

Б. А. Воронцов-Вельяминов  
Е. К. Страут



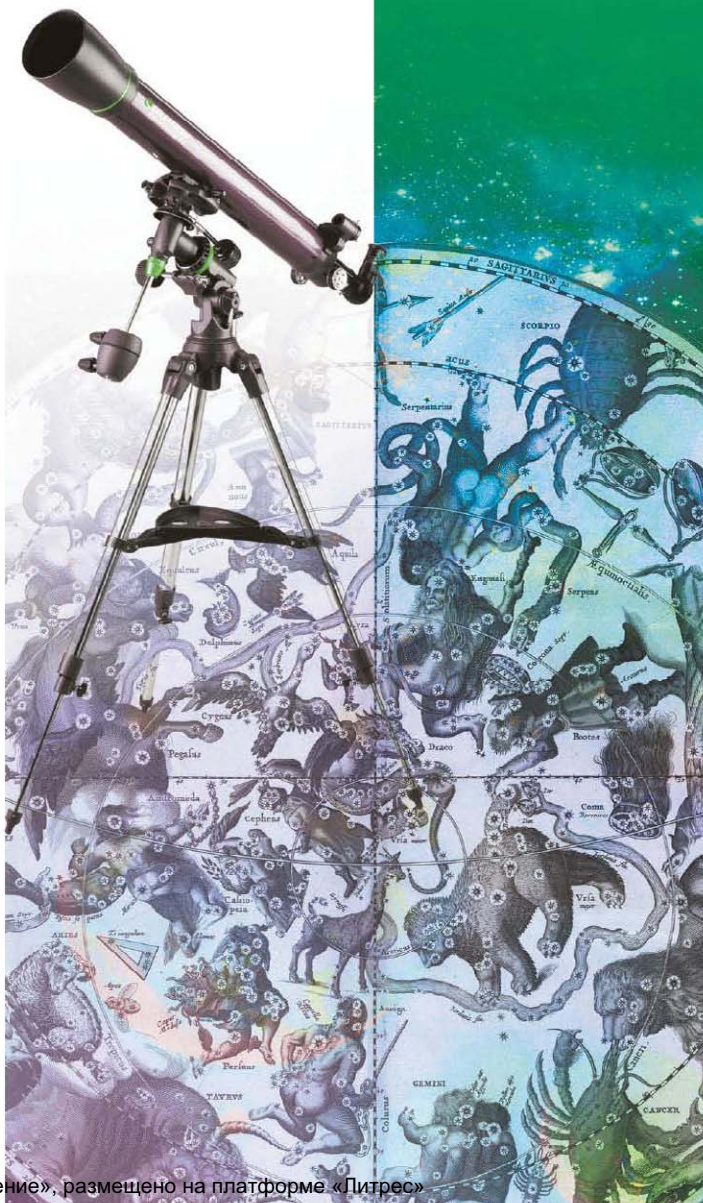
# АСТРОНОМИЯ

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

10

11

классы



УДК 373.167.1:52+52(075.3)  
ББК 22.6я721  
В75

Учебник допущен к использованию при реализации имеющих государственную аккредитацию образовательных программ начального общего, основного общего, среднего общего образования организациями, осуществляющими образовательную деятельность, в соответствии с Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 254 от 20.05.2020 (в редакции приказа № 766 от 23.12.2020).

Научный рецензент — академик РАН, директор Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга А. М. Черепашук

Научное редактирование и доработка М. Ю. Шевченко

Издание выходит в pdf-формате.

**Воронцов-Вельяминов, Борис Александрович.**

В75 Астрономия : 10—11-е классы : базовый уровень : учебник : издание в pdf-формате / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. — 11-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2023. — 238, [2] с. : ил., 8 л. цв. вкл.

ISBN 978-5-09-108781-9 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-103697-8 (печ. изд.).

Настоящая книга является переработанным в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования вариантом широко известного учебника Б. А. Воронцова-Вельяминова «Астрономия. 11 класс». В нём сохранена классическая структура изложения учебного материала, большое внимание уделено современному состоянию науки. Учтены новые устоявшиеся данные по исследованию небесных тел с космических аппаратов и современных крупных наземных и космических телескопов.

Учебник образует завершённую предметную линию и предназначен для изучения астрономии на базовом уровне.

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

ISBN 978-5-09-108781-9 (электр. изд.)  
ISBN 978-5-09-103697-8 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение»,  
2021

© Художественное оформление.  
АО «Издательство «Просвещение»,  
2021

Все права защищены



# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| <b>I. Введение</b>                                               | 3  |
| § 1. Предмет астрономии                                          | 3  |
| 1. Что изучает астрономия. Её значение и связь с другими науками | 3  |
| 2. Структура и масштабы Вселенной                                | 6  |
| § 2. Наблюдения — основа астрономии                              | 8  |
| 1. Особенности астрономии и её методов                           | 8  |
| 2. Телескопы                                                     | 11 |
| <b>II. Практические основы астрономии</b>                        | 20 |
| § 3. Звёзды и созвездия                                          | 20 |
| § 4. Небесные координаты и звёздные карты                        | 23 |
| § 5. Видимое движение звёзд на различных географических широтах  | 28 |
| 1. Высота полюса мира над горизонтом                             | 28 |
| 2. Высота светила в кульминации                                  | 29 |
| § 6. Годичное движение Солнца по небу. Эклиптика                 | 31 |
| § 7. Движение и фазы Луны                                        | 34 |
| § 8. Затмения Солнца и Луны                                      | 38 |
| § 9. Время и календарь                                           | 42 |
| 1. Точное время и определение географической долготы             | 42 |
| 2. Календарь                                                     | 45 |
| <b>III. Строение Солнечной системы</b>                           | 48 |
| § 10. Развитие представлений о строении мира                     | 48 |
| 1. Геоцентрическая система мира                                  | 48 |
| 2. Гелиоцентрическая система мира                                | 51 |
| § 11. Конфигурация планет. Синодический период                   | 54 |
| 1. Конфигурация планет и условия их видимости                    | 54 |
| 2. Синодический и сидерический периоды обращения планет          | 56 |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| § 12. Законы движения планет Солнечной системы . . . . .                                  | 58        |
| § 13. Определение расстояний и размеров тел<br>в Солнечной системе . . . . .              | 64        |
| 1. Форма и размеры Земли . . . . .                                                        | 64        |
| 2. Определение расстояний в Солнечной системе.<br>Горизонтальный параллакс . . . . .      | 68        |
| 3. Определение размеров светил . . . . .                                                  | 70        |
| § 14. Движение небесных тел под действием<br>сил тяготения . . . . .                      | 72        |
| 1. Закон всемирного тяготения . . . . .                                                   | 72        |
| 2. Возмущения в движении тел<br>Солнечной системы . . . . .                               | 74        |
| 3. Масса и плотность Земли . . . . .                                                      | 75        |
| 4. Определение массы небесных тел . . . . .                                               | 75        |
| 5. Приливы . . . . .                                                                      | 77        |
| 6. Движение искусственных спутников Земли<br>и космических аппаратов к планетам . . . . . | 78        |
| <b>IV. Природа тел Солнечной системы . . . . .</b>                                        | <b>81</b> |
| § 15. Общие характеристики планет . . . . .                                               | 81        |
| § 16. Солнечная система как комплекс тел,<br>имеющих общее происхождение . . . . .        | 82        |
| § 17. Система Земля—Луна . . . . .                                                        | 85        |
| 1. Земля . . . . .                                                                        | 85        |
| 2. Луна . . . . .                                                                         | 89        |
| § 18. Планеты земной группы . . . . .                                                     | 98        |
| 1. Общность характеристик . . . . .                                                       | 98        |
| 2. Меркурий . . . . .                                                                     | 99        |
| 3. Венера . . . . .                                                                       | 100       |
| 4. Марс . . . . .                                                                         | 103       |
| § 19. Далёкие планеты . . . . .                                                           | 107       |
| 1. Общность характеристик планет-гигантов . . . . .                                       | 107       |
| 2. Спутники и кольца планет-гигантов . . . . .                                            | 110       |
| § 20. Малые тела Солнечной системы.<br>Карликовые планеты . . . . .                       | 114       |
| 1. Астероиды . . . . .                                                                    | 114       |
| 2. Карликовые планеты . . . . .                                                           | 117       |
| 3. Кометы . . . . .                                                                       | 118       |
| 4. Метеоры, болиды и метеориты . . . . .                                                  | 123       |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>V. Солнце и звёзды</b> .....                                      | 129 |
| § 21. Солнце — ближайшая звезда .....                                | 129 |
| 1. Энергия и температура Солнца .....                                | 129 |
| 2. Состав и строение Солнца .....                                    | 131 |
| 3. Атмосфера Солнца .....                                            | 137 |
| 4. Солнечная активность .....                                        | 139 |
| § 22. Расстояния до звёзд. Характеристики излучения<br>звёзд .....   | 143 |
| 1. Годичный параллакс и расстояния до звёзд .....                    | 144 |
| 2. Видимая и абсолютная звёздные величины.<br>Светимость звёзд ..... | 146 |
| 3. Спектры, цвет и температура звёзд .....                           | 148 |
| 4. Диаграмма «спектр — светимость» .....                             | 150 |
| § 23. Массы и размеры звёзд .....                                    | 153 |
| 1. Двойные звёзды. Определение массы звёзд .....                     | 153 |
| 2. Размеры звёзд. Плотность их вещества .....                        | 158 |
| 3. Модели звёзд .....                                                | 159 |
| § 24. Переменные и нестационарные звёзды .....                       | 163 |
| 1. Пульсирующие переменные .....                                     | 163 |
| 2. Новые и сверхновые звёзды .....                                   | 165 |
| <b>VI. Строение и эволюция Вселенной</b> .....                       | 171 |
| § 25. Наша Галактика .....                                           | 171 |
| 1. Млечный Путь и Галактика .....                                    | 171 |
| 2. Звёздные скопления и ассоциации .....                             | 174 |
| 3. Межзвёздная среда: газ и пыль .....                               | 176 |
| 4. Движение звёзд в Галактике. Её вращение .....                     | 184 |
| § 26. Другие звёздные системы — галактики .....                      | 187 |
| § 27. Основы современной космологии .....                            | 197 |
| § 28. Жизнь и разум во Вселенной .....                               | 207 |
| <b>Приложения</b> .....                                              | 215 |
| <b>Ответы к задачам</b> .....                                        | 236 |



# I. ВВЕДЕНИЕ

## § 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

### 1. Что изучает астрономия.

Её значение и связь  
с другими науками

Астрономия является одной из древнейших наук, истоки которой относятся к III тысячелетию до н. э.

**Астрономия<sup>1</sup> изучает движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем.**

Человека всегда интересовал вопрос о том, как устроен окружающий мир и какое место он в нём занимает. У большинства народов ещё на заре цивилизации были сложены особые — космологические — мифы, повествующие о том, как из первоначального хаоса постепенно возникает космос (порядок), появляется всё, что окружает человека: небо и земля, горы, моря и реки, растения и животные, а также сам человек. На протяжении тысячелетий шло постепенное накопление сведений о явлениях, которые происходили на небе.

Оказалось, что периодическим изменениям в земной природе сопутствуют изменения вида звёздного неба и видимого движения Солнца. Высчитать момент наступления определённого времени года было необходимо для того, чтобы в срок провести те или иные сельскохозяйственные работы: посев, уборку урожая. Но это можно было сделать лишь при использовании календаря, составленного по многолетним наблюдениям положения и движения Солнца и Луны. Так, необходи-

---

<sup>1</sup> Это слово происходит от двух греческих слов: «астрон» — звезда, светило и «номос» — закон.

мость регулярных наблюдений за небесными светилами была обусловлена практическими потребностями счёта времени. Строгая периодичность, свойственная движению небесных светил, лежит в основе основных единиц счёта времени, которые используются до сих пор, — сутки, месяц, год.

Простое созерцание происходящих явлений и их наивное толкование постепенно сменялись попытками научного объяснения причин наблюдаемых событий. Когда в Древней Греции (VI в. до н. э.) началось бурное развитие философии как науки о природе, астрономические знания стали неотъемлемой частью человеческой культуры. Астрономия — единственная наука, которая получила свою музу-покровительницу — Уранию.

С самых древних времён развитие астрономии и математики было тесно связано между собой. Вы знаете, что в переводе с греческого название одного из разделов математики — геометрии — означает «землемерие». Первые измерения радиуса земного шара были проведены ещё в III в. до н. э. на основе астрономических наблюдений за высотой Солнца в полдень. Необычное, но ставшее привычным деление окружности на  $360^\circ$  имеет астрономическое происхождение.

Астрономические наблюдения издавна позволяли людям ориентироваться в незнакомой местности и на море. Развитие астрономических методов определения координат в XV—XVII вв. в немалой степени было обусловлено развитием мореплавания и поисками новых торговых путей. Составление географических карт, уточнение формы и размеров Земли на долгое время стало одной из главных задач, которые решала практическая астрономия. Искусство прокладывать путь по наблюдениям за небесными светилами, получившее название *навигация*, сначала использовалось в мореходном деле, затем в авиации, а теперь и в космонавтике.

Вопрос о положении Земли во Вселенной, о том, неподвижна она или движется вокруг Солнца, в XVI—XVII вв. приобрёл важное значение как для астрономии, так и для миропонимания. Гелиоцентрическое учение **Николая Коперника** явилось не только важным шагом в решении этой научной проблемы, но и способствовало изменению стиля научного мышления, открыв новый путь к пониманию происходящих явлений.

Астрономические наблюдения за движением небесных тел и необходимость заранее вычислять их расположение сы-

грали важную роль в развитии не только математики, но и очень важного для практической деятельности человека раздела физики — механики. Выросшие из единой когда-то науки о природе — философии — астрономия, математика и физика никогда не теряли тесной связи между собой. Взаимосвязь этих наук нашла непосредственное отражение в деятельности многих учёных. Далеко не случайно, например, что **Галилео Галилей** и **Исаак Ньютон** известны своими работами и по физике, и по астрономии. К тому же Ньютон является одним из создателей дифференциального и интегрального исчислений. Сформулированный им же в конце XVII в. закон всемирного тяготения открыл возможность применения этих математических методов для изучения движения планет и других тел Солнечной системы. Постоянное совершенствование способов расчёта на протяжении XVIII в. вывело эту часть астрономии — *небесную механику* — на первый план среди других наук той эпохи.

Много раз в истории развития науки отдельные мыслители пытались ограничить возможности познания Вселенной. Пожалуй, последняя такая попытка случилась в XIX в. незадолго до открытия спектрального анализа. «Приговор» был суров: «Мы представляем себе возможность определения их [небесных тел] форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими способами мы не сможем изучить их химический состав...» (*О. Конт*).

Открытие спектрального анализа и его применение в астрономии положило начало широкому использованию физики при изучении природы небесных тел и привело к появлению нового раздела науки о Вселенной — *астрофизики*. В свою очередь, необычность с «земной» точки зрения условий, существующих на Солнце, звёздах и в космическом пространстве, способствовала развитию физических теорий, описывающих состояние вещества в таких условиях, которые трудно или невозможно создать на Земле.

Более того, в XX в., особенно во второй его половине, достижения астрономии снова, как и во времена Коперника, привели к серьёзным изменениям в научной картине мира, к становлению представлений об эволюции Вселенной. Эти представления составляют основу современной *космологии*. Оказалось, что Вселенная, в которой мы сегодня живём, миллиарды лет тому назад была совершенно иной — в ней не су-

ществовало ни галактик, ни звёзд, ни планет. Для того чтобы объяснить процессы, происходившие на начальной стадии её развития, понадобился весь арсенал современной теоретической физики, включая теорию относительности, атомную физику, квантовую физику и физику элементарных частиц.

События, которые произошли в науке за последние десятилетия, показали, что неразрывная связь, существующая между астрономией и физикой, позволяет успешно решать многие проблемы, волнующие человечество. Далеко не случайно, что в первые годы XXI в. четыре Нобелевских премии по физике были присуждены учёным за исследования по астрофизике и космологии.

Развитие ракетной техники позволило человечеству выйти в космическое пространство. С одной стороны, это существенно расширило возможности исследования всех объектов, находящихся за пределами Земли, и привело к новому подъёму в развитии небесной механики, которая успешно осуществляет расчёты орбит автоматических и пилотируемых космических аппаратов различного назначения. С другой стороны, методы дистанционного исследования, пришедшие из астрофизики, ныне широко применяются при изучении нашей планеты с искусственных спутников и орбитальных станций. Результаты исследований тел Солнечной системы позволяют лучше понять глобальные, в том числе эволюционные, процессы, происходящие на Земле. Вступив в космическую эру своего существования и готовясь к полётам на другие планеты, человечество не вправе забывать о Земле и должно в полной мере осознать необходимость сохранения её уникальной природы.

## 2. Структура и масштабы Вселенной

Вы уже знаете, что наша Земля со своим спутником Луной, другие планеты и их спутники, карликовые планеты, кометы, астероиды и другие малые тела обращаются вокруг Солнца. Все эти тела составляют **Солнечную систему**. В свою очередь, Солнце и все другие звёзды, видимые на небе, входят в огромную звёздную систему — нашу **Галактику**. Самая близкая к Солнечной системе звезда находится так далеко, что

свет, который распространяется со скоростью 300 тыс. км/с, идёт от неё до Земли более четырёх лет. Звёзды являются наиболее распространённым типом небесных тел, в одной только нашей Галактике их насчитывается двести миллиардов. Объём, занимаемый этой звёздной системой, так велик, что свет может пересечь его только за 100 тыс. лет.

Во **Вселенной** существует множество других галактик, подобных нашей. Именно расположение и движение галактик определяет строение и структуру Вселенной в целом. Галактики так далеки друг от друга, что невооружённым глазом можно видеть лишь три ближайшие: две — в Южном полушарии, а с территории России всего одну — туманность Андромеды. От наиболее удалённых галактик свет идёт до Земли около 13 млрд лет. Значительная часть вещества звёзд и галактик находится в таких условиях, которые невозможно создать в земных лабораториях. Всё космическое пространство заполнено электромагнитным излучением, гравитационными и магнитными полями. Между звёздами в галактиках и между галактиками находится очень разреженное вещество в виде газа, пыли, отдельных молекул, атомов и ионов, атомных ядер и элементарных частиц. Перечисленное вещество, излучающее во всём диапазоне электромагнитного спектра, составляет только 5% массы Вселенной. Остальная масса приходится на тёмную материю и тёмную энергию, природу которых придётся ещё установить.

Как известно, расстояние до ближайшего к Земле небесного тела — Луны — составляет примерно 400 тыс. км. Наиболее удалённые объекты располагаются от нас на расстоянии, которое превышает расстояние до Луны более чем в  $10^{17}$  раз.

Попробуем представить размеры небесных тел и расстояния между ними во Вселенной, воспользовавшись хорошо известной моделью — школьным глобусом Земли диаметром 25 см. Этот глобус в 50 млн раз меньше нашей планеты. В этом случае мы должны изобразить Луну шариком диаметром примерно 7 см, находящимся от глобуса на расстоянии около 7,5 м. Модель Солнца будет иметь диаметр 28 м и находиться на расстоянии 3 км, а модель Нептуна — самой далёкой планеты Солнечной системы — будет удалена от нас на 90 км. Ближайшая к нам звезда при таком масштабе модели будет располагаться на расстоянии примерно 800 тыс. км, т. е. в 2 раза дальше, чем настоящая (не модельная) Луна! Размеры

нашей Галактики сократятся примерно до размеров Солнечной системы, но самые далёкие звёзды всё же будут находиться за её пределами.



**ЗАДАНИЕ 1** ..... Вспомните, какие объекты в окружающей местности расположены на таких расстояниях, которые приведены для тел Солнечной системы в описанной выше модели. Какой из них имеет те же размеры, что и модель Солнца (в предлагаемом масштабе)?

## § 2. НАБЛЮДЕНИЯ — ОСНОВА АСТРОНОМИИ

.....

### 1. Особенности астрономии и её методов

Огромные пространственно-временные масштабы изучаемых объектов и явлений определяют отличительные особенности астрономии.

Сведения о том, что происходит за пределами Земли в космическом пространстве, учёные получают главным образом на основе приходящего от этих объектов света и других видов излучения. Наблюдения — основной источник информации в астрономии. Эта *первая особенность* астрономии отличает её от других естественных наук (например, физики или химии), где значительную роль играют опыты и эксперименты, планируемые в лабораториях. Возможности проведения экспериментов за пределами Земли появились лишь благодаря космонавтике. Но и в этих случаях речь идёт о проведении исследований небольшого масштаба, таких, например, как изучение химического состава ближайших небесных тел. Трудно представить себе эксперименты над планетой в целом, звездой или галактикой.

*Вторая особенность* объясняется значительной продолжительностью целого ряда изучаемых в астрономии явлений (от сотен до миллионов и миллиардов лет). Поэтому непосредственно наблюдать многие из происходящих явлений невозможно. Когда явления происходят особенно медленно,

приходится проводить наблюдения многих родственных между собой объектов, например звёзд. Основные сведения об эволюции звёзд получены именно таким способом. Более подробно об этом будет рассказано далее.

*Третья особенность* астрономии обусловлена необходимостью указать положение небесных тел в пространстве (их координаты) и невозможностью сразу указать, какое из них находится ближе, а какое дальше от нас. На первый взгляд, все наблюдаемые светила кажутся нам одинаково далёкими.

Люди в древности считали, что все звёзды располагаются на небесной сфере, которая вращается вокруг Земли как единое целое. Уже более 2000 лет тому назад астрономы стали применять способы, которые позволяли указать расположение любого светила на небесной сфере по отношению к другим космическим объектам или наземным ориентирам. Представлением о небесной сфере удобно пользоваться и теперь, хотя мы знаем, что реально этой сферы не существует.

Построим небесную сферу и проведём из её центра луч по направлению к звезде  $A$  (рис. 1.1). Там, где этот луч пересечёт поверхность сферы, поместим точку  $A_1$ , изображающую эту звезду. Звезда  $B$  будет изображаться точкой  $B_1$ . Повторив подобную операцию для всех наблюдаемых звёзд, мы получим на поверхности сферы изображение звёздного неба — звёздный глобус. Ясно, что если наблюдатель находится в центре этой воображаемой сферы, то для него направления на сами звёзды и на их изображения на сфере будут совпадать. Рассто-

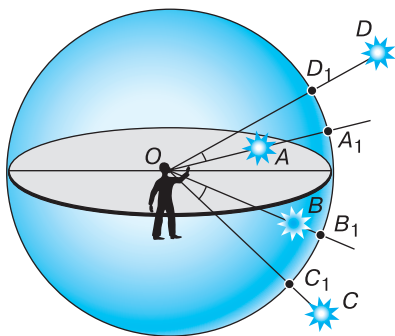


Рис. 1.1. Небесная сфера

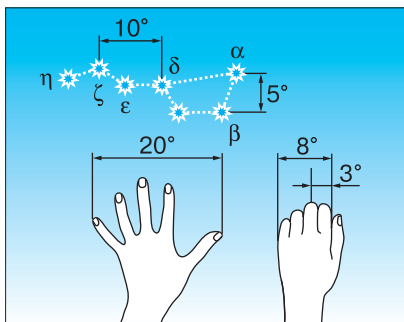


Рис. 1.2. Оценка угловых расстояний на небе

яния между звёздами на небесной сфере можно выражать только в угловой мере. Эти угловые расстояния измеряются величиной центрального угла между лучами, направленными на одну и другую звезду, или соответствующей им дуги на поверхности сферы.

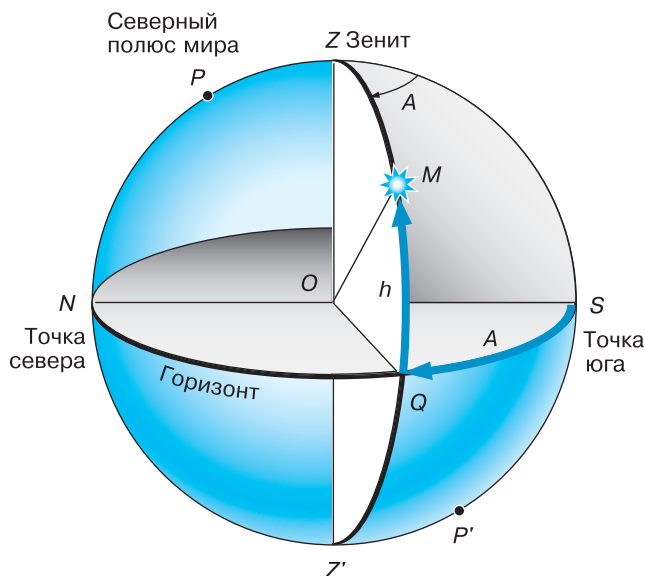
Для приближённой оценки угловых расстояний на небе полезно запомнить такие данные: угловое расстояние между двумя крайними звёздами ковша Большой Медведицы ( $\alpha$  и  $\beta$ ) составляет около  $5^\circ$  (рис. 1.2), а от  $\alpha$  Большой Медведицы до  $\alpha$  Малой Медведицы (Полярной звезды) — в 5 раз больше — примерно  $25^\circ$ . Простейшие глазомерные оценки угловых расстояний можно провести также с помощью пальцев вытянутой руки.

Только два светила — Солнце и Луну — мы видим как диски. Угловые диаметры этих дисков почти одинаковы — около  $30'$  или  $0,5^\circ$ . Угловые размеры планет и звёзд значительно меньше, поэтому мы их видим просто как светящиеся точки. Для невооружённого глаза объект не выглядит точкой в том случае, если его угловые размеры превышают  $2-3'$ . Это означает, в частности, что наш глаз различает каждую светящуюся точку (звезду) отдельно от другой звезды в том случае, если угловое расстояние между ними больше этой величины. Иначе говоря, мы видим объект не точечным лишь в том случае, если расстояние до него превышает его размеры не более чем в 1700 раз.

О том, как на основании угловых измерений определяют расстояния до небесных тел и их линейные размеры, будет рассказано далее.

Чтобы отыскать на небе светило, надо указать, в какой стороне горизонта и как высоко над ним оно находится. С этой целью используется *система горизонтальных координат* — *азимут* и *высота*. Для наблюдателя, находящегося в любой точке Земли, нетрудно определить вертикальное и горизонтальное направления. Первое из них определяется с помощью отвеса и изображается на чертеже (рис. 1.3) отвесной линией  $ZZ'$ , проходящей через центр сферы (точку  $O$ ). Точка  $Z$ , расположенная прямо над головой наблюдателя, называется *зенитом*. Плоскость, которая проходит через центр сферы перпендикулярно отвесной линии, образует при пересечении со сферой окружность — *истинный* или *матема-*

Рис. 1.3.  
Система  
горизонтальных  
координат



**тический горизонт. Высота** светила отсчитывается по окружности, проходящей через зенит и светило  $M$ , и выражается длиной дуги этой окружности от горизонта до светила. Эту дугу и соответствующий ей угол принято обозначать буквой  $h$ . Высота светила, которое находится в зените, равна  $90^\circ$ , на горизонте —  $0^\circ$ . Положение светила относительно сторон горизонта указывает его вторая координата — **азимут**, обозначаемый буквой  $A$ . Азимут отсчитывается от точки юга в направлении движения часовой стрелки, так что азимут точки юга равен  $0^\circ$ , точки запада —  $90^\circ$  и т. д. Обратите внимание, что определение астрономического азимута отличается от географического азимута, который традиционно отсчитывается от точки севера.

Горизонтальные координаты указывают положение светила на небе в данный момент и вследствие вращения Земли непрерывно меняются. На практике, например в геодезии, высоту и азимут измеряют специальными угломерными оптическими приборами — **теодолитами**.

## 2. Телескопы

Основным прибором, который используется в астрономии для наблюдения небесных тел, приёма и анализа приходящего

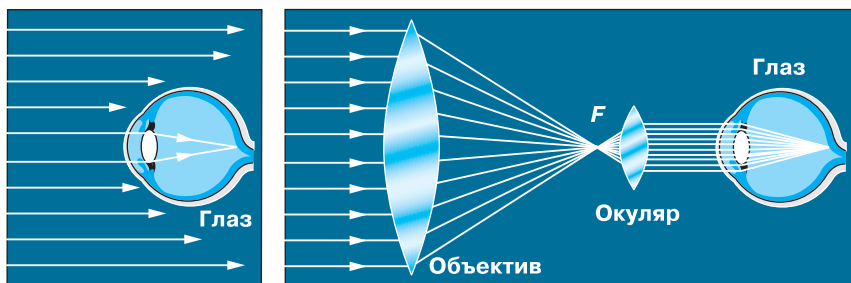


Рис. 1.4. Собираение света объективом телескопа

от них излучения, является *телескоп*. Слово это происходит от двух греческих слов: *tele* — далеко и *skopeo* — смотрю.

Телескоп применяют, во-первых, для того, чтобы собрать как можно больше света, идущего от исследуемого объекта, а во-вторых, чтобы обеспечить возможность изучать его мелкие детали, недоступные невооружённому глазу. Чем более слабые объекты даёт возможность увидеть телескоп, тем больше его **проницающая сила**. Возможность различать мелкие детали характеризует **разрешающую способность** телескопа. Обе эти характеристики телескопа зависят от диаметра его объектива.

Количество света, собираемого объективом, возрастает пропорционально его площади (квадрату диаметра) (рис. 1.4). Диаметр зрачка человеческого глаза даже в полной темноте не превышает 8 мм. Объектив телескопа может превышать по площади зрачок глаза в десятки и сотни тысяч раз. С помощью телескопов и современных приёмников излучения возможно обнаружить звёзды и другие объекты, которые в 100 млн раз слабее объектов, видимых невооружённым глазом.

Чем меньше размер изображения светящейся точки (звезды), которое даёт объектив телескопа, тем лучше его разрешающая способность. Если расстояние между изображениями двух звёзд меньше размера самого изображения, то они сливаются в одно. Вследствие дифракции изображение звезды будет не точкой, а ярким пятном — дифракционным диском, угловой диаметр которого равен

$$\alpha = \frac{206\,265 \cdot \lambda}{D} \cdot 1,22,$$

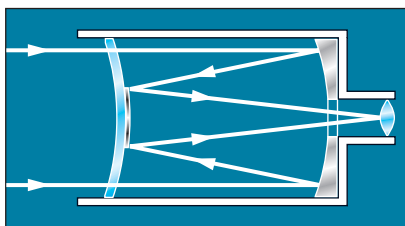


Рис. 1.5. Менисковый телескоп

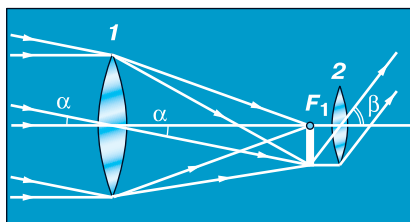


Рис. 1.6. Построение изображения в телескопе

где  $\lambda$  — длина световой волны, а  $D$  — диаметр объектива телескопа, 206 265 — число секунд в радиане. У любительского телескопа, диаметр объектива которого составляет 60 мм, теоретическая разрешающая способность будет равна примерно 2". Напомним, что это превышает разрешающую способность невооружённого глаза (в среднем) в 60 раз. Реальная разрешающая способность телескопа будет меньше, поскольку на качество изображения существенно влияет состояние атмосферы, движение воздуха.

Если в качестве объектива телескопа используется линза, то такой телескоп называется *рефрактором* (от лат. refracto — преломляю), а если вогнутое зеркало, — то *рефлектор* (reflex — отражаю).

Помимо рефракторов и рефлекторов в настоящее время используются различные типы зеркально-линзовых телескопов, один из которых — менисковый — представлен на рисунке 1.5.

У небольших телескопов объективом, как правило, служит двояковыпуклая собирающая линза. Как известно, если предмет находится дальше двойного фокусного расстояния, она даёт его уменьшенное, перевёрнутое и действительное изображение. Это изображение располагается между точками фокуса и двойного фокуса линзы. Расстояния до Луны, планет, а тем более звёзд так велики, что лучи, приходящие от них, можно считать параллельными. Следовательно, изображение объекта будет располагаться в фокальной плоскости.

Построим изображение Луны, которое даёт объектив 1 с фокусным расстоянием  $F$  (рис. 1.6). Объектив строит изображение объекта, линейные размеры которого определяются

фокусным расстоянием  $F$  и угловыми размерами  $\alpha$  объекта на небе. Воспользуемся теперь ещё одной линзой — окуляром 2, поместив её от изображения Луны (точка  $F_1$ ) на расстоянии, равном фокусному расстоянию этой линзы —  $f$ . Фокусное расстояние окуляра должно быть меньше, чем фокусное расстояние объектива. Построив изображение, которое даёт окуляр, мы убедимся, что он увеличивает угловые размеры Луны: угол  $\beta$  заметно больше угла  $\alpha$ .

Если изображение, даваемое объективом, находится вблизи фокальной плоскости окуляра, увеличение, которое обеспечивает телескоп, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$W = \frac{F}{f}.$$

Телескоп увеличивает видимые угловые размеры Солнца, Луны, планет и деталей на них, но звёзды из-за их колоссальной удалённости всё равно видны в телескоп как светящиеся точки.

Имея сменные окуляры, можно с одним и тем же объективом получать различное увеличение. Поэтому возможности телескопа в астрономии принято характеризовать не увеличением, а диаметром его объектива. При визуальных астрономических наблюдениях обычно используют увеличения не более 100 раз. Применять бóльшие увеличения мешает атмосфера Земли. Движение воздуха, незаметное невооружённым глазом (или при малых увеличениях), приводит к тому, что мелкие детали изображения становятся нерезкими, размытыми. Это мешает и современным наблюдениям с фотоэлектронными приёмниками света. Поэтому астрономические обсерватории, на которых используются крупные телескопы, размещаются в районах с хорошим астроклиматом: большим количеством ясных дней и ночей, с высокой прозрачностью и стабильностью атмосферы, на высоте нескольких километров над уровнем моря.

Современный телескоп представляет собой сложное устройство, которое имеет предельно точную оптику малых и больших размеров, наилучшие из существующих приёмники излучения и обширный комплекс научной и обслуживающей аппаратуры. Все наиболее крупные современные телескопы — это телескопы-рефлекторы.

Крупнейший в России телескоп-рефлектор (рис. 1.7) имеет зеркало диаметром 6 м, отшлифованное с точностью до долей микрометра. Фокусное расстояние зеркала 24 м. Его масса около 40 т. Масса всей установки телескопа более 850 т, а высота 42 м. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительное время удерживать его в поле зрения, плавно поворачивая телескоп вслед за вращением Земли. Телескоп входит в состав Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук и установлен на Северном Кавказе (близ станицы Зеленчукская в Карачаево-Черкесии) на высоте 2100 м над уровнем моря.



Рис. 1.7. Шестиметровый телескоп-рефлектор

Крупнейший в мире телескоп установлен на острове Ла Пальма (Канарские острова) у побережья Африки. «Глаз» этого телескопа — зеркало диаметром 10,4 м. Площадь его поверхности составляет 76 м<sup>2</sup>, а состоит оно из 36 шестиугольных фрагментов. Оказалось, что такие огромные зеркала лучше собирать из отдельных тонких частей. Изготавливаются они не из стекла, а из более лёгких синтетических материалов. Цельное зеркало будет деформироваться под собственной тяжестью. Чтобы составное зеркало сохраняло необходимую форму, положение отдельных частей корректируется специальными приспособлениями (актюаторами), которыми управляет компьютер. Телескоп, где такая корректировка выполняется 2 раза в секунду, может обеспечить разрешающую способность около 0,4". В настоящее время изготавливается гигантский телескоп с зеркалом диаметром 39,3 м для Европейской Южной обсерватории в Чили. Объектив будет состоять из 798 сегментов диаметром 1,4 м каждый. Открытие телескопа запланировано на конец 2024 г.

Астрономы уже давно не ведут визуальных наблюдений. На смену им в XIX в. пришла фотография, а в настоящее время её во многих случаях заменяют электронные приёмники света. Наибольшее распространение получили полупроводниковые приборы с зарядовой связью (сокращённо ПЗС). Матрицы ПЗС, которые применяются в современных цифровых фотоаппаратах, по своему устройству аналогичны тем, которые используются в астрономии. Важнейшим качеством ПЗС, в которых используется внутренний фотоэффект, является их высокая чувствительность. Они регистрируют практически каждый попавший на них фотон. Не менее важно и то, что запись полученных при этом изображений ведётся с помощью компьютера. Такая запись удобна для проведения различных исследований и передачи другим учёным. Некоторые телескопы используются для того, чтобы полученное изображение через компьютер передавать непосредственно пользователям Интернета. Это позволяет участвовать в наблюдениях за космическими объектами многим людям, которые интересуются астрономией, в том числе школьникам.

ПЗС незаменимы для телескопов, которые работают в автоматическом режиме, без участия человека. В частности, это касается космического телескопа «Хаббл», который обращается вокруг Земли на высоте около 600 км. Находясь за пределами основной массы атмосферы, этот телескоп с зеркалом диаметром 2,4 м позволяет изучать объекты, которые в 10—15 раз слабее объектов, доступных такому же наземному телескопу. Телескоп «Хаббл» обеспечивает разрешающую способность 0,1", что недостижимо даже для более крупных наземных телескопов. Под таким углом футбольный мяч виден с расстояния 450 км. Выбор объектов наблюдения и обработка полученных благодаря телескопу «Хаббл» результатов проводится специалистами многих стран. За время его работы на Землю было передано свыше миллиона высококачественных фотографий различных космических объектов. В их числе изображения самых далёких галактик, которые образовались более 13 млрд лет назад. На цветной вклейке XV (рис. 3) показано, как выглядит область звёздообразования, находящаяся в звёздном скоплении M16 на расстоянии около 7 тыс. световых лет от Земли.

В настоящее время астрономию называют всеволновой, поскольку наблюдения за объектами ведутся не только в оптическом диапазоне. Для этой цели используются различные приборы, каждый из которых способен принимать излучение в определённом диапазоне электромагнитных волн: гамма-, рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное и радиоизлучение.

Только оптическое и, по большей части, радиоизлучение из космоса достигает поверхности Земли без значительного поглощения. Остальные виды излучения сквозь земную атмосферу практически не проникают, она их рассеивает и поглощает. Поэтому телескопы для проведения исследований Вселенной в этих диапазонах длин волн устанавливаются на искусственных спутниках, орбитальных станциях и других космических аппаратах.

Для приёма радиоизлучения различных космических объектов используются радиотелескопы. Основные элементы устройства радиотелескопа — это антенна, приёмник и приборы для регистрации сигнала. У большинства радиотелескопов антенны, которые достигают в диаметре 100 м, по форме такие же, как вогнутые зеркала телескопа-рефлектора (рис. 1.8), но собирающие не свет, а радиоволны. Ведь чем больше площадь антенны, тем более слабый источник радиоизлучения можно зарегистрировать.

Антенна преобразует принятые ею электромагнитные волны в электрические сигналы, которые затем передаются к высокочувствительному приёмнику. В современных радиотелескопах для регистрации сигналов используется компьютер, который сначала запоминает их в цифровой форме, а затем представляет полученные результаты в наглядном виде.

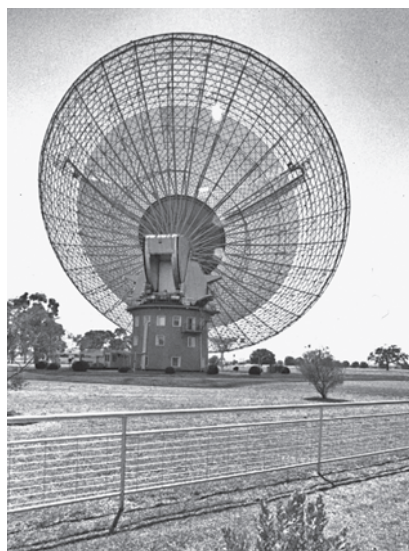


Рис. 1.8. Радиотелескоп

Существенно возрастают возможности радиотелескопов, если их антенны объединить в систему и использовать для изучения одного и того же объекта. Например, система, состоящая из 27 антенн диаметром 25 м каждая, расположенных в определённом порядке, позволяет достичь углового разрешения  $0,04''$ . Это соответствует возможностям радиотелескопа с антенной диаметром 35 км.

В 2011—2018 гг. российские учёные участвовали в масштабном международном проекте «Радиоастрон». На основе выведенного на околоземную орбиту радиотелескопа «Спектр-Р» (диаметр антенны 10 м) и радиотелескопов, расположенных на всех континентах земного шара, создаётся единая наземно-космическая система для изучения различных объектов Вселенной в радиодиапазоне (цветная вклейка I, рис. 1). Двигаясь по вытянутой эллиптической орбите, «Спектр-Р» может удаляться от Земли на расстояние порядка 350 тыс. км. Таким образом, создаваемая система по своим возможностям соответствует радиотелескопу с антенной такого колоссального размера. Она обладает исключительно высокой разрешающей способностью порядка миллионных долей угловой секунды. Это в 250 раз лучше, чем можно добиться с помощью наземной сети радиотелескопов, и более чем в 1000 раз лучше, чем достигнуто телескопом «Хаббл» в оптическом диапазоне.

Реализация проекта «Радиоастрон» позволила получить новые данные о таких явлениях и процессах, как нейтронные звёзды и сверхмассивные чёрные дыры, о строении и динамике областей звёздообразования в нашей Галактике, а также продвинуться в изучении структуры и эволюции Вселенной.



#### Вопросы

1. В чём состоят особенности астрономии? 2. Какие координаты светил называются горизонтальными? 3. Опишите, как координаты Солнца будут меняться в процессе его движения над горизонтом в течение суток. 4. По своему линейному размеру диаметр Солнца больше диаметра Луны примерно в 400 раз. Почему их угловые диаметры почти равны? 5. Для чего используется телескоп? 6. Что считается главной характеристикой телескопа? 7. Почему при наблюдениях в телескоп светила уходят из поля зрения?



### УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Каково увеличение телескопа, если в качестве его объектива используется линза, оптическая сила которой  $0,4$  дптр, а в качестве окуляра линза с оптической силой  $10$  дптр? 2. Во сколько раз больше света, чем телескоп-рефрактор (диаметр объектива  $60$  мм), собирает крупнейший российский телескоп-рефлектор (диаметр зеркала  $6$  м)?



### ЗАДАНИЕ 2

Подберите линзы, необходимые для изготовления простейшего телескопа-рефрактора. Измерив оптическую силу объектива и окуляра, определите, какое увеличение может обеспечить такой телескоп.



## II. ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ

### § 3. ЗВЁЗДЫ И СОЗВЕЗДИЯ

Вероятно, ещё на заре цивилизации люди, стремясь как-то разобраться во множестве звёзд и запомнить их расположение, мысленно объединяли их в определённые фигуры. Вспомните, как часто мы находим в контурах облаков, гор или деревьев очертания людей, животных или даже фантастических существ. Многие характерные «звёздные фигуры» уже в глубокой древности получили имена героев греческих мифов и легенд, а также тех мифических существ, с которыми эти герои сражались. Так появились на небе Геркулес, Орион, Персей, Андромеда, а также Дракон, Телец, Кит. Некоторые из этих созвездий упоминаются в древнегреческих поэмах «Илиада» и «Одиссея». Их изображения можно видеть в старинных звёздных атласах, на глобусах и картах звёздного неба (рис. 2.1).

В наши дни **созвездиями называются определённые участки звёздного неба, разделённые между собой строго установленными границами.**

Среди всех 88 созвездий больше известны самые крупные, в частности Большая Медведица.

Все звёзды, видимые на небе невооружённым глазом, Гиппарх во II в. до н. э. разделил на шесть величин. Самые яркие (их на небе менее 20) стали считать звёздами первой величины. Чем слабее звезда, тем больше число, обозначающее её **звёздную величину**. Наиболее слабые, едва различимые невооружённым глазом — звёзды шестой величины. В каждом созвездии звёзды обозначаются буквами греческого алфавита (приложение II), как правило, в порядке убывания их яркости. Наиболее яркая в этом созвездии звезда обозначается буквой  $\alpha$ , вторая по яркости —  $\beta$  и т. д. Кроме того, примерно



Рис. 2.1. Звёздное небо на старинной карте

300 звёзд получили собственные имена преимущественно арабского и греческого происхождения. Так, например, одна из ярчайших звёзд всего неба из созвездия Волопаса называется Арктур, в переводе с греческого — «страж медведя», что связывает эту звезду с соседним созвездием Большой Медведицы.  $\alpha$  Северной Короны называется Альфекка, что переводится с арабского как «ярчайшая на блюде», отражая иные традиции размещения на небе тех или иных фигур (рис. 2.1).

Как отыскать на небе Полярную звезду —  $\alpha$  Малой Медведицы, напоминает рисунок 2.2. В этом созвездии, которое нередко называют «Малый ковш», она является

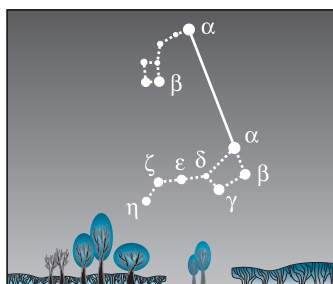


Рис. 2.2. Способ отыскания Полярной звезды

самой яркой. Но так же, как и большинство звёзд ковша Большой Медведицы, Полярная — звезда второй величины и в число самых ярких звёзд неба не входит.

Впоследствии учёные стали располагать фотометрами для измерения *освещённости*, т. е. потока излучения, приходящего от звезды (или другого источника) к наблюдателю в единицу времени на единицу площади, перпендикулярной лучу зрения. Теперь в астрономии для обозначения этой величины используется термин «*блеск*», а измеряется она в *звёздных величинах*. В результате измерений оказалось, что самые яркие звёзды неба — звёзды первой величины — примерно в 100 раз ярче самых слабых, видимых глазом — звёзд шестой величины.

Современная шкала звёздных величин определена так, что звезда первой величины в 2,512 раза ярче звезды второй величины. В свою очередь, звезда второй величины во столько же раз по блеску превосходит звезду третьей величины и т. д. Несколько звёзд были отнесены к звёздам нулевой величины, потому что их блеск оказался в 2,512 раза больше, чем у звёзд первой величины. А самая яркая звезда ночного неба — Сириус ( $\alpha$  Большого Пса) получила даже отрицательную звёздную величину  $-1,5$ . Список наиболее ярких звёзд с указанием их названия и звёздной величины приведён в приложении V.

Измерения светового потока от звёзд позволяют теперь определить их звёздные величины с точностью до десятых и сотых долей.

С изобретением телескопа учёные получили возможность увидеть более слабые звёзды, от которых приходит гораздо меньше света, чем от звёзд шестой величины. Шкала звёздных величин всё дальше и дальше уходит в сторону их возрастания по мере того, как увеличиваются возможности телескопов. Так, например, космический телескоп «Хаббл» позволил получить изображение предельно слабых объектов — до тридцатой звёздной величины.



**ВОПРОСЫ** 1. Что называется созвездием? 2. Перечислите известные вам созвездия. 3. Как обозначаются звёзды в созвездиях? 4. Звёздная величина Веги равна 0,03, а звёздная величина Денеба составляет 1,25. Какая из этих звёзд ярче? 5. Ка-

кая из звёзд, помещённых в приложении V, является самой слабой? 6\*<sup>1</sup>. Как вы думаете, почему на фотографии, полученной с помощью телескопа, видны более слабые звёзды, чем те, которые можно увидеть, глядя непосредственно в тот же телескоп?



**УПРАЖНЕНИЕ 2** 1. Рассчитайте, во сколько раз звезда второй звёздной величины ярче звезды четвёртой величины. 2. Проведите такой же расчёт для звёзд первой и шестой величины. *Указание.* Используйте при этом значение отношения светового потока от звёзд двух соседних величин: 2,512. Округлите полученное в результате число до целого и запомните его. 3. Считая, что разница в звёздных величинах Солнца и Сириуса составляет 25, рассчитайте, во сколько раз от Солнца приходит больше энергии, чем от самой яркой звезды ночного неба.



**ЗАДАНИЕ 3** Найдите и прочитайте мифы о происхождении названий созвездий.

**ЗАДАНИЕ 4** Найдите на небе звёзды: Арктур, Бетельгейзе и Сириус. Какого они цвета?

## § 4. НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ И ЗВЁЗДНЫЕ КАРТЫ

Невооружённым глазом на всём небе можно видеть примерно 6000 звёзд, но мы видим лишь половину из них, потому что другую половину звёздного неба закрывает от нас Земля. Вследствие её вращения вид звёздного неба меняется. Одни звёзды только ещё появляются из-за горизонта (восходят) в восточной его части, другие в это время находятся высоко над головой, а третьи уже скрываются за горизонтом в западной стороне (заходят). При этом нам кажется, что звёздное небо вращается как единое целое. Теперь каждому хорошо известно, что вращение небосвода — кажущееся явление, вызванное вращением Земли.

---

<sup>1</sup> Звёздочкой отмечены вопросы и задачи повышенной трудности.