свет в несколько раз.

Межзвездная среда не только ослабляет свет далеких звезд, но еще и вызывает изменение их цвета. Звезды, свет которых испытал сильное ослабление, кажутся нам более красными. Это происходит потому, что лучи красного света меньше поглощаются и рассеиваются межзвездными пылинками, чем синие. Измеряя ослабление света звезд на различных длинах волн, можно судить о свойствах межзвездной пыли. Выяснилось, что межзвездные пылинки очень мелкие — размером около 0,5 мкм. Они состоят в основном из углерода, кремния и

Рис. 30.2. Темная туманность «Конская голова»



«намерзших» на них молекул межзвездного газа.

В межзвездном пространстве пыль везде сопутствует газу. На ее долю приходится около 1% от массы газа. Поэтому концентрация пыли всегда выше, а прозрачность среды ниже там, где много газа. Это хорошо видно на примере молекулярных облаков — самых плотных газовых облаков в межзвездной среде. Из-за присутствующей в них пыли они практически непрозрачны и выглядят на небе как темные области, почти лишенные звезд. Редкие звездочки, просвечивающие сквозь их менее плотные части, кажутся сильно покрасневшими. Газопылевые образования, которые из-за низкой прозрачности выглядят как темные области, называются *темными туманностями* (рис. 30.2).

В ясную ночь, наблюдая Млечный Путь даже невооруженным глазом, можно заметить, что он имеет неровные очертания, а в созвездии Лебедя даже разделяется на два параллельно идущих рукава. Это наглядный результат проекции на Млечный Путь темных туманностей, большинство которых находится вблизи плоскости Галактики.

Происхождение пыли не вполне еще ясно. Теоретические расчеты и наблюдения показали, что пылинки могут конденсироваться в атмосферах холодных звезд, откуда давление излучения должно выталкивать их в межзвездное пространство.

30.3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле. Помимо разреженного газа и пыли, в межзвездном пространстве с огромной скоростью, близкой к скорости света (300 000 км/с), движется большое число элементарных частиц и ядер

различных атомов. Эти частицы летят по всей нашей Галактике в самых различных направлениях. Они называются *космическими лучами*.

Частицы космических лучей удается регистрировать непосредственно при помощи специальных физических приборов — счетчиков быстрых частиц, устанавливаемых на космических аппаратах. Сквозь атмосферу Земли космические лучи пробиться не могут. Сталкиваясь с атомами земной атмосферы, они разбивают их, рождая целые ливни из элементарных частиц. Лишь небольшой процент космических частиц избегает столкновений в атмосфере и достигает Земли высоко в горах. Поэтому в различных странах организованы специальные высокогорные станции по наблюдению и исследованию космических лучей.

Не все космические частицы приходят к нам из межзвездных глубин. Многие имеют солнечное происхождение. Они рождаются главным образом при солнечных вспышках (§ 26). Однако самые быстрые частицы, летящие с околосветовой скоростью и обладающие огромной энергией, приходят в Солнечную систему из далеких просторов Галактики.

Основными источниками космических лучей в Галактике считаются остатки сверхновых звезд и пульсары — быстро вращающиеся и сильно намагниченные нейтронные звезды.

Мы уже знаем, что остатки сверхновых звезд являются мощными источниками синхротронного радиоизлучения, которое возникает при движении быстрых электронов в магнитном поле. Но наблюдения показали, что синхротронное радиоизлучение приходит к нам и из тех областей межзвездного простран-

ства, где остатков сверхновых звезд нет. Следовательно, и между звездами существует магнитное поле, заставляющее быстрые электроны космических лучей излучать радиоволны.

Исследования показали, что магнитная индукция межзвездного магнитного поля невелика: в среднем она в сто тысяч раз меньше, чем у поверхности Земли. Это поле охватывает и межзвездный газ, поэтому межзвездная среда слабо намагничена.

30.4. Вопросы

1. Как различаются по температуре и концентрации частиц ионизированный, молекулярный и атомарный газы в межзвездном пространстве? 2. Из каких наблюдений можно сделать вывод о существовании межзвездной пыли? 3. Если в направлении на темную туманность наблюдается очень мало звезд, то откуда следует, что это вызвано поглощением света, а не действительным отсутствием звезд в этом направлении? 4. Частицы космических лучей в межзвездном пространстве движутся не прямолинейно. Почему?

30.5. Упражнения

1. Какая масса газа в среднем содержится в межзвездном пространстве в объеме, равном объему земного шара (радиус Земли 6400 км)?

2. Какова масса молекулярного облака диаметром 2 св. года с концентрацией частиц 10^4 молекул в 1 см^3 ? (Считать, что все молекулы — это H_2 .)

31. ОБРАЗОВАНИЕ ЗВЕЗД. ПРОБЛЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЖИЗНИ

31.1. Образование звезд. В § 27 говорилось, что наиболее массивные звезды живут сравнительно недолго — несколько миллионов лет. Если такие звезды наблюдаются, значит, образование звезд не завершилось миллиарды лет назад, а происходит и в настоящую эпоху.

Звезды, масса которых многократно превышает массу Солнца, большую часть жизни обладают огромными размерами, высокой светимостью и температурой. Из-за высокой температуры они имеют голубоватый цвет, и поэтому их называют *голубыми сверхгигантами*. Мы уже знаем, что такие звезды, нагревая окружающий межзвездный газ, приводят к образованию газовых туманностей. За свою сравнительно короткую жизнь массивные звезды не успевают очень далеко уйти от тех мест, где они родились. Поэтому светлые газовые туманности и голубые сверхгиганты указывают нам на положение тех областей в Галактике, где недавно происходило или происходит и сейчас образование звезд.

Оказалось, что молодые звезды не распределены в пространстве случайным образом. Существуют обширные области, где они совсем не наблюдаются, и районы, где их сравнительно много. Больше всего голубых сверхгигантов наблюдается в области Млечного Пути, т. е. вблизи плоскости Галактики, там, где концентрируется газопылевая межзвездная среда.

Но и вблизи плоскости Галактики молодые звезды распределены неравномерно. Они почти никогда не

встречаются поодиночке. Чаще всего эти звезды образуют рассеянные скопления и более разреженные звездные группировки больших размеров, названные *звездными ассоциациями*, которые насчитывают десятки, а иногда и сотни голубых сверхгигантов. Самые молодые из звездных скоплений и ассоциаций имеют возраст менее 10 млн. лет. Почти во всех случаях эти молодые образования наблюдаются в областях повышенной плотности межзвездного газа. Это указывает на то, что процесс звездообразования связан с межзвездным газом.

Примером области звездообразования является гигантский газовый комплекс в созвездии Ориона. Он занимает на небе практически всю площадь этого созвездия и включает в себя большую массу нейтрального и молекулярного газа, пыли и целый ряд светлых газовых туманностей. Образование звезд в нем продолжается и в настоящее время.

Согласно наиболее разработанной гипотезе, звезды возникают из облаков холодного межзвездного газа. Однако завершённой и общепринятой теории образования звезд пока еще не создано. Ученые усиленно работают над этой проблемой. Познакомимся с основными принципами, на которых базируются представления о формировании звезд из газопылевой среды.

Конденсация газа в звезды в определенном смысле напоминает другой физический процесс: конденсацию водяного пара в капельки воды при его охлаждении. И в том и в другом случае происходит многократное увеличение плотности вещества. Но если конденсация пара совершается в результате взаимодействия молекул, то межзвездный газ сжимается прежде всего благо-

даря действию гравитация. Поэтому конденсация газа в звезды называется *гравитационной конденсацией*.

Сила гравитационного притяжения между отдельными частицами всегда стремится сжать газ. Сжатию обычно препятствует сила внутреннего давления газа, связанного с хаотическими движениями его частиц — атомов или молекул. Чем меньше температура газа, тем меньше его давление и тем большую роль может играть притяжение отдельных частиц друг к другу. В обычных облаках межзвездного газа силы гравитации очень малы по сравнению с силами внутреннего давления. Но в холодных плотных молекулярных облаках гравитация оказывается сильнее, и образующиеся отдельные сгустки газовой среды должны сжиматься, увеличивая свою плотность. Конечным результатом такого сжатия может явиться образование звезд. Сжатие газа полностью прекратится, когда в центре сжимающегося газового шара температура и давление станут настолько высокими, что начнутся термоядерные реакции. В результате образуется звезда.

Первое время свет молодой звезды может очень сильно поглощаться плотной окружающей газопылевой средой, и тогда звезда и нагретая ею пыль будут наблюдаться как *инфракрасный источник*, потому что для инфракрасных лучей среда значительно прозрачнее. Такие источники были обнаружены в областях звездообразования. По-видимому, некоторые из них являются недавно сформировавшимися звездами.

Формирование звезд из газа — процесс очень медленный, он требует многих миллионов лет.

Солнце, как мы знаем, является

типичной звездой. Поэтому и при образовании других звезд могут возникать планетные системы.

Планеты и малые тела Солнечной системы возникли в газопылевом *протопланетном диске*, окружавшем молодое Солнце (см. § 16). Вместе с другими планетами возникла и Земля. Первоначально ее атмосфера и физические условия на поверхности были совсем не такими, как сейчас. Температура была значительно выше, а атмосфера содержала очень много углекислого газа. Никакой жизни на Земле в то время не могло существовать. И лишь спустя несколько миллиардов лет после своего формирования Земля стала похожа на современную планету.

31.2. Проблема жизни во Вселенной. Физические условия на древней Земле оказались такими, что оказалось возможным возникновение сложных белковых молекул, а затем и простейших самовоспроизводящихся организмов — живых клеток. На Земле зародилась жизнь, которая за несколько миллиардов лет эволюции и усложнения организмов привела к появлению животного мира и человека.

До сих пор остается неизвестным, как часто подобные события могут происходить во Вселенной. В Солнечной системе признаки жизни не были найдены ни на одном из тел помимо Земли.

Но с астрономической точки зрения ни Земля как планета, ни Солнце, которое ее обогревает, не представляют ничего исключительного. Следовательно, **жизнь может существовать не только на Земле.** По-видимому, очаги жизни следует искать на планетных системах других звезд, но из-за большого расстояния мы пока не можем непосред-

редственно наблюдать планеты даже у ближайших звезд.

Проблема возникновения жизни и ее распространенности во Вселенной остается одной из наиболее сложных и важных проблем, решаемых астрономией в комплексе с другими естественными науками.

Особенно интересным было бы обнаружить присутствие разумной жизни во Вселенной, следы высокоразвитых внеземных цивилизаций. Неоднократно предпринимались и предпринимаются попытки уловить радио- или иные сигналы разумного происхождения из космоса. Есть надежда, что они завершатся успехом.

31.3. Вопросы

1. Опишите предполагаемую последовательность событий, которые привели к образованию Земли и возникновению на ней жизни. 2. Какие силы играют основную роль при формировании звезд и планет?

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА VII

Звезды не распределены в пространстве равномерно. Наблюдается много скоплений из сотен, тысяч и более звезд, которые удерживаются

вместе благодаря силам взаимного притяжения. Среди скоплений встречаются как очень старые, с возрастом более 10 млрд. лет, так и сравнительно недавно возникшие.

Совокупность наблюдаемых вокруг нас звезд образует гигантский звездный «остров» — Галактику, размеры которой превышают сотни тысяч световых лет. Подчиняясь закону всемирного тяготения, звезды, и в том числе Солнце, движутся вокруг центра Галактики со скоростями в сотни километров в секунду. Помимо звезд, в состав Галактики входит разреженная межзвездная среда — газ, пыль и космические лучи, движущиеся в слабом магнитном поле.

Газ в межзвездном пространстве наблюдается в трех состояниях: атомарном, молекулярном и ионизованном (плазменном).

Между звездами и газом постоянно происходит обмен веществом. Звезды, по-видимому, образуются из газа и сами возвращают часть своей массы в межзвездную среду. Вместе со звездами могут возникать и планетные системы. При определенных условиях на некоторых из них должна зарождаться жизнь. Однако вне Земли обнаружить ее пока не удалось.

32. ГАЛАКТИКИ

32.1. Открытие галактик. Давно высказывалось предположение, что наша Галактика — это еще не вся Вселенная, что помимо нее должно существовать много других звездных систем большого размера. Их следует искать среди слабосветящихся пятен — туманностей, которые наблюдаются в телескопы в самых различных областях неба. Правда, некоторые туманности имеют незвездный, эмиссионный спектр. Мы уже знаем, что это области ионизованного межзвездного газа. Но есть и такие, у которых спектр похож на спектр звезд. Это действительно далекие звездные системы. В некоторых из них отчетливо наблюдаются спиралевидные полосы — *ветви*. Самым заметным из подобных объектов на северном небе является туманность Андромеды (вкл. VII). Темной ясной ночью ее можно найти в созвездии Андромеды с помощью бинокля и даже невооруженным глазом.

Чтобы узнать, находятся ли эти звездные острова в нашей Галактике или являются самостоятельными, надо было определить расстояние хотя бы до нескольких из них. Это удалось сделать лишь в 20-х годах нашего века, когда американский астроном Э. Хаббл, используя самый большой в то время рефлектор с зеркалом диаметром 2,5 м, получил четкие изображения отдельных звезд туманности Андромеды и обнаружил среди них переменные звезды — цефеиды. К тому времени был уже известен способ определения расстояний до цефеид (см. § 25), а следо-

вательно, и до той звездной системы, в которой они наблюдаются. Расстояние до туманности Андромеды и других подобных ей объектов оказалось настолько большим, что сразу стало ясно: они не принадлежат Галактике.

По своей природе эти системы аналогичны нашей Галактике, поэтому их стали называть *галактиками* (с маленькой буквы).

Большинство галактик — очень слабые объекты. Всего три галактики заметны невооруженным глазом. Это — Большое (рис. 32.1) и Малое Магеллановы Облака (в южном полушарии неба) и туманность Андромеды. В небольшой телескоп с объективом диаметром 10—15 см на темном безлунном небе можно увидеть несколько десятков галактик, причем большинство из них едва заметны. А с помощью крупных телескопов доступны наблюдениям многие миллионы галактик до 24—28-й звездной величины. Но даже на лучших фотографиях большинство из них выглядит как маленькие пятнышки, во многих случаях с трудом отличимые от изображений звезд. Такими слабыми галактиками буквально усеяно все небо, они наблюдаются в любом направлении. Лишь на фоне Млечного Пути и вблизи него далеких галактик практически не видно из-за поглощения света в межзвездном пространстве нашей Галактики. Пространство же между галактиками, в отличие от межзвездного, оказалось почти совершенно прозрачным. Именно поэтому наблюдениям доступно так много очень далеких галактик.



Рис. 32.1. Большое Магелланово Облако

32.2. Расстояния до галактик.

Несмотря на то что крупные телескопы позволяют получать изображения миллионов отдаленных галактик, почти все, что мы знаем об их природе, составе и физических характеристиках, основано на более подробном изучении нескольких тысяч самых ярких из них.

Ближайшие к нам галактики — это Магеллановы Облака. В южном полушарии они видны невооруженным глазом как два облачка, словно «оторвавшиеся» от Млечного Пути. Свое название Магеллановы Облака получили в связи с тем, что в Европе о них узнали от участников кругосветного путешествия Магеллана. На фотографиях Магеллановых Облаков видно очень много отдельных звезд и звездных скоплений, принадлежащих этим галактикам.

Наблюдения цефеид в Магеллановых Облаках показали, что расстояния до них составляют около 150 000 св. лет. С такого расстояния звезды, подобные Солнцу, можно наблюдать лишь на пределе возможностей современных телескопов. Зато горячие голубые сверхгиганты, которых очень много в этих галактиках, видны прекрасно.

Туманность Андромеды более чем вдесятеро дальше от нас, чем Магеллановы Облака. Расстояние от нее — около 2 млн. св. лет. Но и с такого расстояния с помощью больших телескопов можно наблюдать много звезд высокой светимости, в том числе цефеиды.

Расстояние до более далеких галактик, где цефеиды уже невозможно увидеть, определяется по другим объектам, например по самым ярким звездам галактики (сверхгигантам), по новым или сверхновым звездам или по шаровым звездным скоплениям. Чем дальше галактика, тем слабее кажутся эти объекты. Это и позволяет сделать приблизительную оценку расстояния до нее. До еще более далеких галактик, в которых отдельные объекты плохо различимы или вообще не видны, расстояние определяется *методом красного смещения*, предложенным американским астрономом Э. Хабблом. Он обнаружил, что в спектрах далеких галактик **линии смещены относительно их нормального положения в красную сторону**, и установил, определяя расстояние до галактик по ярчайшим звездам, что относительное увеличение длин волн линий пропорционально расстоянию до галактики D . Эта зависимость получила название **закона Хаббла**. Позднее выяснилось, что красное смещение связано с эффектом Доплера (далекие

галактики удаляются от нас). Причина этого явления будет рассматриваться в разделе IX.

Зависимость между красным смещением и расстоянием до галактик, полученная по данным современных наблюдений, показана на рис. 32.2.

Красное смещение обычно измеряется относительным изменением длины волны спектральных линий $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$. Мы знаем (см. § 14.2), что лучевая скорость, с которой источник света удаляется от нас, равна скорости света, умноженной на это отношение: $v_r = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0}$. Так как по

закону Хаббла $D \sim \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, то этот закон можно записать как линейную зависимость между скоростью v_r и расстоянием D до галактики:

$$v_r = HD. \quad (32.1)$$

Коэффициент пропорциональности H , называемый постоянной Хаббла, показывает, на сколько километров в секунду возрастает скорость галактик с увеличением расстояния до них на 1 Мпк. Определение величины H оказалось исключительно трудной задачей. По различным оценкам значение H заключено в пределах 50—100 км/(с·Мпк). Часто принимают $H = 75$ км/(с·Мпк). В этом случае удаление галактики со скоростью 15 000 км/с говорит о расстоянии до нее $D = \frac{v}{H} = 200$ Мпк, или около 600 млн. св. лет.

Закон Хаббла выполняется только для далеких галактик, расстояние до которых превышает 5—10 Мпк. Некоторые близкие галактики (в том числе туманность Андромеды) даже приближаются к нам, т. е. имеют не красное, а фиолетовое смещение линий.

В настоящее время красные смещения измерены у нескольких тысяч галактик. Самые далекие из них расположены на таком большом расстоянии от нас, что свету потребовалось около 10 млрд. лет, чтобы его преодолеть.

32.3. Типовая задача. Определение расстояния до галактики и ее размера.

Условие. Найти расстояние до галактики и ее линейный размер, если известно, что длины волн всех спектральных линий в спектре галактики увеличены из-за эффекта Доплера на 10%. Угловой размер галактики составляет 1'.

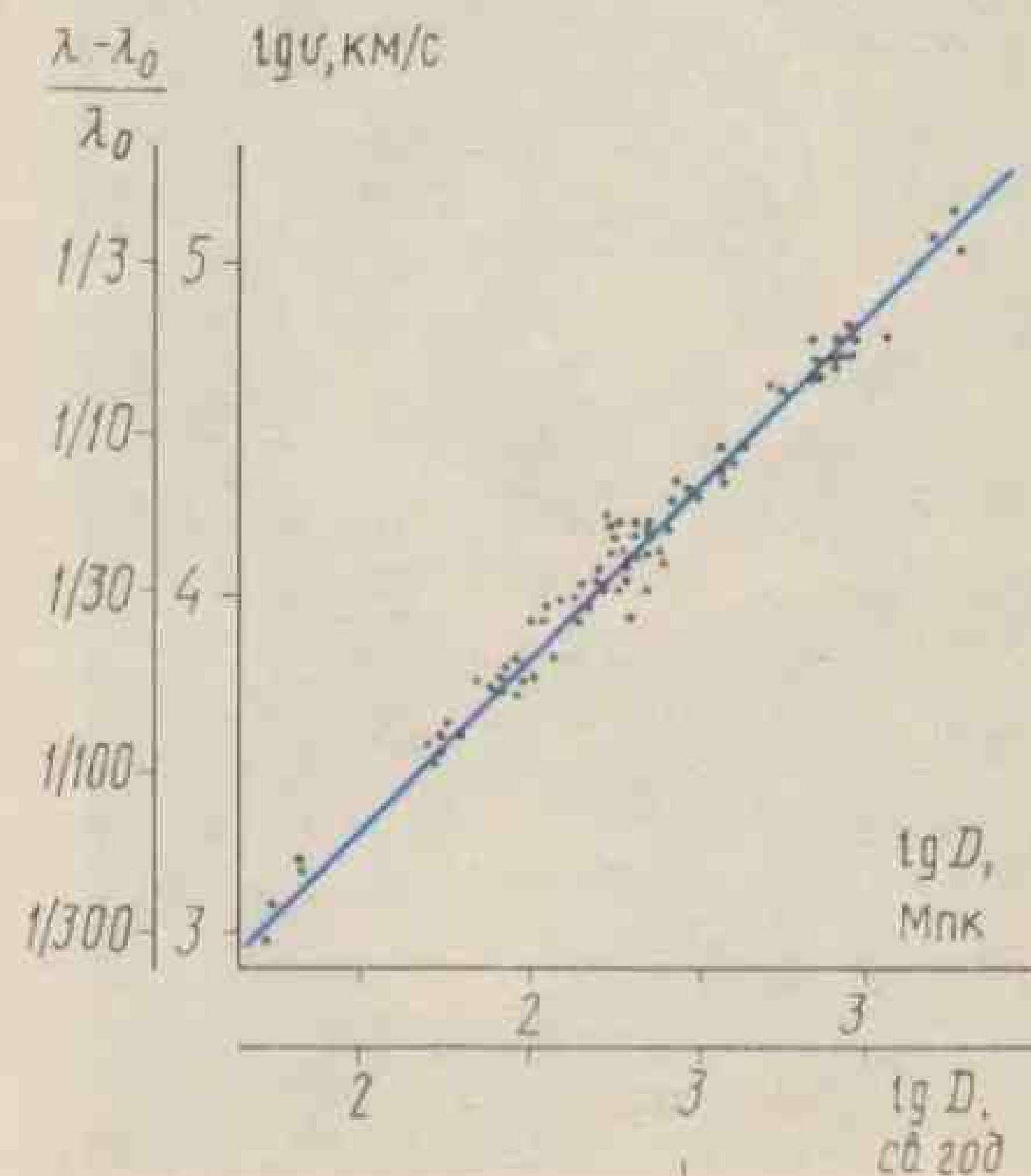
Решение. По закону Хаббла

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

Подставляя в полученную формулу значения величин

$$\begin{aligned} c &= 3 \cdot 10^5 \text{ км/с}, \\ \Delta\lambda/\lambda_0 &= 0,1 \text{ и } H = \\ &= 75 \text{ км/(с·Мпк)}, \end{aligned}$$

Рис. 32.2. Зависимость красного смещения от расстояния (масштаб логарифмический)



получим

$$D = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ км/с} \cdot 0,1}{75 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}} = 400 \text{ Мпк.}$$

Линейный размер

$$d = D \sin (1') = \frac{400 \text{ Мпк}}{3438} = \\ = 0,116 \text{ Мпк} = 116 \text{ кпк.}$$

32.4. Типы галактик. Большинство наблюдаемых галактик можно отнести по внешнему виду к одному из трех типов.

Первый тип — эллиптические галактики. Они напоминают шаровые звездные скопления, только несравненно больше их по размеру и иногда имеют заметно сплюснутую форму. Примером эллиптической галактики может служить галактика в созвездии Девы (вкл. VIII).

Рис. 32.3. Спиральная галактика в созвездии Гончих Псов



Расстояние до нее — около 400 млн. св. лет. Эта галактика — одна из самых массивных, известных нам. По массе и числу звезд она в несколько десятков раз больше, чем наша Галактика. Но такие гигантские галактики встречаются очень редко. Гораздо чаще мы наблюдаем небольшие эллиптические галактики, такие, как две эллиптические галактики — спутники туманности Андромеды, которые хорошо видны на фотографии (см. вкл. VII).

Второй тип — спиральные галактики (рис. 32.3). Как говорит название, в этих галактиках видны спиральные ветви. К их числу относится туманность Андромеды — ближайшая к нам спиральная галактика. **Наша Галактика тоже спиральная**, хотя, находясь внутри ее, непосредственно видеть спирали мы не можем. Однако мы знаем об их существовании по радионаблюдениям межзвездного газа, который расположен в галактическом диске преимущественно в спиральных ветвях. Большинство наблюдаемых галактик — спиральные.

Третий тип — неправильные галактики. Они получили свое название из-за своей неправильной, несимметричной формы. Спиральных ветвей у них нет, зато, как правило, наблюдается много межзвездного газа и областей ионизованного водорода. К числу галактик этого типа относится Большое Магелланово Облако (см. рис. 32.2).

32.5. Состав и структура галактик. Галактики — это самые крупные звездные системы в природе. Звезды в них притягивают друг друга, поэтому каждая галактика может существовать как изолированный звездный остров. Наблюдаемые галактики различаются по составу и структуре.

Большинство спиральных галактик похоже на нашу Галактику. Звезды в них также образуют массивный диск и концентрирующуюся к центру сферическую составляющую. Эти две звездные составляющие особенно хорошо видны, когда мы наблюдаем диск галактики с «ребра». Примером может служить галактика Сомбреро, находящаяся в созвездии Девы (вкл. VIII).

Спиральные ветви расположены в дисках галактик. Они выделяются своей яркостью обычно из-за того, что в них много молодых, недавно возникших ярких звезд. Следовательно, звезды образуются в спиральных ветвях галактик.

В эллиптических галактиках нет заметных звездных дисков, а потому и спиральных ветвей. Эти галактики как бы состоят из одной сферической составляющей.

В неправильных галактиках, наоборот, почти не заметна сферическая составляющая. Большинство звезд находится в звездном диске, только спиральных ветвей в нем нет.

Диски всех галактик вращаются. Измерив скорости их вращения с помощью эффекта Доплера, вычисляют массы галактик примерно так, как это было сделано для нашей Галактики (см. § 29.2). Большинство наблюдаемых галактик имеет массу в десятки и сотни миллиардов масс Солнца. Помимо звезд, в галактиках присутствует межзвездная среда — газ и пыль.

Межзвездная пыль лучше всего заметна в галактиках, диск которых виден нам с «ребра» (см. вкл. VIII). Пыль, находящаяся в плоскости диска, поглощает свет звезд, и галактика из-за этого кажется пересеченной темной полосой.

Газ в галактиках исследуется теми же методами, что и в нашей

Галактике. Нейтральный водород наблюдается по его излучению на длине волны 0,21 м (или несколько большей, если спектр галактики обладает заметным красным смещением, так как оно увеличивает длины волн любого излучения, в том числе и радиоволн). Если в галактике есть ионизованный газ, нагретый горячими звездами, то в ее спектре будут присутствовать линии излучения этого газа. Самые крупные области ионизованного газа видны на фотографиях ближайших галактик как светлые клочковатые облака.

Межзвездный газ в галактиках обычно составляет несколько процентов от полной массы звезд. Больше всего газа встречается в неправильных галактиках (иногда до 50% по массе), меньше всего — в эллиптических, где в большинстве случаев заметных следов газа или пыли нет вообще.

Наблюдения подтвердили, что существует связь между массой межзвездного газа и числом молодых звезд в галактиках: там, где газа очень мало, почти или совсем нет молодых звезд.

Среди молодых звезд большой светимости всегда присутствуют голубые сверхгиганты. Поэтому галактики, в которых интенсивно возникают звезды, более «голубые». В неправильных галактиках, содержащих много межзвездного газа, молодые звезды особенно многочисленны. Это самые «голубые» галактики. Эллиптические галактики, где межзвездный газ обычно не наблюдается, имеют более «красный» цвет, чем спиральные или неправильные; молодых звезд в них или совсем нет, или очень мало. Такая связь между газом и молодыми звездами считается одним из свидетельств того, что звезды возникают из газа.

32.6. Вопросы

1. Чем галактики отличаются от звездных скоплений? 2. Перечислите ближайшие к нам галактики, которые можно наблюдать невооруженным глазом. К каким типам они принадлежат? К какому типу относится наша Галактика? 3. С помощью эффекта Доплера измерили лучевую скорость туманности Андромеды. Оказалось, что она приближается к нам. Означает ли это, что когда-нибудь обязательно произойдет столкновение? 4. Мы видим туманность Андромеды, какой она была 2 млн. лет назад. Какие изменения в принципе мы могли бы в ней заметить, если бы сумели увидеть, какой она является сейчас? 5. Почему галактики, наблюдаемые вблизи Млечного Пути, имеют в среднем более красный цвет, чем вдали от него? 6. Почему спиральные ветви обычно отличаются от остальных областей галактик более голубым цветом?

32.7. Упражнения

1. Галактика удаляется со скоростью 10 000 км/с и имеет размер 1'. Сколько времени потребуется для луча света, чтобы пересечь ее по диаметру?

2. На какой длине волны приходит к нам излучение атомов межзвездного водорода от галактики, удаленной на расстояние 1300 Мпк? (Постоянную Хаббла считать равной 75 км/(с·Мпк). Длина волны излучения неподвижного источника — 0,21 м.)

3. Из-за красного смещения длина волны спектральных линий галактики увеличена в 1,2 раза. Каково расстояние до галактики в световых годах?

4. Чему (примерно) равна масса галактики, если наиболее далекие от ее центра звезды движутся в ее диске со скоростью 200 км/с вокруг центра? Радиус диска — 20 000 св. лет.

33. НЕОБЫЧНЫЕ ГАЛАКТИКИ

33.1. Взаимодействующие галактики. Галактики, как и звезды, далеко не всегда бывают одиночными. Они часто образуют системы: пары, группы или обширные скопления, содержащие до нескольких тысяч отдельных галактик (рис. 33.1). Например, наша Галактика вместе с Магеллановыми Облаками, туманностью Андромеды и несколькими десятками более мелких галактик образует небольшое скопление — так называемую *Местную группу*.

Во всех системах галактики находятся в непрерывном движении. Из-за больших расстояний мы не можем наблюдать их относительного перемещения, но эффект Доплера позволяет измерять скорости относительного движения галактик. Они составляют, как правило, сотни километров в секунду. В отличие от звезд, которые практически никогда, даже в самых плотных скоплениях, не сталкиваются друг с другом, многие галактики, входящие в состав систем, из-за своих больших размеров время от времени неизбежно «задевают» друг друга и даже сталкиваются. Ничего катастрофического при этом не происходит, ведь звезды в галактиках располагаются достаточно редко. Поэтому столкновения галактик не вызывают столкновений звезд. Близкие прохождения галактик сопровождаются другими, хорошо заметными явлениями: ис-

кажением формы из-за мощных приливов, потерей галактиками части звезд и межзвездного газа. В некоторых случаях соседние галактики наблюдаются в общей оболочке из покинувших их звезд. Часто между близкими галактиками заметны перемычки из звезд или газа или наблюдаются длинные «хвосты», уходящие от них далеко в межгалактическое пространство. Близкие друг к другу галактики с заметным искажением формы получили название *взаимодействующих* (рис. 33.2).

Основная причина, приводящая к необычным формам взаимодействующих галактик, связана с их гравитационным влиянием друг на друга. Звезды каждой галактики движутся вокруг ее центра, повинаясь закону всемирного тяготения. Внешнее гравитационное поле соседней галактики неизбежно изменяет их пути. Эти изменения в разных областях галактики будут различными. Возникают явления, аналогичные земным приливам, когда под действием гравитационного поля соседнего тела меняется форма объекта. Приливные искажения взаимодействующих галактик могут быть очень сильными и даже привести к частичному их разрушению или слиянию в одну систему.

Наша Галактика вместе с ее ближайшими спутниками — Магеллановыми Облаками — также образует взаимодействующую систему. Радионаблюдения на волне излучения нейтрального водорода обнаружили, что от Магеллановых Облаков в сторону нашей Галактики движется поток газа, полная масса которого составляет не менее 100 млн. масс Солнца. На небе этот поток образует длинную неровную полосу, протянувшуюся более чем на 90° из южного небесного полу-



Рис. 33.1. Центральная часть скопления галактик в созвездии Геркулеса



Рис. 33.2. Взаимодействующие галактики

шария в северное. Он получил название *Магелланова Потока*. Ни в какие оптические телескопы его

не видно. Этот пример показывает, что взаимодействие между галактиками затрагивает не только звезды, но и большие массы межзвездного газа.

33.2. Галактики с активными ядрами. Напомним, что ядром называется центральная, наиболее яркая и плотная часть галактики. Как и ядро нашей Галактики, ядра других галактик состоят в основном из звезд, но в некоторых из них, в самом их центре, происходит колоссальное выделение энергии, которое нельзя объяснить излучением или взрывами обычных звезд. Такие галактики получили название галактик с активными ядрами.

Энергия в активных ядрах галактик может выделяться в самых различных формах. Перечислим основные из них.

1. Иногда в центре галактики наблюдается мощный источник электромагнитных волн (видимого, инфракрасного или ультрафиолетового излучения, а в редких случаях — радио- и рентгеновского). Светимость центрального источника может составлять заметную долю от светимости галактики в целом, хотя сам источник занимает очень небольшую область в центре галактики размером менее одного светового года. Во многих галактиках мощность излучения центрального источника непостоянна. Она может заметно изменяться за месяцы или даже за несколько недель.

2. В центре галактики присутствует газ, излучающий яркие и широкие эмиссионные линии и движущийся со скоростью в несколько тысяч километров в секунду, т. е. в десятки раз быстрее, чем звезды.

3. Из ядра происходит выброс мощных потоков космических лучей,

чаще всего в двух противоположных направлениях. Удаляясь от ядра галактики, электроны космических лучей рожают мощное синхротронное радиоизлучение. Вблизи таких галактик образуются радиоисточники колоссального размера, часто во много раз больше самой галактики. Как правило, они располагаются симметрично по обе стороны от нее.

Галактики, являющиеся мощными радиоисточниками, называются *радиогалактиками*. Это одна из разновидностей галактик с активными ядрами. Примером может служить уже упоминавшаяся эллиптическая галактика в созвездии Девы (вкл. VIII). Мощность ее радиоизлучения составляет 10^{35} Вт. Это в сто тысяч раз больше, чем у обычных галактик, таких, как наша. Ближайшей к нам радиогалактикой является галактика Центавр А (вкл. VIII).

Галактики с высокой активностью ядер составляют несколько процентов от числа всех наблюдаемых галактик. Среди ближайших к нам галактик их нет. Наша Галактика также не относится к их числу.

33.3. Квазары. В 60-х годах были обнаружены объекты, подобные активным ядрам галактик. Это квазизвездные объекты, т. е. объекты, похожие на звезды. Часто их также называют *квазарами*. Слово «квазар» образовано от слов «квазизвездные радиоисточники». Такое название связано с тем, что квазизвездные объекты впервые были обнаружены по их радиоизлучению (хотя впоследствии оказалось, что многие квазары не являются радиоисточниками). На фотографиях они выглядят как ничем не примечательные слабые голубоватые звездочки. Но первые же спектральные наблюдения показали всю их не-

обычность. Спектры квазаров совсем не похожи на спектры звезд. В отличие от последних, они содержат яркие эмиссионные линии. Спектральные линии сильно смещены в красную сторону, как у далеких галактик. Расстояния, определенные по красному смещению, для многих квазаров превышают 5 млрд. св. лет. Некоторые из них наблюдаются с таких расстояний, на которых обычные галактики уже нельзя обнаружить.

Квазары — самые далекие тела, наблюдаемые во Вселенной. Они могут быть обнаружены с очень больших расстояний благодаря своей гигантской светимости, которая достигает $(10^{12}—10^{13}) L_{\odot}$. Это в десятки и сотни раз выше, чем светимость нормальной галактики. Особенно много энергии квазары излучают в инфракрасной области спектра.

Квазары — самые мощные из известных в природе источники видимого и инфракрасного излучений.

По своим свойствам квазары похожи на активные ядра внутри галактик. Как и в активных ядрах галактик, в квазарах наблюдается излучение горячего и быстро движущегося газа, скорость которого измеряется тысячами километров в секунду. Подобно активным ядрам, многие квазары заметно изменяют свою яркость за несколько месяцев или лет. Специально проведенные исследования показали, что вокруг многих из них наблюдается слабое свечение, объясняющееся присутствием звезд. Это говорит о том, что квазары действительно находятся внутри галактик, хотя яркое ядро превосходит их звездный компонент по светимости.

Все квазары (или по крайней мере значительная их часть) — это ядра далеких галактик, находящиеся

в состоянии очень высокой активности.

Природа различных форм активности ядер галактик и квазаров, их происхождение и источники энергии до сих пор точно не установлены. Предложено несколько теоретических схем, объясняющих их основные свойства. Они проверяются и уточняются астрономическими наблюдениями.

33.4. Вопросы

1. Радиоизлучение радиогалактик имеет синхротронную природу. Вспомните, какие обсуждавшиеся нами ранее объекты также обладают синхротронным радиоизлучением.
2. Как по наблюдениям можно отличить звезды от квазаров?
3. О большой скорости, с которой по различным направлениям движется газ в активных ядрах галактик и квазарах, свидетельствует необычный вид линий излучения в их спектрах: они очень широкие. Объясните почему.
4. Вывод о том, что источники мощного излучения в активных ядрах галактик и квазаров имеют размеры существенно меньше 1 св. года, был сделан на основании того, что их яркость может заметно меняться за время меньше года. На чем основано это заключение?

33.5. Упражнения

1. Самый яркий и один из самых близких квазаров выглядит как звездочка 13-й звездной величины. Будет ли он виден в телескоп с диаметром объектива 10 см?
2. Квазар, рассмотренный в предыдущей задаче, имеет красное смещение $\Delta\lambda/\lambda = 0,16$. Определите расстояние до него (в м, пк и св. г.) и светимость (в $L_{\odot}$).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА VIII

Современные телескопы дают возможность наблюдать миллионы далеких звездных островов — галактик. До сравнительно близких галактик расстояния можно определить по отдельным наблюдаемым в них звездам, а до далеких — по смещению линий в их спектрах.

Выделяют эллиптические, спиральные и неправильные галактики. Они отличаются друг от друга по форме, звездному составу и массе межзвездного газа. В спиральных и неправильных галактиках звезды и газ образуют вращающийся диск

очень больших размеров (обычно десятки тысяч световых лет). В этих галактиках, наряду со старыми, наблюдаются молодые, недавно сформировавшиеся звезды.

Во внутренних, наиболее плотных областях галактик — в их ядрах — во многих случаях наблюдаются процессы выделения огромной энергии, не связанной с излучением обычных звезд.

Объектами, родственными по природе активным ядрам галактик, являются квазизвездные объекты (квазары). Это — самые мощные источники энергии, известные в природе.

IX. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

34. РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

34.1. Красное смещение и расширение Вселенной. Самый грандиозный процесс во Вселенной — это ее расширение. *Расширением Вселенной* называется непрерывное увеличение средних расстояний между далекими объектами — галактиками, их скоплениями, квазарами. Доказательством существования такого процесса служат наблюдаемые красные смещения линий в спектрах далеких галактик, пропорциональные расстоянию до них. Согласно эффекту Доплера, такие смещения линий указывают на удаление этих галактик от нас. На первый взгляд может показаться, что наша Галактика занимает какое-то особое положение, если другие объекты от нее удаляются. В действительности это не так: одинаковым образом растет расстояние и между другими галактиками, так что если бы мы проводили наблюдения с любой из них, то все равно обнаружили бы такую

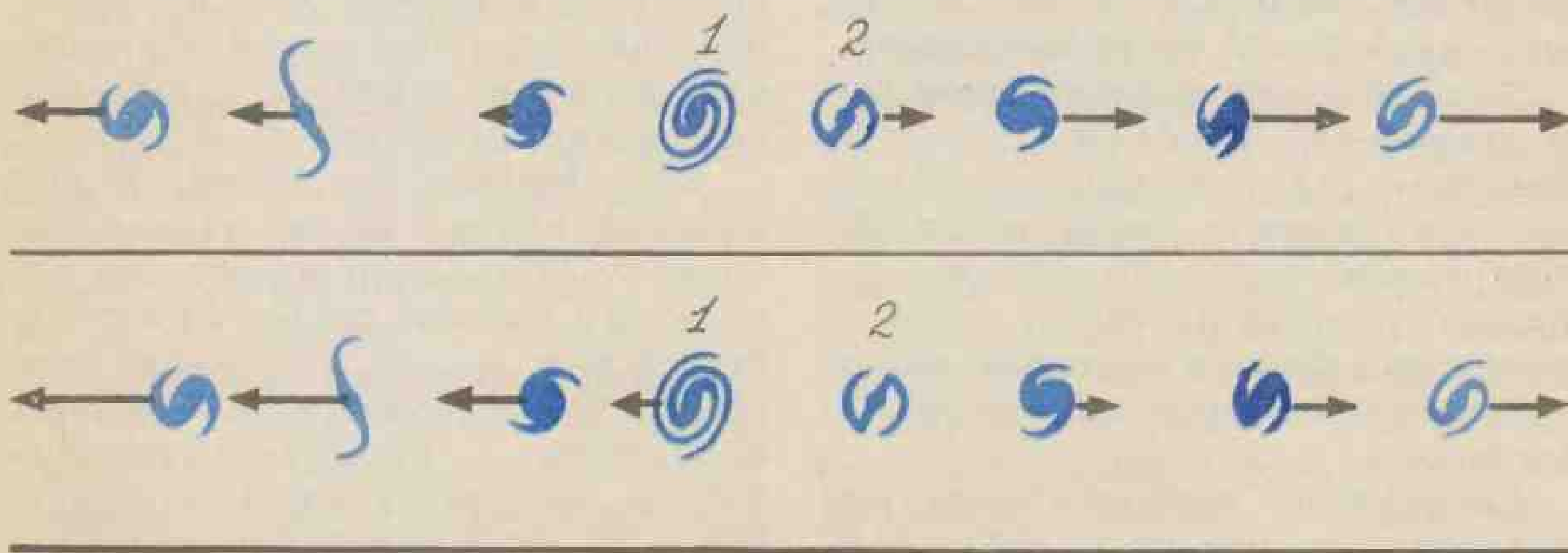
же картину: скорости удаления объектов тем выше, чем они дальше от наблюдателя (рис. 34.1).

Закон пропорциональности скорости удаления расстоянию до галактик, называемый *законом Хаббла*, используется, как мы уже знаем, для определения расстояний до далеких объектов (см. § 32.2).

Сами галактики не расширяются. Сила гравитации удерживает их звезды вместе. Удаление далеких галактик друг от друга не является результатом действия каких-то сил отталкивания между ними. Это следствие того, что быстро расширялась та среда, из которой возникли галактики. Можно сказать, что они продолжают удаляться друг от друга по инерции.

Чтобы примерно оценить, когда началось расширение, достаточно

Рис. 34.1. Схема взаимного удаления галактик. Длина стрелок показывает для каждой галактики ее скорость относительно галактики 1 (вверху) 2 (внизу)



знать значение постоянной Хаббла H . Далекие объекты, находящиеся на расстоянии D от нашей Галактики (или любой другой), удаляются со скоростью HD . Значит, рядом друг с другом они были $D/HD = H^{-1}$ лет назад. Если $H \approx 75$ км/(с·Мпк), то, учитывая, что $1 \text{ Мпк} \approx 3 \times 10^{19}$ км, получаем $H^{-1} \approx 4 \cdot 10^{17}$ с, или немногим более 10 млрд. лет. Но эта оценка лишь приблизительна. Принято считать, что расширение Вселенной началось между 10 и 20 млрд. лет назад.

34.2. Необратимые изменения во Вселенной. Во Вселенной медленно и непрерывно происходят изменения, которые могут иметь необратимый характер. Одно из них — это расширение Вселенной. Оно приводит к тому, что постепенно увеличиваются средние расстояния между галактиками. Меняются и сами галактики. Со временем падает интенсивность образования звезд в них — ведь запасы вещества, из которого образуются звезды, в каждой галактике ограничены. В большинстве эллиптических галактик образование звезд уже давно прекратилось. В звездах водород превращается в другие, более тяжелые элементы. Значит, меняется химический состав вещества во Вселенной. Этот процесс также необратим. **Вселенная меняется и не всегда была такой, какой мы ее наблюдаем.**

Астрономические наблюдения дают уникальную возможность видеть объекты в далеком прошлом. Из-за того что скорость света и других электромагнитных волн конечна, мы видим источники излучения такими, какими они были в прошлом, когда испустили дошедшие до нас световые волны.

Специально проводившиеся на ограниченных участках неба под-

счеты очень слабых и далеких галактик согласуются с предположением о том, что они раньше были ближе друг к другу, чем сейчас, и содержали больше молодых (голубых) звезд. Поскольку Вселенная расширяется, в еще более далеком прошлом галактики должны были находиться совсем близко друг от друга, а на самых ранних этапах расширения они вообще не могли существовать обособленно. Вещество, которое сейчас образует звезды и галактики, представляло собой в то время сплошную, быстро расширяющуюся газовую среду, состоящую из легких элементов (водорода и гелия). Предполагают, что на определенной стадии расширения этого первичного газа его первоначально очень высокая температура упала, газ остыл и под действием сил гравитации начал сжиматься в отдельные сгустки, из которых впоследствии возникли звездные острова — галактики — и их системы — скопления галактик.

Мы уже знаем, что наиболее старые звезды нашей Галактики имеют возраст, превышающий 10 млрд. лет. Изучение звездного состава других галактик показало, что и в них, так же как и в нашей, присутствуют очень старые звезды. Следовательно, наблюдения согласуются с выводами о том, что образование большинства галактик произошло очень давно, на определенном этапе расширения Вселенной.

34.3. Модели Вселенной. В астрономии, как и в других науках, для изучения того или иного объекта или сложного явления создается его теоретическая модель. С одной стороны, она опирается на данные, полученные в результате экспериментов или наблюдений, а с другой — на фундаментальные законы

физики. Так, существуют модели Земли, планет, звезд и галактик, описывающие основные физические свойства этих объектов. Любая модель — это только приближение к действительности. В процессе развития науки модели могут уточняться, становиться более детально разработанными или же заменяться новыми, если вошли в явный конфликт с наблюдениями. Неоднократно предпринимались попытки построить модель всего окружающего мира. Древние геоцентрические модели, помещавшие Землю в центр мироздания, — это также модели мира, но опирались они на скудные физические представления того времени.

Первые физически обоснованные модели всей безграничной Вселенной, широко используемые и в настоящее время, были разработаны советским физиком А. А. Фридманом в 20-х годах на основе незадолго до этого созданной теории гравитации (общей теории относительности) А. Эйнштейна. В этих моделях предполагается, что вещество однородно распределено по всей Вселенной, так что в ней все области или направления совершенно равноправны. Поэтому такие модели называют *однородными* и *изотропными*.

Реальная Вселенная сложнее любой модели. Если бы вещество в ней действительно представляло идеальную однородную среду, то откуда же взялись бы такие сгущения вещества, как звезды или их системы? Однако наблюдения далеких галактик и их скоплений показывают, что в больших масштабах (порядка сотен Мпк) вещество действительно распределено более или менее однородно. Поэтому модели Фридмана описывают поведение материи только

в больших масштабах. Они дают возможность математически рассчитать, как должны изменяться плотность материи в безграничной Вселенной и геометрические свойства пространства, начиная с состояния очень высокой (но не бесконечно высокой) плотности.

Самым важным выводом, который следует из этих расчетов, является вывод о том, что Вселенная не может оставаться неизменной, стационарной. Вселенная должна расширяться или сжиматься под действием гравитации. Как следствие этого, средняя плотность вещества падает или возрастает. Во времена Фридмана ничего не было известно о движении галактик. Но вскоре Э. Хаббл обнаружил зависимость красного смещения линий в спектрах галактик от расстояния до них (закон Хаббла), которая свидетельствовала об удалении галактик друг от друга. Именно такой закон и вытекал из моделей Фридмана, описывающих расширяющуюся Вселенную. Поэтому можно сказать, что возможность расширения Вселенной была теоретически предсказана до его открытия.

Модели Фридмана отличаются друг от друга такими параметрами, как средняя плотность вещества и значение постоянной Хаббла. Эти величины известны не очень точно (особенно первая), что не позволяет надежно выбрать более «правильную» модель. Модели Фридмана дают различные предсказания лишь для очень далекого будущего: в некоторых моделях расширение Вселенной должно происходить вечно, в некоторых — смениться сжатием. Что касается прошлого, то выводы всех моделей одинаковы: расширение Вселенной началось с очень большой плотности вещества, при кото-

рой было бы немыслимо существование не только звезд или галактик, но даже отдельных атомов.

На основании моделей Фридмана была разработана физическая картина эволюции вещества, начиная с очень высоких плотностей, когда вещество представляло собой быстро взаимодействующие друг с другом элементарные частицы. Удалось рассчитать, какие химические элементы могли возникнуть в результате этого взаимодействия на начальном этапе расширения Вселенной. Оказалось, что тогда успели возникнуть только атомы водорода и гелия (примерно 10 атомов H на 1 атом He). Все остальные элементы образовались позднее (главным образом в результате ядерных реакций в недрах звезд и при взрыве звезд). И действительно, такая картина очень хорошо согласуется с измерениями химического состава звезд и галактик, которые состоят в основном из водорода и гелия.

34.4. Реликтовое излучение. Очень важное подтверждение правильности нестационарных моделей Вселенной было получено с открытием *реликтового излучения*, исследование которого существенно обогатило наши представления о ранних этапах расширения Вселенной.

В 60-х годах при проверке работы приемников радиоизлучения для связи со спутниками (т. е. в значительной степени случайно) было обнаружено, что из космического пространства непрерывно приходит радиоизлучение на очень коротких длинах волн. Оно исходит не из отдельных источников, а отовсюду, из любой точки неба.

Распределение энергии в спектре этого излучения показало, что по своей природе оно тепловое (см.

§ 14). Его основная энергия приходится на диапазон сантиметровых и миллиметровых радиоволн. Такой спектр имело бы тепловое излучение любой непрозрачной среды, нагретой до 3 К. Поэтому обнаруженное радиоизлучение часто называют *трехградусным*.

Это излучение не связано ни с какими наблюдаемыми объектами и существует как бы независимо от них. Оно заполняет пространство между звездами и галактиками и поэтому несет в себе очень большую энергию. Даже если бы все существующие или ранее существовавшие звезды в галактиках разом отдали свои запасы термоядерной энергии, то вся выделившаяся энергия была бы во много раз меньше, чем та, которая заключена в реликтовом излучении. Следовательно, его природа не связана с активностью наблюдаемых звезд или галактик.

Существование подобного излучения было предсказано учеными еще до его открытия на основании моделей расширяющейся Вселенной. Согласно современным представлениям, оно возникло на раннем этапе расширения, когда еще не существовало ни звезд, ни галактик (это и объясняет название излучения — *реликтовое*, т. е. древнее, остаточное). Предполагается, что среда, заполнявшая такую «беззвездную» Вселенную, представляла собой горячий газ, излучавший электромагнитные волны по всем направлениям. Спектр излучения этого газа соответствовал его температуре согласно закону Вина (§ 14). Со временем, вследствие расширения, плотность газа уменьшилась и он стал прозрачным, как рассеявшийся туман. С тех пор связанное с ним излучение, перестав поглощаться, со скоростью света распространяется по

всей безграничной Вселенной. На Земле принимаются сейчас потоки реликтового излучения, которые родились в горячей среде более 10 млрд. лет назад. Мы их можем до сих пор наблюдать потому, что они приходят с очень больших расстояний, для преодоления которых потребовалось столько времени. Вспомним: чем больший путь проделывают электромагнитные волны, которые мы улавливаем, тем в более далеком прошлом они были испущены.

Первичный газ, который «породил» реликтовое излучение, имел температуру в тысячи кельвинов, и максимум в спектре его излучения в соответствии с законом Вина должен был приходиться на оптическую область спектра. Но красное смещение, связанное с расширением Вселенной, «сдвинуло» этот максимум в радиодиапазон, увеличив длины волн света примерно в тысячу раз. Вот почему спектр реликтового излучения соответствует сейчас температуре всего 3 К.

Исследования реликтового излучения помогают лучше понять те сложные процессы, которые происходили во Вселенной миллиарды лет назад. Но пока не получено ответа на важнейший вопрос: с какой плотности вещества началось расширение Вселенной и что существовало до этого? Модели Фридмана не могут дать ответа. Требуются не только новые астрономические исследования, но и дальнейшее развитие теоретической физики, изучающей фундаментальные свойства материи элементарных частиц, без чего невозможно найти объяснение сложным физическим явлениям, происходившим на ранней стадии расширения при фантастически высоких плотностях и температурах.

Над этими проблемами работают наши современники.

34.5. Заключение. Всего лишь за последние несколько десятилетий в общих чертах стало выясняться, как устроена и из чего состоит наблюдаемая область Вселенной. Многим сложным процессам удалось найти объяснение, однако далеко не все наблюдаемые астрономические явления стали для нас понятными. О природе некоторых из них мы судим лишь предположительно. Немало важных открытий наверняка еще предстоит сделать в будущем. Особенно много нерешенных вопросов связано с происхождением и эволюцией астрономических объектов и всей наблюдаемой области Вселенной. Тем не менее вся история развития науки показывает, что человек в состоянии понять наблюдаемый мир, найти объяснение происходящим в нем процессам. Исследование безграничного мира, окружающего нашу крошечную планету, расширяет кругозор человека, дает ему знание фундаментальных законов природы, которым в равной степени подчиняется материя как здесь, на Земле, так и на невообразимо больших расстояниях от нее.

34.6. Вопросы

1. Как объясняется красное смещение, о чем оно говорит? 2. Какой физический смысл имеет постоянная Хаббла? 3. Перечислите основные аргументы, говорящие о том, что окружающая нас Вселенная медленно меняется со временем. 4. Если бы Вселенная не расширялась, а бесконечное множество галактик — таких, как мы наблюдаем сейчас, — существовало вечно, то все небо от них ярко бы светилось. Объясните почему. 5. Какому значению

постоянной Хаббла соответствуют расстояния до галактик, принятые при построении диаграмм на рис. 32.3?

34.7. Упражнения

1. Первые грубые оценки постоянной Хаббла привели к ошибочному значению $H = 530$ км/(с $\times$ Мпк). Как давно должно было начаться расширение Вселенной при таком значении H ?

2*. Действительно ли постоянная Хаббла H постоянна во времени? Считая, что скорости галактик друг относительно друга не меняются, найдите, чему будет равно H через 6 млрд. лет. (Современное значение

H принять равным 75 км/(с $\times$ Мпк).)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАЗДЕЛА IX

Красное смещение линий в спектрах далеких галактик интерпретируется как постепенное увеличение расстояний между удаленными друг от друга галактиками или их скоплениями. Расширение Вселенной началось между 10 и 20 млрд. лет назад. На ранней стадии расширения еще не могло существовать отдельных звезд и галактик. Вещество представляло собой первоначально очень плотный горячий газ. Подтверждением этого вывода явилось открытие реликтового электромагнитного излучения Вселенной.

Ответы к упражнениям

1.7. 1. $2,7 \cdot 10^8$ с. 2. $4,2 \cdot 10^{-8}$ св. лет; $2,6 \cdot 10^{-7}$ св. лет; $6,8 \cdot 10^{-4}$ св. лет.

3.7. 2. К югу от надира $h = -(90^\circ + \delta + \varphi)$, к северу от надира $h = \varphi + \delta - 90^\circ$.

4.6. 1. $h = 90^\circ - \varphi + \delta$. 2. Никогда. 3. 28 октября, 15 февраля. 4. Нет.

6.6. 2. На 117 с. 3. 7 августа 1839 г.

8.7. 1. $P = 2T_J$, Марс. 2. 1 год 104,4 дня. 3. 1,08 года. 4. $1,4 \cdot 10^7$ км, 3500 км.

9.4. 2. Модуль скорости остается постоянным, а ее направление изменяется. 4. $5,9 \times 10^{-3}$ м/с²; $1,8 \cdot 10^{-8}$ м/с².

10.4. 1. 11,2 км/с. 2. 1,8 км/с; 2,38 км/с. 3. 11,8 ч. 4. 3,6 сут.

11.4. 1. $\approx 36\,000$ км, 3 км/с.

13.7. 3. Увеличение $> D/d$. 4. От 20° до 40° . 5. $20''$. 6. $100''$. 7. $3,2 \cdot 10^{-4}$.

14.5. 1. 10 000 К. 2. 2600 км/с. 3. $3 \cdot 10^7$ м/с. 4. 0,06 нм.

15.3. 1. $94,3 M_\odot = 5,66 \cdot 10^{28}$ кг. 2. $M_{3B} = M_\odot/2$.

18.5. 1. 12,6 м/с. 2. $2,7 \cdot 10^{-6}$ рад/с. 3. 54 ч. 4. 0,17 веса на Земле.

19.9. 1. 3,72 м/с²; 8,69 м/с²; 3,72 м/с². 2. $66''$; $50''$; $21''$. 3. 0,43 от земного, 0,0064. 4. $24''$.

20.5. 2. $2 \cdot 10^8$ Дж.

21.3. 1. В 8 раз. 2. $-26,5^m$. 3. $7,5^m$; 5^m ; $2,5^m$; $-2,5^m$; -5^m ; $-7,5^m$. 4. $m_{\text{ск}} = m - 2,5 \times \lg N$. 5. В 10^7 раз. ≈ 100 фот/с.

22.9. 1. 403 км. 2. 30 000 К. 4. $26 R_\odot$. 5. $300\,000 L_\odot$, $3,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. 6. а) 5^m ; б) 0^m ; $7,5^m$.

23.5. 1. $1,07 \cdot 10^{-11}$ м; $2,57 \cdot 10^{-13}$ м. 2. $3,4 \cdot 10^{16}$ Па. 3. $5,8 \cdot 10^5$ м/с; $1,2 \cdot 10^4$ м/с. 4. $4,4 \cdot 10^9$ кг/с, $7 \cdot 10^{-3}\%$.

24.4. 1. 236 км; 236 м. 2. $7,1 \cdot 10^{-4} L_\odot$. 3. $2,7 \cdot 10^{11}$ кг. 4. 124 км/с.

25.6. 1. 10^m ; 16^m . 2. 27 лет. 3. 2 кпк.

26.5. 1. 50 000 км. 2. 360 км. 3. 2 км/с. 4. 620 км/с. 5. $7 \cdot 10^{11}$ кг/с.

27.4. 1. 0,03%. 2. 133 км.

28.4. 1. а) в $1,6 \cdot 10^{10}$ раз; б) в $2,4 \cdot 10^4$ раз; в) в $3,1 \cdot 10^3$ раз.

29.4. 1. 444 года. 2. 13,3 км/с. 3. 25 раз. 4. $4,3 \cdot 10^{41}$ кг.

30.5. 1. 900 г. 2. $9,4 \cdot 10^{32}$ кг.

32.7. 1. 39 кпк. 2. 0,282 м. 3. 800 Мпк. 4. $1,1 \cdot 10^{41}$ кг.

33.5. 1. Предельная звездная величина $m = 2,5 + 5 \cdot \lg D$ [мм] = $12,5^m$. 2. 640 Мпк, $2 \cdot 10^{25}$ м, 2 млрд. св. лет; $2,1 \cdot 10^{12} L_\odot$.

34.7. 1. $5,7 \cdot 10^{16}$ с = 1,8 млрд. лет.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Важнейшие события в истории астрономии

Годы до н.э.	
4000	Создание мегалитической обсерватории Стоунхендж (Англия)
1100	Измерение наклона эклиптики к экватору (Китай)
240	Измерение размеров Земли Эратосфеном
140	Деятельность выдающегося греческого астронома Гиппарха (определил расстояние до Луны, составил каталог положений и яркости ярких звезд)
46	Введение в Риме календаря Юлием Цезарем
Годы н.э.	
1515	Первая публикация Коперником гелиоцентрической системы мира
1543	Выход в свет основного труда Коперника
1582	Введение 15 октября григорианского календаря (новый стиль)
1609	Начало телескопических наблюдений Галилея
1609	Публикация первого закона Кеплера
1668	Первая модель рефлектора Ньютона
1676	Ремер измерил скорость света, наблюдая спутники Юпитера
1687	Публикация Ньютоном основ механики
1761	Ломоносов открыл атмосферу на Венере
1781	Гершель открыл Уран
1814	Фраунгофер описал линии поглощения в спектре Солнца
1842	Открытие эффекта Доплера
1846	Открытие Нептуна
1868	Швабе обнаружил периодичность появления солнечных пятен
1905—1916	Создание Эйнштейном специальной теории относительности и теории гравитации
1923	Определение расстояния до ближайших галактик
1929	Хаббл открыл закон расширения Вселенной
1930	Открытие Плутона
1931	Начало радиоастрономии
1938	Установление ядерной природы энергии звезд
1946	Начало применения ракетной техники в астрономии
1951	Обнаружение радиоизлучения нейтрального водорода в межзвездном пространстве
1957	Запуск в СССР первого в мире ИСЗ и начало космической эры
1963	Открытие квазаров
1965	Открытие реликтового излучения Вселенной
1967	Открытие пульсаров
1987	Первое обнаружение нейтрино от сверхновой звезды

II. Данные о телах Солнечной системы

Астрономические объекты	Среднее расстояние от Солнца, а.е.	Звездный период обращения, сутки, годы		Синодический период обращения, сутки	Период вращения (знак «—» обратное вращение)	Радиус, в радиусах Земли	Масса, в массах Земли	Число известных спутников	Наименьшая видимая звездная величина
Меркурий	0,4	88	0,24	116	59 сут.	0,38	0,055	—	—1,9
Венера	0,7	225	0,62	584	— 243 дня	0,95	0,816	—	—4,4
Земля	1,0	365	1,0	—	23° 56'	1,00	1,000	1	—
Марс	1,5	687	1,88	780	24 37	0,53	0,107	2	—2,0
Юпитер	5,2	4333	11,86	399	9 50	11,2	318	16	—2,7
Сатурн	9,5	10759	29,46	378	10 14	9,5	95,2	17	+0,7
Уран	19,2	30700	84,0	370	— 17,2 сут.	4,1	14,6	15	+5,5
Нептун	30,1	60200	164,8	367	17,3 сут.	4,0	17,2	8	+7,8
Плутон	39,5	90800	248,6	367	— 6,4 сут.	0,45	0,002	1	+15,1
Солнце	—	—	—	—	25,4 сут.	109,1	333 000	—	—26,7

III. Характеристики некоторых ярких звезд

Звезды	α	δ	m	μ	v_r	D	L	T
Полярная (α М. Медведицы)	1° 49'	+89°	2,3"	0,05'' в год	—17 км/с	780 св. л.	$6 \cdot 10^3 L_\odot$	$6 \cdot 10^3$ К
Альдебаран (α Тельца)	4 33	+16,3	0,8	0,20	—	70	160	$3,8 \cdot 10^3$
Ригель (β Ориона)	5 12	—8	0,1	0,001	+21	800	$54 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$
Бетельгейзе (α Ориона)	5 52	+7,5	0,8	0,03	+21	650	$20 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
Сириус (α Б. Пса)	6 43	—16,5	—1,5	1,3	—8	9	23	$9,6 \cdot 10^3$
Вега (α Лиры)	18 35	+39	0,0	0,34	—14	26	50	$9,9 \cdot 10^3$
Арктур (α Вознеса)	14 13	+19,5	—0,1	2,3	—5	36	100	$4 \cdot 10^3$
Денеб (α Лебедя)	20 ...	+45	1,2	0,003	—5	1800	$70 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$
Солнце	—	—	—26,7	—	—	$1,5 \cdot 10^{11}$ м	1	$5,8 \cdot 10^3$

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение	3	4.4. Типовая задача. Определение вы- соты Солнца в кульминациях	26
I. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ	3	4.5. Вопросы	—
1.1. Что изучает астрономия	—	4.6. Упражнения	—
1.2. Особенности астрономии	6	5. Солнечные и лунные затмения	27
1.3. Связь астрономии с другими науками	7	5.1. Условия наступления затмений	—
1.4. Развитие астрономии	8	5.2. Виды затмений	28
1.5. Значение астрономии	11	5.3. Вопросы	30
1.6. Вопросы	12	6. Время и календарь	—
1.7. Упражнения	—	6.1. Измерение времени	—
Основные выводы раздела I	13	6.2. Типовая задача. Нахождение сред- него солнечного времени	32
II. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ		6.3. Календарь	—
2. Видимое движение светил	14	6.4. Типовая задача. Перевод дат ста- рого и нового стиля	33
2.1. Созвездия	—	6.5. Вопросы	—
2.2. Суточное движение светил	16	6.6. Упражнения	—
2.3. Небесная сфера	—	Основные выводы раздела II	—
2.4. Важнейшие круги и точки небесной сферы	17	III. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ	
2.5. Вопросы	18	7. Движение планет	35
2.6. Упражнения	—	7.1. Видимые движения планет	—
3. Система небесных координат	—	7.2. Система Коперника	37
3.1. Небесные координаты	—	7.3. Вопросы	39
3.2. Зависимость суточного движения светил от положения наблюдателя на Земле	19	8. Взаимное расположение планет	—
3.3. Высота полюса мира над горизон- том	20	8.1. Конфигурация светил	—
3.4. Типовая задача. Высота светила в кульминации	21	8.2. Синодический и сидерический пе- риоды обращений	40
3.5. Видимость светил в данном месте Земли	—	8.3. Типовая задача. Соотношение между сидерическим и синодическим пе- риодами обращений	41
3.6. Вопросы	—	8.4. Расстояния до планет	—
3.7. Упражнения	22	8.5. Методы определения расстояний до тел Солнечной системы	42
4. Видимые движения Луны и Солнца	—	8.6. Вопросы	43
4.1. Видимое движение и фазы Луны	—	8.7. Упражнения	—
4.2. Годичное движение Солнца	23	9. Законы движения планет	—
4.3. Изменение суточного пути Солнца и Луны в течение года	25	9.1. Законы Кеплера	—
		9.2. Закон всемирного тяготения	44

9.3. Вопросы	45
9.4. Упражнения	45
10. Движение тел под действием гравитации	46
10.1. Задача двух тел	—
10.2. Небесная механика	48
10.3. Вопросы	49
10.4. Упражнения	—
11. Орбиты космических аппаратов. Космические исследования	—
11.1. Движение искусственных небесных тел	—
11.2. Возможности космических исследований	50
11.3. Вопросы	51
11.4. Упражнения	52
<i>Основные выводы раздела III</i>	<i>—</i>
IV. МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
12. Исследование электромагнитного излучения небесных тел	53
12.1. Шкала электромагнитных волн	—
12.2. Всеволновая астрономия	—
12.3. Вопросы	55
13. Телескопы в астрономии	—
13.1. Назначение телескопов	—
13.2. Оптические телескопы	—
13.3. Угловое разрешение телескопов	58
13.4. Радиотелескопы	59
13.5. Типовая задача. Определение параметров телескопа	60
13.6. Вопросы	—
13.7. Упражнения	—
14. Определение физических свойств и скорости движения небесных тел по их спектрам	61
14.1. Спектры небесных тел	—
14.2. Эффект Доплера	64
14.3. Типовая задача. Использование эффекта Доплера	65
14.4. Вопросы	—
14.5. Упражнения	—
15. Масса небесных тел	66
15.1. Определение масс небесных тел	—

15.2. Типовая задача. Определение массы планеты	—
15.3. Упражнения	67
<i>Основные выводы раздела IV</i>	<i>—</i>
V. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	
16. Состав и происхождение Солнечной системы	68
16.1. Вопросы	70
17. Планета Земля	—
17.1. Вопросы	73
18. Система Земля — Луна	—
18.1. Движение Луны относительно Земли	—
18.2. Приливы	74
18.3. Физическая природа Луны	76
18.4. Вопросы	78
18.5. Упражнения	—
19. Физические свойства больших планет	—
19.1. Меркурий	—
19.2. Венера	79
19.3. Марс	81
19.4. Юпитер	82
19.5. Сатурн, Уран, Нептун	84
19.6. Система Плутон — Харон	85
19.7. Основные причины различия физических свойств больших планет	—
19.8. Вопросы	86
19.9. Упражнения	—
20. Малые тела Солнечной системы и межпланетная среда	87
20.1. Астероиды	—
20.2. Кометы	—
20.3. Метеориты	89
20.4. Вопросы	90
20.5. Упражнения	—
<i>Основные выводы раздела V</i>	<i>91</i>
VI. ЗВЕЗДЫ И СОЛНЦЕ	
21. Звездные величины	92
21.1. Шкала звездных величин	—
21.2. Типовая задача. Суммарная звездная величина объекта	94

21.3. Упражнения	—	27. Эволюция звезд и Солнца	—
22. Основные свойства звезд	—	27.1. «Старение» звезд	—
22.1. Звезды — важнейшие объекты Вселенной	—	27.2. Конечные стадии	123
22.2. Равновесие звезд	95	27.3. Вопросы	124
22.3. Температуры звезд	97	27.4. Упражнения	—
22.4. Светимость звезд	98	<i>Основные выводы раздела VI</i>	—
22.5. Размеры звезд	99		
22.6. Типовая задача. Определение радиуса звезды	100	VII. НАША ГАЛАКТИКА	
22.7. Масса и плотность звезд	—	28. Состав и структура Галактики	126
22.8. Положение звезд на диаграмме температура — светимость	101	28.1. Млечный Путь и структура Галактики	—
22.9. Вопросы	102	28.2. Звездные скопления	—
22.10. Упражнения	103	28.3. Вопросы	129
23. Физика звезд	—	28.4. Упражнения	—
23.1. Физическое состояние и химический состав звезд	—	29. Движение звезд	—
23.2. Равновесие звезд	104	29.1. Тангенциальные и лучевые скорости звезд	—
23.3. Источники энергии звезд	105	29.2. Вращение Галактики	130
23.4. Вопросы	106	29.3. Вопросы	131
23.5. Упражнения	107	29.4. Упражнения	—
24. Необычные звезды	—	30. Межзвездная среда	132
24.1. Белые карлики	—	30.1. Межзвездный газ	—
24.2. Нейтронные звезды	108	30.2. Межзвездная пыль	133
24.3. Вопросы	109	30.3. Космические лучи и межзвездное магнитное поле	134
24.4. Упражнения	—	30.4. Вопросы	135
25. Звезды, меняющие светимость	110	30.5. Упражнения	—
25.1. Переменные звезды	—	31. Образование звезд. Проблема возникновения жизни	136
25.2. Типовая задача. Определение расстояния до цефеиды	102	31.1. Образование звезд	—
25.3. Вспыхивающие звезды и новые звезды	113	31.2. Проблема жизни во Вселенной	137
25.4. Сверхновые звезды	114	31.3. Вопросы	138
25.5. Вопросы	116	<i>Основные выводы раздела VII</i>	—
25.6. Упражнения	—		
26. Солнце — ближайшая к нам звезда	—	VIII. ЗА ПРЕДЕЛАМИ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ	
26.1. Общие сведения	—	32. Галактики	139
26.2. Внешняя атмосфера Солнца: хромосфера и корона	118	32.1. Открытие галактик	—
26.3. Активность Солнца и ее влияние на Землю	120	32.2. Расстояния до галактик	140
26.4. Вопросы	121	32.3. Типовая задача. Определение расстояния до галактики и ее размера	141
26.5. Упражнения	—	32.4. Типы галактик	142
		32.5. Состав и структура галактик	—
		32.6. Вопросы	144
		32.7. Упражнения	—

33. Необычные галактики	—	34.3. Модели Вселенной	—
33.1. Взаимодействующие галактики	—	34.4. Реликтовое излучение	152
33.2. Галактики с активными ядрами	146	34.5. Заключение	153
33.3. Квазары	—	34.6. Вопросы	—
33.4. Вопросы	147	34.7. Упражнения	154
33.5. Упражнения	—	<i>Основные выводы раздела IX</i>	—
<i>Основные выводы раздела VIII</i>	148	Ответы к упражнениям	—
IX. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ		Приложения	155
34. Расширяющаяся Вселенная	149	I. Важнейшие события в истории астро-	
34.1. Красное смещение и расширение		номии	—
Вселенной	—	II. Данные о телах Солнечной системы	156
34.2. Необратимые изменения во Все-		III. Характеристики некоторых ярких	
ленной	150	звезд	—

На обложке учебника помещена фотография солнечной короны, сделанная 31 июля 1981 г. С. Кучми (Институт астрофизики Национального центра научных исследований Франции). Цветные иллюстрации любезно представлены астрофизической обсерваторией Смитсоновского института (США).

Учебное издание

ЗАСОВ
АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ
КОНОНОВИЧ
ЭДВАРД ВЛАДИМИРОВИЧ

АСТРОНОМИЯ

Учебник для 11 класса школ и классов с углубленным изучением физики и астрономии

Зав. редакцией *Н. В. Хрусталь*
 Редактор *Н. В. Филонович*
 Младший редактор
 Художники *С. Ф. Лухин, В. С. Давыдов,*
В. М. Прокофьев, О. М. Шмелев
 Художественный редактор *Е. Л. Скорина*
 Технический редактор *Г. В. Субочева*
 Корректор *Н. С. Соболева*

ИБ № 14466

Сдано в набор 28.12.92. Подписано к печати 10.08.93. Формат 70×90¹/₁₆. Бум. офсетная № 2. Гарнит. литерат. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,70+форз. 0,29+вкл. 0,58. Усл. кр.-отт. 26,69. Уч.-изд. л. 11,66+форз. 0,21+вкл. 0,51. Тираж 154 000 экз. Заказ № 3684.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и информации Российской Федерации. 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Смоленский полиграфический комбинат Министерства печати и информации Российской Федерации. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.