

В. Г. Сурдин

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

$$r = \frac{a(1+e^2)}{1+e\cos U}$$

$$a_e = \frac{GM_e}{R^2}$$



ЗАДАЧИ С РЕШЕНИЯМИ



В.Г. Сурдин

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

с решениями —



Москва • 2002

УРСС

Сурдин Владимир Георгиевич

Астрономические задачи с решениями: Учебное пособие. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 240 с.

ISBN 5-354-00090-4

В книге собрано около 430 задач по астрономии с подробными решениями. Часть из них — классические, часть — совершенно новые. Все решения составлены автором книги и нередко дополняют и даже исправляют ошибки классических решений. Уровень задач в среднем ниже олимпиадного, хотя отдельные задачи потребуют упорной работы. Абсолютное большинство задач «с изюминкой»: не торопитесь давать ответ, даже если на первый взгляд задача покажется простой.

Книгу можно рекомендовать школьникам, изучающим астрономию, географию и природоведение, а также всем любителям астрономии.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, д. 9.

Лицензия ИД № 05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 01.03.2002 г.

Формат 60×90/16. Тираж 3000 экз. Печ. л. 15. Зак. № 179

Отпечатано в типографии ИПО «Профиздат». 109044, г. Москва, Крутицкий вал, 18.

ISBN 5-354-00090-4

ИЗДАТЕЛЬСТВО УРСС
НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ



E-mail: urss@urss.ru

Каталог изданий

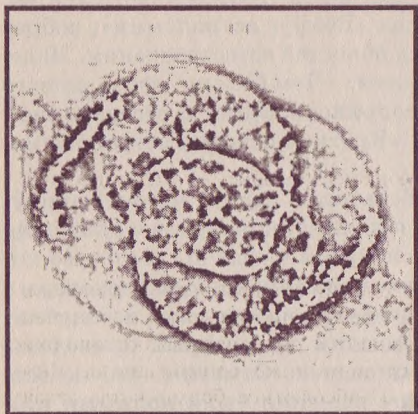
в Internet: <http://urss.ru>

Тел./факс: 7 (095) 135-44-23

Тел./факс: 7 (095) 135-42-46

© Едиториал УРСС, 2002

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, если на то нет письменного разрешения Издательства.



Предисловие

При изучении наук задачи полезнее правил

И. Ньютон

Петроградский профессор Н. Каменьщиков, составивший в трудные для науки годы один из первых, а может быть и самый первый в нашей стране задачник для любителей астрономии, писал: «Юношу-астронома увлекает, кроме красоты неба, часто и красота решения астрономических задач... Этот сборник, посвященный “молодым вольным астрономам”, имеет своей главной целью пробудить самостоятельность у юноши, заинтересовать и приучить его к творческой работе» [12]. Трудно сказать, почему это обращение было адресовано лишь юношам; в наше время не меньший энтузиазм к астрономии проявляют и девушки. Все любители астрономии и других естественных наук любят решать задачи, испытывая свои знания и оттачивая смекалку. Продвигаясь от простых задач к более сложным, самые упорные и талантливые ребята в конце-концов берутся за проблемы, подобные той, которую решали Леверье и Адамс, когда с помощью одних только вычислений они открыли новую планету — Нептун.

В последние годы опубликовано несколько сложных задачников по астрономии — это результат проведения всесоюзных, всероссийских, московских, международных и других крупных астрономических олимпиад (см. [1–4]). Но для начинающих любителей астрономии эти задачи, как правило, трудны. Поэтому мы подготовили новую книгу, придерживаясь ранее избранного принципа: решение задач — это не только испытание, но и увлекательное обучение. Чтобы каждая задача стала для юного естествоиспытателя надежной ступенькой на лестнице познания, мы приводим обстоятельные решения всех задач и надеемся, что эта книжка будет полезна и интересна для любителей астрономии, физики, географии

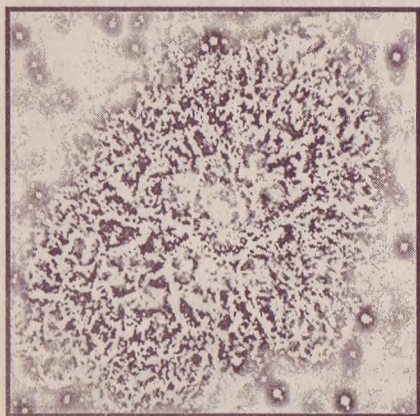
и космонавтики. Кстати, для расширения кругозора любителей неба мы включили в эту книжку раздел «Вокруг астрономии», собрав в него интересные задачи из соседних областей естествознания. Надеемся, они понравятся нашим читателям. «Чем больше сфера нашего знания, тем шире поверхность ее соприкосновения с безграничной областью неведомого» (Артур Берри «Краткая история астрономии», М.: Издание И. Д. Сытина, 1904).

В этой книжке собраны как собственные задачи автора, придуманные за 30 лет проведения уроков и лекций, конкурсов и олимпиад по астрономии, так и традиционные вопросы и задачи, авторство которых за давностью лет определить уже невозможно. Идеи некоторых задач были взяты целиком или в переработанном виде из опубликованных в прошлые годы книг, ссылки на которые приведены в квадратных скобках после условия задачи. Отметим, что не всегда приведенные авторами этих задач решения были полными или вообще верными. Поэтому, если даже вам покажется, что с какой-либо задачей вы уже встречались, советуем еще раз внимательно ее обдумать, а затем познакомиться с нашим вариантом ее решением.

Как всегда, ждем комментариев, советов, неожиданных решений и новых задач по адресу:

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Университетский проспект, 13
119899 Москва
или по электронной почте: surdin@sai.msu.ru

ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ



Глава 1

Координаты

1.1. Странный дом

Где нужно построить дом, чтобы все его окна выходили на север?
Будут ли при этом все его комнаты лишены солнечного света?

Решение: Этот дом нужно построить в Антарктиде, точно на Южном полюсе Земли. Любое направление из этой точки указывает на север. Полгода в тех местах полярная ночь — солнце не восходит. Зато всю вторую половину года, — с конца сентября по конец марта, — там полярный день: солнце не опускается под горизонт, а обходит вас по кругу, поэтому ни одна из комнат не будет лишена солнечного света.

1.2. Верный путь

Куда придешь, если все время двигаться строго:

а) на север; б) на юг; в) на запад; г) на восток; д) на северо-восток?

Решение: Придешь

а) на Северный полюс;

б) на Южный полюс;

в, г) у этих путей нет конечных точек;

д) а вот этот вопрос самый интересный. Если все время придерживаться северо-восточного направления, то все меридианы будешь пересекать под углом 45° . На плоскости такую траекторию, пересекающую выходящие из начала координат радиусы под фикси-

рованным углом, называют «спиралью Архимеда». На шаре аналогичную кривую называют «локсодромия» (или «локсодрома»). Она тоже похожа на спираль, если конечно заданный угол пересечения не равен 90° . Значит траектория нашего путешественника на глобусе будет похожа на спираль, которая начинается у Южного полюса, постепенно раскручивается, пересекает экватор и «наматывается» на Северный полюс. Идя на северо-восток, придешь по этой спирали на Северный полюс, а если все время движешься на юго-запад, то по той же траектории придешь на Южный полюс.

Заметим, что локсодромия широко применяется в морской и авиационной навигации. Хотя кратчайшее расстояние между двумя точками на шаре есть дуга большого круга (ортодромия), судно или самолет, выдерживая по компасу или по звездам определенный курс, движутся по локсодромии. На картах в проекции Меркатора все локсодромии изображаются прямыми линиями. На таких картах легко прокладывать курс с помощью линейки.

А теперь вопрос для любителей математики: долог ли будет путь вдоль локсодромии от Южного полюса до Северного? Требуется определить его длину. И второй вопрос: сколько раз придется обойти вокруг полюса по этой траектории, прежде чем достигнешь его?

1.3. Градус

Что длиннее — градус широты или градус долготы?

Решение: Если считать Землю идеальным шаром (а это почти так и есть), то каждый градус широты покрывает вдоль меридиана одинаковое расстояние — около 111 км. Это так, поскольку все меридианы — одинаковые большие круги на сфере. Но длина одного градуса долготы, измеряемая вдоль параллелей, зависит от широты данной параллели: если двигаться вдоль экватора (это тоже большой круг), то 1° долготы также занимает около 111 км; но на любой другой широте параллель короче экватора (поскольку это уже малые круги), следовательно, и 1° на ней покрывает меньшее расстояние. Например, на широте Москвы градус долготы имеет длину всего 62 км.

1.4. Кругосветка

Два путешественника решили обогнуть Землю: первый — двигаясь с запада на восток, а второй — от полюса к полюсу. Который из них вернется в исходную точку раньше, если скорости у них одинаковые?

Решение: Если исходная точка лежит не вблизи экватора, то первый путешественник вернется раньше, поскольку длина любой параллели, — кроме расположенных близ экватора, — меньше длины окружности Земли по меридиану (см. задачу 1.3). Считая Землю сжатым эллипсоидом, вычислим длину параллели (L_p).

$$L_p = \frac{2\pi R_e}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1-e^2}}},$$

где R_e и R_p — экваториальный и полярный радиусы Земли,

$$e = \frac{\sqrt{R_e^2 - R_p^2}}{R_e}$$

— эксцентриситет меридионального сечения Земли, φ — геоцентрическая широта.

Длину меридиана (L_m) вычислить сложнее: она выражается через полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра второго рода (на самом деле это совсем не страшно), имеющий решение в виде бесконечного ряда по степеням e . Для малых значений e можно ограничиться двумя первыми членами этого ряда:

$$L_m \approx 2\pi R_e \left(1 - \frac{1}{4}e^2 \right).$$

Из уравнения $L_p = L_m$, отбрасывая высокие степени e , найдем широту, при которой пути по меридиану и параллели равны:

$$\varphi \approx \operatorname{arctg} \frac{e}{\sqrt{2}} \approx \sqrt{c},$$

где c — сплюснутость земного эллипсоида (так называемое «сжатие Земли»): $c = (R_e - R_p)/R_e \approx 1/298$. Отсюда $\varphi \approx 3,3^\circ$. Таким образом, длина меридиана больше длины любой параллели, за исключением полосы шириной около 7° вдоль экватора, в которой параллели длиннее меридиана.

1.5. Короткий путь

Командир самолета отдает приказ штурману: «Мы должны как можно быстрее попасть в точку, лежащую на 40° восточнее нас. Проложите курс». «Нет ничего проще, — отвечает штурман, — нам следует все время двигаться строго на восток». Прав ли он?

Решение: Нет, штурман не прав. Кратчайшая линия на шаре между двумя точками — это дуга большого круга (своего рода «прямая

линия» на шаре). Поэтому летчик сначала должен отклониться от параллели в сторону полюса, а после середины пути немного повернуть в сторону экватора. Легче всего построить кратчайшую траекторию между двумя точками на глобусе, натянув между ними нитку. Попробуйте и вы узнаете, насколько ошибся штурман.

1.6. Разные минуты

На сколько угловых минут поворачивается земной шар за 1 минуту времени?

Решение: За одни звездные сутки ($23^{\text{h}}56^{\text{m}}04^{\text{s}} \approx 1\,436^{\text{m}}$) земной шар поворачивается на $360^{\circ} = 21\,600'$. Следовательно, за 1^{m} он поворачивается на $21\,600/1\,436 = 15,041'$. Это точный ответ, но для быстрых оценок достаточно считать период оборота Земли равным 24^{h} ; тогда за 1^{h} она поворачивается на 15° , за 1^{m} — на $15'$ и за 1^{s} — на $15''$.

1.7. Неизменная высота

В каких случаях угловая высота светила над горизонтом не изменяется в течение суток?

Решение: Высота звезд (но не Солнца, Луны и планет) не изменяется в течение суток для наблюдателей, находящихся на полюсах Земли. Для наблюдателя в любой точке Земли не изменяется высота светил, расположенных точно в полюсах мира.

Для тех, кому эта задача показалась легкой, предлагаем заметить в ее условии слово «суток» на следующие слова: год, 100 лет, 10 000 лет.

1.8. Общий круг

Какой из небесных кругов все светила пересекают дважды в сутки? [9, I.П1.6.2]

Решение: Небесный меридиан в верхней и нижней кульминациях.

1.9. Солнце

Прямое восхождение Солнца 6^{h} . Когда это бывает? Каково в этот момент склонение Солнца? [9, I.K1.4.2]

Решение: Солнце удалилось от точки весеннего равноденствия на 6^h , значит оно находится в точке летнего солнцестояния, что бывает около 22 июня. Склонение Солнца в этот момент $+23,5^\circ$.

1.10. Одесская задача

В Одессе ($\varphi = 46^\circ 28'$) наблюдалась верхняя кульминация двух звезд: первой на высоте $27^\circ 14'$, а второй на высоте $51^\circ 43'$. Определите склонение этих звезд.

Решение: Если звезда проходит точку верхней кульминации на высоте $h < \varphi$, то это происходит к югу от зенита, но если $h > \varphi$, то звезда в этот момент может находиться как к югу, так и к северу от зенита (именно такова ситуация со второй звездой). Высота точки пересечения небесного экватора и меридиана на юге $h_3 = 90^\circ - \varphi$. Соответственно, склонение первой звезды $\delta_1 = h_1 - h_3 = h_1 + \varphi - 90^\circ = -16^\circ 18'$. А склонение второй звезды может быть как $\delta_2^S = h_2 - h_3 = h_2 + \varphi - 90^\circ = 8^\circ 11'$, так и $\delta_2^N = h_1 - h_3 = \varphi + 90^\circ - h = 84^\circ 45'$.

1.11. Где Солнце выше?

На какой географической широте в день летнего солнцестояния высота Солнца над горизонтом наибольшая? [9, I.K2.4.2]

Решение: В этот день склонение Солнца $\delta = +23,5^\circ$. Поэтому пройти через зенит (а это и есть наибольшая высота) Солнце сможет только на широте тропика Рака: $\varphi = +23,5^\circ$.

1.12. Утренняя звезда

К западу или к востоку от Солнца находится Венера, если она наблюдается утром? [9, II.П1.4.2]

Решение: К западу.

1.13. Загадочное число

Знакомо ли вам это число $3^\circ 08' 29,73''$ и где оно используется?

Решение: Если перевести число $3^\circ 08' 29,73''$ в десятичную систему, то получим $3 + 8/60 + 29,73/3600 = 3,141592 \approx \pi$. Это известная

математическая константа, равная отношению длины окружности к ее диаметру.

1.14. Где полюс?

Каковы координаты северного полюса эклиптики?

Решение: Вспомнив смысл точки весеннего равноденствия ($\alpha = 0^h$) и величину наклона земной оси ($\epsilon = 23,5^\circ$), без труда определим, что северный полюс эклиптики имеет прямое восхождение 18^h и склонение $66,5^\circ$.

1.15. Прецессия

Как известно, прецессия, или предварение равноденствия, — это медленное ($50''$ в год) обратное перемещение точек равноденствия. А по какому кругу небесной сферы происходит это перемещение: по экватору или по эклиптике?

Решение: Перемещение точек равноденствия происходит по эклиптике, поскольку движение в пространстве испытывает плоскость земного экватора.

1.16. Координаты Солнца

Каковы экваториальные координаты Солнца в моменты равноденствий и солнцестояний?

Решение: В моменты равноденствий Солнце пересекает небесный экватор ($\delta = 0^\circ$) в точках весеннего ($\alpha = 0^h$) и осеннего ($\alpha = 12^h$) равноденствия. В моменты солнцестояний оно более всего удалено от экватора, — к северу в июне ($\delta = +23,5^\circ$) и к югу в декабре ($\delta = -23,5^\circ$), находясь «на полпути» между точками равноденствий (летом $\alpha = 6^h$, зимой $\alpha = 18^h$).

1.17. Эклиптика

Какая часть окружности эклиптики постоянно находится над горизонтом? [5, № 265]

Решение: Половина. Любые большие круги небесной сферы пересекают друг друга пополам.

1.18. Астрономическая Мекка

Какова должна быть высота полюса мира, чтобы в течение суток все звезды неба взошли над горизонтом? [12, № 73]

Решение: Это возможно только на экваторе, где высота полюсов мира равна 0° .

1.19. Странный телескоп

Установленный на северной широте 50° телескоп имеет альт-азимутальную монтировку, на которой он может поворачиваться на 360° по азимуту и от 40° до 50° по высоте. Какая доля небесной сферы доступна для наблюдений с этим телескопом?

Решение: Такому телескопу, несмотря на первое впечатление о его малой подвижности, доступны для наблюдений все объекты к северу от небесного экватора, т. е. ровно половина всей небесной сферы. Телескопы такой конструкции не выдуманы: они уже существуют. Например, девятиметровый телескоп Хобби—Эберли. Зачем нужны такие неполноповоротные инструменты?

Создавая гигантские телескопы на Земле, астрономы вынуждены идти на компромиссы. Переход от зеркал 5-метрового класса к 10-метровым потребовал расчленения объектива на части. Мозаичные зеркала собирают много света для спектроскопии и фотометрии, но хороших изображений они пока не дают. А на какие жертвы придется пойти при переходе к зеркалам 20-метрового класса? Ответ очевиден — такое зеркало станет не только мозаичным, но и потеряет подвижность. К сожалению, этому учит нас опыт создания крупных радиотелескопов. Величайшие антенны мира неподвижно лежат на земле (например, 305-метровая чаша в Аресибо), используя вращение планеты и небольшие перемещения приемника в фокусе телескопа для обзора неба.

Однако успехи неподвижных радиоантенн бесспорны, а значит и оптикам этот путь не заказан. Первыми вступить на него решили инженеры известной обсерватории Мак-Дональд в Техасе. Они задумали телескоп с зеркалом размером 33 м, у которого действующая апертура составит 25 м! Это гигантское сферическое зеркало будет собрано из 169 шестиугольных сегментов размером по 2,5 м. Чтобы избежать переменных нагрузок на сложную сотовую конструкцию зеркала, его укрепят под постоянным углом 55° к горизонту, а наведение на объект будет происходить за счет вращения конструкции по азимуту, а также за счет вращения Земли и перемещения кабины наблюдателя в фокусе главного зеркала. Наблюдениями будет охвачена широкая полоса неба в диапазоне склонений от -10 до $+72^\circ$. При этом любой объект можно будет сопровождать не менее часа.

Исправление сферических аберраций мозаичного зеркала будет поручено четырехзеркальному корректору в главном фокусе. Диаметр поля зрения составит $3,5'$.

Конструкторы дали своему будущему детищу название Предельно Большой Телескоп (Extremely Large Telescope — ELT). Создание такого инструмента обойдется недешево. Чтобы проверить сам принцип, специалисты Мак-Дональдской обсерватории при участии астрономов из нескольких университетов США и Германии решили построить прототип 25-метрового телескопа, имеющий точно такую же конструкцию, но более скромный размер: его 11-метровое мозаичное сферическое зеркало обладает действующей апертурой в 9,2 метра. Этот телескоп, созданный в 1997 г., назван именами двух меценатов, много сделавших для развития образования в США — Уильяма Хобби и Роберта Эберли. Телескоп Хобби—Эберли (Hobby-Eberly Telescope — HET) стал к тому же крупнейшим телескопом, доступным для любознательной публики: пристроенная к его башне галерея позволяет экскурсантам наблюдать за работой астрономов, не мешая им. Впрочем, это не просто галерея, а целый астрономический музей, названный именем известного американского астронома Джорджа Абеля.

1.20. Гром и молния

Наблюдатель, находящийся на вершине горы высотой 1 км увидел, как на высоте 15° над горизонтом сверкнула молния, а через минуту услышал, как прогремел гром. Определите расстояние от молнии до наблюдателя и до поверхности Земли.

Решение: Расстояние до наблюдателя (L) вычисляется по времени распространения грома со скоростью звука ($0,333$ км/с):

$$L = 60 \text{ с} \times 0,333 \text{ км} = 20 \text{ км}.$$

Если пренебречь кривизной поверхности Земли, то высота молнии (H) вычисляется просто:

$$H = 20 \text{ км} \times \sin 15^\circ + 1 \text{ км} = 6,2 \text{ км}.$$

А если принять во внимание кривизну поверхности планеты, то вычисления становятся... еще проще:

$$H = 20 \text{ км} \times \sin 15^\circ = 5,2 \text{ км}.$$

Проверьте сами.

1.21. Шутка

Что общего на небе между Телескопом и Микроскопом?

Решение: У них одна общая точка ($\alpha = 20,5^h$, $\delta = -45,4^\circ$), в которой сходятся четыре созвездия: Индеец, Телескоп, Стрелец и Микроскоп.

1.22. Сердцем на восток

В песне «Глупые мечты» Наталья Ветлицкая поет:

Теплая вода,
Золотой песок;
К северу лицом,
Сердцем на восток.

Если понимать эти слова буквально, то где происходит действие?

Решение: Если сердце с левой стороны, то на Земле нет такого места, поскольку, глядя на север, вы всегда имеете слева запад.

1.23. Азимут

Из книги Ивана Ефремова «Дорога ветров»:
«Я записал азимут СЗ 330° ».

Какой это азимут — астрономический или геодезический? [6, № 6]

Решение: Геодезический, поскольку он отсчитывался от севера к востоку (СЗ очевидно означает северо-запад).

1.24. Полюс в зените

При каких условиях полюс эклиптики совпадает с зенитом наблюдателя? [4, № 29]

Решение: На полярных кругах; на северном — в момент восхода точки весеннего равноденствия, на южном — в момент ее захода.

1.25. Уникальные звезды

Каково склонение звезд, которые в любом месте Земли могут быть видимы на горизонте? [4, № 67]

Решение: $\delta = 0^\circ$.

1.26. Гомер ошибся?

В знаменитой «Одиссее» древнегреческого поэта Гомера упоминается созвездие Большой Медведицы. Гомер определяет его как «созвездие, которое никогда не погружает своих звезд в волны моря» (рис. 1.1).

Точность описаний Гомера известна; его поэмы для нас один из основных источников знаний о древнейшей Греции. Но на его родине вы увидели бы неожиданное зрелище: Большая Медведица будет на ваших глазах преисправно окунать свои звезды в волны Ионического и Эгейского морей. Это не удивительно: Греция — южная страна; на ее широте высота северного полюса мира мала, и Медведица становится созвездием «заходящим». В чем же дело?



Рис. 1.1

Решение: Недоразумение с Гомером не имело бы места, если бы наша планета, перемещаясь в пространстве, выполняла только два рода движения — вокруг Солнца и вокруг собственной оси. Тогда на протяжении миллиардов лет над северным полюсом Земли красовалась бы одна и та же «Полярная звезда», например, привычная нам α Малой Медведицы. Незаходящие звезды для каждой данной широты земного шара всегда оставались бы незаходящими, а заходящие — вечно «купались бы в морских волнах».

Но этого нет. Земля на своем пути участвует не в двух, а в значительно большем числе различных движений. В частности, она не только крутится вокруг оси, но и разворачивает свою ось, как запущенный на столе волчок. Существует два типа таких движений: небольшое раскачивание — нутация, — каждое колебание которого длится около 19 лет, и медленное широкое качание — прецессия, — заставляющее воображаемую ось Земли описывать довольно широкий конус. За 26 000 лет конец земной оси прочерчивает на звездном небе круг радиусом $23,5^\circ$.

Поэтому в разные времена земная ось бывает направлена на разные звезды: сегодня роль «Полярной звезды» играет α Малой Медведицы, а, скажем, 5 000 лет назад эту роль исполняла α Дракона, а через 12 000 лет Полярной звездой станет Вега — α Лиры. При

этом с течением времени одно и то же созвездие оказывается на разном удалении от полюса. Созвездие, которое раньше представлялось незаходящим для данной местности, удалившись от полюса, может перейти в разряд заходящих. Именно это произошло с Ковшом Большой Медведицы в Греции.

Астрономы вычислили, что 3 000 лет назад, во времена Гомера, звезды Ковша не приближались в Греции к горизонту ближе, чем на 11° , так что действительно Медведица не «окунала своих звезд в волны моря». Таким образом, стихи Гомера не только не дают права сомневаться в месте рождения великого поэта, но, наоборот, подтверждают греческого происхождения поэмы.

1.27. Долгота

Как известно, определить географическую долготу места значительно сложнее, чем широту. Чтобы найти широту, достаточно измерить высоту полюса мира или высоту Солнца в момент его полуденной кульминации. А для определения долготы из астрономических наблюдений необходимы точные часы, хранящие время нулевого меридиана. Определив по таким часам, скажем, момент кульминации Солнца в точке наблюдения, мы узнаем, на сколько часов в точке наблюдения полдень наступает раньше или позже, чем на нулевом меридиане, а значит, определим свою долготу.

Для определения долготы наземных пунктов годились часы не очень высокого качества. С ними можно было неоднократно путешествовать между пунктами наблюдения, например, из Парижской обсерватории в Пулковскую и обратно, определяя поправку часов и таким образом постепенно уточняя разницу долгот. Но совсем иные трудности испытывали моряки, которым, чтобы не пройти мимо цели (например, — небольшого острова), требовалось определить долготу сейчас же, без многократных путешествий к Гринвичской обсерватории и обратно. Чтобы создать точные часы, выдерживающие правильный ход в течение нескольких месяцев, а то и лет, в условиях морской качки и смены температуры, потребовалось большое искусство механиков: хорошие морские хронометры были созданы лишь к концу XVIII века. Но до этого момента предлагались и другие способы определения долготы без использования часов на корабле, иногда — весьма экзотические.

Вот один из таких методов, предложенный английскими математиками Уильямом Уистоном (1667—1752) и Хемфри Диттоном (1675—1714) и опубликованный ими в книге [26]. Для экономии средств предлагалось создать «координатную службу» не во всей акватории Мирового океана, а лишь вдоль важнейших торговых путей (цитируем по [27, с. 61]):

«По предположению авторов, в известных пунктах, расположенных на торговых путях, следовало поставить на якорь суда,

оснащенные мортирами; каждую полночь по местному времени о. Тенерифе (через который, по мнению Уистона и Диттона, проходил нулевой меридиан) каждое судно должно было производить выстрел вертикально вверх трассирующим снарядом (или ракетой), видимым издали, причем так, чтобы снаряд взрывался точно на высоте 6 440 фут (около 2 000 м). Чтобы установить свое местоположение, корабли должны в полночь следить за этими сигналами, а затем по компасу определять направление на сигнальное судно. Расстояние корабля от сигнального судна можно было определить, измерив время между моментом вспышки взорвавшегося снаряда и звуком орудийного выстрела или измерив высоту наивысшей точки траектории снаряда».

Справедливости ради нужно отметить, что в этом проекте есть немало общего с современной системой глобального позиционирования, реализованной с помощью искусственных спутников Земли. Однако в то время такая система выглядела утопически. Оцените, например, количество заякоренных кораблей, которые могли бы обеспечить такую систему на трассе Лондон—Калькутта в обход Африки протяженностью около 20 тыс. км.

Решение: Для синхронизации выстрелов с каждого заякоренного корабля необходимо видеть разрыв снарядов, выпущенных с соседних кораблей. В простейшем случае можно считать, что наблюдение производится с уровня моря, и вспышка наблюдается точно на горизонте. Если R — радиус Земли, а снаряд взрывается на высоте H над сигнальным судном, то по теореме Пифагора легко найти расстояние между судами:

$$L = \sqrt{(R + H)^2 - R^2} \approx \sqrt{2RH}.$$

Для $H = 2$ км получим $L \approx 160$ км. Даже в этом предельно допустимом случае на трассе Лондон—Калькутта пришлось бы держать около 125 сигнальных судов.

В действительности, для надежного наблюдения вспышки и, тем более, измерения ее высоты над горизонтом необходимо, чтобы вспышка наблюдалась на высоте не менее $2-3^\circ$. Быть может для этого наблюдателю достаточно подняться с палубы на мачту судна. Легко показать, что это не так: наблюдая с высоты a , вы увидите вспышку на угловой высоте $\alpha \approx \sqrt{2a/R}$ рад над горизонтом (это выражение легко получить, пользуясь все той же теоремой Пифагора). Например, для наблюдателя на мачте высотой $a = 30$ м вспышка с линии горизонта приподнимется всего на $0,2^\circ$, что явно мало. Придется расставлять сигнальные суда чаще. При дистанции в 50 км их вспышки будут видны на высоте около 2° над горизонтом, что можно считать приемлемым. (Надеюсь, вы проверяете эти числа самостоятельными расчетами.) Следовательно, по проекту Уистона и Диттона только на одной морской трассе Лондон—Калькутта для надежной навигации пришлось бы держать сотни сигнальных судов.

В действительности эту задачу решили не артиллеристы, а часовщики и астрономы, снабдив в XIX веке всех корабельных штурманов секстантом, морским хронометром и астрономическим ежегодником с предвычисленными положениями небесных светил. И уж совсем замечательно упростилась процедура определения географических координат к концу XX века, после запуска навигационных спутников. Теперь достаточно нажать кнопку спутникового приемника и прочитать на его экране свои точнейшие координаты. Как видим, современная ракетная техника решила эту проблему окончательно.

Но ведь Уистон и Диттон тоже предлагали использовать ракеты. Так кто же в конце концов решил проблему координат — астрономы или артиллеристы?

1.28. Прямо по компасу

Человек, смотря на компас, шагает все прямо и прямо, как раз в ту сторону, куда указывает темным концом магнитная стрелка (рис. 1.2). Он «идет по компасу» на север к полюсу. Но к полюсу он не придет.

Назовите ту точку земного шара, куда он придет. Нарисуйте маленькую карту, по которой можно было бы судить, где эта точка расположена.

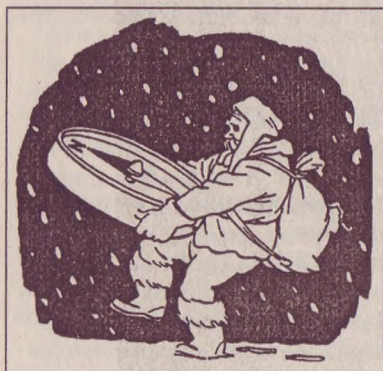


Рис. 1.2

Решение: Некоторые думают, что путешественник придет на северный географический полюс. Но это не так. Двигаясь по стрелке компаса, он придет на северный магнитный полюс, который в 2000 г. имел координаты 75° с. ш., 100° з. д. Эта точка расположена на самом севере Канады, среди островов Королевы Елизаветы, в архипелаге Парри, на острове Батерст. В отличие от географического полюса, который всегда «на месте», магнитный полюс понемногу дрейфует, но не так быстро, чтобы его нельзя было догнать пешком.

1.29. В южном порту

Темная, душная тропическая ночь где-то в жаркой зоне земного шара. Шелестят под дуновением горячего ветра сухие кожистые листья пальм. Пряно пахнут цветы незнакомых деревьев. Темное,

как чернила, море со вспыхивающими следами таинственных животных; черное небо с ярко пылающими созвездиями и сочной полосой Млечного Пути. В верхней части его арки четыре незнакомые звезды образуют крест. А вот над самым горизонтом знакомый уже нам «ковш» — семь звезд Большой Медведицы...

Время позднее, часы показывают полночь. Наш корабль стоит на рейде. Радист в своей рубке разговаривает с Москвой.

— Покойной ночи! — передает он.

— Если у вас ночь, то — приятных сновидений! — отвечают ему. — У нас сейчас яркое солнце, ровно полдень, — добавляет московский собеседник.

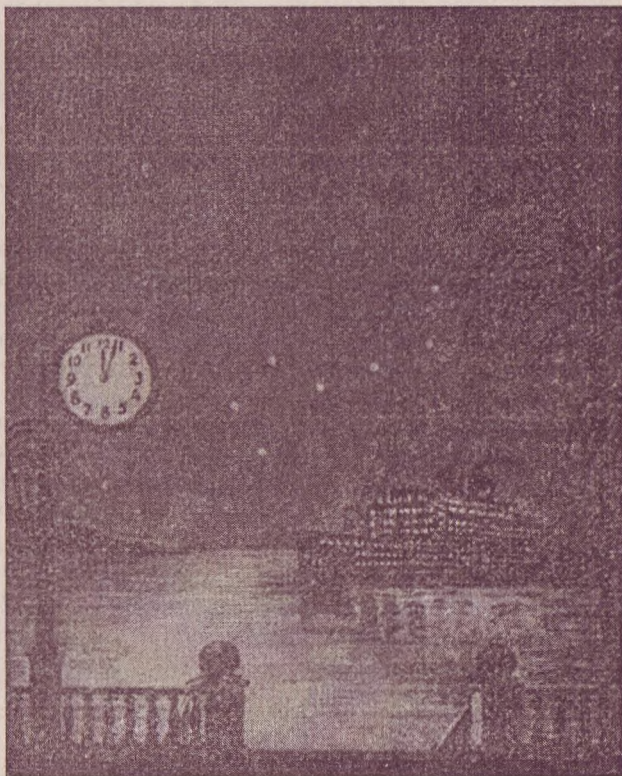


Рис. 1.3

Можете ли вы, взглядевшись в картинку повнимательнее (рис. 1.3), точно установить, где находится изображенный на ней порт?

Решение: Знание астрономии и географии позволит нам без особого труда решить эту задачу.

Широту места мы найдем по высоте Полярной звезды относительно горизонта. Не беда, что самой Полярной не видно; Ковш Большой Медведицы позволит нам определить ее место на небе. Соединив между собой две звезды, образующие переднюю стенку «ковшика», и продолжив эту линии в сторону его «крышки» на пять таких расстояний, мы и должны наткнуться на Полярную звезду.

Как видите, эта линия приводит нас в данном случае за горизонт.

Полярная звезда, которая в Москве, на $55^{\circ}45'$ северной широты стояла под углом $55^{\circ}45'$ над горизонтом, здесь располагается на $18-20^{\circ}$ под ним. Вот вам и широта места: $18-20^{\circ}$ южная.

Долготу по звездам непосредственно не определишь. Но ее вычисляют по времени прохождения через небесный меридиан какого-нибудь светила, относительно которого известно, когда оно же проходит через гринвичский нулевой меридиан.

Мы с вами не располагаем такими данными относительно каких-либо светил, кроме Солнца.

Через меридиан того места, на которое мы с вами смотрим, оно, очевидно, должно будет пройти ровно через 12 часов (для простоты будем считать, что часы на столбе показывают ровно полночь).

Но ведь в Москве, судя по переговорам радиста, полдень. Значит, местное время в порту и в Москве различается ровно на полсутки. (При тщательном решении задач такого рода следует, вообще говоря, выяснять, по какому гражданскому времени идут часы в каждой местности. Например, в Москве часы зимой опережают поясное время на час, а летом — на два часа. Но здесь мы этим пренебрегаем.) Итак, расстояние по долготе между Москвой и загадочным портом равно как раз половине окружности Земли. Порт находится ровно на 180° восточнее (или западнее, что все равно) Москвы. А так как долгота Москвы от Гринвича составляет в круглых цифрах 38° (точно $37^{\circ}42'$) к востоку, то, очевидно, долгота искомого пункта равна 142° от Гринвича к западу.

Теперь берите карту и ищите. Под этой широтой и такой долготой в просторах Тихого океана лежит тропический остров Таити. Вот куда занесла нас с вами фантазия художника!

1.30. У Черного моря

Город Феодосия лежит на 45° северной широты. К чему Феодосия расположена ближе: к экватору или к Северному полюсу? [18, с. 32]

Решение: Возможно, вы поспешили с ответом и, не задумываясь, сказали: Феодосия находится на одинаковом расстоянии и от полюса и от экватора. И до экватора и до полюса от Феодосии ровно по 45° ,

значит по $1/8$ части земной окружности. Если ответили так, то ошиблись ровно на 36 км.

Земля сплюснута у полюсов, а это значит, что длина градусов меридиана должна постепенно возрастать от экватора к полюсам, и, следовательно, расстояние в 45° от экватора до Феодосии меньше расстояния в 45° от Феодосии до Северного полюса.

Длина градуса меридиана на широтах от 0 до 10° составляет в среднем 110,6 км, а на широтах от 80 до 90° уже 111,7 км, т. е. больше на целый километр.

1.31. Ночной ориентир

Многие из нас умеют определять страны света и время суток по Солнцу, а можете ли вы определить то же самое по полной Луне? [18, с. 34]

Решение: Луна в любой фазе, как и Солнце, более всего возвышается над горизонтом, когда находится на юге. Если же Луна полная, то в это время она дает достаточно света, чтобы заметить четкую тень от предметов. Самая короткая тень при полной Луне соответствует полуночи; направление тени покажет, где находится север. Зная север, нетрудно определить и остальные страны света.

1.32. Горизонт и склонение

В каком месте Земли любой круг склонений может совпасть с горизонтом? [29, с. 8]

Решение: Напомним: круг склонений — это большой круг (или полукруг) небесной сферы, проходящий через полюсы мира и данное светило, перпендикулярно небесному экватору. Поэтому ответ очевиден — на экваторе.

1.33. Небесные круги

Какие важные круги небесной сферы не имеют аналогов на земном шаре? [29, с. 8]

Решение: Эклиптика, первый вертикал, колюры равноденствий и солнцестояний. Дело в том, что все они не связаны прямо с экваториальной системой координат.

1.34. Задача капитана Немо

Капитан Немо по прибытии Наутилуса на Южный полюс говорит:

«Если завтра, 21 марта, в полдень солнечный диск будет правильно пересечен пополам северным горизонтом, принимая в соображение преломление лучей, это будет означать, что я нахожусь как раз на Южном полюсе».

Все ли правильно в утверждении капитана Немо? [12, № 38]

Решение: Действительно, для наблюдателя на Южном полюсе небесный экватор совпадает с математическим (истинным) горизонтом; значит, центр Солнца в момент равноденствия должен как раз пересекать горизонт. Верно и то, что необходимо учесть атмосферную рефракцию («преломление лучей»), которая у горизонта приподнимает видимый диск Солнца на $35'$. Однако момент весеннего равноденствия указан весьма неточно: он не связан однозначно с календарной датой 21 марта и уж, тем более, — с полуднем неизвестно какого меридиана. В разные годы Солнце проходит через точку весеннего равноденствия 20 или 21 марта, причем время никак не связано с каким бы то ни было полуднем.

1.35. Путешествие Наутилуса

«Когда Наутилус еще был на Южном полюсе, созвездия блистали с удивительной ясностью. В зените сиял чудный Южный Крест — полярная звезда антарктических стран».

Сильным ли астрономом проявил себя в этом описании Жюль Верн? [12, № 39]

Решение: Четыре яркие звезды Южного Креста имеют следующие склонения: $-62,6^\circ$, $-59,2^\circ$, $-58,2^\circ$ и $-56,6^\circ$. Взяв среднее арифметическое из этих значений, найдем:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{-62,6^\circ - 59,2^\circ - 58,2^\circ - 56,6^\circ}{4} = -59,2^\circ.$$

Следовательно, для наблюдателя на полюсе центр Южного Креста отстоит от зенита весьма далеко — более чем на 30° . Вообще, Южный Крест в Южном полушарии играет роль Ковша Большой Медведицы, указывая направление на полюс мира, но отнюдь не отмечая его положение. На южном небе близ полюса мира нет ни одной яркой звезды; ближайшая из едва различимых глазом — σ Октанта.

1.36. Большой или малый?

По каким кругам небесной сферы — большим или малым — перемещается Солнце в суточном движении в дни равноденствий и дни солнцестояний? [29, № 72]

Решение: В дни равноденствий суточная параллель Солнца совпадает с небесным экватором, являющимся большим кругом небесной сферы (поскольку его плоскость проходит через центр сферы). В дни солнцестояний суточная параллель Солнца является малым кругом, отстоящим от небесного экватора на $23,5^\circ$.

1.37. Пусть всегда будет Солнце!

Как должны быть расположены на Земле два места с тем, чтобы в любой день года, в любой час хотя бы в одном из них Солнце было над горизонтом или на горизонте? Каковы координаты второй такой точки, если первая точка — Москва ($\varphi = 55^\circ 45'$, $\lambda = 37^\circ 42'$)? [4, № 358]

Решение: Поскольку Солнце всегда освещает половину земного шара, точки с указанными свойствами могут лежать на концах любого диаметра Земли. Для Москвы диаметрально противоположная точка имеет координаты $\varphi = 55^\circ 45'$ к югу от экватора и $\lambda = 142^\circ 18'$ западной долготы. Эта точка лежит в южной, чрезвычайно пустынной части Тихого океана.

1.38. Высота эклиптики

Каковы наименьший и наибольший углы, образуемые эклипкой с горизонтом в Москве? [4, № 28]

Решение: Поскольку широта Москвы $\varphi = 55^\circ 45'$, наклон эклиптики к горизонту в ее крайних положениях составляет $(90^\circ - 55^\circ 45') \pm 23^\circ 26'$. Наибольший угол $57^\circ 41'$; наименьший $10^\circ 49'$.

1.39. Лунная ночь

«На перекате играла полноводная река. Над левым, отлогим берегом сиял месяц в безоблачном звездном небе, и серебристая полоса света перерезала реку».

Считая, что Луна была в полнолунии, сообразите, в каком направлении текла река [6, № 5].

Решение: Судя по тому, что отлогим был левый берег реки, текла она, по всей вероятности, в Северном полушарии (см. задачу 8.11). Раз река текла, значит, дело было летом, когда полная Луна невысоко поднимается над горизонтом. Но поскольку Луна «сияет», вероятно, они находятся вблизи верхней кульминации, на южной стороне небосвода. Встав по течению реки, мы своей левой стороной повернемся к югу. Следовательно, река текла на запад.

1.40. Колюр равноденствий

Нулевой круг склонения, или равноденственный колюр, от которого отсчитываются прямые восхождения светил, проходит через оба полюса мира и точку весеннего равноденствия. С помощью карты звездного неба определите приблизительно направление этого круга (вернее, полукруга) [6, № 70].

Решение: На северном небе равноденственный колюр проходит примерно через Полярную звезду, β Кассиопеи (конец правой ветви в «W») и левую сторону Большого квадрата в Пегасе, проходящую через α Андромеды и γ Пегаса. Это полезно запомнить.

1.41. Далекие меридианы

На сколько километров отстоят друг от друга нулевой и 360-й меридианы в самом широком месте земного шара на экваторе? [6, № 9]

Решение: Они сливаются друг с другом.

1.42. Курс на Сириус!

«У меня был превосходный ориентир: звезда Сириус, перемещаясь по небу с востока на запад, пересекала цепь островов (Фиджи) как раз посередине. Я намеревался плыть на юг до тех пор, пока Сириус не окажется у меня прямо над головой, а затем на запад, пока не увижу землю». Правильно ли решение путешественника? [6, № 58]

Решение: Да, расчет путешественника верен: поскольку склонение Сириуса $-16^{\circ} 43'$, а о-ва Фиджи расположены между $15^{\circ} 40'$ и $21^{\circ} 00'$ ю. ш., то идя примерно по 16-й или 17-й параллели ю. ш., нельзя их миновать.

1.43. Компас

Как узнать с помощью компаса, что мы находимся в Южном полушарии Земли? [6, № 82]

Решение: В Южном полушарии в полдень стрелка компаса будет указывать на Солнце своим северным концом.

1.44. Арабские координаты

«Улугбек вычислил и привел в “Звездной книге” координаты 683 различных городов. Правда, теперь нам трудно проверить их точность... Арабские географы тех времен вели отсчет долготы от каких-то островов..., но где они находились, мы точно не знаем». Что можно сказать по поводу этого утверждения? [6, № 11]

Решение: Прежде всего, легко можно проверить точность определения широт. А далее, зная долготу даже одного пункта, легко найти меридиан, принятый Улугбеком за начальный. Наконец, при достаточно точных измерениях при любых начальных меридианах разности долгот любых двух пунктов должны быть одинаковы как в каталоге Улугбека, так и в современных каталогах.

1.45. Зодиак на горизонте

В каком месте Земли эклиптика может совпасть с горизонтом и когда это бывает? [4, № 30]

Решение: См. ответ к задаче 1.24.

1.46. От звезды до звезды

Каково линейное расстояние между двумя звездами, находящимися от нас на расстояниях r_1 и r_2 и разделенными на небе углом θ ? [4, № 33]

Решение: $\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta}$.

1.47. Слева Южный Крест

«Нос судна был направлен на планету, мерцавшую около созвездия Скорпиона. Когда эта планета скроется за горизонтом, я буду ориентироваться на Южный Крест, оставляя его слева по борту».

Дело происходило примерно на 13° ю. ш. В каком направлении плыло судно и в какой сезон года? [6, № 43]

Решение: Поскольку нос судна был направлен на заходящую планету, и, к тому же, юг был слева, очевидно, что судно плыло на запад. Близ экватора и даже на небольших южных широтах созвездие Южного Креста видно не всегда: оно отстоит от южного полюса мира на 35° . В этих широтах оно долго видно над горизонтом в период полуночной кульминации. Поскольку прямое восхождение звезд этого компактного созвездия около 12^h , Солнце имеет в это время прямое восхождение около 0^h ; следовательно дело происходило весной.

1.48. «Говорит и показывает α Кентавра!»

«...Антенна телевизора была направлена на Альфу Кентавра — ближайшую к нашей планете звезду». Дело происходило в Нью-Йорке ($40^\circ 40'$ с. ш.). Можно ли оттуда «нацелиться» на Альфу Кентавра? [6, № 60]

Решение: Склонение Альфы Кентавра $-60^\circ 50'$, поэтому крайний северный предел для нее (без учета рефракции) $29^\circ 10'$ с. ш.; севернее этой широты она уже не видна. Практически ее можно наблюдать на широтах южнее 25° с. ш. Поэтому в Нью-Йорке Альфа Кентавра не видна.

1.49. Северный полюс

На полярную научную станцию «Северный полюс — 2001» прибыла инспекция — начальство из Москвы. Выйдя из самолета, руководитель комиссии осмотрелся и недовольно заметил: «Непорядок: почему не отмечено положение земной оси? Ученые люди, а не знаете, что через Северный полюс проходит ось вращения Земли!» Как вы думаете, что ответил ему на это замечание начальник станции?

Решение: Начальник станции был вежливый человек. Он согласился с замечанием и пообещал исправить оплошность. «Однако, — добавил он, — поскольку станция находится на свободно дрейфующей льдине, которую течением и ветром сносит иногда на несколько километров в сутки, отметку земной оси придется каждый день переставлять. Для этого понадобится дополнительная штатная единица, а также снегоход (или вертолет) и топливо». Руководитель комиссии замахал руками и сказал, что в смету эти расходы не заложены, дополнительных фондов нет, и он не выделит на это ни копейки. Начальник станции пожалел, что такая хорошая идея не может быть

реализована. «Бюджет — святое дело», — добавил он, и дискуссия о земной оси завершилась к обоюдному удовольствию. Мораль: учитесь разговаривать с чиновниками!

1.50. Южный полюс

Антарктическая станция Амундсен—Скотт. Выйдя из самолета, молодой полярник побежал к шесту с табличкой, отмечающей Южный полюс, и попытался выдернуть его из снега.

— Что это вы задумали? — спросил его старший товарищ.

— Видите ли, я обещал поставить флаг нашего молодежного клуба аккурат в точку полюса. Поэтому я решил немного передвинуть эту табличку, чтобы освободить заветную точку.

— Да не мучайтесь вы, поставьте свой флаг рядом, и он окажется ничуть не в худшем положении.

— Как же так? — удивился молодой полярник. — Мой флаг окажется не на месте. Ведь ось Земли проходит только через одну точку.

— Вы уверены? — усмехнулся его старший коллега.

А вы, уважаемый читатель, как думаете?

Решение: В действительности земная ось не совсем жестко «закреплена» в теле планеты. Полюсы — Северный и Южный — немного перемещаются относительно своих средних положений. Амплитуда этих покачиваний невелика: всего около $0,3''$, что соответствует на поверхности Земли перемещению на 9 метров. Такое перемещение происходит за время порядка года. Разумеется, сама ось стабильна, а покачивания относительно нее испытывает поверхность Земли. Поэтому зафиксировать положение полюса на твердой поверхности на длительное время можно лишь с такой точностью.

1.51. Полярный градус

«11–12 августа. За день нас отнесло (на льдине) к востоку на целых восемь градусов. И мы уже так близки к полюсу, что один градус долготы равен всего двум–трем километрам». В указанное время дрейфующая льдина была примерно на 89° с. ш. Чему равна длина 1° долготы на этой широте? [6, № 290]

Решение: Дуга меридиана в 1° всюду имеет длину около 111 км (хотя вблизи экватора она немного короче — 110,6 км, а вблизи полюса немного длиннее — 111,7 км [37]). На таком отрезке поверхность Земли вокруг полюса можно считать плоской и определять длину

параллели как $2\pi \times 111,7 = 702$ км. Следовательно, на 1° долготы на этой широте приходится $(702/360)$ около 2 км.

1.52. Где градус длиннее?

Из разговора двух измученных путешественников, продвигающихся на лыжах к Северному полюсу:

— Держись, приятель! Я только что определил по спутниковой системе наши координаты: до полюса осталось всего несколько градусов широты.

— Я стараюсь держаться, но сдается мне, чем ближе мы к полюсу, тем длиннее становятся эти проклятые градусы.

Что мог бы ответить астроном на такое замечание о градусах широты?

Решение: Как ни странно, но второй путешественник прав: градус широты действительно имеет разную длину вдоль земной поверхности, причем, чем ближе к полюсу, тем он длиннее. Это вызвано сплюснутостью Земли вдоль оси вращения. У экватора протяженность одного градуса широты составляет 110,58 км, а у полюса (как Южного, так и Северного) — 111,70 км.

Заметим, что речь идет о геодезической широте или очень близкой к ней астрономической широте. Если же иметь в виду геоцентрическую широту, то зависимость протяженности градуса от нее будет обратная — у полюсов он, очевидно, короче, чем у экватора. Любителю астрономии следует внимательно уяснить различия разных определений широты, используя учебник или справочник.

1.53. Где зенит?

Чему равны часовой угол и азимут зенита? [4, № 39]

Решение: Часовой угол равен 0^h ; азимут неопределенный.

1.54. Кому это удобно?

Почему удобно считать азимуты в направлении юг — запад — север — восток? [4, № 49]

Решение: Заметим, что в указанном направлении отсчитываются как астрономический, так и геодезический азимуты (хотя у них различаются начальные точки отсчета: юг — у астрономического, север — у геодезического). Это направление удобно потому, что соответствует

суточному вращению небесной сферы... для наблюдателей Северного полушария. Отсюда ясно видно происхождение понятия «азимут».

1.55. К востоку от меридиана

При каком условии звезда прямого восхождения α будет находиться к востоку от меридиана в данный момент звездного времени (s)? [4, № 58]

Решение: $\alpha - 12^h < s < \alpha$.

1.56. Азимут не меняется

При каких условиях азимут звезды не меняется от ее восхода до кульминации [4, № 68].

Решение: Для наблюдателя, находящегося на земном экваторе и наблюдающего экваториальную звезду.

1.57. Где Сириус?

Где стоит на небе Сириус ($\alpha = 6^h45^m$) 21 марта через час после захода Солнца? 23 сентября через час после восхода Солнца (для средних широт Северного полушария)? [4, № 62]

Решение: Низко на юге в обоих случаях.

1.58. В кульминации

Чему равен азимут звезды в момент верхней кульминации для места на широте φ ? У всех ли звезд он одинаков? [4, № 101]

Решение: 0^h , если $\delta < \varphi$; 180° , если $\delta > \varphi$.

1.59. Азимут не ноль

У каких светил азимут в вашем городе никогда не равен нулю? [4, № 102]

Решение: У кульминирующих к северу от зенита ($\delta > \varphi$).

1.60. Светит эфиопская звезда

Москва и столица Абиссинии Аддис-Абеба лежат почти на одном меридиане. Широта Москвы $+56^\circ$, Аддис-Абебы $+9^\circ$. Какова разность высот, на которых звезду Сириус в момент верхней кульминации видят наблюдатели в этих городах? [4, № 104]

Решение: Сириус лежит к югу от небесного экватора, поэтому для наблюдателей Северного полушария разность высот его кульминации определится простой разностью широт наблюдателей: 47° .

1.61. Север и юг

Может ли какая-нибудь одна и та же звезда проходить через небесный меридиан г. Иркутска ($52^\circ 18'$) и в точке севера и в точке юга? А в других местах Земли может ли быть такое явление? [4, № 110]

Решение: Не может нигде.

1.62. Древние карты

Почему на старинных географических картах очертания берегов северных стран выглядят значительно точнее (ближе к современным картам), чем очертания побережий экваториальных территорий?

Решение: Основную погрешность в старинные карты вносило неточное знание долготы. При одинаковой ошибке в угловой мере долготы ее линейная ошибка уменьшается с ростом широты ($\propto \cos \varphi$).

1.63. Задача Робинзона

Человек взял палку длиной в 1 м и, воткнув ее в землю, измерил в полдень длину ее тени. Взяв по календарю склонение Солнца в этот день, он определил широту своей местности и получил ошибочный результат, несмотря на правильность его вычислений. В чем может заключаться причина этой ошибки? [4, № 130]

Решение: Возможны, как минимум, две причины:

- палка не была перпендикулярна к тени;
- был неверно определен момент полдня: на него указывает не декретное время, взятое по показанию часов, а момент минимальной длины тени.

1.64. Рефракция-1

Влияет ли рефракция на обе экваториальные координаты светил или только на одну и всегда ли? [4, № 170]

Решение: На обе, за исключением часового угла и прямого восхождения в кульминациях.

1.65. Рефракция-2

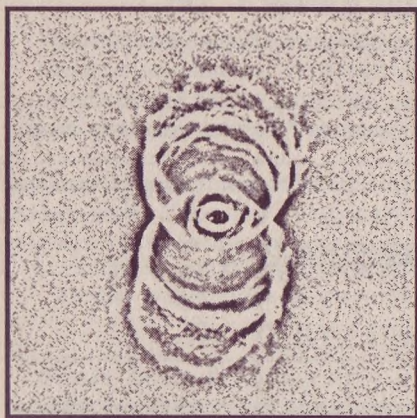
Влияет ли рефракция на обе эклиптические координаты светил и всегда ли? [4, № 171]

Решение: На обе, и всегда.

1.66. Часы остановились

Путешественник прибыл в некоторый ненаселенный пункт Крайнего Севера, имея в своем распоряжении таблицы координат (α и δ) звезд, таблицы затмений спутников Юпитера, вычисленные для гринвичского времени на текущий год, теодолит и звездные часы, случайно остановившиеся в дороге, но исправные. Описать порядок наблюдений и вычислений, которые путешественник должен произвести, чтобы определить свою широту и долготу [4, № 237].

Решение: 1) Наблюдая какую-нибудь звезду на одинаковой высоте до и после кульминации, установить полуденную линию и меридиан. 2) Отмечая прохождение звезд через меридиан, установить звездное время и поставить по нему хронометр. 3) Тут же, отсчитывая вертикальный круг, по меридианным высотам установить широту. 4) Наблюдать моменты затмения спутников Юпитера по своему хронометру. Перевести звездное время в среднее и, сравнивая с таблицами, определить долготу.



Глава 2

Время

2.1. Странные часы

Почему путешественники, идущие к Северному полюсу, предпочитают иметь часы со стрелками и циферблатом, разделенным на 24 часа.

Решение: В районе полюса в летнее время Солнце движется невысоко над горизонтом по кругу, почти не поднимаясь и не опускаясь в течение суток. Если часовая стрелка на часах путешественника делает, как и Солнце, один оборот в сутки, то часы могут служить «компасом». Например, если поставить часы в пункте выхода по местному солнечному времени и в пути ориентировать их часовой стрелкой на Солнце, то отметка «24 часа» всегда будет указывать направление на полюс.

2.2. Исчезла тень

«К полудню вы уже напрасно будете оглядываться в поисках своей тени. Солнце повисло прямо над головой, а тень скрылась под подошвами». Действие происходило в Дели ($28^{\circ} 40'$ с. ш.); определите месяц [6, № 86].

Решение: Севернее $23^{\circ} 27'$ с. ш. Солнце в зените не бывает. Максимальная высота Солнца в Дели в день летнего солнцестояния около 85° . В этот момент длина тени вертикально стоящего человека нормального роста (175 см) не может быть короче 15 см ($= 175 \times \cos 85^{\circ}$). Но, если не придирается, то можно считать, что такая тень спо-

собна спрятаться под подошвы, особенно, если человек чуть-чуть наклонится (в какую сторону?). Происходить это может с середины июня до первых чисел июля, когда склонение Солнца почти равно максимальному.

2.3. Звезда на экваторе

Какую часть суток проводит над горизонтом звезда, расположенная точно на небесном экваторе?

Решение: Полсутки независимо от широты наблюдателя (кроме полюсов, разумеется). Атмосферную рефракцию мы не учитываем.

2.4. Длина суток

Как изменилась бы длина солнечных суток относительно звездных, если бы Земля обращалась относительно Солнца с той же скоростью, но в противоположном направлении? [5, № 313]

Решение: Поскольку в году солнечных суток стало бы на одни больше, чем звездных, продолжительность каждого солнечного суток стала бы на $24^h/366 \approx 4^m$ короче звездных.

2.5. Солнечные часы

В каких местах земного шара солнечные часы имели бы самое простое устройство? [6, № 118] Почему именно там их никогда не сооружают?

Решение: На географических полюсах Земли. Часы состояли бы из вертикального стержня (гномона) и равномерно градуированного круглого циферблата. Но на полюсах такие часы, как минимум, зимние полгода будут бездействовать — полярная ночь; да и летом ясное небо на высоких широтах бывает не часто. К тому же, в районе Северного полюса постоянная подвижка льдов будет нарушать ориентацию часов.

2.6. Когда равноденствие?

Почему день весеннего равноденствия не всегда попадает на 21 марта? [5, № 354]

Решение: Потому что интервал времени между весенними равноденствиями, — тропический год, содержит нецелое число суток

(365,2422), а календарные года — неодинаковое количество суток (високосный 366, невисокосный 365).

2.7. Где равноденствие?

Определите, где сегодня день равен ночи? [8, II.4]

Решение: Сегодня и всегда — на экваторе. Но если сегодня день весеннего или осеннего равноденствия, то день равен ночи и во всех прочих местах Земли (кроме полюсов, конечно).

2.8. Тень

В давние времена в жарких странах время измеряли по длине тени от вертикального шеста. Можно ли применить этот способ на Северном или Южном полюсах? [8, I.8]

Решение: Нет, так как на полюсах высота Солнца в течение суток практически не меняется. Но в летнее время длина тени может служить календарем.

2.9. Новогодний сюрприз

Посмотрите задачу 5.4. Когда нужно произвести выстрел из Англии, чтобы снаряд прибыл в пункт назначения в момент наступления нового года?

Решение: Считая, что Новая Зеландия лежит на 180° восточнее Англии, определим, что время там опережает английское (всемирное) на 12^h . К тому же полет снаряда продолжается минут 50. Значит новогоднее поздравление нужно выстрелить из Англии 31 декабря в $11^h 10^m$.

2.10. Орион

В Новосибирске 22 декабря восходит Солнце. Можно ли в это время в Москве видеть созвездие Ориона? [9, I.3.3.2]

Решение: Новосибирск лежит примерно на той же широте (55°), что и Москва, но на 45° восточнее. Значит Солнце там восходит на 3 часа раньше, чем в Москве. В день зимнего солнцестояния (22 декабря) прямое восхождение Солнца 18^h , а восходит оно на широте Москвы и Новосибирска в $8^h 30^m$ местного среднего солнечного времени

(см. Астрономический календарь). Значит в момент восхода Солнца в Новосибирске там в нижней кульминации находятся точки небесной сферы с прямым восхождением $18^h + 8,5^h - 24^h = 2,5^h$, а западный горизонт пересекает точка небесного экватора с $\alpha = 2,5^h + 6^h = 8,5^h$. А в Москве в этот момент на западном горизонте лежит точка экватора с $\alpha = 8,5^h - 3^h = 5,5^h$.

Глядя на карту звездного неба, мы видим, что фигура Ориона заключена по прямому восхождению между $\alpha = 5^h$ и 6^h , а по склонению между $\delta = +10^\circ$ и -10° . Поэтому самая эффектная часть созвездия, ниже Пояса Ориона, в этот момент уже скроется под горизонтом, но Бетельгейзе и, может быть, Беллатрикс еще будут видны.

2.11. Венера

Чему равен звездный период обращения Венеры вокруг Солнца, если ее наибольшая восточная элонгация повторяется через 1,60 года?

Решение: Пусть P_V и P_\oplus — звездные (сидерические) периоды обращения Венеры и Земли вокруг Солнца. Тогда за единицу времени (например, за сутки, если P_V и P_\oplus выражено в сутках) Венера проходит $1/P_V$ часть орбиты, а Земля $1/P_\oplus$. Значит Венера опережает Землю за единицу времени на $1/P_V - 1/P_\oplus$ часть орбиты. А на целый круг она опередит Землю за синодический период P , который найдем из очевидного соотношения:

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_V} - \frac{1}{P_\oplus}.$$

Именно с таким периодом повторяются различные конфигурации Венеры относительно Солнца, в том числе и одноименные (т. е. восточные или западные) элонгации. Очевидно, что

$$\frac{1}{P_V} = \frac{1}{P} + \frac{1}{P_\oplus}.$$

А поскольку $P = 1,60$ года и $P_\oplus = 1$ год, то

$$P_V = 0,615 \text{ года} = 225 \text{ сут.}$$

2.12. Марс

Чему равен звездный период обращения Марса вокруг Солнца, если его соединение с Солнцем повторяется в среднем через 2,14 года?

Решение: Поскольку Марс — внешняя планета (по отношению к Земле), его соединения с Солнцем повторяются через синодический период, который, следуя рассуждениям задачи 2.11, найдем как

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_{\oplus}} - \frac{1}{P_M}.$$

Тогда звездный период обращения Марса вокруг Солнца составит

$$\frac{1}{P_M} = \frac{1}{P_{\oplus}} - \frac{1}{P},$$

откуда

$$P_M = 1,88 \text{ года} = 687 \text{ суток}.$$

2.13. День смеха

Где дольше длится день 1 апреля — в Токио или в Тегеране, если эти города лежат на одной географической параллели, но Тегеран расположен на $88^{\circ}21'$ западнее Токио? [5, № 271]

Решение: В начале апреля продолжительность дня в Северном полушарии быстро возрастает, поскольку недавно было весеннее равноденствие (23 марта). Поэтому, чем позже восходит Солнце на данной широте, тем длиннее будет день. В Тегеране восход Солнца происходит почти на 6 часов позже, чем в Токио ($88^{\circ}21'/15 = 5^{\text{h}}53^{\text{m}}$). За это время склонение Солнца увеличится и продолжительность дня возрастет.

2.14. Ровно две недели

Когда разница между юлианским и григорианским календарями составит 14 дней?

Решение: Различие между юлианским (старым) и григорианским (новым) календарями состоит в правиле счета високосных лет. В юлианском календаре каждый четвертый год (номер которого делится без остатка на 4) считается високосным и содержит день «29 февраля». А в григорианском календаре это правило немного изменено: среди обычных, «неюбилейных» годов високосные назначаются также, как в юлианском; но среди «юбилейных» годов, оканчивающих столетия (например, 1700, 1800, 1900, 2000, и т. д.) високосными считаются только те, число столетий, в которых делится на 4. Поэтому 2000 г. был високосным и в юлианском, и в григорианском календарях, а 1700, 1800 и 1900 годы были високосными в юлианском календаре, но в григорианском — не были. Вот почему именно

в «юбилейные» годы при переходе от февраля к марту разница между юлианским и григорианским календарями увеличивается на 1 день; не происходит этого только в те «юбилейные» годы, число столетий, в которых делится на 4.

Теперь задачу решить легко. Вспомним, что весь XX век разница между юлианским и григорианским календарями составляла 13 дней. В 2000-м високосном году она не изменилась. Теперь следует ждать очередного «юбилейного» года — им будет 2100 г., високосный в юлианском и простой в григорианском календарях. Поэтому с момент наступления 1 марта 2100 г. разница между этими календарями увеличится до 14 дней.

2.15. Идеальные часы

Известно, что простейшие солнечные часы показывают время с ошибкой, доходящей до 15 минут. Предложите конструкцию солнечных часов, лишенную этого недостатка.

Решение: Это должны быть «экваториальные часы», у которых плоскость циферблата параллельна плоскости экватора. Часовые деления нанесены внутри тонкого экваториального полукруга (полуцилиндра), а отбрасывающим тень гномоном служит не тонкий стержень, представляющий полярную ось, а надетый на эту ось цилиндр, диаметр сечения которого зависит от высоты так же, как уравнение времени от склонения Солнца. Этот цилиндр заменяется дважды в году — в дни летнего и зимнего солнцестояний. Составленные вместе «полугодовые» цилиндры представляют «восьмерку» (аналемму), которую описывает положение Солнца на небе, зафиксированное в одно и то же среднее солнечное время. Разумеется, это лишь одно из возможных решений задачи.

2.16. Именины планеты

В повести Аркадия и Бориса Стругацких «Попытка к бегству» капитан звездолета, прибывшего в неизученную планетную систему, «...пригнул к себе раструб бортового дневника и продиктовал:

— Юлианский день двадцать пять сорок два девятьсот шестьдесят семь. Вторая планета системы ЕН 7031 нарекается Саулой, по имени члена экипажа историка Саула Репнина».

В какой век перенесла героев повести фантазия братьев Стругацких?

Решение: По «Астрономическому календарю» определим, что, например, 1 января 2000 г. было 2 451 545-м юлианским днем. В повести указана дата 2 542 967. Разница составляет 91 422 сут., или

91 422/365,2422 = 250,31 года. Следовательно действие происходит в XXIII веке, а точнее — в апреле 2250 года.

2.17. «Удачный год»

Если простой/високосный год начался понедельником, то каким днем недели он закончится? [6, № 143]

Решение: Понедельником/вторником. Пример: простой 2001 год начался и закончился понедельником. Для быстрого решения этой задачи нужно было заметить, что число 364 делится на 7 без остатка.

2.18. У кого равноденствие дольше?

Где 21 марта день длиннее — в Сиднее ($\varphi = -33^\circ$, $\lambda = 151^\circ$ в. д.) или в Сантьяго ($\varphi = -33^\circ$, $\lambda = 70^\circ$ з. д.)?

Решение: В Сиднее день длиннее, поскольку в Южном полушарии продолжительность дня в это время года убывает, а в Сантьяго тот же календарный день начинается почти на 15 часов позже, чем в Сиднее.

2.19. Верная примета

В романе Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.) происходит такой диалог:

«— А правда ли, — воскликнула Мадлен, — что, когда падает звезда, кто-нибудь умирает?

— Правда, — с улыбкой ответил Фингер. — Вот расчет: на Земле каждую секунду умирает не менее двух человек. Падение же звезды длится примерно полсекунды».

Согласны ли вы с таким утверждением?

Решение: Население Земли 6 млрд человек. Средняя продолжительность жизни около 60 лет (= 2 млрд с). Следовательно, за каждую секунду в среднем умирает 3 человека. Метеор, как правило, наблюдается около секунды. Поэтому расчет Фингера совершенно точен.

2.20. Молодая или старая?

Как по внешнему виду Луны определить, начался ли лунный месяц недавно или он близится к концу?

Решение: Если лунный серп виден как дуга у буквы Р, то Луна растущая, и лунный месяц начался недавно. Если серп в виде буквы С — Луна старая, месяц заканчивается.

2.21. Ночь коротка...

Почему на земном экваторе день всегда продолжительнее ночи на 7 минут? [29, с. 11]

Решение: Продолжительностью дня называют промежуток времени между наблюдаемым восходом и заходом верхнего края Солнца. Вследствие атмосферной рефракции ($35'$ у горизонта) и видимого диска у Солнца ($16'$) его видимый верхний край «опережает» математический центр диска на $51'$ утром и на столько же отстает от него вечером. Это почти на 7 минут удлиняет день на экваторе (и еще сильнее — вдали от экватора).

2.22. Долгота и время

Разность долгот двух мест равна разности каких времен — солнечных или звездных? [4, № 220]

Решение: Безразлично.

2.23. Даты

Сколько дат одновременно может быть на Земле? [29, с. 11]

Решение: Две.

2.24. Магелланов пролив

В романе «Воздушный корабль» (гл. XIII) Жюль Верн пишет: «23-го июля на юго-востоке показалась земля. Это было недалеко от входа в Магелланов пролив. В это время года на 54-й южной параллели ночь продолжается восемнадцать часов. Путники чувствовали холод: температура была шесть градусов ниже нуля».

Определите, в какое время года это было? Проверьте, действительно ли 18 часов продолжается там ночь 23-го июля? [12, № 404]

Решение: Действительно, в конце июля в Южном полушарии зима; температура на широте Магелланова пролива приблизительно такая,

как указал Жюль Верн. А вот продолжительность ночи никогда не достигает там 18-ти часов. Чтобы убедиться в этом, достаточно открыть любой астрономический календарь и посмотреть таблицу «Долгота дня». На широте 54° самый короткий день (в период летнего солнцестояния) длится около 7 часов 15 минут. Значит, продолжительность самой длинной ночи не превосходит 16 часов 45 минут. К тому же дата 23 июля отстоит на месяц от дня солнцестояния. В той же таблице мы увидим, что за этот период день на указанной широте удлиняется почти на 40 минут. Таким образом, Жюль Верн «удлинил» ночь на 2 часа.

2.25. Задача греческих мореплавателей

Древнегреческие мореплаватели боялись времени года, когда Арктур заходил вечером, а также времени года, когда Орион был виден перед восходом Солнца на западной части небесного свода, считая это время за очень бурное. Пользуясь подвижной картой неба, определите, какое время года это было? [12, № 19]

Решение: Легко найти, что греческие мореплаватели боялись конца осени, именно — месяца ноября.

2.26. Времена года у римлян

Лето начиналось у римлян в то время, когда Плеяды были видны восходящими рано утром, а зима начиналась, когда Плеяды заходили рано утром.

В каком месяце начиналось у римлян лето и в каком — зима? Для решения используйте подвижную карту неба [12, № 18].

Решение: Лето у римлян начиналось в мае, а зима — в ноябре.

2.27. Плеяды в Австралии

Австралийские аборигены танцуют в честь семи звезд (Плеяд) в ту ночь, когда Плеяды в полночь имеют наибольшую высоту над горизонтом. Они полагают, что Плеяды покровительствуют коренным австралийцам. Когда это происходит? Высоко ли поднимаются в эту ночь Плеяды? [12, № 28]

Решение: Прямое восхождение Плеяд около 4^h ; если они кульминируют в полночь, то Солнце должно в этот момент иметь прямое восхождение $4^h + 12^h = 16^h$, что бывает ежегодно (см. звездную карту или астрономический календарь) около 25 ноября.

Плеяды лежат примерно на 25° к северу от небесного экватора. Приняв широту центральных областей Австралии за -25° , мы увидим, что небесный экватор там пересекает меридиан на высоте 65° над точкой севера. Следовательно, Плеяды поднимаются на севере на 40° над горизонтом. Для других районов Австралии ответ изменится не более чем на $\pm 13^\circ$.

Как видим, Плеяды в Австралии видны не так хорошо, как в наших средних северных широтах. Для жителей южного континента они блистают лишь в период австралийской весны. Возможно, с этим и связано их почитание местными жителями.

2.28. Чехов и Орион

В рассказе А. П. Чехова «Почта» читаем:

«Студент поглядел на небо и продолжал:

— Даже по небу видно, что уже осень. Посмотрите направо. Видите три звезды, которые стоят рядом по одной линии? Это созвездие Ориона, которое появляется в нашем полушарии только в сентябре.

Почтальон, засунувший руки в рукава и по уши ушедший в воротник своего пальто, не шевельнулся и не взглянул на небо. По-видимому, созвездие Ориона не интересовало его. Он привык видеть звезды и, вероятно, они давно уже надоели ему. Студент помолчал немного и сказал:

— Холодно! Пора бы уж быть рассвету. Вам известно, в котором часу восходит теперь солнце?

— Что-с?

— В котором часу восходит солнце?

— В шестом! — ответил ямщик».

Определите при помощи звездной карты и астрономического календаря: во-первых, правда ли, что созвездие Ориона появляется в наших широтах (простим студенту неточность с «полушарием») только в сентябре; во-вторых, какого числа происходила эта поездка; в третьих, в каком примерно азимуте стоял Орион в момент разговора студента с почтальоном; и в четвертых, в каком направлении ехал тарантас, если оба пассажира сидели лицом по направлению к лошадям? [12, № 406]

Решение: Орион на широте Москвы виден со второй половины августа до середины апреля. Достаточно высоко над горизонтом Орион, действительно, начинает подниматься лишь в сентябре. Если иметь в виду местное (солнечное) время, то Солнце восходит в шестом часу в сентябре. Под утро в сентябре Орион стоит уже довольно высоко, почти точно на юге. Значит, тарантас ехал на восток.

2.29. Полярный день

Если Солнце в каком-либо месте не заходит за горизонт более суток, мы называем это «полярным днем», а если не восходит — «полярной ночью». Посмотрите в таблицу, где указана их продолжительность на некоторых широтах Земли:

Таблица 2.1

Продолжительность полярного дня и полярной ночи

Северная широта, °	Полярный день, сут.	Полярная ночь, сут.	Южная широта, °	Полярный день, сут.	Полярная ночь, сут.
68	53	25	68	50	28
70	73	53	70	68	56
72	89	71	72	84	76
74	103	86	74	98	91
76	116	99	76	110	105
78	128	111	78	121	118
80	139	123	80	132	130
82	150	134	82	143	141
84	161	145	84	153	152
90	191	175	90	183	182

Объясните, почему в среднем полярный день длится дольше полярной ночи? Почему на Северном полюсе полярный день длиннее, чем на Южном?

Решение: Продолжительность полярного дня в среднем больше, чем полярной ночи, во-первых, из-за атмосферной рефракции, которая «приподнимает» солнечный диск над горизонтом, а во-вторых, «по определению», ибо *днем* принято называть период, когда над горизонтом видна какая-либо часть солнечного диска, а не его центр.

Полярный день на Северном полюсе длиннее, чем на Южном, потому что в летние месяцы Северного полушария (апрель — сентябрь) Земля перемещается по той части своей орбиты, которая более удалена от Солнца; в районе 6 июля Земля проходит через точку афелия. В соответствие со Вторым законом Кеплера угловое перемещение Земли по орбите в этот период замедляется, значит, Солнце медленнее движется по эклиптике. Поэтому затягивается лето в Северном полушарии и сокращается в Южном. Эффект этот настолько велик, что на Южном полюсе он «побеждает» рефракцию: полярный день там оказывается чуть-чуть короче полярной ночи.

2.30. Часы спешат

Ход часов отрегулирован неверно: они спешат, «убегая» за сутки вперед на 1 минуту. Насколько они опередят сигнал точного времени за неделю?

Решение: Разумеется, за неделю эти часы «убегут» вперед на 7 минут. Очень простая задача, но она служит необходимой прелюдией к следующей, более сложной задаче.

2.31. Земля замедляет вращение

Да-да, вращение нашей планеты постепенно замедляется! Главная виновница этого — Луна, которая вызывает на Земле приливы, бегущие по поверхности планеты с востока на запад. Впрочем, и Земля не остается в долгу: она вызывает на Луне значительно более сильные приливы, которые давно уже заставили нашу спутницу затормозить свое вращение настолько, что она постоянно смотрит на Землю одной своей стороной. Теперь и Луна пытается сделать то же самое с Землей. До полного «приручения» нашей планеты еще далеко, но все же ее вращение постепенно тормозится, так что за 100 лет длина суток возрастает на 0,0016 с. Вопрос: через сколько лет Земля в своем вращении отстанет ровно на 1 оборот?

Решение: Если предыдущую задачу можно было уподобить движению двух поездов с разными (но постоянными!) скоростями, то механической аналогией для этой задачи может также служить гонка двух поездов, один из которых сохраняет постоянную скорость (движение без торможения, гипотетическая Земля), а второй движется равноускоренно, с постоянным торможением (реальная Земля). Если поезда вышли из одной точки с одинаковыми скоростями, а ускорение второго поезда равно a , то со временем (t) расстояние между ними составит $S = at^2/2$. Вот и все; единственная тонкость — это правильно записать величину a . Если величину S мы хотим измерять в сутках (т. е. в оборотах планеты), а время — в годах, то значение $a = 0,0016 \text{ с}/(\text{сут } 100 \text{ лет})$ следует перевести в единицы $\text{сут}/\text{год}^2$. Очевидно, для этого требуется разделить его на количество секунд в сутках и умножить на количество суток в году:

$$a = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \times 365,24}{100 \times 86\,400} = 6,76 \cdot 10^{-8} \text{ сут}/\text{год}^2.$$

Теперь мы легко определим время, за которое Земля отстанет на 1 оборот ($S = 1 \text{ сут}$):

$$t = \sqrt{2S/a} = \sqrt{2/6,76 \cdot 10^{-8} \text{ сут}/\text{год}^2} = 5\,440 \text{ лет}.$$

Таким образом, с эпохи фараонов и до наших дней Земля «не докрутила» один оборот. Это весьма точно подтверждается описаниями исторических затмений Солнца. Например, проведенные без учета торможения Земли расчеты показывают, что в определенный день

в определенном месте должно было наблюдаться затмение, а исторические хроники говорят, что в тот день лунная тень прошла существенно восточнее расчетной траектории.

2.32. Анекдот

«Учительница говорит ученикам:

— Сегодня будет затмение Солнца. Посмотрите это ровно в 22:30.

Голос с задних парт:

— По какому каналу?»

Тут надо смеяться. Однако, вот вопрос — над кем: над учительницей или над учеником?

Решение: Для ответа на вопрос в задаче недостаточно данных: мы не знаем, где и когда происходил этот разговор. Если дело было в экваториальных странах, где Солнце заходит за горизонт в районе 6 часов по местному времени, то прав ученик, собравшийся смотреть редкое явление по телевизору. Смеяться будем над учителем.

А если дело было у полярного круга в начале или в конце лета, то по местному (декретному + летнему) времени в 22:30 Солнце вполне могло быть над горизонтом. Например, в конце мая в Мурманске долгота дня около 23 часов, т. е. Солнце скрывается под горизонтом лишь на 1 час в районе полуночи. В этой ситуации можно посмеяться над учеником из анекдота.

Чтобы до конца разобраться в этой задаче, решите ее для своей местности: с учетом широты и долготы места наблюдения, принятого у вас декретного времени и не забудьте о летнем времени. Предположите, что действие происходит в конце мая или начале сентября (учебное время). Моменты захода Солнца на широте 56° и широтные поправки найдете в астрономическом календаре.

2.33. Эфемерида Солнца

Можно сказать, что Солнце из года в год совершает один и тот же путь по небесной сфере. Почему же его склонения, приводимые в астрономических календарях на одну и ту же дату разных лет, отличаются друг от друга? [6, № 72]

Решение: В основном потому, что период обращения Земли вокруг Солнца (звездный, или сидерический год) не равен целому числу суток. Поэтому начало календарного года каждый раз застаёт Землю немного в разных точках орбиты (соответственно, Солнце — в разных точках эклиптики). Есть и другие причины, например, прецессия

земной оси, приводящая к смещению точки весеннего равноденствия, к которой «привязаны» начальные точки небесных систем координат — эклиптической и экваториальной.

2.34. Азбучная истина

«Солнце нам очень пригодится. Кстати, смотрите, сейчас ровно полдень, и оно у нас прямо над головой.

— На экваторе всегда так, — пробормотал я... — об этом написано во всех учебниках географии». Что здесь неверно сказано? [6, № 83]

Решение: На экваторе Солнце бывает прямо над головой только в дни равноденствий. Кроме того, сомнительно, чтобы полдень на часах, идущих по гражданскому (декретному) времени, совпал с истинным солнечным полуднем.

2.35. Когда равноденствие?

Принято считать, что в обычном, невисокосном году 21 марта и 23 сентября — дни равноденствий, когда день и ночь на всем земном шаре делятся по 12 часов. Посмотрите, однако, в астрономический или отрывной календарь, например, на 2001 год, и вы найдете, что еще 18 марта продолжительность дня на широте Москвы составляла 12 часов 03 минут; 19 марта — 12 часов 07 минут; 20 марта — 12 часов 12 минут; а 21 марта — 12 часов 16 минут. Подобно этому 23 сентября день продолжался 12 часов 09 минут; 24 сентября — 12 часов 05 минут, и только 25 сентября день продолжался ровно 12 часов. Чем объясняется такое расхождение календаря с общепринятым мнением?

Решение: Продолжительностью дня принято называть промежуток времени от видимого восхода верхнего края Солнца до его видимого захода. Учитывая атмосферную рефракцию у горизонта ($35'$) и угловой радиус солнечного диска ($16'$), мы видим, что в тот момент, когда верхний край Солнца на горизонте, его центр на $51'$ ниже горизонта. Для наблюдателя на экваторе, где Солнце у горизонта движется вертикально, это дает выигрыш дневного времени, равный $24^h \times 51' / 360^\circ = 3,4^m$ утром и столько же вечером. На широте Москвы, где Солнце в равноденствие восходит и заходит под углом около 34° к горизонту, этот эффект почти удваивается и составляет $6,1^m$ утром и столько же вечером; всего около $12,2^m$. Это почти точно соответствует избыточной продолжительности дня 21 марта и 23 сентября. Оставшиеся небольшие отличия связаны с тем, что каждый

год момент пересечения Солнцем небесного экватора не в точности совпадает с общеизвестными датами равноденствий. Например, в 2001 г. весеннее равноденствие было 20 марта в $13^{\text{h}} 31^{\text{m}}$, а осеннее — 22 сентября в $23^{\text{h}} 04^{\text{m}}$ всемирного времени.

2.36. Полярная ночь

Экспедиция У. Э. Парри в 1819 г. зимовала возле острова Мелвилл, в заливе Уинтер Харбор; зимняя ночь началась 6 ноября и закончилась 7 февраля. Определите по этим датам широту места зимовки [6, № 99].

Решение: Проще всего решить эту задачу с помощью «Справочника любителя астрономии» П. Г. Куликовского, найдя в его таблицах продолжительность полярной ночи в зависимости от широты с учетом рефракции. В нашем случае ночь продолжалась 93 сут., что по таблицам дает широту зимовки 75° . Действительно, взяв карту северной части Канады, мы легко найдем на этой широте, среди островов Королевы Елизаветы, архипелаг Парри, крупнейшим островом которого является Мелвилл. Легко догадаться, что как раз экспедиция Уильяма Парри открыла эти земли.

2.37. Истинные сутки

Когда в году бывают самые длинные и самые короткие истинные солнечные сутки? [6, № 114]

Решение: Истинными солнечными сутками называют промежуток времени между двумя последовательными одноименными (например, нижними) кульминациями Солнца. Продолжительность истинных солнечных суток в течение года изменяется приблизительно на 52 с: максимальная продолжительность $24^{\text{h}} 00^{\text{m}} 30^{\text{s}}$ среднего солнечного времени наблюдается 22–23 декабря, а минимальная $23^{\text{h}} 59^{\text{m}} 38^{\text{s}}$ между 14 и 16 сентября. Это происходит из-за неравномерности годичного движения Солнца по эклиптике (т. е. — Земли по орбите) и в результате наклона эклиптики к экватору.

2.38. Загадка уравнения времени

Один любитель астрономии недоумевал: «Как это понять? С одной стороны, нам известно, что истинные солнечные сутки по своей длительности лишь незначительно отличаются от средних солнечных, а, с другой стороны, уравнение времени в ноябре достигает 16 минут!» Разъясните это недоумение [6, № 116].

Решение: Уравнение времени показывает разницу в моментах верхней кульминации действительного и фиктивного (среднего) Солнца. Эта разница накапливается в течение нескольких месяцев из небольшого различия в длительности истинных и средних солнечных суток. Зная максимальное различие в продолжительности указанных суток (около 1^m , см. задачу 2.37) и характерное время накопления (порядка месяца), мы легко оценим полную амплитуду уравнения времени: $1^m \times 30 = 0,5$ часа.

2.39. Солнечное время

Почему сейчас в обыденной жизни не пользуются истинным солнечным временем? [6, № 113]

Решение: Истинное солнечное время задается видимым движением Солнца по небу. Например, истинные солнечные сутки — это интервал между двумя последовательными прохождением Солнца через небесный меридиан в нижней кульминации. Если бы это движение отражало только вращение Земли вокруг своей оси, то оно происходило бы очень равномерно. Но оно связано также с неравномерным движением Земли вокруг Солнца и с наклоном земной оси; поэтому истинные солнечные сутки переменны. По этой причине простые солнечные часы спешат или отстают порою на четверть часа. Для измерения времени в быту и в науке используется математически вычисленное положение среднего солнца и, соответственно, средние солнечные сутки — интервал между двумя последовательными прохождением среднего солнца через небесный меридиан в нижней кульминации. Средние солнечные сутки имеют практически постоянную длину.

2.40. Звездное время

Звездные сутки в противоположность истинным солнечным суткам имеют постоянную длительность. Почему же ими не пользуются в повседневной жизни? [6, № 111]

Решение: Потому что: 1) удобнее измерять время, используя движение по небу наиболее заметного светила — Солнца, а не точки весеннего равноденствия, ничем на небе не отмеченной; 2) при пользовании звездным временем за год получилось бы 366 звездных суток при 365 вполне заметных днях; 3) звездные сутки начинаются в разные часы дней и ночей; 4) при пользовании какими бы то ни было солнечными сутками мы в какой-то степени можем ориентироваться во времени по положению Солнца на небе, а при пользовании звездными сутками такая ориентация была бы довольно затруднительна

и совсем невозможна для лиц, плохо знакомых с астрономией; 5) активная часть наших суток приходится на дневное время, когда звезды не видны вовсе; 6) легкая облачность скрывает звезды, но не мешает ориентироваться во времени по Солнцу.

2.41. Вдоль меридиана

Обычно считается, что на всем протяжении какого-либо меридиана, от полюса и до полюса, один и тот же час суток и что при движении по меридиану нет надобности в перестановке стрелки часов. Так ли это на самом деле? [6, № 119]

Решение: Нет. Довольно часто один и тот же меридиан проходит по разным часовым поясам, границы которых обычно согласуются с административным, а не с географическим делением земного шара (рис. 2.1). Однако местное звездное и местное среднее солнечное время на всем протяжении любого меридиана одинаковы.

2.42. Вокруг света

Филеас Фогг — герой романа Жюль Верна «Вокруг света за 80 дней» выгадал один день во время кругосветного путешествия. В каком направлении он объехал земной шар? [6, № 127]

Решение: С запада на восток.

2.43. Перемена дат

Сравните два указания, касающиеся изменения даты при переезде через демаркационную линию:

1) «Корабль, направляющийся к востоку, с полуночи, следующей за переходом через линию изменения даты, повторяет свою дату, например, после 5 числа считает опять 5. Корабль, направляющийся к западу, в полночь, следующую за переходом через линию изменения даты, попускает очередное число, например, после 4 считает не 5, а 6 число».

2) «На корабле или самолете, пересекающем линию изменения дат, двигаясь с запада на восток, в счете календарных дат возвращаются на один день назад; например, подойдя к линии изменения дат в 10 часов 2 мая, после ее пересечения считают 10 часов 1 мая. При движении с востока на запад к календарной дате прибавляют один день, так что, подойдя к линии изменения дат с востока в 10 часов 2 мая, считают 10 часов 3 мая».

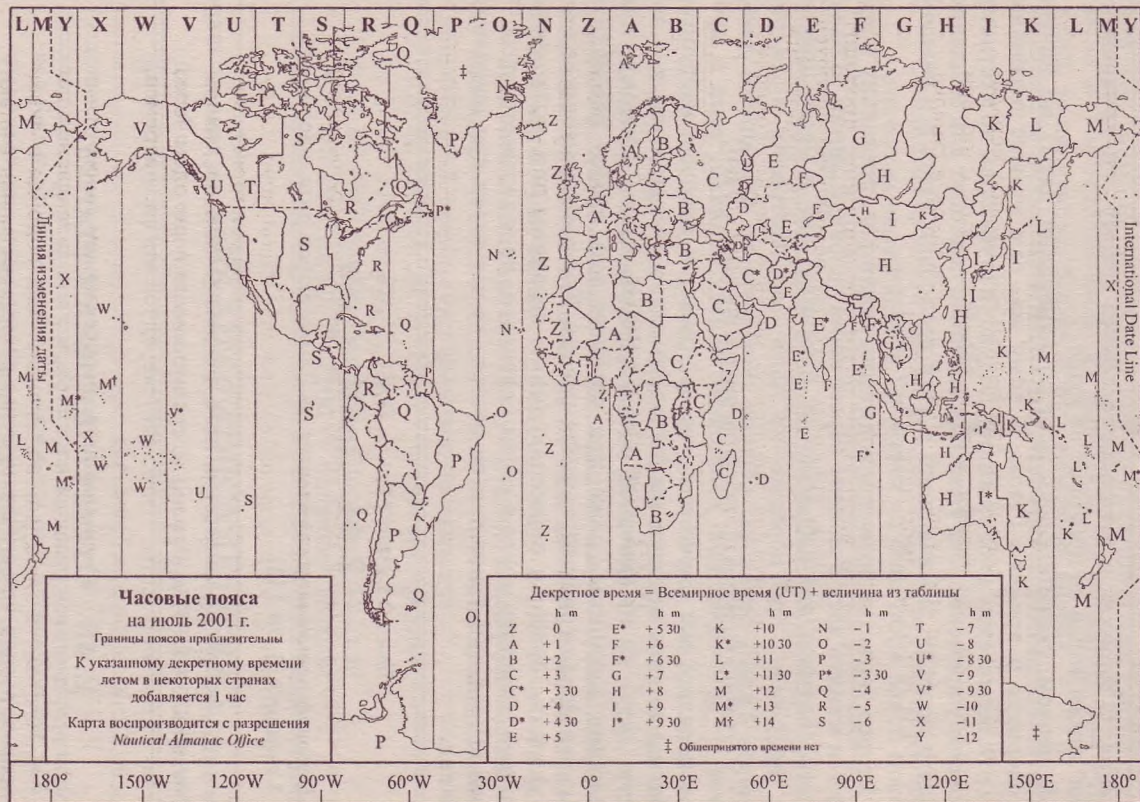


Рис. 2.1

Почему во всех этих указаниях говорится о морях и летчиках? Какое из указаний вы посоветуете иметь в виду морям, а какое — летчикам? [6, № 128]

Решение: О морях и летчиках говорится потому, что демаркационная линия нигде не проходит по суше.

В первом указании речь идет об изменении даты, но ничего не говорится о времени суток. К тому же, сам момент перемены даты откладывается до ближайшей полуночи (очевидно, по местному солнечному времени). Это указание идеально подходит для медленно идущего корабля, проводящего в пути несколько суток и в каждом часовом поясе живущего по местному времени.

Второе указание более подходит для авиаторов, поскольку предлагается менять дату в момент пересечения условной линии. В большинстве случаев это избавляет от путаницы дат в месте прибытия; например, при перелете из Азии или Австралии в Америку через Тихий океан вы обычно попадаете во вчерашний день, точнее — во вчерашнюю календарную дату. Однако, если в процессе перелета вы пересекли часовой пояс, в котором наступила полночь, то при посадке вы попадете не во вчерашнюю, а в текущую дату, но из вечерней в ее утреннюю часть. Поэтому, для избежания путаницы, даже при перелете есть смысл переводить часы, пересекая границы часовых поясов. И вот в этом вопросе второе указание неверно: пересекая линию перемены дат, вы должны не только изменить число в своем календаре, но и перевести часы — на час вперед при движении на восток, на час назад при движении на запад.

2.44. День за два

Сколько времени удерживается на Земле любая дата, например, 1 января? [6, № 133]

Решение: Любая календарная дата удерживается на земном шаре в течение двух суток.

2.45. Отстает широким шагом

Как это получается, что юлианский календарь при большей длительности года, чем его фактическая длительность, все-таки отстает от природы? Ведь это напоминает отставание одного путника от другого при большей длине шага у отстающего? Разберитесь в этой неувязке [6, № 137].

Решение: Чем больше какая-нибудь мера, тем меньшее число раз она содержится в измеряемой величине. Таким образом, при пользовании юлианским годом (365,2500 сут) мы получаем меньше годов и долей года, чем при использовании тропического года (365,2422 сут). Если бы мы использовали для календаря год меньший, чем тропический, то получалось бы, наоборот, забегание вперед.

2.46. Два века

Сколько лет прошло от начала сотого года до нашей эры до начала сотого года нашей эры? [6, № 142]

Решение: 199 лет.

2.47. День рождения Петербурга

Днем основания Петербурга считается 16 мая 1703 г. (старого стиля). Когда у нас отмечалось 250-летие со дня его основания? Когда будет отмечаться 300-летие? [6, № 141]

Решение: 250-летие отмечалось 27 мая 1953 г., а 300-летие будет отмечаться 27 мая 2003 г.

Для того чтобы перевести дату события, указанную по юлианскому календарю (старый стиль), в дату по григорианскому календарю (новый стиль), используют следующую таблицу:

от 5. X. 1582 до 29. II. 1700	— поправка 10 дней
от 1. III. 1700 до 29. II. 1800	— поправка 11 дней
от 1. III. 1800 до 29. II. 1900	— поправка 12 дней
от 1. III. 1900 до 29. II. 2100	— поправка 13 дней.

2.48. Открытие Америки

Датой открытия Америки считается 12 октября 1492 г. Какая это дата по новому стилю? [6, № 140]

Решение: Нового стиля тогда еще не было.

2.49. Селекционер

«Иван Владимирович Мичурин родился 28 (15) октября 1855 года». Разберитесь в этих датах и сообразите, верны ли они? [6, № 146]

Решение: Очевидно, дата в скобках указана по старому стилю. Тогда первая дата неверна. Надо было бы написать: 27 (15) октября 1855 г.

2.50. Странный месяц

Почему римляне присоединили добавочный день в високосном году к февралю, а не к какому-нибудь другому месяцу? [6, № 148]

Решение: Потому что в римском календаре февраль сначала был последним месяцем года.

2.51. Во сколько сегодня полдень?

Зимой в Москве Солнце кульминирует на юге примерно в 12 часов 30 минут по московскому времени. А в какое время это событие происходит летом?

Решение: Приблизительно в 13 часов 30 минут в связи с введением летнего времени.

2.52. Восход звезды

Когда (приблизительно) восходит звезда, которая месяц назад восходила в 10 часов вечера? [4, № 18]

Решение: В 8 часов вечера; разумеется, если в течение прошедшего месяца не было перехода на летнее или зимнее время.

2.53. Часовой угол

Чему равно звездное время, если звезда с прямым восхождением $21^{\text{h}}09^{\text{m}}23^{\text{s}}$ имеет часовой угол $98^{\circ}11'15''$ к востоку? [4, № 61]

Решение: $14^{\text{h}}36^{\text{m}}38^{\text{s}}$.

2.54. Ковш Б. Медведицы

Рассчитайте, в какое время года около 9 часов вечера (по местному среднему солнечному времени) Ковш Большой Медведицы расположен ручкой книзу, зная, что этот астеризм размещается между 11 и 14 часами прямого восхождения [4, № 149].

Решение: В начале февраля. Именно в этот период года за 3 часа до полуночи круг склонения с $\alpha = 12^h$ смотрит на восток.

2.55. Сириус

В какой день кульминирует в полночь самая яркая звезда неба — Сириус ($\alpha = 6^h 45^m$)? [4, № 150]

Решение: В первые дни января.

2.56. Как точнее?

Для того, чтобы по возможности точнее отметить момент прохождения звезды через меридиан, как лучше поступить: отметить момент, когда зенитное расстояние звезды наименьшее, или отметить момент ее прохождения через вертикальную нить телескопа, расположенного в плоскости меридиана? [4, № 162]

Решение: Второй способ точнее, поскольку вблизи кульминации зенитное расстояние светила изменяется значительно медленнее, чем азимут.

2.57. Стечение обстоятельств

Где на Земле и для какой звезды изменение ее зенитного расстояния в течение суток неизменно пропорционально изменению ее часового угла? [4, № 164]

Решение: Экваториальная звезда ($\delta = 0^\circ$), наблюдаемая с экватора Земли.

2.58. Карнавальная ночь

На сколько действие рефракции укорачивает продолжительность ночи на экваторе Земли? [4, № 177]

Решение: Примерно на 5 минут. Рефракция у горизонта «приподнимает» светило примерно на $35'$; следовательно, день удлиняется на такое время, за которое Солнце перемещается по небу на $70'$ (поскольку в экваториальной местности направление действия рефракции совпадает с направлением движения Солнца). Это время составляет 4,7 минут.

2.59. Крутится—вертится шар голубой

Каково было бы соотношение солнечного времени и звездного, если бы Земля вращалась в направлении, противоположном действительному направлению ее вращения? [4, № 219]

Решение: Солнечные сутки были бы короче звездных.

2.60. Городское время

Поперечник некоторого города равен 30 км. На сколько истинный полдень на его восточной окраине наступает раньше, чем на западной окраине, если его широта $55^{\circ}45'$? [4, № 238]

Решение: Разделив длину экватора (40 тыс. км) на 360° , найдем длину градуса долготы на экваторе: 111 км. На широте города она составит:

$$111 \text{ км} \cdot \cos 55^{\circ}45' = 62,5 \text{ км}.$$

Следовательно, протяженность города по долготе составляет $30/62,5 = 0,48^{\circ} = 29'$. На такой угол Земля поворачивается за 1 минуту 56 секунд.

2.61. Потерянные сутки

Если при кругосветном путешествии в направлении на запад теряют одни солнечные сутки, то теряют ли также и звездные сутки? [4, № 275]

Решение: Да.

2.62. В унисон

Как часто совпадают удары звездного и среднего хронометров, отбивающих полусекунды? [4, № 280]

Решение: Ясно, что секунда звездного времени короче секунды среднего солнечного времени на $1/366,24\dots$ долю; для простоты округлим это число до $1/366$. Если в какой-то момент удары обоих хронометров совпали, то в следующий раз их секундные удары совпадут через 366 звездных или 365 солнечных секунд. Учитывая, что хронометры отбивают полусекундные доли, их удары совпадут через 183 звездные секунды, или 3 минуты 03 секунды.

2.63. Несимметричный день

Почему по среднему времени послеполуденные части дня начинают удлиняться примерно с 8 декабря, за две недели до зимнего солнцестояния? [4, № 295]

Решение: Потому, что уравнение времени в эти дни увеличивается быстрее, чем, вследствие изменения склонения Солнца, ускоряется его заход.

2.64. «Ночное»

Какое время суток изобразил Архип Иванович Куинджи на картине «Ночное»? (рис. 2.2) [А. С. Шаров]



Рис. 2.2

Решение: Вечер в средней полосе России.

2.65. Марсианское время

Наклон оси Марса к плоскости его орбиты 65° , эксцентриситет орбиты 0,093 (эксцентриситет земной орбиты 0,017). На основании этих данных скажите, существует ли на Марсе надобность в среднем солнечном времени? [4, № 298]

Решение: Надобность в среднем времени на Марсе должна быть, причем еще большая, чем на Земле, поскольку, при практически одинаковом наклоне осей вращения, орбита Марса значительно более эллиптическая, чем орбита Земли.

2.66. Фазы Луны

При какой фазе Луны вся ночь бывает лунная? Безлунная?

Решение: В полнолуние. В новолуние.

2.67. День Победы

Почему День победы в Великой Отечественной войне в Западной Европе празднуют 8 мая, а в России — 9 мая?

Решение: Капитуляция была подписана около полуночи, когда в Европе было еще 8 мая, а в России уже 9 мая.

2.68. «Пан»

Перед вами картина М. А. Врубеля «Пан» (рис. 2.3) и комментарий к ней: «В картине “Пан” (1899, ГТГ) греческий бог превращается в русского лешего. Старый, морщинистый, с бездонными голубыми глазами, узловатыми, словно сучья, пальцами, он как будто возникает из замшелого пня. Фантастическую колдовскую окраску приобретает характерный русский пейзаж: безбрежные влажные луга, извилистая речушка, тонкие березки, застывшие в тишине опускающихся на землю сумерек, озаренные багрянцем рогатого месяца» (50 биографий мастеров русского искусства. Л.: Аврора. 1970. С. 218). Не допустил ли искусствовед ошибку, описывая эту знаменитую картину?

Решение: Разумеется, на картине изображено утро, поскольку в Северной полушарии такое положение месяца говорит о восходе Луны незадолго до восхода Солнца. Впрочем, и по смыслу мифа о Пане это тоже утро.

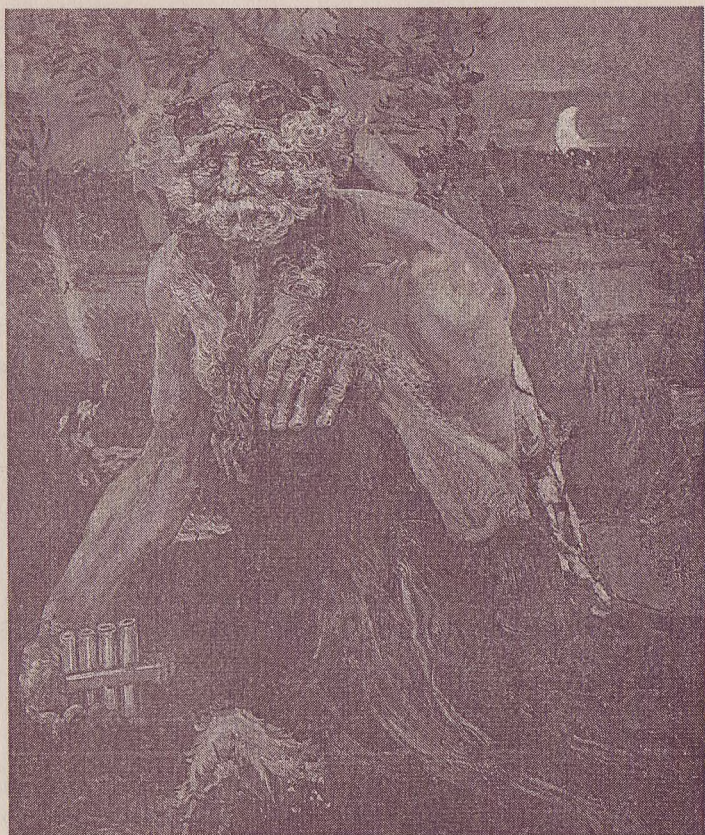


Рис. 2.3

2.69. День = Ночь

Сегодня день равен ночи. Чему равна их общая продолжительность? [39, № 3]

Решение: Очевидно, дело происходит либо весной, либо осенью, в дни, близкие к равноденствиям (а почему не в моменты равноденствий?). Общей продолжительностью дня и ночи, т. е. продолжительностью суток будем считать время от восхода до следующего восхода Солнца. Но весной день прибавляется, и каждый следующий восход наступает раньше предыдущего. Следовательно, весенний вариант ответа на эту задачу звучит так: общая продолжительность дня и ночи составит менее 24 часов. Очевидно, осенний вариант будет такой: ...более 24 часов.

2.70. Планета, подобная Луне

Если планета всегда повернута к Солнцу одной стороной, то сколько звездных и сколько солнечных суток проходит на ней в течение года?

Решение: Одни звездные и ни одних солнечных.



Глава 3

Видимое движение светил

3.1. Небо Луны

Что чаще видно на небе Луны — Солнце или Землю?

Решение: Поскольку Луна совершает один оборот вокруг оси относительно направления на Солнце за синодический месяц, равный 29,53 суток, в любой точке ее поверхности Солнце видно над горизонтом в течение примерно двух недель, а следующие две недели его не видно. А вот Земля постоянно видна только из одного полушария Луны (мы называем его «видимой стороной Луны»), а из другого полушария («обратная сторона Луны») Землю не видно никогда. Поэтому на видимой стороне Луны чаще видна Земля, а на невидимой — Солнце.

3.2. Вышел месяц из тумана

«На западе давно погас закат, а на востоке поднялся прозрачный серп месяца». Что здесь неверно подмечено автором? [6, № 169]

Решение: Поздним вечером на востоке Луна могла появиться только в фазе, близкой к полнолунию, но никак не «серп месяца».

3.3. Забывчивый картограф

Почему положение планет не изображено на картах звездного неба?

Решение: Нет смысла наносить положение планет на звездные карты, поскольку планеты довольно быстро изменяют свое положение относительно звезд. В специально выбранных системах координат (например, в экваториальной или, еще лучше, галактической) звезды почти не перемещаются, поэтому звездные карты могут служить весьма долго: десятилетия и даже столетия, если не требуется очень высокая точность. Но положение большинства планет за год изменяется на десятки градусов. Поэтому для наблюдателей планет ежегодно публикуют специальные карты (обычно — в астрономических календарях и ежегодниках), где на фоне созвездий нанесены траектории каждой планеты с отметками дат. Так же изображают перемещение по звездному небу астероидов и периодических комет. Часто на этих картах наносят положение утреннего и вечернего горизонта для наблюдателей на определенной широте: это помогает определять возможную длительность видимости объекта и планировать наблюдения.

3.4. Солнце восходит и заходит...

Обыкновенно говорят, что Солнце восходит на востоке, а заходит на западе. Так ли это на самом деле? [6, № 2]

Решение: Если имелось в виду, что Солнце восходит в точке востока и заходит в точке запада, то, как правило, это не верно. Только в дни равноденствий, — весеннего и осеннего, — Солнце пересекает горизонт в точках востока и запада. В остальные дни года оно пересекает горизонт либо к югу от этих точек (в период зимы Северного полушария), либо к северу (летом).

3.5. Куда нас занесло?

Моторы дирижабля отказали много дней назад. С тех пор неуправляемый воздушный корабль неся по воле ветра в неизвестном направлении и, наконец, потеряв плавучесть, зацепился за верхушки пальм и грузно опустился на крохотном острове. Выбравшись из гондолы, измученный командир воздушного гиганта лег под деревом и впервые за прошедшие дни увидел безоблачное ночное небо. Между вершинами деревьев спокойно светили яркие звезды. Полежав с полчаса, командир поднялся и обратился к своим спутникам: «Ну вот, теперь хотя бы ясно, где мы находимся. Звезды движутся справа налево: значит ветер отнес нас в ... полушарие?»

Итак, в каком полушарии Земли оказался неуправляемый дирижабль?

Решение: Если виден небольшой участок неба, то по направлению перемещения звезд весьма непросто определить широту местности и даже полушарие Земли. Например, в области зенита звезды всегда движутся с востока на запад, а выглядит это «слева направо» или «справа налево», зависит от того, к северу или к югу лицом вы обращены. В средних широтах любого полушария, обратившись лицом к полюсу мира, вы заметите, что выше и ниже полюса звезды движутся в противоположных направлениях: если их движение вокруг полюса происходит против часовой стрелки — вы в Северном полушарии, если по часовой стрелке — в Южном. Проще всего определить полушарие, находясь на полюсах: на Северном полюсе звезды у горизонта движутся слева направо, а в зените — против часовой стрелки; на Южном полюсе — наоборот.

Труднее всего определить полушарие в тропиках: только знание созвездий поможет вам быстро узнать, по какую сторону экватора вы находитесь. Если же вы не помните созвездий, то, наблюдая звезды на открытом месте несколько часов, определите направление на полюс мира, находящийся над горизонтом, и встаньте к нему лицом. Тогда восходящие справа звезды подскажут, что вы в Северном полушарии, а если звезды восходят слева, то ваш дирижабль занесло в Южное полушарие.

3.6. Вечерняя звезда

«После захода Солнца стало быстро темнеть. Еще не зажглись на темно-синем небе первые звезды, а на востоке уже ослепительно сияла Венера». Все ли верно в этом описании?

Решение: Венера на нашем небе никогда не удаляется от Солнца более чем на 46° , следовательно, она не может быть на востоке, когда Солнце на западе.

3.7. Редкое затмение

Намного чаще можно встретить человека, видевшего полное лунное затмение, чем полное солнечное. Следует ли из этого, что лунные затмения происходят чаще солнечных?

Решение: Лунный и солнечные полные затмения происходят примерно одинаково часто; даже солнечные немного чаще. Однако наблюдать полное солнечное затмение можно только в узкой полосе земной поверхности, по которой пробегает тень Луны. Какой-либо населенный пункт оказывается в полосе полного солнечного затмения в среднем один раз за 250 лет. Поэтому у человека мало шансов

увидеть полное солнечное затмение, если только он не отправится для наблюдений в специальную экспедицию.

А затмение Луны можно наблюдать со всего ночного полушария Земли. Фактически, каждое второе лунное затмение можно видеть из любого места Земли, а случаются они в среднем несколько раз за год. Поэтому почти каждый год у вас есть возможность увидеть полное лунное затмение в том месте, где вы живете (если только погода не подведет).

3.8. На фоне Солнца

Что наблюдается чаще — прохождение Марса или Меркурия по диску Солнца?

Решение: Прохождение Марса по диску Солнца вообще не может наблюдаться с Земли.

3.9. Строительная задача

В какую сторону архитектор должен обратить окна дома, чтобы в них попадало больше солнечного света?

Решение: На юго-запад или юго-восток. В окна, выходящие точно на юг, светит полуденное, высоко поднявшееся Солнце; в этом случае площадь проекции окна перпендикулярной солнечным лучам заметно сокращается, например, при высоте Солнца в 60° — вдвое.

3.10. О том, как Луна холм забодала

«Низко над горизонтом висел узкий серп Луны. Казалось, еще немного и его обращенные книзу рога воткнутся в поросший лесом холм». В какое время суток наблюдалась описанная картина?

Решение: Описанная картина вообще не могла наблюдаться: низко над горизонтом узкий серп Луны обращен не «рогами», а выпуклостью вниз, в сторону Солнца.

3.11. Солнце в зените

Сколько раз в году Солнце на экваторе бывает в зените?

Решение: Всего два раза в году — в истинные полдни дней осеннего и весеннего равноденствий (23 сентября и 21 марта).

3.12. Заместитель Солнца

«Полярной зимой Солнца на полюсе не видно, зато Луна старается — уж если светит, то в полную силу, огромным круглым фонарем». Правда ли это?

Решение: Да, правда. В середине полярной зимы, когда Солнце располагается на эклиптике вблизи точки зимнего солнцестояния, Луна в течение каждого месяца две недели проводит над горизонтом, поднимаясь довольно высоко (до $23,5^\circ$) и проходя фазы, близкие к полнолунию — от первой четверти до последней четверти.

3.13. Редкое событие

«Лицо старого астронома светилось от возбуждения:

— Сегодня удивительный, воистину астрономический день: вскоре после полудня мы будем иметь счастье наблюдать полное солнечное затмение, а в полночь произойдет полное затмение Луны. Такое случается всего один раз за несколько столетий!»

Согласны ли вы с этим утверждением?

Решение: Солнечные затмения происходят в моменты новолуний, а лунные — в полнолуние. Между ними обязательно должно пройти, как минимум, 2 недели. Поэтому утверждение мнимого профессора полностью ошибочно.

3.14. Солнце в колодце

«Наклонись над колодцем, увидишь ты там...»

Константин Бальмонт, КОЛОДЕЦ

В каких областях Земли можно увидеть Солнце, отраженное в воде глубокого колодца?

Решение: Для этого Солнце должно быть в зените, что возможно только в тропических областях Земли, между широтами $23,5^\circ$ с. ш. (тропик Рака) и $23,5^\circ$ ю. ш. (тропик Козерога)

3.15. Дума об Украине

В 1847 г. украинский поэт Тарас Шевченко, находясь в ссылке в Орской крепости, написал стихотворение:

Солнце заходит, горы чернеют,
 Пташки стихают, поле немеет,
 Отдых приходит — люди довольны.
 А я лишь гляну... и сердцу больно,
 И на Украину стремлюсь невольно,
 Думаю думу, вдаль улетаю
 И словно сердцем я отдыхаю.
 Поле чернеет, и сад, и горы,
 Звезда восходит в синих просторах.
 Звезда святая, лью слезы тайно.
 Уже взошла ль ты и на Украине?
 Карие очи тебя нашли ли
 В просторе синем? Иль позабыли?
 Если забыли, — лучше бы спали,
 Про мою долюшку и не слыхали.

(Перевод Г.Владимирского)

Итак, поэт наблюдает восход звезды в часы вечерних сумерек в Орской крепости (ныне г. Орск, $\varphi = 51^\circ$, с. ш., $\lambda = 59^\circ$ в. д.). Видна ли в этот момент та же звезда на Украине, например, в г. Киев ($\varphi = 51^\circ$, с. ш., $\lambda = 31^\circ$ в. д.)? [Идею этой задачи прислал мне в феврале 1998 г. школьник В. В. Благодарный из г. Борисоглебска Воронежской обл.]

Решение: Оба пункта лежат на одной широте, но их долготы различаются почти на 30° , т. е. на 2^h , причем Орск лежит восточнее. Значит в Киеве стемнеет лишь через 2 часа, и тогда же там взойдет указанная звезда. А пока она не видна, и даже Солнце на Украине еще не скрылось за горизонтом.

3.16. Куда плывет Луна?

В каком направлении происходит видимое движение Луны относительно звезд? [9, I.П2.5.2]

Решение: С запада на восток.

3.17. «Дайте мне точку опоры...»

При каком угле ε наклона оси вращения Земли к плоскости ее орбиты южный полярный круг совпадает с тропиком Козерога? [5, № 110]

Решение: $\varepsilon = 45^\circ$. Напоминаем, что тропик — это самая далекая от экватора параллель, на которой Солнце бывает в зените; а поляр-

ный круг — это самая близкая к экватору параллель, на которой бывает полярная ночь. А теперь попробуйте представить движение Солнца на небе в различных точках Земли при $\varepsilon > 45^\circ$ и, наконец, при $\varepsilon = 90^\circ$.

3.18. Двумерные светила

Древнегреческий ученый Анаксимен (VI век до н. э.) объяснял солнечные и лунные затмения так: Солнце и Луна имеют темную и светлую стороны, поэтому, когда они обращаются к Земле темной стороной, наступают затмения. Как опровергнуть это утверждение, скажем, на примере солнечного затмения?

Решение: В фазах частного затмения видимые края Солнца всегда обращены кривизной в одну сторону. А если бы прав был Анаксимен, то при повороте Солнца темной стороной к Земле мы наблюдали бы в начальных фазах «двояковыпуклое» Солнце, какой нам видна Луна между полнолунием и последней четвертью. В отношении лунного затмения Анаксимен также не обратил внимания, что кривизна земной тени отличается от видимой кривизны лунного терминатора.

3.19. На воздушном шаре

В день равноденствия на экваторе в момент захода Солнца начался подъем аэростата со скоростью 10 м/с до высоты в 25 км. Увидят ли его пассажиры восход Солнца на западе? Изменился бы ответ, если бы местом старта был г. Мурманск ($\varphi = 69^\circ$)?

Решение: Подъем аэростата продолжается $25\,000/10 = 2\,500$ секунд. За это время Солнце опустится под математический горизонт на $360^\circ \times 2\,500^s/24^h = 10,4^\circ$. В результате подъема линия истинного горизонта для наблюдателей на аэростате опустится на угол α , который легко найти из треугольника с катетом R_\oplus и гипотенузой $R_\oplus + H$, где $H = 25$ км — высота подъема:

$$\cos \alpha = \frac{R_\oplus}{R_\oplus + H},$$

откуда $\alpha = \arccos(6371/6396) = 5,1^\circ$. Следовательно, пассажиры аэростата не смогут «догнать» Солнце, несмотря на очень большую скорость подъема.

В Мурманске скорость опускания Солнца под горизонт меньше, поскольку оно движется не перпендикулярно к линии горизонта, как на экваторе, а под углом $90^\circ - \varphi$. Следовательно, за время подъема

аэростата Солнце опустится в этот день в Мурманске на $10,4^\circ \sin(90^\circ - 69^\circ) = 3,7^\circ$, и пассажиры смогут из стратосферы увидеть его над горизонтом.

3.20. Каменный визир

В заметке о древнем «Конь-камне», лежащем на берегу Дона в Тульской области (Энциклопедия «Астрономия», М.: «АВАНТА+», 1997, с. 22), есть такие слова:

«Это глыба песчаника длиной больше 3 м и весом 30–35 т. Неизвестно, кто и когда притащил Конь-камень, положил на три опоры и вырубил в нем прямой аккуратный желоб. Посмотришь в этот “прицел” с одного конца и увидишь место на горизонте, где Солнце восходит в самый короткий день; посмотришь с другого — увидишь, где оно заходит в день летнего солнцестояния».

Оцените, насколько точно данное утверждение? С какой ошибкой древние астрономы определяли положение точек восхода и захода?

Решение: Из Астрономического календаря найдем, что на широте 56° в день зимнего солнцестояния восход Солнца происходит в точке с азимутом 46° , а заход в день летнего солнцестояния — в точке с азимутом -137° . Сумма этих углов отличается от 180° на 5° . Очевидно, на экваторе эта разность равна нулю. Поскольку указанный камень расположен южнее Москвы примерно на 5° , для него эта разность составит примерно $4,5^\circ$. Таким образом, древние астрономы с помощью прямого желоба находили точки восхода и захода Солнца в дни солнцестояний с ошибкой около 2° .

3.21. Особые точки

В каких точках горизонта восходит Солнце в дни весеннего равноденствия, летнего солнцестояния, осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния?

Решение: Только в дни весеннего и осеннего равноденствий Солнце везде восходит в точке востока. В остальные дни оно восходит в других точках: в зимние месяцы — к югу от точки востока, в летние — к северу. Например, на широте Москвы (56°) в день летнего солнцестояния Солнце восходит на северо-востоке, а в день зимнего солнцестояния — на юго-востоке.

3.22. Кинотрюк

На Мосфильме снимается сериал «Кровавый закат» из жизни австралийских аборигенов. По сценарию в конце каждого эпизода фильма герои долго смотрят на закатное Солнце, пока оно не скрывается за горизонтом. В киноархиве, в разделе «Восходы и закаты» помощник режиссера нашел прекрасные кадры заката, снятого в среднеазиатской степи, поразительно похожей на австралийский буш. Но 2-й помощник режиссера — любитель астрономии — сказал, что грамотные зрители сразу заметят в этих кадрах подвох. Чтобы не терять достоверность фильма, главный режиссер решил отправить киногруппу в Австралию для съемки заката, однако директор картины сказал, что денег на это нет.

Помогите авторам фильма воплотить их замысел без дорогостоящей поездки в Австралию.

Решение: Сначала разберемся, чем среднеазиатский закат отличается от австралийского. В Северном полушарии Солнце на закате движется вправо-вниз, а в Южном — влево-вниз. Угол, под которым оно пересекает горизонт, зависит от широты места и времени года. Если место наблюдения не очень удалено от экватора (как Австралия или республики Средней Азии), то зависимость от времени года слабая; остается только зависимость от широты: чем меньше широта, тем круче Солнце уходит под горизонт. Поскольку южная часть Австралии лежит на том же удалении от экватора, что и южные области Туркмении, Узбекистана и Таджикистана, то угол пересечения Солнцем горизонта в этих местностях одинаковый. Но направление — разное: в Австралии Солнце движется влево, а в Средней Азии — вправо.

Поэтому следует сделать одно из двух: либо перевернуть пленку с эпизодом заката справа налево, либо найти эпизод среднеазиатского восхода Солнца и пусть пленку в обратную сторону, чтобы это выглядело как закат Солнца.

3.23. На Луне

В романе Айзека Азимова «Сами боги» есть эпизод (часть 3, гл. 14), в котором герой, живущий на лунной базе, выходит на поверхность Луны и смотрит на небо:

«Земля висела в небе на положенном месте — ее широкий серп выгибался к юго-западу. Прямо под ним горел Орион».

- 1) На какой стороне Луны и в каком ее полушарии находился герой?
- 2) В какой фазе была Луна для наблюдателей на Земле?
- 3) На фоне какого созвездия была видна Луна с Земли?
- 4) В каком сезоне года это происходило?

Решение: Сначала напомним, как «устроена» лунная география. При составлении первых карт Луны, в XVIII веке, названия сторон света на лунном диске были введены так, как привычно астрономам — по сторонам земного горизонта: половину лунного диска, обращенную к западу, называли «западной», а другую половину — «восточной»; именно с такими обозначениями мы встречаемся на старых картах. Но в эпоху космонавтики это оказалось неудобно, и лунную географию изменили. Теперь стороны света на Луне называют так же, как на Земле: для лунного наблюдателя Солнце тоже восходит на востоке и заходит на западе. При этом и для земного наблюдателя все стало на свои места: теперь линия терминатора перемещается с лунного востока на лунный запад. Итак, глядя из Северного полушария Земли на Луну без телескопа, мы видим лунный север вверху, юг — внизу, восток — справа, запад — слева; т. е. так же, как на картах Земли.

1) Лунный экватор почти совпадает с эклиптической. Поэтому Солнце всегда восходит практически в точке востока, а заходит в точке запада. Орбита Луны слабо наклонена к эклиптике, поэтому Земля для лунного наблюдателя практически «ходит по эклиптике» и видна наблюдателю северного полушария только над южной частью горизонта, а наблюдателю южного полушария — только над северной его частью. Теперь посмотрим на карту неба. В районе Ориона эклиптика проходит к северу от этого созвездия. Поскольку, глядя на серп Земли, наблюдатель видел, что «под ним горел Орион», значит направление «вверх» означало «на север», т. е. Земля висела над южной частью горизонта. Вывод: герой романа был в северной полушарии Луны и, разумеется, на видимой ее стороне.

2) Поскольку Солнце освещает Луну и Землю с одного направления, а направления взгляда наблюдателей на Луне и Земле противоположны, ясно, что с их точек зрения фазы Земли и Луны дополняют друг друга до полного круга. Поэтому в момент, когда Земля выглядела как «широкий серп, выгнутый к юго-западу», т. е. была между «новоземелием» и первой четвертью, Луна была между полнолунием и последней четвертью. Если учесть, что серп Земли был широкий, т. е. она была ближе к первой четверти, то Луна была ближе к последней четверти.

3) По карте видим, что эклиптика над Орионом проходит в созвездии Тельца и Близнецов; там была Земля. Значит Луна была в противоположной части эклиптики — в Стрельце или (менее вероятно) Змееносца.

4) Солнце было к западу от Земли, на расстоянии от 0 до 90° (очевидно, ближе к 90°). Значит оно наблюдалось в Овне или Рыбах (более вероятно, что именно в Рыбах). Это бывает с середины марта по середину мая; скорее всего был конец марта или апрель.

3.24. Полярный рейс

Известный физик Анатолий Абрагам вспоминает в своей книге «Время вспять, или Физик, физик, где ты был» (М.: Наука, 1991, с. 349) как он возвращался из Японии во Францию: «Домой мы летели через полюс и имели удовольствие наблюдать восход Солнца дважды в течение часа». Объясните, как это могло быть, и когда.

Решение: Если взлет произошел сразу после захода Солнца, то первый восход наблюдался при наборе самолетом высоты, когда быстро опускалась линия истинного горизонта. Затем Солнце скрылось за горизонтом и могло появиться второй раз, когда самолет пересек терминатор (линию «ночь–день»), смещенный от полюса в сторону Японии в результате наклона земной оси. Это могло быть только летом Северного полушария.

3.25. Пируэты Меркурия

В какой связи находятся моменты стояния Меркурия с моментами его наибольших восточной и западной элонгаций? Варианты решения:

1. Совпадают с ними.
2. Непосредственно предшествуют им.
3. Происходят непосредственно за ними.
4. Происходят после восточной и перед западной.
5. Происходят после западной и перед восточной.

Решение: Стоянием называют кажущуюся остановку в видимом движении планеты при ее переходе от прямого к попятному движению и наоборот. При этом речь идет о движении планеты относительно

Таблица 3.1

Конфигурации Меркурия	Даты		
Верхнее соединение	4 февраля	25 мая	8 сентября
Наибольшая восточная элонгация	3 марта (18°)	28 июня (26°)	24 октября (24°)
Стояние	9 марта	12 июля	5 ноября
Нижнее соединение	19 марта	26 июля	15 ноября
Стояние	1 апреля	5 августа	25 ноября
Наибольшая западная элонгация	16 апреля (26°)	14 августа (19°)	3 декабря (20°)

звезд. Поскольку Солнце перемещается относительно звезд с запада на восток, в момент наибольшей восточной элонгации планеты, когда она неподвижна относительно Солнца, у нее есть движение к востоку относительно звезд, которое прекратится через несколько дней, когда планета наберет некоторую скорость к западу относительно Солнца. По той же причине следующее ее стояние произойдет за несколько дней до наибольшей западной элонгации. Поэтому верен 4-й вариант решения. Пример из Астрономического календаря на 1999 г. представлен в табл. 3.1.

Попробуйте сравнить это с эфемеридами Меркурия на текущий год.

3.26. Прогноз затмения

Полное лунное затмение должно произойти 15 мая. Когда можно ожидать солнечное затмение? [15, с. 34]

Решение: Пусть наклон лунной орбиты к эклиптике составляет $5,5^\circ$. Для земного наблюдателя угловой диаметр земной тени на орбите Луны составляет $1,5^\circ$. Значит при полном лунном затмении центр Луны удаляется от эклиптики не более чем на $1,5^\circ/2 - 0,5^\circ/2 = 0,5^\circ$. При этом его расстояние от узла лунной орбиты составляет $0,5^\circ / \sin 5,5^\circ = 5,2^\circ$.

В то же время, для наступления солнечного затмения (не обязательно полного) с учетом суточного параллакса Луны (1°) она может удаляться от эклиптики на $1,5^\circ$, а от узла орбиты — на $1,5^\circ / \sin 5,5^\circ = 15,7^\circ$, что для Солнца соответствует 16 суткам пути по эклиптике, а значит превышает половину лунного (синодического) месяца. Поэтому, если лунное затмение произошло вблизи узла, то солнечное произойдет *дважды*: за 14–15 дней до и через 14–15 дней после лунного. Но если лунное затмение произошло на расстоянии более 2° от узла орбиты, то солнечное затмение в ближайшее время будет только одно: либо за 14–15 дней до, либо через 14–15 дней после лунного.

Заметим, что указать более точно интервал времени между моментами лунного и солнечного затмений невозможно, поскольку синодические месяцы, в отличие от сидерического, не имеет одинаковой продолжительности: вследствие эксцентриситета лунной орбиты они делятся от $29,25^d$ до $29,83^d$.

3.27. «Неправильное» Солнце

Внимательно посмотрите на фрагмент таблицы «Солнце» из Астрономического календаря на 1993 г. (месяц март, широта 56°) (табл. 3.2).

Таблица 3.2

День	Азимуты точек восхода и захода, °	Склонение	Моменты	
			восхода	захода
18	±89	−1°01'58"	6 ^h 08 ^m	18 ^h 10 ^m
19	90	−0°38'15"	6 ^h 05 ^m	18 ^h 12 ^m
20	91	−0°14'31"	6 ^h 03 ^m	18 ^h 14 ^m
21	92	+0°09'12"	6 ^h 00 ^m	18 ^h 16 ^m
22	92	+0°32'54"	5 ^h 57 ^m	18 ^h 18 ^m
23	93	+0°56'35"	5 ^h 55 ^m	18 ^h 20 ^m

Почему момент прохождения Солнца через точку весеннего равноденствия (склонение = 0°) не совпадает с моментом восхода/захода в точках восток/запад (азимут = 90°)? Почему эти моменты различаются на 1,5 сут?

Решение: Главная причина — атмосферная рефракция, приподнимающая диск Солнца у горизонта на угол $SO = 35'$. К тому же, по определению, восходом считается пересечение горизонта верхним краем солнечного диска: это еще добавочный угол $OB = 16'$. Итого: край Солнца виден выше эклиптики на угол $BS = 41'$. Найдём теперь путь вдоль эклиптики AS , который Солнцу остается пройти до точки равноденствия, когда его край восходит в точке востока с азимутом -90° . По теореме синусов

$$\frac{BS}{\sin \angle BAS} = \frac{AS}{\sin \angle ABS},$$

но $\angle BAS = 23,5^\circ$ и $\angle ABS = \varphi$. Поэтому

$$AS = \frac{BS \sin \varphi}{\sin 23,5^\circ}$$

Для $\varphi = 56^\circ$ получим $AS = 41 \text{ мин} \times 0,83/0,40 = 85 \text{ минут}$. Переведем в дни: $365 \times 85/(360 \times 60) = 1,44 \text{ сут}$.

3.28. Голубая звезда

Во время великого противостояния экспедиция прибыла на Марс в район экватора планеты. Ночью два космонавта вышли на поверхность. «Смотри, как сияет наша Земля, — сказал один. — Она самая яркая на марсианском небе». Прав ли он?

Решение: Во время противостояния Земля с Марса вообще не видна, ибо в том же направлении находится Солнце.

3.29. Солнечный марафон

В какое время года Солнце быстрее движется по эклиптике?
[6, № 63]

Решение: Солнце быстрее перемещается по эклиптике в период зимы в Северном полушарии, поскольку Земля в это время ближе к Солнцу и, согласно 2-му закону Кеплера, движется по орбите быстрее.

3.30. Ночной старт

В романе Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.) есть такой эпизод:

«Этот день закончился эффектным зрелищем: с горной площадки, обращенной к океану, в двенадцать часов ночи была пущена первая пробная ракета без людей, с самопишущими автоматическими приборами. Она имела два метра высоты и была укреплена почти отвесно, с легким наклоном в сторону океана...

— Ну, а теперь отойдите, — объявил Цандер. — Пускаю ракету.

Все отошли и замолчали в ожидании. На темном небе мерцали звезды. Молодой месяц сиял почти над головой, и казалось, что ракета отправляется в лунное путешествие».

Оцените этот эпизод с астрономической точки зрения.

Решение: Очевидная ошибка в этом эпизоде связана с фазой Луны. После захода Солнца («на темном небе»), и более того — в полночь, молодая Луна никак не может располагаться в области зенита. Если Луна в это время действительно была высоко, то ее фаза была близка к полнолуннию. Кстати, в таком случае небо далеко не темное, и звезды на нем видны плохо.

3.31. «Где мы?»

Вы, конечно, догадались, что изображает эта картинка (рис. 3.1): на ней герои романа «Таинственный остров» Жюль Верна находят направление меридиана на берегу острова Линкольна, затерянного в пустынных водах южной части Тихого океана.

Солнце только что миновало высшую точку своего дневного пути. Самая короткая полуденная тень отмечена колышком, поставленным ровно в полдень. Рядом с ним воткнуты в песок другие колышки; каждый из них соответствует концу тени, ложившейся от большой вехи в более ранние, предполуденные часы.



Рис. 3.1

Изучите самым тщательным образом эту иллюстрацию и подумайте: не можете ли вы сообщить, в какой части земного шара родился и жил художник, автор этого рисунка?

Решение: Иллюстратор, рисовавший картинку к «Таинственному острову», был, конечно, жителем Северного полушария. Он твердо уверовал со школьной скамьи в то, что «солнце в полдень стоит на юге».

Действительно, так и бывает у нас, живущих севернее тропика Рака. Но так никогда не бывает в Южном полушарии, южнее тропика Козерога. Там солнце в полдень всегда стоит на севере. Но тогда (внимательно взгляните на картинку) могут ли тени от предметов ложиться так, как их нарисовал художник? Разумеется, нет!

Здесь, на жюльверновском острове Линкольна, под 35° южной широты, утренняя тень неминуемо должна была бы лечь в левую часть рисунка, если бы художник, рисуя, смотрел на север. Последующие тени стали бы передвигаться все более вправо. Иллюстратор же изобразил как раз обратную картину. Она может иметь место всегда севернее тропика Рака и иногда севернее тропика Козерога, но никогда не южнее последнего.

3.32. Пейзаж с натуры

Посмотрите на изображенный здесь пейзаж (рис. 3.2) — закат Солнца — и скажите: правильно ли он нарисован. В этом рисунке есть одна неточность, которая должна броситься вам в глаза.



Рис. 3.2

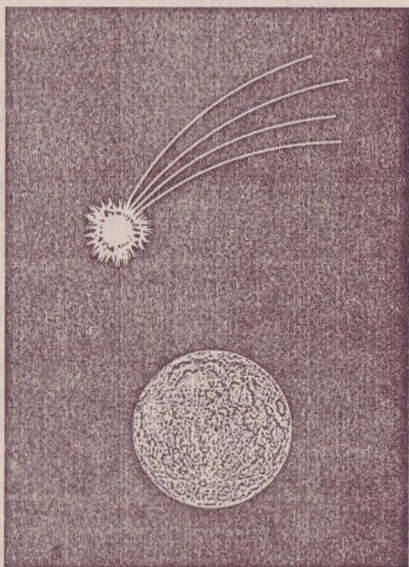


Рис. 3.3

Решение: Грубая несообразность рисунка состоит в том, что лунный серп обращен своей выпуклой стороной не к Солнцу, а от него. Ведь Луна освещается Солнцем, значит, она никак не может быть обращена к нему своею неосвещенной стороной.

3.33. Не в бровь, а в глаз!

В кинофильме «Конец света» (реж. Питер Хайамс, США, 1999) есть кадр (рис. 3.3), в котором над полной Луной протянулась комета, выгнувшись от головы до кончика хвоста, как бровь над глазом. Оцените эту режиссерскую находку с точки зрения астрономии.

Решение: По-первых, рядом с полной Луной кометы не видны — слишком велика засветка неба. Во-вторых, если перед нами полная

Луна, то Солнце у нас за спиной. Значит хвост кометы должен быть обращен от нас, а не поперек нашего луча зрения. В третьих, комета в таком положении находится на расстоянии более 1 а. е. от Солнца, где кометы редко бывают яркими. В целом, очевидно, что научные знания не сдерживали полета художественной мысли создателей этого кинофильма.

3.34. Фантастика XVII века

В своем замечательном научно-фантастическом произведении «Сон, или Лунная астрономия» [19] Иоганн Кеплер описал астрономические явления, якобы наблюдавшиеся с поверхности Луны. Если адаптировать его язык к современным терминам, то один из отрывков звучит так:

«Луна состоит из двух полушарий: одно обращено к Земле, другое — в противоположную сторону. С первого всегда видна Земля, со второго Землю увидеть невозможно. Наблюдателям первого полушария кажется, что Земля на их небе неподвижна, но они легко могут заметить ее суточное вращение. На Луне происходит смена дня и ночи, однако, в отличие от Земли, день на Луне всегда равен ночи, их продолжительность не меняется в течение года».

Верны ли сведения о Луне, приведенные Кеплером 400 лет назад?

Решение: Сведения, приведенные Кеплером, практически верны. На лунном небе Земля почти неподвижна. Для наблюдателя на большей части лунной поверхности Земля не восходит и не заходит. Солнечные сутки на Луне (равные 29,5 земных суток) практически поровну делятся между восходом и заходом Солнца, как на Земле в дни равноденствий, поскольку плоскость лунного экватора составляет с плоскостью эклиптики угол всего в $1^{\circ} 30'$.

3.35. Комета Энке

Период обращения вокруг Солнца самой короткопериодической кометы (Энке) составляет 3,3 года. Почему же условия ее видимости повторяются с характерным периодом в 10 лет?

Решение: За 10 лет комета делает ровно 3 оборота по своей орбите, а Земля — ровно 10. При этом оба небесных тела оказываются почти в тех же точках пространства, а значит, такими же становятся и условия видимости кометы с Земли.

Подумайте, почему в данном случае нельзя было применять формулу, связывающую синодический и сидерический периоды?

3.36. Астроном-большевик

В книге о жизни московского астронома Павла Карловича Штернберга [25, с. 74] описан эпизод его первого знакомства с книгой К. Маркса. Дело было осенью ...

«Когда оторвался от “Капитала”, за окном стояла ночь. В лампе нервно прыгало пламя: кончился керосин.

Над крышей соседнего дома висела Луна, а дальше, левее, пролегла широкая светлая полоса — Млечный Путь».

Насколько правдиво это описание с точки зрения астрономии?

Решение: Судя по описанию, была первая половина ночи. Луна стояла высоко, выше соседнего дома. Следовательно она была в довольно развитой фазе — вероятно между первой четвертью и полнолунием — и к тому же выше эклиптики. Судя по ее положению относительно Млечного Пути, Луна была в созвездии Овна, а Солнце — в районе Весов. Такое положение Солнца действительно соответствует поздней осени. Поэтому с точки зрения расположения светил замечаний к тексту нет.

Однако вызывает большие сомнения возможность увидеть Млечный Путь в городе, при свете лампы, сквозь окно, да к тому же — при яркой Луне.

3.37. Солнце на севере

Нельзя представить себе, чтобы жители Австралии увидели Солнце на юге. А можем ли мы, жители России, увидеть Солнце на... севере [18, с. 33]

Решение: Да, поскольку в период полярного дня Солнце совершает за сутки полный видимый оборот по сторонам горизонта, так что его можно видеть и на севере. А ведь за полярным кругом, где как раз и бывают полярный день и полярная ночь, находятся многие области России и даже такие крупные города как Мурманск и Норильск. С учетом же рефракции, «приподнимающей» видимый диск светила над горизонтом, Солнце на севере можно наблюдать даже чуть южнее полярного круга, почти точно с широты 67° . В Северном полушарии на широте 68° Солнце не заходит уже 40 суток, на 70° — 70 суток, на 80° — 137 суток и на 90° — 189 суток.

3.38. Поровну?

Предположим, что Солнце и Луна сегодня пересекают небесный экватор. Означает ли это, что они будут видны над горизонтом ровно половину суток?

Решение: Солнце и Луна будут видны в этот день над (математическим) горизонтом более половины суток. Солнце — по причине атмосферной рефракции, которая «ускоряет» восход и «задерживает» заход светил. У горизонта угол рефракции достигает $35'$ по вертикали; светило на небесном экваторе проходит его для наблюдателя на земном экваторе за 2,3 минуты, а для наблюдателя на широте Москвы — за 4,2 минуты. Поэтому в указанный день жители средних широт смогут наблюдать центр солнечного диска примерно на 8 минут более полусуток. Для Луны влияние рефракции полностью перекрывается эффектом суточного параллакса (около 1°), который «задерживает» восход и «ускоряет» заход светила. Однако еще более сильным оказывается влияние собственного движения Луны относительно Солнца на восток почти на 7° за полсутки, что задерживает заход Луны почти на полчаса!

3.39. Трусливая Луна

В романе «Воздушный корабль» Жюль Верн пишет: «Итак, у нас окончательно установлен факт, что Фриколин был страшный трус. Одним словом, он, по поговорке, был “труслив, как Луна”. Тут я сделаю отступление, воспользуюсь случаем для заявления громкого протеста против оскорбительного сравнения целомудренной сестры лучезарного Аполлона, кроткой Селены, с лакеем Фриколином. По какому праву обвиняют в трусости планету, которая, с тех пор как мир стоит, всегда смотрела Земле прямо в лицо и никогда не поворачивала к ней свою спину?»

Согласны ли вы полностью с этим утверждением относительно Луны? [12, задача 402]

Решение: Сказанное о поведении Луны следует уточнить. Хотя она действительно повернута к Земле одним полушарием, поскольку суточный и орбитальный ее периоды совпадают, но все же с точки зрения земного наблюдателя «лунный лик» испытывает небольшие покачивания. Вследствие равномерного вращения Луны вокруг оси и неравномерного движения по эллиптической орбите наблюдается либрация (качание) по долготе с периодом в один аномалистический месяц и величиной $\pm 7^\circ 54'$. А вследствие наклона оси вращения к плоскости орбиты наблюдается либрация по широте $\pm 6^\circ 50'$ с периодом в драконический месяц. Немного добавляет к этому и тот факт, что сам земной наблюдатель перемещается суточным вращением

планеты относительно ее центра и поэтому немного (около 1°) заглядывает за края Луны; этот эффект называют суточным параллаксом. Таким образом Луна показывает нам часть своей обратной стороны, причем не такую уж малую часть: с Земли доступно наблюдению около 60 % лунной поверхности.

Второе замечание касается истории Луны. Вероятно, не всегда ее суточное и орбитальное движения происходили синхронно. Миллиарды лет назад, сразу после формирования, Луна могла иметь более короткий суточный период, который постепенно удлинялся за счет ее приливного взаимодействия с Землей. В ту эпоху к Земле, еще лишенной обитателей, Луна поворачивала не только «лицо», но и «спину».

3.40. Где быстрее?

В какой части неба азимуты светил меняются быстрее всего и в какой — медленнее всего? [29, с. 9]

Решение: Азимут светила быстрее всего меняется в меридиане и медленнее всего в первом вертикале. При этом очень сильна зависимость от высоты светила над горизонтом: вблизи зенита его азимут меняется с большой скоростью; в некоторых случаях — с бесконечной (найдите эти случаи). Это особенно важно для телескопов на альт-азимутальных монтировках, для которых область вблизи зенита оказывается недоступной для плавного гидирования.

3.41. Скромные спутники

Почему для любого наблюдателя на поверхности Марса его спутники — Фобос и Деймос — проводят больше времени под горизонтом, чем над ним? [29, № 252]

Решение: Это объясняется близостью спутников к поверхности планеты, которая заслоняет от любого «марсианина» большую часть их орбиты, а марсианским «полярникам» вообще не позволяет видеть спутники (на полюсах Марса и без этого хватает страха и ужаса — очень уж там холодно!)

3.42. Стрелец в Италии

«...Октябрь прошел, и в черном воздухе блестели мои родные звезды, холодные сверкающие звезды созвездия Стрельца», — пишет один итальянский писатель. Видно ли в это время в Италии созвездие Стрельца? [6, № 71]

Решение: Автор этой задачи Василий Федорович Орлов дает на нее такой ответ: «Нет. Солнце в ноябре проходит недалеко от Стрельца, и этого созвездия не видно. Вероятно, автор под именем Стрельца понимает какое-то другое созвездие.»

Но если провести более детальное исследование, например, при помощи электронного планетария (я использовал программу Александра Волынкина Turbo Sky 3.0 Pro), то выясняется, что ответ Орлова верен лишь в отношении российских средних широт. А на юге Италии, на широте 38° после захода Солнца и окончания сумерек в первых числах ноября Стрелец прекрасно виден над юго-западной частью горизонта, на высоте от 10° до 30° .

3.43. Солнце — пополам

«А 23 марта, в день весеннего равноденствия, Солнце (на Северном полюсе) казалось бы перерезанным горизонтом как раз пополам», — разъясняет один из героев повести Жюль Верна «Путешествие капитана Гаттераса». Так ли это? [6, № 94]

Решение: Нет. Если так и бывает, то еще до весеннего равноденствия. А непосредственно в этот день солнечный диск вследствие рефракции виден полностью и даже может быть приподнят над горизонтом.

3.44. Ночь в прерии

«Она представляла себе ночь среди полудиких степей, ночь в прерии, куда углубился отряд пионеров в поисках места, где можно было бы построить город... ночь таинственных созвездий на незнакомом небе, спокойно взирающих на муки людей».

Здесь переданы мысли жительницы восточной части США о пионерах, двигавшихся на крайний запад Северной Америки. Правильно ли она представляла себе обстановку этого путешествия? [6, № 22]

Решение: Нет. Никаких новых созвездий на своем пути по Америке с востока на запад по одной и той же параллели пионеры увидеть не могли.

3.45. Короткие сумерки

Все путешественники отмечают, что в тропических странах, и особенно на экваторе, сумерки непродолжительны: «примерно через

полчаса после захода Солнца царит уже почти полная ночь». Чем это объясняется? [6, № 107]

Решение: Это объясняется большим наклоном (около 90°) траектории Солнца к горизонту. Как известно, гражданские сумерки заканчиваются, когда Солнце опускается на 6° под горизонт; вблизи экватора ему для этого требуется от момента захода всего около $(6/360) \cdot 24 = 0,4$ часа, т. е. 24 минуты. На других широтах пологая траектория заходящего (или восходящего) Солнца значительно удлиняет сумерки.

3.46. Полярные дни и ночи

Что на Северном полюсе длится дольше — день или ночь?

Решение: Полярные день и ночь длятся приблизительно одинаково — по полгода. Однако существуют два причины, которые делают день на Северном полюсе немного продолжительнее ночи.

Во-первых, Земля обращается вокруг Солнца не совсем по кругу: ее орбита — эллипс. Когда в Северном полушарии зима, наша планета находится в области перигелия орбиты; поэтому в зимние месяцы Солнце быстрее перемещается по эклиптике, чем в летние. Из-за этого промежуток времени между осенним равноденствием (когда Солнце переходит в Южное полушарие) и весенним равноденствием (когда оно возвращается в Северное) на одну неделю короче, чем промежуток между весенним и осенним равноденствиями.

Во-вторых, из-за атмосферной рефракции светила у горизонта видны чуть выше, чем было бы при отсутствии атмосферы. Это «чуть» составляет у самого горизонта примерно $35'$. Если считать, что день начинается в тот момент, когда центр видимого солнечного диска пересекает горизонт, то в действительности в этот момент истинный центр Солнца еще находится на $35'$ ниже горизонта, линию которого мы будем считать совпадающей с небесным экватором. Поскольку эклиптика пересекает экватор под углом $23,5^\circ$, центру Солнца осталось пройти в этот момент до точки равноденствия $35' / \sin 23,5^\circ = 1,5^\circ$. (Тем, кто не знаком с тригонометрией, советуем аккуратно построить рисунок и измерить на нем длины линий, чтобы увидеть, что путь Солнца по эклиптике примерно втрое больше, чем по вертикали). Этот путь Солнце пройдет примерно за 1,5 суток. На столько же удлинится день при заходе Солнца. Всего эффект рефракции составит 3 суток.

Таким образом, на Северном полюсе день длиннее ночи примерно на 10 суток. А как обстоит дело на Южном полюсе? Уверены, что вы ответите на этот вопрос быстро и без подсказки.

3.47. Бессонница

«Она проснулась до рассвета, в тот ранний час, когда в окно сквозь мягкую россыпь облачных ракушек еще поблескивал серпик молодого месяца». Найдите обмолвку автора [6, № 170].

Решение: Перед рассветом может быть виден лишь серпик старого месяца.

3.48. Комната на чердаке

Героиня рассказа О'Генри «Комната на чердаке» каждую ночь наблюдала в потолочное окно своей комнаты, похожей на колодец угольной шахты, звезду, которая напоминала ей бриллиантовую булавку. Ей разъяснили, что эта звезда — Гамма Кассиопеи и относится она к звездам 2-й величины. Это происходило в Нью-Йорке ($40^{\circ} 40'$ с. ш.). Склонение γ Кассиопеи $+61^{\circ}$. Возможно ли наблюдать эту звезду в Нью-Йорке через потолочное окно? Верно ли указана ее звездная величина? [6, № 54]

Решение: Гамма Кассиопеи в зените в Нью-Йорке не бывает: там ее минимальное расстояние от зенита около 20° . Но если потолочное окно достаточно широкое или расположено на северном склоне крыши, то ее в него можно видеть. Эта переменная бело-голубая звезда с изменением блеска от $1,6^m$ до $3,0^m$.

3.49. Тонкое наблюдение

«К полуночи выплыл месяц. Яркий, будто никелированный, опустив книзу остро отточенное жало кривого ножа, он катился и в то же время оставался на месте в дымчато-белых облаках». Найдите неточности в приведенном отрывке и укажите тонкое наблюдение писателя [6, № 175].

Решение: Если месяц был похож на лезвие кривого ножа, то это был либо молодой, либо старый месяц. Но молодой склоняется к заходу вечером, а старый поднимается лишь под утро. Значит, в полночь описанная картина наблюдаться не могла. Однако привлекает внимание вторая часть описания: «...он катился и в то же время оставался на месте в дымчато-белых облаках». Этот эффект «бега Луны на месте» следует обсудить особо.

Если в лунную ночь погода выдалась облачная и ветреная, то наверняка вы заметите удивительное явление — полет Луны. Стоит ей показаться в разрыве облаков, как она «метнется в сторону», и вы невольно вскинете голову и начнете следить за ней. Но через несколько

4 Зак. 179

секунд поймете, что Луна стоит на месте, а летят, в действительности, облака. Впрочем, если облачность плотная и разрывов в ней мало, то вы можете долго не увидеть Луну второй раз и останетесь в полной уверенности, что «нечто яркое округлой формы быстро пролетело на фоне облаков». Известны случаи, когда именно так рождались слухи об НЛО. Как же объясняется эффект «полета Луны»?

Как известно, наш глаз соединен с мозгом пучком нервных волокон, но их в пучке существенно меньше, чем светочувствительных клеток в сетчатке глаза. Поэтому глаз сам осуществляет предварительную обработку информации и передает в мозг простые образы. Например, в хаотически разбросанных пятнах глаз старается «угадать» контуры геометрических фигур, уже знакомых мозгу: такая информация обрабатывается значительно быстрее. Это свойство глаза иногда оказывается полезным для астрономов (фигуры созвездий запоминаются легче), а иногда вредным. Пример тому — «открытие» каналов на Марсе, или «обнаружение» звездных цепочек и колец.

Итак, глаз передает в мозг далеко не все, что видит, а лишь самое важное. Но откуда он знает, что важно, а что нет? В процессе биологической эволюции каждый орган человека приобрел такие качества, которые помогают нам выжить. Глаз — не исключение. Он прежде всего выделяет из увиденного ту информацию, которая может относиться к потенциальным жертвам человека или к опасным для него хищникам. И то, и другое обычно связано с движением: жертва убегает, хищник нападает. Поэтому наша зрительная система прежде всего фиксирует изменение, перемещение объекта в поле зрения. Причем осуществляется это наиболее эффективным способом.

Дело в том, что между сетчаткой глаза и корой головного мозга зрительный сигнал испытывает сложные преобразования. В целом он существенно упрощается, но при этом из него выделяется жизненно важная информация, потеря которой могла бы стать губительной для нас. В частности, сохраняется и даже значительно усиливается информация о перемещении изображения по сетчатке. И даже более того — сохраняется только информация о перемещении. Неподвижные объекты, изображение которых не смещается на сетчатке, глаз через некоторое время вообще перестает замечать. Поэтому, чтобы все же видеть неподвижную картину, глаз постоянно совершает микроскопические повороты на $2-3'$, создавая тем самым искусственные смещения изображений на сетчатке. Именно поэтому, глядя на звезды, мы иногда замечаем их «прыжки»: в действительности это микроскопические движения глаза.

Другая важная особенность глаза состоит в том, что область четкого зрения находится в центре сетчатки и имеет размер всего несколько градусов, тогда как все остальное поле нашего зрения имеет низкую разрешающую способность.

Теперь представьте себе, что вы охотник, всматривающийся в неподвижный пейзаж в поисках жертвы. Кстати, умная жертва,

почувствовав неладное, замрет, и ее будет непросто различить. Но, предположим, жертва вас не замечает и продолжает спокойно пасть. В принципе, у глаза есть две возможности: зафиксировать взгляд на пейзаже или на движущейся жертве. Если бы взгляд был зафиксирован на пейзаже, то раздражающим стимулом, перемещающимся по сетчатке, было бы изображение жертвы. Но сигнал от него был бы слаб, поскольку оно покрывает малую часть сетчатки, а качество изображения жертвы было бы плохим, поскольку оно сразу бы вышло из области четкого зрения.

Поэтому эволюция избрала иной путь. Наш глаз фиксирует взгляд на движущейся жертве; ее изображение постоянно остается в центре сетчатки в области четкого зрения. Зато при этом перемещается по сетчатке изображение всего окружающего пейзажа, создавая мощный зрительный импульс и возбуждая внимание. Это стандартная ситуация и мозг интерпретирует ее однозначно: небольшое зафиксированное в центре поля зрения изображение — это движущийся объект, а окружающее его обширное движущееся изображение — это неподвижный фон.

И вот перед нами картина — бегущие по ночному небу облака и появляющиеся в их разрывах Луна, яркая звезда или планета. Глаз (точнее, мозг) реагирует на эту картину привычным образом: в нашем восприятии облака стоят, а яркий объект стремительно летит. Лишь сознательно и совсем не сразу удастся подавить это ощущение, «остановить» небесное светило и «сдвинуть» облака. Для опытных наблюдателей неба это не представляет труда.

Отметим любопытную аналогию между живой системой «глаз + мозг» и компьютеризованными видеосистемами. Оказывается, подобно нашему глазу работает электронная система стабилизации изображения у портативных видеокамер. Если картинка смещается целиком, то система возвращает ее в пределы кадра, предполагая, что причина смещения — дрожание руки оператора. Но если на неподвижном фоне смещается небольшая часть изображения, то система не вмешивается, считая это реальным перемещением одного из объектов съемки. Таким образом, если направить камеру на облачное небо с Луной, то она, как и глаз, постарается «остановить облака и двинуть Луну».

Вот такое весьма интересное явление подметил автор приведенного фрагмента.

3.50. Сон Богдана

«Понемногу сон одолел Хмельницкого. Уже засыпая, он увидел на западе зарево и подумал: “Луна всходит...” Луна была прозрачная, синеватая, как круглая льдинка».

Найдите обмолвку автора и определите обстоятельства наблюдения [6, № 181].

Решение: Восходят все светила в восточной части неба, а не на западе. Поскольку Луна описана в фазе полнолуния («круглая льдинка»), то недавно зашло Солнце, значит, время было вечернее. Если бы Луна выплывала из-за горизонта, близкого к математическому (морская гладь, широкое поле), то цвет ее диска был бы красноватый. Дело в том, что даже сравнительно тонкий слой чистого воздуха хорошо рассеивает голубые лучи (вспомните цвет дневного неба — это рассеянные атмосферой голубые лучи солнечного света), но беспрепятственно пропускает желтые, зеленые и красные; поэтому цвет солнечного диска высоко в небе желтоватый. Когда же светило наблюдается на малой угловой высоте, его лучи преодолевают большую толщу воздуха, которая рассеивает не только голубые, но частично зеленые и желтые лучи. Почти нетронутыми атмосферой остаются только красные лучи. Поэтому Луна и Солнце у самого (математического) горизонта выглядят красными.

Описанный в отрывке синеватый цвет лунного диска указывает, что светило выплывало из-за сравнительно высокой преграды, например, из-за близкого леса или дома.

3.51. Аптекарьша

«Скоро рассвет... (аптекарьша) видит, как мало-помалу белеет восточный край неба, как потом он багровеет, словно от большого пожара. Неожиданно из-за отдаленного кустарника выползает большая широколистая Луна. Она красна».

Все ли здесь верно? [6, № 182]

Решение: В описание вкралась одна обидная неточность: «большая широколистая» Луна, т. е. Луна в фазе полнолуния или близкой к нему, восходит не под утро, а вечером или ночью. В остальном описанный Чеховым восход Луны чрезвычайно точен.

Вообще, восход и заход Луны за горизонт — эмоциональное явление, не раз описанное в научной и художественной литературе, но до конца еще не разгаданное. «Красноту и широколистесть» Луны у горизонта астрономы легко могут объяснить. В задаче 3.50 мы уже обсудили красноту лунного «лица» у горизонта. А что касается ее «широколистесть», то и это явление имеет объяснение. Оказывается, длинный путь светового луча в атмосфере не остается прямолинейным. Атмосфера, подобно слою воды или стекла, преломляет падающий на ней свет тем сильнее, чем больше угол его падения. Астрономы называют это атмосферной рефракцией.

У самого горизонта прошедший сквозь атмосферу луч отклоняется на полградуса. Изображение источника приподнимается над горизонтом тем сильнее, чем ближе он к горизонту. Поэтому нижний край Луны приближается к верхнему: у ней как бы прижимается «подбородок» и выпячиваются «скулы». Вот она уже и «...широколица».

Но существует эффект, который физика объяснить не может: у горизонта Луна кажется нам больше, чем когда она высоко в небе. В действительности, когда мы наблюдаем Луну у горизонта, она от нас даже немного дальше, чем если бы мы видели ее вблизи зенита: разница составляет около 2 %. Но какая-то особенность нашего зрения вводит нас в заблуждение, и Луна кажется у горизонта существенно ближе и больше. Иногда это приводит к удивительным казусам: например, Луну принимают за НЛО! Попробуйте дать объяснение кажущемуся увеличению углового размера Луны у горизонта — это вполне серьезная научная задача.

3.52. В Антарктике

«К островам Баллени подошли уже к вечеру, когда смеркалось... С юга надвигалась густая туча, а выше, на узкой полосе чистого неба, светила полная Луна. Я даже удивился: откуда она здесь взялась? Мы так долго не видели ее, что даже забыли о ее существовании, а тут вдруг она явилась круглая, румяная, добродушная».

Это происходило 27 марта 1956 г. на $66^{\circ}05'$ ю. ш. Нет ли в приведенном отрывке каких-либо несообразностей? [6, № 183]

Решение: Это происходило примерно в эпоху весеннего равноденствия. Солнце заходило почти точно на западе, а значит, полная Луна должна была восходить вблизи точки востока и двигаться к северу. На южной стороне неба Луна на умеренных широтах Южного полушария не бывает. Это возможно только за полярным кругом.

Чтобы не оставалось сомнений, можно проверить истинность описания при помощи электронного планетария. Я воспользовался программой Turbo Sky v. 3.0 Pro (автор — А. Волынкин) и убедился, что в указанном месте и в указанное время, действительно, почти полная Луна взошла при заходе Солнца на востоко-юго-востоке и, двигаясь к северу, поднялась к полуночи над горизонтом более чем на 30° . Видимость Луны над облаками могла быть только в северной части неба. Вероятно, автор описания ориентировался привычным для европейского человека образом: где днем было Солнце — там и юг.

3.53. Песнь о Гайавате

В поэме Лонгфелло есть такая картина:

«В гневе солнце заходило,
Пролагая путь багряный,
Зажигая тучи в небе,
Как вожди сжигают степи,
Отступая пред врагами;
А Луна — ночное солнце —
Вдруг восстала из засады
И направилась в погоню
По следам его кровавым
В ярком зареве пожара».

Разберитесь, в какой фазе была Луна? [6, № 188]

Решение: В полнолунии.

3.54. Незаходящая Луна

«Зимой месяц светит, как они мне сказывали, в здешних местах почти два месяца сряду и становится час от часу больше, смотря по тому, как коротки дни бывают. Я оставляю сие на рассмотрение астрономов, правду ли они мне сказали».

Здесь речь идет о Шпицбергене, средняя широта которого около $77,5^\circ$. Возможны ли там подобные явления? Можно ли вообще где-либо на Земле наблюдать незаходящую в течение нескольких суток Луну? [6, № 199]

Решение: Да, но Луна не может светить два месяца подряд, так как она движется близ эклиптик, а значит, подобно Солнцу, в любом месте Земли непрерывно видна не дольше половины своего орбитального периода: у Солнца это полгода, а у Луны — полмесяца. Луна может быть незаходящей севернее $+61^\circ$ с. ш. и южнее -61° ю. ш.

3.55. Восход

«На горизонте только что взошла яркая и крупная звезда. Казалось, она запуталась в траве. На другой половине неба всплывала, отрываясь от земли, Луна».

Реальна ли описанная здесь картина? [6, № 201]

Решение: Нет: Луна и звезды восходят на одной и той же половине неба.

3.56. От восхода до захода

Что бывает продолжительнее — самые длинные солнечные дни или промежутки времени от восхода и до захода Луны? (Имеются в виду средние широты.) [6, № 208]

Решение: Промежутки времени от восхода до захода Луны. Это вызвано как более быстрым собственным движением Луны в направлении обратном суточному движению неба, так и возможным большим склонением Луны, чем Солнца, вследствие наклона ее орбиты к эклиптике.

3.57. Летние затмения

Из 25 полных солнечных затмений, которые уже произошли и еще произойдут в период с 1988 по 2023 г. (два полных сароса), 7 затмений попадают на июнь и июль. И это не игра случая. Взяв больший промежуток времени — с 1950 по 2040 г. (5 саросов), — мы увидим, что из 61 полного затмения 18 попадают на июнь и июль. В обоих случаях доля «летних» затмений (около $1/3,5$) значительно превышает долю июня и июля в году ($1/6$). Чем можно объяснить такое преобладание полных затмений в летние месяцы? [6, № 212]

Решение: Тем, что в летние месяцы, когда Земля движется в районе афелия своей орбиты, видимый угловой диаметр Солнца имеет наименьшее значение, поэтому диск Солнца легко закрывается Луной.

3.58. Очередь к затмению-1

Полное солнечное затмение 11 августа 1999 г. наблюдалось в Румынии, Франции, Германии, Турции, Иране... Расставьте эти места в том порядке, в каком по ним шла лунная тень [6, № 214–215].

Решение: Франция, Германия, Румыния, Турция и Иран: лунная тень движется по земной поверхности с запада на восток в соответствии с орбитальным движением Луны.

3.59. Очередь к затмению-2

Полное лунное затмение 9 января 2001 г. наблюдалось в Алжире, Иране, Эфиопии, России, Индии, Китае, Швейцарии... Расставьте эти места в том порядке, в каком в них наблюдалось это явление.

Решение: Лунное затмение наблюдается синхронно везде, где Луна в этот период видна над горизонтом.

3.60. Частное затмение

Какая часть солнечного диска — верхняя или нижняя — была закрыта Луной при наблюдении частного затмения 31 июля 2000 г. с территории России? [6, № 216]

Решение: Верхняя. Поскольку частное затмение наблюдалось в средних широтах Северного полушария, тень Луны прошла над Северным полюсом. Следовательно, для наблюдателей в России Луна казалась смещенной к северу, т. е. вверх относительно солнечного диска.

3.61. Движение тени

Как движется лунная тень по земной поверхности: вдогон или навстречу суточному вращению планеты? Что движется быстрее — лунная тень или точки земной поверхности? [6, № 219]

Решение: Лунная тень и поверхность Земли под ней движутся в одном направлении, но тень движется быстрее.

3.62. Солнечное кольцо

Какой вид имеет кольцеобразное солнечное затмение в тех местах, где оно наблюдается из области лунной полутени? [6, № 220]

Решение: Оно будет иметь вид частного солнечного затмения.

3.63. Затмение на полюсах

Можно ли наблюдать какие бы то ни было затмения с земных полюсов? [6, № 221]

Решение: Можно наблюдать и солнечные, и лунные затмения, причем не реже, чем в других местах на Земле.

3.64. Планета петляет

У какой из внешних планет описываемая ею петля на фоне звездного неба наименьшая по размеру? [6, № 228]

Решение: У наиболее удаленной от Земли — у Плутона.

3.65. Всенощная планета

Какие планеты, в какой конфигурации и из каких мест на Земле можно наблюдать всю ночь, с вечера до рассвета? [О. С. Угольников]

Решение: Кроме верхних планет (Марс, Юпитер, Сатурн,...) можно наблюдать и одну нижнюю — Венеру, в ее нижнем соединении с Солнцем. Наклон орбиты Венеры к эклиптике около $3,5^\circ$, так что с Земли она видна под углом около 8° от Солнца. Поэтому вблизи полярного круга ее можно наблюдать всю ночь.

3.66. Молодая Луна

Известно, что иногда на фоне вечерней зори удается заметить Луну в возрасте моложе 1 суток, а иногда — даже при хорошей погоде, — не удается. От каких факторов это зависит и существует ли у них периодичность во времени? [О. С. Угольников]

Решение: В наших средних широтах глубина погружения Солнца под горизонт при заданном угловом расстоянии Луны от него ($1 \text{ сут} = 12^\circ$), видимой над горизонтом, сильно зависит от сезона: более всего она в день весеннего равноденствия. Второй фактор — положение узлов лунной орбиты, влияющее на угловое расстояние Луны от эклиптики. Оно меняется с периодом сароса (около 18 лет).

3.67. Дневное полнолуние

Можно ли одновременно видеть над горизонтом Солнце и полную Луну? [4, № 178]

Решение: Можно, благодаря действию атмосферной рефракции, «приподнимающей» светило у горизонта на $35'$.

3.68. Астрономические широты

Начиная с какой географической параллели, вечерние и утренние астрономические сумерки никогда ночью не сливаются друг с другом?

Указание: астрономические сумерки оканчиваются, когда Солнце опускается под горизонт на 18° [4, № 333].

Решение: К югу от $48,5^\circ$.

3.69. Угадайка

10 мая было противостояние Марса. В каком созвездии он был виден? Венера была в наибольшем вечернем удалении 5 февраля. В каком созвездии она находилась? [4, № 387]

Решение: Марс противоположен Солнцу, т. е. в Весах. Венера примерно на 45° к востоку от Солнца, т. е. в Рыбах.

3.70. Равные периоды

Если синодический период обращения планеты равен ее звездному периоду, то чему оба они равны в годах? [4, № 395]

Решение: 2 года.

3.71. Постоянство Венеры

Условия видимости Венеры повторяются через 8 лет почти в те же числа месяцев. Выяснить причину этого явления [4, № 399].

Решение: Причина в том, что 8 земных лет ($= 2922$ сут) почти в точности равны пяти синодическим периодам Венеры ($5 \times 584 = 2920$ сут).

3.72. Двойное затмение

Может ли произойти покрытие Юпитера Луной во время затмения Луны? А покрытие Венеры [4, № 630]?

Решение: Юпитера — может, а Венеры — нет.

3.73. Полуночное затмение

Может ли на Земле наблюдаться солнечное затмение в полночь [4, № 632]?

Решение: Может — в полярных областях.

3.74. Задача профессора Блажко

Астроном производит наблюдения каждый день в одно и то же звездное время, и при этом каждый раз он видит Солнце точно на горизонте. Где и когда это может быть? [Задачу С. Н. Блажко сохранил Э. В. Кононович]

Решение: На Северном полярном круге в 18 часов и на Южном полярном круге в 6 часов по звездному времени (т. е. когда точки равноденствия пересекают линию горизонта, а эклиптика совпадает с ней).

3.75. Задача профессора Куликова

В течение месяца астроном ежедневно выходил из дома через час после захода Солнца и каждый раз видел на небе одну и ту же картину созвездий. В каких широтах и в какой сезон года это было? [Задачу К. А. Куликова сохранил А. С. Шаров]

Решение: Поскольку звездные сутки короче солнечных на 3 минуты 56 секунд, это могло быть только в таком месте и в такой сезон, где и когда заход Солнца в каждый последующий день происходит раньше примерно на 4 минуты. Иными словами, за описанный в условии задачи месяц время захода Солнца должно сместиться вперед на 2 часа. Сразу ясно, что это осень. Воспользовавшись Астрономическим календарем (или даже домашним, отрывным или перекидным), мы увидим, что на широте Москвы (56°) моменты восхода Солнца за любой осенний месяц (август, сентябрь, октябрь, ноябрь) смещаются примерно на 1 час. Значит, искомая точка лежит севернее (в Южном полушарии — южнее) этой широты. Придется искать эту широту при помощи довольно редкой таблицы «Долгота дня на различных широтах», приведенной, например, в Астрономическом календаре под редакцией О. С. Угольникова, издаваемом журналом «Звездочет» (www.astronomy.ru). В этой таблице мы должны обнаружить широту и сезон, где долгота дня за месяц сокращается на 4 часа. Как видим, это возможно в сентябре–октябре на широте $65\text{--}66^\circ$. Это приблизительно широта Архангельска, Печоры, Надыма.

3.76. Рассвет

Найдите астрономическую неточность в стихотворении И. А. Бунина «Октябрьский рассвет» (1887 год):

Ночь побледнела, и месяц садится
За реку красным серпом.
Сонный туман на лугах серебрится,

Темный камыш отсырел и дымится,
Ветер шуршит камышом.

Тишь на деревне. В часовне лампада
Меркнет, устало горя.
В трепетный сумрак озябшего сада
Льется со степи волнами прохлады,
Медленно рдеет заря.

[Эту задачу предложил астроном Глушков Ю. Н.]

Решение: В этом изумительном стихотворении Ивана Бунина неверно описано движение Луны: очевидно, что под утро «месяц» мог лишь восходить, но не садиться.

3.77. Проблемы селенитов

Герои романов Жюль Верна «С Земли на Луну» (1865 г.) и «Вокруг Луны» (1870 г.) обсуждают жизнь воображаемых жителей Луны — селенитов:

«— Зато, — продолжал Барбикен, — природа балует жителей видимой части Луны в ущерб их антиподам. На долю селенитов невидимой части выпали, как видите, ночи в триста пятьдесят четыре часа, ночи, темноту которых не прорезает ни один луч. А селениты видимой части Луны, как только Солнце, светившее им пятнадцать суток подряд, скроется за горизонтом, уже видят на противоположной стороне неба блестящее светило — Землю, чей диск в тринадцать раз больше Луны, а следовательно, и света дает в тринадцать раз больше. Свет Земли не поглощается атмосферой. Земля уходит с лунного горизонта только в ту минуту, когда на нем с противоположной стороны появляется Солнце.

— Хорошо сказано! — перебил Мишель. — Немного, пожалуй, академично, но здорово».

Вопрос: все ли утверждения Барбикена были академически безупречными?

Решение: Председатель «Пушечного клуба» Барбикен ошибся в одном: для жителей Луны (если исключить небольшие зоны либрации) Земля практически неподвижно висит в небе — не восходит и не заходит. Но, разумеется, в продолжении лунных суток яркость земного диска меняется, поскольку Земля для селенитов, как и Луна для землян, проходит через все фазы — от новоземелия до полноземелия. Поэтому ночь на обратной стороне Луны, где Земля вообще не видна, значительно темнее, чем на видимой. В этом Барбикен прав.



Глава 4

Приборы и наблюдения

4.1. В самом деле: зачем нужен телескоп?

Решение: Телескоп выполняет несколько весьма различных функций:

- 1) он увеличивает видимый угол между светилами или деталями поверхности небесных объектов, усиливая этим остроту нашего зрения;
- 2) он собирает больше света, чем зрачок нашего глаза, усиливая этим проникающую способность зрения;
- 3) он строит изображение на фотопластинке или другом приемнике света, позволяя вообще заменить глаз более объективным и чувствительным инструментом.

Для различных наблюдений наиболее важной становится одна из этих способностей телескопа. Поэтому строят специализированные телескопы, у которых именно эта способность выражена лучше всего.

Например, существуют специальные астрометрические телескопы, позволяющие очень точно измерять углы на небе. Есть астрографы, в которых глаз полностью заменен фотопластинкой. Есть солнечные телескопы, у которых важно не количество собранного света, а большой масштаб изображения. Есть телескопы для получения спектров слабых звезд и галактик — вот они-то как раз должны собирать слабый свет с большой площади; поэтому их объективы самые крупные. Сколько задач у телескопов, столько разнообразных конструкций, поэтому нечасто встретишь два одинаковых профессиональных телескопа, у каждого из них своя специализация.

4.2. Коллектив — это сила!

В звездном скоплении 250 одинаковых звезд; каждая имеет блеск 10^m . Каков суммарный блеск скопления?

Решение: Представим число 250 как $2,5 \times 100$, тогда ясно, что скопление в целом будет на $1^m + 5^m = 6^m$ ярче одной его звезды. Следовательно, блеск скопления составит $10^m - 6^m = 4^m$.

4.3. Есть ли жизнь на Земле?

Обычный уличный фонарь виден с расстояния 20 км. Можно ли с Луны невооруженным глазом заметить ночное освещение города на Земле, если в нем по ночам горит 100 тыс. фонарей?

Решение: По сравнению с предельным расстоянием видимости фонаря (20 км) Земля от Луны находится в 20 тыс. раз дальше. Значит свет каждого фонаря для лунного наблюдателя в 400 млн раз слабее предела видимости одного фонаря. Поэтому даже скопление из 100 тыс. фонарей будет для лунного наблюдателя в 4 тыс. раз слабее «еле различимого фонаря». Значит невооруженным глазом с Луны по ночам этот город не виден.

4.4. Телескоп на Луне

Еще раз прочитайте, предыдущую задачу. А что, если лунный наблюдатель имеет телескоп диаметром 60 см, — заметит ли он ночной город?

Решение: Диаметр объектива этого телескопа в 100 раз превышает диаметр ночного зрачка человеческого глаза. Значит площадь объектива в 10 тыс. раз больше площади зрачка. Если правильно подобрано увеличение телескопа, так, что весь собранный им свет попадает в зрачок наблюдателя, то «вооруженный» телескопом глаз становится в 10 тыс. раз чувствительнее невооруженного и теперь уже может различить светлое пятнышко ночного города.

4.5. Бинокль

Наш глаз видит звезды не слабее 6^m . А можно ли заметить звезду 10^m в 12-кратный бинокль с объективами диаметром 60 мм?

Решение: Диаметр зрачка у молодого здорового глаза изменяется в зависимости от освещенности от 2 до 8 мм. Если не предпринимать

особенно долгой адаптации к темноте, то ночью диаметр зрачка составляет около 6 мм. Как видим, диаметр объектива бинокля в 10 раз больше, а значит количество собранного им света больше в 100 раз. Но весь ли собранный свет попадает в зрачок наблюдателя? Диаметр выходного зрачка бинокля составляет $60/12 = 5$ мм, поэтому можно считать, что весь. Если бы не было потерь света в оптике (отражение и поглощение в стекле), то такой бинокль усиливал бы проникающую способность глаза на 5^m . Но даже если половина света теряется, усиление составит не менее 4^m , так что звезды 10^m должны быть доступны.

4.6. Наивный вопрос

Почему днем не видно звезд?

Решение: Рассеянный в атмосфере солнечный свет делает дневное небо довольно ярким. На этом фоне слабый свет звезд практически не различим. Впрочем, в ясную погоду днем можно заметить Венеру, если она не очень близка к Солнцу; особенно легко это сделать в горах, где небо днем темнее, чем на равнине. С помощью телескопа, увеличивающего видимый угловой размер площадки неба, можно как бы «размазать» дневной свет по большей площади и тем самым снизить его яркость. При этом днем можно заметить планеты и яркие звезды. Только, пожалуйста, берегите свой глаз и телескоп от прямых солнечных лучей.

4.7. Свет мой, зеркальце...

Почему все крупнейшие в мире телескопы — рефлекторы?

Решение: Телескоп-рефрактор с диаметром объектива более 1 метра практически невозможно изготовить: во-первых, очень непросто отлить столь крупный диск оптически идеального стекла, а любая неоднородность в теле линзы существенно ухудшает качество построенного ею изображения. Во-вторых, чем больше диаметр линзы, тем она толще, а в толстом стекле происходят заметные потери света. Так, поглощение видимого света легким оптическим стеклом (крон) составляет около 1 % на 1 см пути, а тяжелое стекло (флинт) поглощает около 3 % света на 1 см пути. А в ультрафиолетовом диапазоне поглощение значительно больше. Кроме этого, каждое прохождение света через оптическую поверхность линзы приводит к потере 4–6 % энергии. А у объектива рефрактора четыре таких поверхности.

К тому же, укрепленная только по периметру, огромная линза деформируется собственным весом, и созданное ей изображение погнется. Самые крупные из созданных до сих пор линз имеют

диаметр 1,5 м, но это не полноценные объективы рефракторов, а специальные тонкие линзы особой формы — коррекционные пластины для зеркальных телескопов Шмидта. До сих пор крупнейшим линзовым объективом остается созданный в 1895 г. 40-дюймовый объектив рефрактора обсерватории Йеркса (США), расположенной в 80 милях к северо-западу от г. Чикаго, на берегу озера Женева на высоте 73 м над уровнем моря [11]. Фокусное расстояние этого объектива 19 м.

У телескопов диаметром более 1 метра объективы зеркальные. Астрономические зеркала тоже сделаны из стекла или подобных ему материалов; но если линзу можно поддерживать только по периметру, то зеркало — по всей площади тыльной поверхности, поэтому оно не прогибается под собственным весом. К тому же зеркало может быть значительно тоньше эквивалентной ему по диаметру линзы — ведь у зеркала работает только одна оптическая поверхность, а не весь объем, как у линзы. Например, две линзы йеркского объектива диаметром 1,04 м имеют толщины 6,4 см (крон) и 3,8 см (флинт) [11], а 8,2-метровое зеркало нового телескопа Европейской южной обсерватории в Чили имеет толщину всего 20 см.

В прошлом большим недостатком рефлекторов считалась недолговечность зеркального покрытия объектива. Но современная техника позволяет быстро восстанавливать тускнеющий за несколько лет зеркальный слой объектива, так что по всем параметрам сегодня телескопы-рефлекторы превосходят своих линзовых собратьев.

4.8. В чем его сила?

Увеличивает ли телескоп видимые размеры звезд?

Решение: Весьма непростая задача. Разумеется, телескоп увеличивает угловой размер любого объекта, в том числе и звезды. Но кажется ли нам угловой размер звезды больше при ее наблюдении в телескоп? Ответ на этот вопрос зависит от дополнительных данных, прямо в условии задачи не указанных. Будем считать, что угловое разрешение человеческого глаза составляет $100''$, а видимый диаметр диска звезды, связанный с атмосферным размытием ее изображения, составляет $1''$. Тогда при увеличении телескопа менее 100 раз изображение звезды по-прежнему будет казаться точечным, но при более сильном увеличении мы заметим дрожащий диск звезды.

Если наблюдение ведется в космический телескоп, то атмосфера не портит изображения, но дифракция света на объективе телескопа все равно создает неточечное изображение звезды: угловой диаметр дифракционного диска составляет примерно λ/D , где λ — длина волны света, D — диаметр объектива. Например, если у телескопа $D = 20$ см, то в оптическом диапазоне ($\lambda = 5\,000$ А) размер дифракционного диска звезды будет около $2,5 \cdot 10^{-6}$ радиан или $0,5''$. При

увеличении более 200 раз изображение звезды для глаза из точечного превратится в дискообразное (точнее, это будет диск, окруженный несколькими концентрическими кольцами малой яркости). Итак, в любом случае при сильном увеличении изображение звезды уже не будет казаться глазу точкой.

4.9. Зоркий глаз

Можно ли различить невооруженным глазом на Луне Море Кризисов, диаметр которого 520 км?

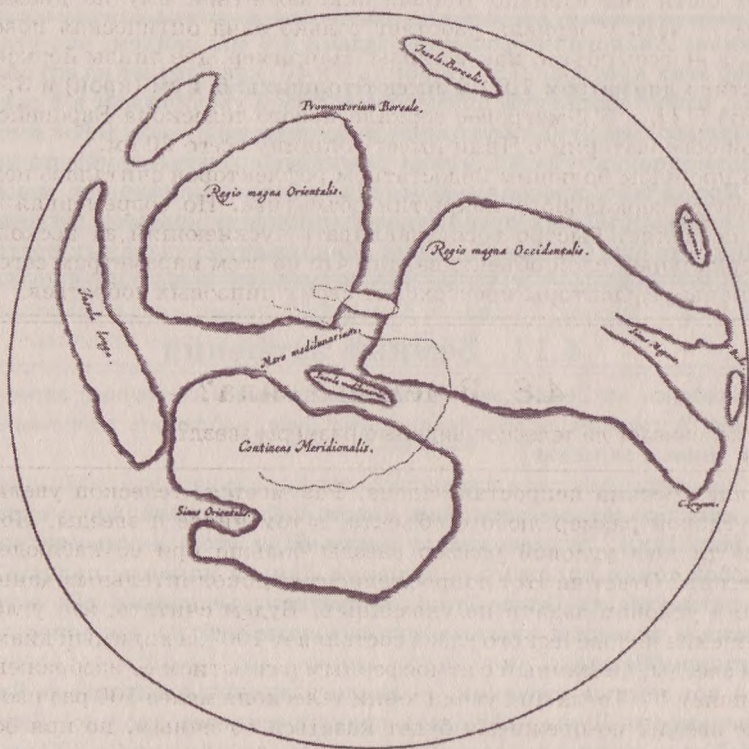


Рис. 4.1. Рисунок Луны, сделанный (до изобретения телескопа!) английским ученым Вильямом Гильбертом (1540–1603). Некоторым деталям на своей карте он дал названия, например Британия (современное Море Кризисов), Большая страна Восточная (Море Дождей), Большая страна Западная (Море Ясности), Остров Среднелунный (Залив Центральный) и др. [Gilbert W. De mundo nostro Sublunari. Amstelodami. 1651]. Фото и ссылка из канд. диссертации Е. К. Страута (М., 1965)

Решение: При диаметре 3 476 км Луна видна на земном небосводе под углом $31'$. Значит Море Кризисов будет видно под углом $31' \times 520/3\,476 = 4,6'$. Формально это в 3 раза превышает предел углового разрешения глаза. Действительно, зоркий глаз в хороших условиях способен различить Море Кризисов, что доказано зарисовками Луны, сделанными до изобретения телескопа (рис. 4.1).

4.10. Вооруженный глаз

Можно ли в бинокль 8×40 различить на Луне кратеры Тихо и Коперник, имеющие диаметры около 90 км?

Решение: Аналогично решению задачи 4.9 мы найдем, что угловой размер этих кратеров $0,8'$. Бинокль 8×40 , как следует из его обозначения, имеет объективы диаметром 40 мм и увеличивает в 8 раз. Используя его, мы увидим указанные кратеры под углом $0,8' \times 8 = 6,4'$. Этого вполне достаточно, чтобы разглядеть общую структуру кратеров. Кроме того, проводя наблюдения вблизи полнолуния, мы заметим системы светлых лучей, расходящихся от кратеров Тихо и Коперник. Это еще больше облегчает обнаружение указанных кратеров.

4.11. Земные затмения

Находясь на Земле, мы наблюдаем лунные и солнечные затмения. А сможем ли мы, находясь на Луне, наблюдать солнечные и земные затмения?

Решение: Солнечные затмения можно наблюдать только с видимой стороны Луны, откуда видна Земля. При этом их можно видеть из любой точки видимого полушария Луны в моменты полных лунных затмений на Земле (т.е., в среднем, несколько раз в году), а также в моменты частных лунных затмений из тех точек, куда падает тень Земли.

А вот земные затмения, — аналоги лунных затмений на Земле, с поверхности Луны наблюдать практически невозможно. Диаметр лунной тени на поверхности Земли обычно не превышает 200 км, что для лунного наблюдателя составляет угол в $1,8'$. На фоне пестрой земной поверхности эта темная точка будет почти неразличима. А полутень Луны имеет небольшой контраст. Фотографии Земли со спутников в моменты полных солнечных затмений показывают, что тень и полутень Луны на земной поверхности угадываются с большим трудом даже с относительно небольшого расстояния.

4.12. Зеркальце для подглядывания

Почему объективы солнечных телескопов часто делают неподвижными (например, у вертикальных или горизонтальных телескопов), используя для слежения за Солнцем целостат?

Решение: Для получения большего масштаба изображения солнечных инструменты имеют длинный фокус (до 80 м); нелегко было бы работать с такой длинной поворачивающейся трубой. Поэтому для компенсации движения Солнца по небу применяют компактный двузеркальный или даже однозеркальный целостат. А потеря света при отражении от зеркал целостата не очень важна для солнечного инструмента.

4.13. Железнодорожные метеориты

Если нанести на географическую карту пункты падения метеоритов, обнаруженных в азиатской части СССР, то окажется, что почти все они расположены вблизи линии великой Сибирской железнодорожной магистрали. Чем это объяснить? [5, № 432]

Решение: Населенные пункты в этой области страны в основном расположены вдоль линии Сибирской железной дороги. Где живут люди, там чаще всего и находят метеориты.

4.14. Алголь

Чему равно отношение радиусов компонентов в системе затменной переменной звезды типа Алголь, если затмение центральное, спутник темный, а блеск в минимуме снижается на 1^m ? [5, № 475]

Решение: Если считать диск главного компонента равномерно ярким (нет потемнения к краю), то поток света от него в момент затмения понизится во столько раз, каково отношение открытой площади диска к его полной площади:

$$\frac{\pi R^2}{\pi R^2 - \pi r^2} = 2,512,$$

где R и r — радиусы главного компонента и его спутника. Отсюда

$$\frac{r}{R} = \sqrt{1 - \frac{1}{2,512}} = 0,776.$$

4.15. Кастор

При наблюдении звезды Кастор в телескоп видно, что она содержит два компонента, имеющих блеск $+2,0^m$ и $+2,8^m$ и разделенных расстоянием в несколько угловых секунд. Определите блеск этой звезды при наблюдении ее невооруженным глазом.

Решение: Невооруженный глаз воспримет эту пару звезд как одну звезду, поскольку угол между ними мал. Вспомним связь между потоком света от звезды и ее звездной величиной:

$$I \propto 2,512^{-m} = 10^{-0,4m}.$$

Потоки света от двух звезд складываются:

$$I = I_1 + I_2,$$

следовательно,

$$10^{-0,4m} = 10^{-0,4m_1} + 10^{-0,4m_2}.$$

Для тех, кто знаком с логарифмами, дальше все ясно: взяв логарифм правой и левой частей уравнения, получим

$$\begin{aligned} -0,4m &= \lg(10^{-0,4m_1} + 10^{-0,4m_2}), \\ m &= -2,5 \lg(10^{-0,4m_1} + 10^{-0,4m_2}). \end{aligned}$$

С помощью этой формулы находим для Кастора $m = 1,6$. Задача решена.

Но и без помощи логарифмов можно оценить суммарный блеск двух звезд. Разница на $0,8^m$ означает примерно двукратное изменение потока света. Значит слабый компаньон вдвое слабее яркого. В сумме потоки их света составят 1,5 от потока яркого компонента, а это соответствует разности блеска примерно в $0,5^m$. Следовательно суммарный блеск двух звезд будет около $2^m - 0,5^m = 1,5^m$. Неплохое согласие с точным ответом.

Заметим, что в действительности Кастор — одна из самых сложных кратных звезд. В нем не менее шести компонентов; в частности, каждая из упомянутых выше звезд — спектральная двойная.

4.16. Лучистая звезда

На фотографиях, полученных с телескопом-рефлектором, изображения ярких звезд имеют «лучики» (рис. 4.2), появление которых, как известно, вызвано дифракцией света на растяхках вторичного зеркала или кабины главного фокуса. Обычно таких растяжек четыре и «лучики» имеют форму креста. Но если растяжек две и они в момент наблюдения в меридиане ориентированы вдоль меридиана, то как будут ориентированы «лучики» на фото?



Рис. 4.2.

Решение: «Лучики» будут вытянуты с востока на запад, поскольку дифракция на линейном препятствии отклоняет волну в перпендикулярном направлении.

4.17. Нас видно?

Может ли астроном, живущий в системе α Кентавра, заметить в телескоп планеты Солнечной системы?

Решение: Расстояние до α Кентавра составляет $1,33 \text{ пк} = 274\,000 \text{ а. е.}$ Поскольку с расстояния в 1 пк отрезок длиной 1 а. е. виден под углом в $1''$, максимальные видимые расстояния наших планет от Солнца для кентаврского астронома составят $\alpha_{\text{max}} = (A/1,33)''$, где A — большая полуось орбиты планеты (табл. 4.1). Зная, какой блеск имеют планеты при их наблюдении с Земли в период противостояния или — для Меркурия и Венеры — наибольшей элонгации (m_0), а также зная расстояние до них в этот момент (Δ), мы без труда

Таблица 4.1

Планета	A , а. е.	α_{\max}	m_0	Δ , а. е.	m
Меркурий	0,4	0,3''	-0,2 ^m	0,92	27 ^m
Венера	0,7	0,5''	-4,1	0,69	24
Земля	1,0	0,8''	(-3)	(0,69)	25
Марс	1,5	1,1''	-1,9	0,52	27
Юпитер	5,2	3,9''	-2,4	4,2	22
Сатурн	9,6	7,2''	+0,8	8,6	23
Уран	19,2	14,4''	+5,8	18,2	27
Нептун	30,1	22,6''	+7,6	29,1	27
Плутон	39,4	29,6''	+14,7	38,4	34

определим их звездную величину при наблюдении от α Кентавра (m):

$$m = m_0 + 5 \lg \frac{274\,000 \text{ а.е.}}{\Delta}$$

Вообще говоря, для современных телескопов доступны объекты 22–25^m, как и угловое разрешение в 0,3–0,5''. Но нужно иметь в виду, что для астронома, живущего у α Кентавра, Солнце будет сиять ярко, как звезда Вега на нашем небе. Такое соседство исключает возможность обнаружить планету. Но если поднять телескоп в космос, то отсутствие рассеянного в атмосфере света сделает эту проблему решаемой.

4.18. Как наблюдал Галилей?

Известно, что Галилей открыл пятна на Солнце. Объясните, как он мог наблюдать поверхность Солнца с помощью своего телескопа.

Решение: Путем проекции на экран, поскольку телескоп с отрицательным окуляром работает как телеобъектив.

4.19. Рисуем Марс

В какое время суток предпочтительно наблюдать Марс в телескоп для зарисовки деталей его поверхности: сразу после наступления темноты, в районе полуночи или в предрассветные часы?

Решение: Предпочтительнее наблюдать Марс в полночь, поскольку в период противостояния именно в это время он проходит через меридиан.

4.20. Находчивый турист

Путешественник в горах захотел измерить высоту Солнца над горизонтом. У него имеются угломерные приборы и прочее снаряжение туриста, но, вот беда, — горизонт закрыт горным хребтом. Как поступил путешественник.

Решение: Путешественник налил в тарелку немного воды, поставил ее перед собой и измерил угол между Солнцем и его отражением в воде. Учитывая, что поверхность воды горизонтальна, легко показать, что высота Солнца над горизонтом равна половине измеренного угла.

4.21. Астрономическая точность

«Все звезды, видимые простым глазом, и многие из телескопических давно уже сосчитаны, зарегистрированы и занесены на карты», — говорится в курсе общей астрономии И. Ф. Полака. Почему же в таком случае число звезд, видимых невооруженным глазом, никогда не указывается точно, а только приблизительно? [6, № 49]

Решение: Потому что острота зрения у разных людей и условия наблюдения не одинаковы.

4.22. Дневные светила

Какие светила видны днем и при каких условиях?

Решение: Солнце, Луна и Венера — невооруженным глазом. Звезды до 4^м — с помощью телескопа.

4.23. Морская смекалка

Корабль плыл мимо острова. Капитан записал в судовом журнале: «Над островом возвышается великолепная гора Нгоро-Нгоро. В полдень, когда мы поравнялись с ней, я при помощи секстанта измерил расстояние до вершины и нашел его равным 12,5 мили». Объясните, как капитан смог измерить расстояние?

Решение: Возможны несколько способов:

а) приближаясь к острову или удаляясь от него, измерить угловую высоту вершины над горизонтом в двух точках А и В (рис. 4.3), а лагом измерить пройденный при этом путь. Зная углы α и β , а также отрезок АВ, легко найдем все стороны треугольников АСD и ВСD;

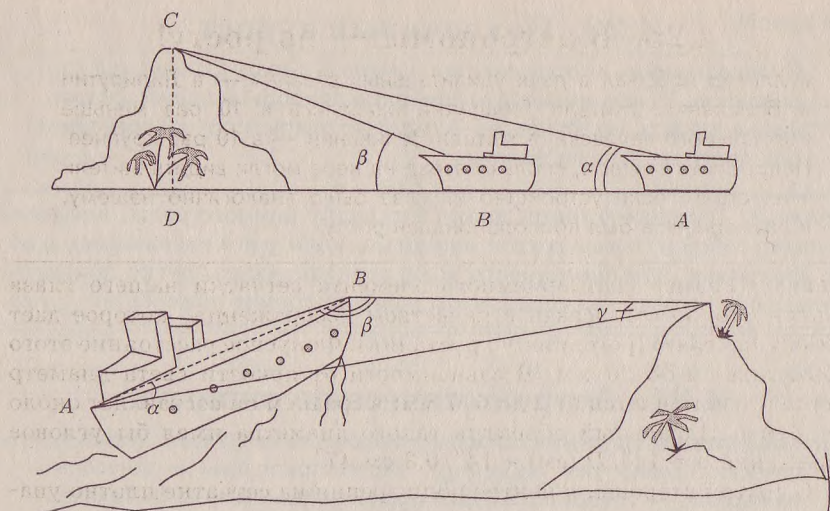


Рис. 4.3

б) используя секстант как горизонтальный угломерный инструмент, а известную капитану длину судна — как базу, измерить параллакс вершины и вычислить расстояние до нее;

в) обычно в лоции указаны высоты гор, поэтому достаточно измерить ее угловую высоту, чтобы вычислить расстояние (этот способ самый простой);

г) определив с помощью секстанта по солнцу свои точные координаты и сняв с карты координаты горы на острове, в принципе, можно вычислить расстояние. Вопрос лишь в точности измерения; обычный секстант такой точности не даст.

4.24. Пропал Уран

21 сентября 1999 года произошло покрытие Урана Луной. В этот день Уран находился в созвездии Козерога. Какое из двух явлений — исчезновение или появление Урана — можно было легко наблюдать в небольшие телескопы?

Решение: Легко было наблюдать только исчезновение Урана. Поскольку созвездие Козерога видно в сентябре по вечерам, значит, Луна была растущая. Исчезновение Урана в начале его покрытия происходило у левого, темного края Луны, поэтому явление легко можно было наблюдать. Появление планеты произошло из-за светлого края Луны; заметить слабый Уран (видимая звездная величина 6^m) в этот момент было довольно трудно.

4.25. В астрономы — по росту!

Гулливвер побывал в двух удивительных странах — в Лилипутии и Великании. Жители Лилипутии оказались в 10 раз меньше нормального человека, а жители Великании — в 10 раз крупнее. Попробуйте оценить, сколько звезд на небе могли видеть жители этих стран, если устройство их глаз было аналогично нашему, а размер глаза был пропорционален росту.

Решение: Размер светоприемного элемента сетчатки нашего глаза довольно точно согласован с качеством изображения, которое дает «объектив» глаза (роговица + хрусталик). Фокусное расстояние этого «объектива» $F \approx 20$ мм. В зависимости от яркости света диаметр зрачка глаза меняется от 2 до 6–7 мм; в среднем он составляет около $D = 3$ мм. Идеальный объектив такого диаметра имел бы угловое разрешение $\alpha = 14''/D$ (см) $= 14''/0,3$ см $47''$.

С другой стороны, в центре поля зрения на сетчатке плотно упакованные светоприемные элементы дневного зрения — колбочки — имеют размер около $h = 2$ мкм; следовательно, они видны из центра объектива под углом $h/F = 10^{-4}$ радиана или $10^{-4} \times 2 \cdot 10^5 = 20''$. С удалением от центра поля зрения плотность элементов сетчатки, а следовательно, и ее разрешающая способность уменьшаются в несколько раз [21]. У людей с нормальным зрением реальная разрешающая способность зрения близка к $1'$. У большинства животных — от слона и гигантского кальмара до мышки и лягушки — сохраняется согласованность параметров зрачка и сетчатки [22]. Из этого следует, что линейный размер элемента сетчатки остается практически постоянным ($h \sim F/D$). Будем считать, что глаза лилипута, великана и нормального человека подобны друг другу ($F/D = \text{const}$). Тогда и размер элемента их сетчаток одинаков.

Поскольку угловой размер звезды на небе очень мал ($\sim 1''$), ее изображение всегда попадает лишь на один элемент сетчатки. Однако поток света от звезды при этом возрастает в зависимости от размера глаза ($\sim D^2$). Поэтому глаз великана будет в 100 раз чувствительнее, а глаз лилипута — в 100 раз менее чувствителен, чем глаз нормального человека. В звездных величинах это различие означает $+5^m$ и -5^m соответственно. Таким образом, великан зафиксирует звезды $6^m + 5^m = 11^m$, которых на небе миллионы, а лилипут заметит только самые яркие звезды $6^m - 5^m = 1^m$, которых всего лишь несколько.

Кроме этого следует отметить изменения яркости ночного неба в промежутках между звездами. Как известно, за счет свечения атмосферы, далеких звезд и межзвездного вещества темное ночное небо в действительности не совсем черное: с площадки в 1 квадратную минуту в глаз попадает столько же света, как от звезды 13^m . При увеличении размера глаза этот свет распределяется на большее число элементов сетчатки, следовательно небо выглядит более темным

(что еще сильнее усилит впечатление от миллионов звезд, доступных зрению гиганта, позволив ясно увидеть самые слабые из них). Для лилипута этот эффект означает усиление яркости ночного неба. На каждый элемент его сетчатки будет приходиться в 100 раз больше света, что повысит яркость неба до $13^m - 5^m = 8^m$. Хорошо адаптированный к темноте глаз человека способен зафиксировать звезду 8^m , следовательно житель Лилипутии никогда не увидит абсолютно черного неба, а всегда будет чувствовать исходящий от него слабый свет.

Таким образом, для занятия астрономией предпочтительно быть гигантом.

4.26. Солнце — тоже звезда

Понятие о звездных величинах было первоначально развито для указания блеска ночных светил — звезд. Когда же астрономы решили измерить в звездных величинах блеск дневного светила — Солнца, это потребовало немалого экспериментального искусства и применения довольно сложных приборов — фотометров. А как быть, если таких приборов нет? Предположим, вы — астроном середины XIX века. Могли бы вы, основываясь на самых общих сведениях о видимости ночных и дневных светил, оценить блеск Солнца в звездных величинах?

Решение: Практически невозможно сравнить непосредственно блеск точечного слабого объекта — звезды — с блеском протяженного супер-яркого объекта — Солнца. Для такого сравнения необходим какой-то третий, промежуточный объект. В качестве него можно использовать... голубое дневное небо. О нем нам известно два факта: 1) свечение дневного неба вызвано рассеянным в воздухе солнечным светом; 2) на фоне ясного голубого неба невооруженным глазом с трудом можно заметить лишь самое яркое ночное светило — Венеру, имеющую блеск -4^m . Следовательно, можно считать, что для нашего глаза изображение Венеры имеет такую же яркость, как эквивалентный ей по угловому размеру кусочек голубого неба. Оказывается, этого достаточно, чтобы сопоставить потоки света, приходящие от Венеры и от Солнца.

Чтобы решить задачу, нужно ответить на два вопроса: 1) сколько требуется «Венер», чтобы составить из них полусферу неба; 2) какая доля от потока солнечных лучей рассеивается в атмосфере и создает эффект голубого неба? Первый вопрос прост: Венера, как точечный источник, имеет для глаза угловой размер около 1 кв. минуты дуги, поскольку предел углового разрешения нормального глаза около $1'$. А чтобы определить, сколько квадратных минут в полусфере неба, вспомним, что площадь сферы равна $4\pi R^2$, а длина окружности $2\pi R = 360 \cdot 60'$. Отсюда площадь полусферы равна $7,43 \cdot 10^7$ кв.

минут. Таким образом, поток света от Венеры приблизительно в 10^8 слабее, чем от полусферы голубого дневного неба.

С другой стороны, довольно очевидно, что проходя сквозь атмосферу в районе зенита, прямой солнечный свет ослабевает приблизительно на 10 %. Это следует хотя бы из того, что у самого горизонта, когда яркость солнца ослабевает в десятки раз, его лучи преодолевают почти в 40 раз большую толщину атмосферы, чем в области зенита (об этом подробнее см. в [1, задача 8.29]). Если в зените предположить ослабление $\tau_0 = 0,1$ и вспомнить, что закон поглощения экспоненциальный $\sim \exp\{-\tau\}$, то у горизонта получим ослабление в $\exp\{0,1 \cdot 40\} \approx 55$ раз, что совпадает с субъективным ощущением. Таким образом, поток прямого света от Солнца на порядок больше, чем поток рассеянного дневного света, а значит в 10^9 раз больше, чем поток света от Венеры. В звездных величинах это $-2,5 \lg 10^9 = -22,5^m$. Следовательно звездную величину Солнца можно оценить как $-22,5^m - 4^m = -26,5^m$. Поразительно, что эта весьма грубая оценка практически совпадает с истинной величиной, измеренной с большими техническими трудностями.

4.27. Парадокс телескопа

Оптическая схема телескопа рефрактора (рис. 4.4) выглядит парадоксально: такой прибор не должен давать изображения светил! Поскольку предмет наблюдения удален от объектива чрезвычайно далеко, объектив строит его изображение практически точно в фокальной плоскости. Это изображение служит объектом для окуляра, передний фокус которого совпадает с задним фокусом объектива. Поэтому лучи выходят из окуляра параллельным пучком и не создают изображения наблюдаемого объекта. Как же в таком случае астрономы ведут наблюдения?

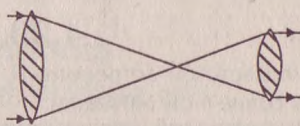


Рис. 4.4

Решение: Параллельный пучок лучей, выходящий из окуляра телескопа, становится после прохождения через хрусталик глаза сходящимся, способным строить изображение на сетчатке. Если ли же телескоп используется для фотографирования или наблюдения Солнца на белом экране, размещенном за окуляром, то при этом окуляр выдвигается, и выходящий из него пучок лучей становится сходящимся, создавая действительное изображение объекта на фотопластинке или экране.

4.28. Телескоп и звезды

Зачем астрономы наблюдают звезды в телескоп? При наблюдении планет или туманностей телескоп увеличивает угол, под которым видны мелкие детали, и они становятся различимыми для глаза. Но при наблюдении звезд, чрезвычайно удаленных от Земли и имеющих очень маленький угловой размер, они при любом разумном увеличении все равно остаются точками. Зачем же тогда наблюдать их в телескоп? [23, № 108]

Решение: Действительно, диск звезды в телескоп разглядеть невозможно. Однако за счет большого диаметра объектива телескоп собирает гораздо больше света, чем невооруженный глаз человека. Весь собранный свет телескоп посылает в зрачок глаза, делая заметными очень слабые звезды. Например, если диаметр объектива 60 мм, он по диаметру в 10 раз, а по площади в 100 раз превышает зрачок глаза; это позволяет увидеть в такой телескоп в 100 раз менее яркие звезды.

Вторая важная задача телескопа — увеличить видимый угол между звездами. Это позволяет обнаруживать двойные звезды, измерять их взаимное движение. В этом же качестве телескоп используется как визирное устройство, т. е. как «прицел» для точного измерения положения звезд на небе.

4.29. Метроном

В повести об астрономе П. К. Штернберге [25, с. 60] есть эпизод на солнечном затмении:

«На золотой солнечный шар наплывал черный диск. Над землей, как холодный вздох, пробежал ветер... Наконец солнце исчезло, стало темно, по спинам прошел озноб. Лишь удары метронома будто отталкивали что-то надвигающееся и страшное».

Объясните, пожалуйста, какую роль играл метроном при наблюдении солнечного затмения?

Решение: Полная фаза затмения длится недолго — всего несколько минут. За это время ученому нужно проделать множество манипуляций по смене фотопластинок в камере, экспонированию изображений, и т. п. На часы смотреть некогда. Стук метронома позволяет отсчитывать секунды в уме. Это очень удобно для определения выдержек при съемке, для определения моментов контакта солнечного и лунного дисков и для контроля полного времени работы.

У старых телескопов, имеющих механический часовой привод, он также играет роль метронома, громко отбивая секунды (так называемый «секундный контроль»). Астроному это удобно: открыв затвор объектива и начав экспозицию, нужно некоторое время провести у телескопа — выставить гидировочную звезду в перекрестие

нитей и убедиться в точности ведения, — и лишь затем подойти к столу с лампой, посмотреть на часы и записать время начала экспозиции; в течение всех этих действий астроном отсчитывает в уме удары секундного контроля, чтобы точно восстановить момент начала экспозиции.

4.30. Народная примета

В рассказе «На затмении» В. Г. Короленко пишет: «— А у нас, братцы, мужики и без остроумов знали, что будет затмение, — выступает внезапно мужичок из-за Пучежа. — Ей-Богу... Потому старики учили: ежели говорят, месяц по зорям ходит, — непременно к затмению... Ну, только в какой день — это не знали... Это, нечего хвастать, было нам неизвестно».

Как объяснить эту народную примету? [12, задача 25]

Решение: Признаюсь, что точного решения этой задачи у меня нет. Есть лишь некоторые подозрения. Сама задача взята из [12]. В указании к ее решению проф. Каменьщиков пишет: «Солнечные затмения бывают при новолунии; но не при каждом новолунии, а при каком?» Однако самого решения он не дает. Не дам его и я. Жду идей от читателей.

4.31. Звезда и спичка

Можно ли закрыть спичкой звезду на темном ночном небе?

Решение: Казалось бы, решение очевидно: угловой размер звезды на небе для глаза неразличим, а спичка видна вполне ощутимо. Значит, она закроет звезду. Но проделайте опыт и вы будете удивлены — звезда бледнеет, но не исчезает. А дело в том, что в темноте диаметр нашего зрачка увеличивается примерно до 6 мм, что значительно превышает диаметр спички. Поэтому она не может полностью перекрыть объектив глаза.

4.32. Венера для марсиан

Для земного наблюдателя блеск Венеры во время наибольшей элонгации равен $-4,4^m$. Чему равен блеск Венеры в этой же конфигурации при наблюдении с Марса? Расстояние Венеры от Солнца равно 0,72 а. е., а Марса от Солнца 1,52 а. е.

Решение: Расстояние Венеры от Земли в момент наибольшей элонгации составляет $\sqrt{1 - 0,72^2} = 0,69$ а. е., а от Марса $\sqrt{1,52^2 - 0,72^2} =$

1,34 а. е. Квадрат отношения этих расстояний составляет 3,77 — во столько же раз будет меньше поток света от Венеры на Марсе по сравнению с Землей. В звездных величинах это около $1,4^m$. Следовательно, во время наибольшей элонгации на Марсе блеск Венеры будет около -3^m .

4.33. Энергетический кризис

Почему башни с телескопами не отапливаются? [6, № 156]

Решение: Помещение, в котором работает телескоп, не отапливают даже в самые сильные морозы, чтобы избежать возникновения конвективных потоков в помещении и над ним, так как эти потоки делают изображения светил в телескопе расплывчатыми и дрожащими. Кроме того, отопление башни могло бы повлечь за собой неодинаковое расширение различных частей оптических приборов, что в свою очередь привело бы к различным дефектам в полученных изображениях. Более того, учитывая значительную тепловую инерцию главного зеркала больших телескопов, подкупольное пространство башни в дневное время даже охлаждают до ожидаемой ночной температуры.

В последние годы возникла еще одна проблема, связанная с температурой телескопа и его приборов. Как известно, фотопластинку постепенно вытеснили электронные приемники света — фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). Все они лучше работают при пониженной температуре, поскольку при этом снижается хаотическое («шумовое») движение электронов. Поэтому в летнее время такие приборы специально охлаждают, а зимой они неплохо работают и без принудительного охлаждения.

4.34. «Секстант»

Дуга секстанта (рис. 4.5) содержит только 60° . Как же с его помощью измеряют высоты светил, большие 60° ? [6, № 157]

Решение: В конструкции секстанта используется два зеркала. Отражение от первого из них (подвижного) удваивает высоту светила, что позволяет измерять углы до 120° .

4.35. Штурманская

«Да и с секстантом дело идет не шибко (ночью на морозе)... мучались и, подсвечивая фонариком, всматривались в шкалу, считая градусы, минуты, секунды». Что здесь вызывает возражение? [6, № 159]

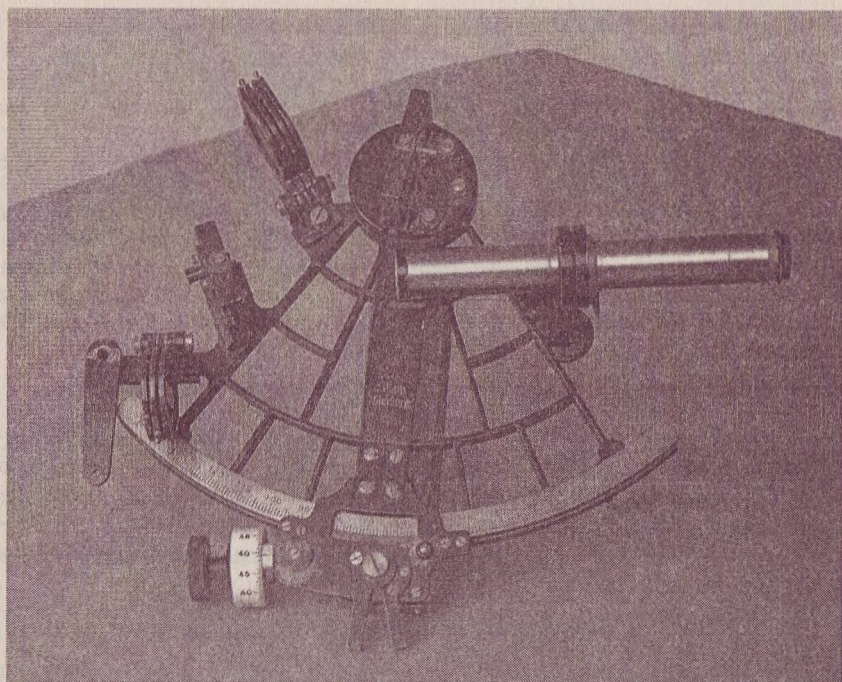


Рис. 4.5

Решение: На шкале секстанта нет секундных делений.

4.36. Полнолуние

Сколько времени можно видеть круглую, неуцербленную Луну? [6, № 186]

Решение: Наблюдая Луну с Земли, мы единовременно окидываем взглядом чуть менее половины ее шара. Простой чертеж показывает, что отличие угла при вершине шарового сектора видимой части Луны от 180° как раз равно видимому размеру Луны ($0,5^\circ$). С другой стороны, Солнце освещает чуть более половины лунного полушария (см. задачу 6.42); это «чуть», как легко догадаться, также составляет $0,5^\circ$ — угловой диаметр Солнца. Следовательно, неуцербленный лунный диск будет виден ровно столько, сколько длится перемещение лунного терминатора на 1° , т. е. $1/360$ от продолжительности синодического месяца: $29,53 \text{ сут}/360 = 2 \text{ часа}$.

4.37. Вращение Солнца

Вокруг своей оси Солнце вращается в том же направлении, что и Земля, — с запада на восток. Каким представляется нам это вращение при наблюдении с Земли? [6, № 250]

Решение: С точки зрения земных наблюдателей (без телескопа) и земных ориентиров поверхность Солнца в результате вращения движется с востока на запад.

4.38. Форма Солнца

Сплюснuto ли Солнце у своих полюсов вследствие вращения вокруг оси подобно земному шару? [6, № 251]

Решение: Оно, конечно, должно быть сплюснuto, но из-за сравнительно медленного вращения эта сплюснутость так мала, что не поддается измерению (см. подробнее в [36]).

4.39. Телескоп с жидким зеркалом

Помешивая ложечкой five-o'clock-tea, Исаак Ньютон заметил, что при вращении поверхность жидкости приобретает форму параболоида. Поскольку в это время великий физик был занят полировкой металлического зеркала для первого в мире телескопарефлектора, он подумал, что этот эффект можно было бы использовать для изготовления больших параболических зеркал, например, остужая жидкую бронзу во вращающейся форме или просто заливая в такую форму ртуть, которая, оставаясь жидкой при комнатной температуре, прекрасно отражает свет.

Первый, кому удалось воплотить эту идею в жизнь, был знаменитый американский оптик Роберт Вуд, который в 1909 г. построил вращающееся жидкое зеркало диаметром 51 см и с его помощью фотографировал звезды. В наши дни эта идея вновь стала популярной: в 1990-е годы, отливая зеркала для четырех телескопов Южной европейской обсерватории, имеющих диаметры по 8,2 м, оптики использовали вращающиеся изложницы, чтобы придать застывающему материалу форму параболоида. В те же годы начались эксперименты по использованию больших ртутных вращающихся зеркал для астрономических наблюдений. К 2001 г. созданы телескопы с такими зеркалами диаметром от 2 до 6 метров. Попробуйте оценить некоторые параметры таких зеркал:

- а) сколько оборотов в минуту должно совершать жидкое зеркало, имеющее фокусное расстояние 20 м?

- б) определите минимальный вес ртутного зеркала, имеющего фокусное расстояние 20 м, если металл залит в круглую вращающуюся кювету с плоским дном диаметром 4 м.

Решение: Пусть форма поверхности зеркала описывается уравнением $y = ax^2$, где y — вертикальная координата вдоль оси вращения зеркала, а x — перпендикулярная ей радиальная координата. Тогда касательная в точке x к вертикальному сечению поверхности зеркала имеет наклон $\operatorname{tg} \alpha = y' = 2ax$. Очевидно, таков же угол α падения на поверхность зеркала луча, приходящего вдоль оптической оси. Следовательно, фокусное расстояние зеркала равно

$$F = y + \frac{x}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \frac{1}{4a}.$$

Теперь вычислим коэффициент a как функцию скорости вращения зеркала. Пусть P — период оборота кюветы. Поскольку поверхность жидкости перпендикулярна равнодействующей всех сил, тангенс касательной к ней равен отношению центростремительного ускорения к ускорению свободного падения (g):

$$\operatorname{tg} \alpha = 2ax = \frac{v^2}{g} = \frac{4\pi^2 x}{gP^2},$$

откуда

$$a = \frac{2\pi^2}{gP^2}.$$

Таким образом, фокусное расстояние зеркала составляет

$$F = \frac{gP^2}{8\pi^2}.$$

Отсюда период вращения кюветы определим как

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{2F}{g}}.$$

Для $F = 20$ м получим $P = 12,7$ с. Следовательно, кювета должна совершать 4,7 оборота в минуту. Теперь определим минимальные объем и массу зеркала радиуса R , имея в виду плотность ртути $\rho = 13,7$ г/см³. Объем фигуры вращения найдем с помощью простого интеграла:

$$V = \int_0^R 2\pi x \cdot ax^2 dx = \frac{\pi^3 R^4}{gP^2}.$$

Отсюда масса ртути

$$M = \rho V = \frac{\pi \rho R^4}{8F}.$$

Для $R = 2$ м и $F = 20$ м получим $M = 4,3$ т. Довольно тяжелое сооружение, да и ртуть в таком количестве стоит недешево. Подумайте, как сделать зеркало легче? Если не найдете ответ сами, то можете посмотреть его на канадском сайте Liquid-Mirror Telescope (<http://www.astro.ubc.ca/LMT/lmt.html>).

4.40. Колодец в Саратове

Некто уверял, что его знакомый в Саратове ($\varphi = 51^\circ 31'$), видел днем звезду Капеллу ($\delta = 46^\circ 00'$) из очень глубокого колодца. Могло ли это быть? [4, № 115]

Решение: Прежде всего, этого не могло быть из геометрических соображений: через зенит в Саратове проходят светила со склонением $\delta = 51^\circ 31'$. К тому же, известно, что звезды из колодцев днем не могут быть видны (см. [1, 8.10], или Квант 1/1994, или Физика в школе 6/1995, или Звездочет 5/1996, или www.astronomy.ru:8101/articles/1996/daystars.htm).

4.41. Полуночное Солнце

Штурман корабля нашел зенитное расстояние центра Солнца в полночь равным 80° . Где и в какое время года мог находиться корабль, и на сколько километров штурман ошибочно определил бы положение корабля по широте, если бы он не учел влияние атмосферной рефракции [4, № 176].

Решение: Корабль находился за северным или за южным (хотя это менее вероятно) полярным кругом летом. Поскольку на зенитном расстоянии 80° при температуре от 0 до -10° С рефракция составляет от $5,5'$ до $5,8'$, то возможная ошибка могла бы достичь 10–11 км.

4.42. Наблюдаем Меркурий!

В какое время года вечерняя видимость Меркурия является наиболее благоприятной? [4, № 388]

Решение: Весной, когда вечером на западе эклиптика образует с горизонтом наибольший угол.

4.43. Астероиды

На фотографии засняты одновременно две малые планеты на расстоянии 3° одна от другой, оставившие на пластинке свои следы

в виде черточек, так как они передвинулись за время экспозиции по отношению к звездам. Указать, какая из этих двух планет, вероятно, находится ближе к Земле и к Солнцу — та, след которой длиннее, или та, след которой короче [4, № 389].

Решение: Та, у которой след длиннее, ближе и к Земле, и к Солнцу.

4.44. Земля с Марса

Для будущих исследователей на Марсе Земля является, подобно Венере, то утренним, то вечерним светилом. Через какие промежутки времени можно видеть Землю с Марса в качестве утренней звезды? Каковы будут ей максимальная элонгация и блеск?

Решение: Это синодический период Марса, равный 780 сут. Среднее угловое расстояние Земли от Солнца в ее максимальной элонгации для наблюдателя на Марсе определим как $\arcsin(r_{\oplus}/r_{\text{М}}) = \arcsin(1,00/1,52) = 41^\circ$. Как видим, условия наблюдения Земли с Марса похожи на условия наблюдения Венеры с Земли. Поэтому оценим блеск Земли по аналогии с Венерой. Земля в $1/0,72 = 1,39$ раза дальше от Солнца, чем Венера; это дает ей проигрыш в освещенности поверхности в $1,39^2 = 1,93$ раза. Альbedo у Земли почти вдвое меньше, чем у Венеры. Учитывая их почти одинаковый размер и чуть больший фазовый угол Земли в период ее максимальной элонгации, можно считать, что Земля посылает в сторону Марса в 4 раза более слабый поток света, чем Венера в сторону Земли.

В наибольшей элонгации Земля располагается на расстоянии $\sqrt{1,52^2 - 1} = 1,14$ а. е. от Марса, тогда как Венера — на расстоянии $\sqrt{1 - 0,72^2} = 0,69$ а. е. от Земли. При одинаковых источниках света это дало бы проигрыш в освещенности поверхности Марса в $(1,14/0,69)^2 = 2,73$ раза. А учитывая, что Земля светит в сторону Марса в 4 раза слабее, чем Венера в сторону Земли, получим, что освещенность от Земли на Марсе в 11 раз слабее, чем на Земле от Венеры. В звездных величинах это $2,6^m$. Поскольку в период наибольшей элонгации (фаза 0,5) блеск Венеры составляет около $-4,5^m$, то с приемлемой точностью можно считать, что блеск Земли для наблюдателя на Марсе составит около -2^m . Учитывая разреженность марсианской атмосферы, можно полагать, что это зрелище не намного уступает видимости Венеры на нашем небе.

4.45. Земля и Луна

Сможет ли наблюдатель на Марсе увидеть Луну и Землю раздельно невооруженным глазом?

Решение: Разделим вопрос на два: 1) будет ли блеск Луны доступен невооруженному глазу? и 2) будет ли угловое расстояние между Землей и Луной достаточным для невооруженного глаза?

1. Блеск Луны оценим, сравнивая ее с Землей. Альbedo у Луны в 3 раза меньше, чем у Земли. К тому же диаметр Луны в 3,67 раза меньше земного. Поток света отраженного от Луны, в $3 \times 3,67^2 \approx 40$ раз меньше, чем от Земли. В звездных величинах это 4^m . Следовательно, блеск Луны (см. предыдущую задачу) составит около 2^m . Для глаза вполне различимо, даже рядом с таким ярким объектом, как Земля (-2^m).

2. Максимальное угловое разделение Земли и Луны для марсиан в период наибольшей элонгации Земли составит

$$\arcsin \left(\frac{384 \text{ тыс. км}}{1,14 \text{ а. е.}} \times 150 \text{ млн км} \right) = 0,13^\circ = 8'.$$

Этот угол легко различим для здорового глаза.

4.46. Заход Солнца

Два наблюдателя в сентябре, находясь на экваторе, следят за заходом Солнца: один из них наблюдает со шлюпки, другой — со стратостата, поднявшегося на высоту 25 км. На сколько позднее зайдет Солнце для пилота стратостата? [4, № 529]

Решение: При отсутствии атмосферной рефракции геометрическое понижение горизонта для пилота стратостата составило бы угол α , найти который можно, например, из уравнения $\cos \alpha = R_{\oplus} / (R_{\oplus} + H)$ или $\sin \alpha \approx \sqrt{2H/R_{\oplus}}$, где R_{\oplus} — радиус Земли, H — высота наблюдателя. Для малых значений α (в радианах) получим $\alpha \approx \sqrt{2H/R_{\oplus}}$, что приводит к простой формуле для понижения горизонта без учета рефракции:

$$\alpha = 61' \sqrt{\frac{H}{1 \text{ км}}}.$$

Учет рефракции дает для наблюдателя на уровне моря дополнительный «подъем» светила относительно горизонта на $35'24''$ [37]. Легко понять, что для наблюдателя за пределом атмосферы это значение удваивается. Именно такой случай наиболее соответствует условию нашей задачи, поскольку выше наблюдателя на стратостате практически нет атмосферы. Значит, полный эффект рефракции для пилота стратостата можно принять равным $71'$. Вместе с простым понижением горизонта для него (для $H = 25$ км имеем $\alpha = 305'$) получим полное «продление» траектории Солнца под горизонт на $376'$. Эту дугу светило проходит за 25 минут. Именно на это время пилот стратостата продлил себе день.

4.47. Кривая Луна

Почему перпендикуляр к линии, соединяющей рожки лунного серпа, как часто кажется, не проходит через Солнце (рис. 4.6)? [4, № 580]

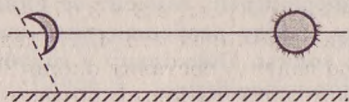


Рис. 4.6

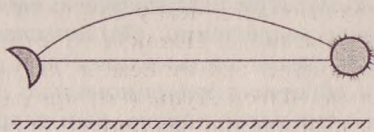


Рис. 4.7

Решение: Потому, что прямая в пространстве линия, соединяющая Луну и Солнце, в проекции на небесную сферу является дугой большого круга. А большинство наблюдателей мысленно проводят эту линию приблизительно на постоянной высоте вдоль горизонта (рис. 4.7).

4.48. Куда бежит тень?

Может ли тень Луны при солнечном затмении где-нибудь и когда-нибудь перемещаться к западу по поверхности Земли? [4, № 644]

Решение: Да, может: выше полярного круга, когда затмение происходит вблизи полуночи в период полярного дня.

4.49. Юпитер

Какое нужно применить увеличение, чтобы при наблюдении Юпитер (видимый диаметр $40''$) был виден такой же величины, как Луна для невооруженного глаза? [4, № 739]

Решение: Около 45 раз.

4.50. Планетарные туманности

Две планетарные туманности имеют одинаковые линейные размеры, строение, вид и истинный суммарный блеск, но одна вдвое дальше другой. Каково отношение их поверхностных яркостей? [4, № 784]

Решение: Единица, так как поверхностная яркость не зависит от расстояния.

4.51. Двойные звезды

Почему некоторые звезды выглядят двойными в голубых лучах, но не разрешаются в красных лучах?

Решение: При наблюдении с небольшим телескопом его предельное угловое разрешение, обусловленное дифракцией, зависит от длины волны света: минимальное расстояние между разрешаемыми звездами обратно пропорционально длине волны. Поскольку у голубых лучей она вдвое короче, то и разрешение вдвое выше.

4.52. Обзор неба

Камера Шмидта диаметром 1,2 метра регистрирует на фотопластинке область неба размером $7^\circ \times 7^\circ$. Сколько экспозиций нужно сделать, чтобы покрыть фотографиями все небо?

Решение: Можно рассуждать так. Угловая длина окружности равна $2\pi R = 360^\circ$. Отсюда выразим R и найдем площадь сферы в угловых единицах $4\pi R^2 = 4\pi(360^\circ/2\pi)^2 = 41,253$ квадратных градуса. Следовательно, потребуется не менее $41,253/(7^2) = 842$ фотопластинок, чтобы покрыть снимками все небо. Это можно сделать примерно за год, если телескоп установлен на экваторе.

4.53. Подмигни звезде

Одинаково ли мигают звезды при их наблюдении одним и двумя глазами? [39, № 87]

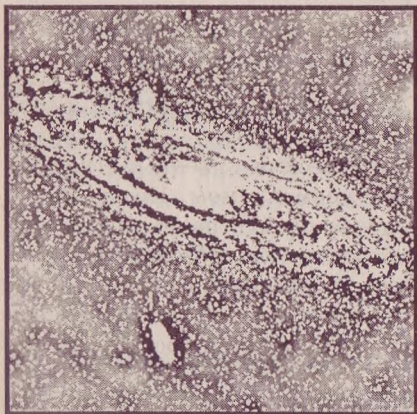
Решение: При наблюдении двумя глазами звезды мигают не так интенсивно. Причина в том, что в каждый глаз лучи приходят по своим траекториям, поэтому независимые мигания усредняются и в заметной степени нейтрализуют друг друга. Чем шире раздвинуты глаза, тем сильнее этот эффект. Если бы наблюдение велось не двумя глазами, а четырьмя или семью (как у паука), то мигания звезд были бы еще слабее. По этой же причине мы видим дрожание и мигание звезд при наблюдении в маленький телескоп, но не видим в большой, в котором изображение звезды постоянно размазано в широкую «кляксу» (это эффект сложения многих независимых флюктуаций).

4.54. Мы с вами встречались?

Каждая глава этой книги начинается стилизованным изображением известного астрономического объекта. Сможете ли вы их узнать?

Решение:

Предисловие	—	Планетарная туманность (NGC 6543)
Глава 1	—	Крабовидная туманность (M 1)
Глава 2	—	Планетарная туманность (Mycn18 = «Песочные часы»)
Глава 3	—	Юпитер
Глава 4	—	Луна
Глава 5	—	Спиральная галактика (M 31 = «Туманность Андромеды»)
Глава 6	—	Сатурн
Глава 7	—	Спиральная галактика (NGC 1232)
Глава 8	—	Солнце (в линии излучения HeII, 304 Å)
Справочные данные	—	Звездное скопление и туманность «Тарантул» (БМО)
Астрономические термины	—	Красное Пятно в атмосфере Юпитера
Литература	—	Космический телескоп им. Хаббла



Глава 5

Космонавтика

5.1. Люди на Луне

Почему во время экспедиций астронавтов по программе «Аполлон» (1969—1972) посадки производились только на видимую сторону Луны?

Решение: Астронавты поддерживали прямую радиосвязь с Землей, а для этого требуется, чтобы Земля была видна с места посадки. В будущем, когда будут созданы научные станции на обратной стороне Луны, для связи с ними станут необходимы спутники-ретрансляторы.

5.2. Ракета +

В чем преимущества многоступенчатой ракеты?

Решение: Основной вес любой ракеты составляет топливо и баки для него. При взлете топливо вырабатывается, и все большая часть веса ракеты приходится на опустевшие баки. По-существу, сброс каждой очередной ступени — это способ освободиться от опустевших топливных баков. Но есть и другие причины, по которым предпочтительна многоступенчатая конструкция ракет. Например, на разных высотах рационально использовать двигатели различного типа: на малой высоте, в плотных слоях атмосферы — «керосиновые», а в безвоздушном пространстве — водородные. Именно многоступенчатая конструкция позволяет комбинировать ракеты разного типа.

5.3. Ракета —

В чем недостатки многоступенчатой ракеты?

Решение: Многоступенчатая ракета используется лишь для одного полета, поэтому космические запуски столь дороги. К тому же, падающие на землю или в океан ступени весьма опасны и требуют больших безлюдных площадей рядом с космодромом. Кроме этого, расстыковка ступеней и включение двигателей в полете не всегда проходит успешно. К тому же, как любое одноразовое изделие, многоступенчатая ракета изготавливается с умеренным запасом надежности и поэтому иногда подводит. Все это заставляет инженеров искать пути создания многоразовых и, возможно, одноступенчатых космических кораблей.

5.4. Из пушки на... Землю

Огромная пушка выстрелила из Англии так, что послала снаряд в Новую Зеландию. Оцените время его полета.

Решение: Легко видеть, что Англия и Н. Зеландия расположены на земном шаре почти диаметрально противоположно. Следовательно, траектория полета снаряда будет весьма близка к половине оборота вокруг Земли искусственного спутника, движущегося по низкой орбите. Как известно, продолжительность такого оборота (гагаринский полет) 1,5 часа, значит снаряд долетит до цели минут за 45.

Для тех, кто знаком с соотношениями эллиптического движения, заметим: легко можно доказать, что самой энергетически выгодной и быстрой траекторией полета снаряда в диаметрально противоположную точку Земли служит именно полукруг — т. е. половина круговой орбиты. Вспомним [10], что линейная скорость в точках эллиптической орбиты с истинной аномалией v равна

$$V = \sqrt{\frac{GM}{a}} \sqrt{\frac{1 + 2e \cos v + e^2}{1 - e^2}},$$

где G — постоянная тяготения, M — масса центрального тела, e — эксцентриситет орбиты, a — большая полуось орбиты. А расстояние спутника от центрального тела (т. е. его радиус-вектор) составляет

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}.$$

В нашем случае, поскольку в апогее орбита лежит выше радиуса Земли ($r > R_{\oplus}$), угол v изменяется от $\pi/2$ до $3\pi/2$. В точках старта

и финиша $\cos v = 0$ и $r = R_{\oplus}$, следовательно

$$V = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}(1+e)^2}{(1-e^2)}} \quad \text{и} \quad R_{\oplus} = a(1-e^2).$$

Отсюда мы находим скорость выстрела в зависимости от эксцентриситета орбиты:

$$V_e = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}(1+e)^2}{R_{\oplus}}} = V_1(1+e),$$

где V_1 — первая космическая скорость на поверхности Земли (7,9 км/с). Как видим, любая орбита, отличная от круговой (точнее, «полукруговой»), требует большей скорости выстрела. К тому же она длиннее, а средняя скорость движения по ней ниже. Значит выстрел «по антиподам» нужно производить так, чтобы снаряд летел как можно ближе к поверхности Земли. Оборот по предельно низкой орбите длится $P_0 = 2\pi\sqrt{R_{\oplus}^3/GM_{\oplus}} = 84,4$ минуты. Значит до антиподов нельзя долететь быстрее, чем за 42 минуты. Но поскольку снаряд все же должен подняться над плотными слоями атмосферы, очевидно его полет будет продолжаться минут 45–50.

Да, чуть не забыли: в снаряде было рождественское поздравление жителям Новой Зеландии и много-много новогодних подарков!

5.5. Глаз или телескоп?

Космонавт высадился на Деймосе. Будет ли он видеть поверхность Марса невооруженным глазом лучше или хуже, чем астрономы с Земли видят в самые лучшие телескопы?

Решение: Расстояние от Деймоса до поверхности Марса 20 000 км. При угловом разрешении глаза в $100''$ и совершенно прозрачной атмосфере Марса космонавт различит объекты размером $100'' \times 20\,000/206\,265 = 10$ км. А с Земли при минимальном расстоянии до Марса в 55 млн км (великое противостояние) и «зоркости» телескопа в $0,5''$ (очень хорошее изображение) астроном увидит объекты размером $0,5 \times 55 \times 10^6/206\,265 = 133$ км. Даже если наблюдение от Земли ведется с помощью Космического телескопа, имеющего угловое разрешение около $0,05''$, размер наименьших деталей на его снимках (13 км) будет уступать возможностям космонавта.

5.6. ИСЗ

Двигаясь невысоко над поверхностью Земли (от 200 до 1 000 км), искусственный спутник испытывает заметное сопротивление

атмосферы. Как при этом изменяется его скорость: увеличивается или уменьшается?

Решение: Казалось бы, под действием сопротивления воздуха скорость аппарата должна уменьшаться, как это происходит, например, с любым автомобилем, который катится по инерции. Но у спутника, в отличие от автомобиля, нет твердой опоры. Теряя энергию за счет сопротивления воздуха, он не может сохранить высоту полета и начинает приближаться к Земле. При этом за счет ее притяжения он разгоняется и увеличивает свою скорость.

В литературе по небесной механике это явление известно как «парадокс спутника». Вот как он сформулирован в книге М. Б. Балка [34]: «Вследствие торможения атмосферой линейная скорость спутника, движущегося по орбите, близкой к круговой, возрастает; ускорение в направлении движения оказывается таким же, каким бы оно было, если бы сила лобового сопротивления изменила свое направление и толкала бы спутник вперед».

До тех пор, пока сопротивление воздуха не очень сильное (на высоте более 130 км), форма орбиты спутника остается почти неизменной, но размер ее уменьшается, а скорость движения спутника по ней увеличивается. Войдя в плотные слои атмосферы, спутник испытывает такое сильное торможение, что сила тяжести уже не может его разгонять, и он теряет скорость (а нередко — просто сгорает от сильного трения о воздух).

5.7. На спутнике Сатурна

Художник нарисовал картину «Высадка космонавтов на спутнике Сатурна», изобразив на фоне звездного неба диск Солнца и планету Сатурн примерно одного размера. Какой из спутников Сатурна имел в виду художник?

Решение: Угловой диаметр солнечного диска, наблюдаемого от Сатурна, составляет $32'/9,54 \text{ а. е.} = 3,4'$. Нужно определить, с какого из спутников Сатурна под таким же углом виден диск планеты. Приняв экваториальный диаметр Сатурна равным 120 тыс. км, найдем, что под углом $3,4'$ он виден с расстояния $R = 120 \text{ тыс. км} \times 3438/3,4 = 120 \text{ млн км}$. Но такого далекого спутника у Сатурна нет: самый далекий среди известных — Феба, отстоит от Сатурна на 13 млн км.

5.8. Высоко сижу, ...

Какую долю земной поверхности может охватить взглядом космонавт с высоты 400 км?

Решение: Пусть точка O — центр Земли, K — космонавт и Γ — горизонт. Обозначим длины отрезков: OG через R_{\oplus} и $K\Gamma$ через D . Тогда длина отрезка KO будет равна $R_{\oplus} + h$, где $h = 400$ км — высота орбиты. Расстояние до горизонта определим из прямоугольного треугольника $ГОК$ по теореме Пифагора: $(R_{\oplus} + h)^2 = D^2 + R_{\oplus}^2$, откуда

$$D^2 = 2R_{\oplus}h + h^2 = 2R_{\oplus}h \left(1 + \frac{h}{2R_{\oplus}} \right).$$

Поскольку $h \ll R_{\oplus}$, второе слагаемое в этой формуле много меньше первого, поэтому им можно пренебречь. В результате получаем формулу для расстояния до горизонта при высоте наблюдателя $h \ll R_{\oplus}$:

$$D \approx \sqrt{2R_{\oplus}h} = 113 \text{ км} \sqrt{\frac{h}{1 \text{ км}}}.$$

Для $h = 400$ км получим $D = 226$ км. Поскольку $D \ll R_{\oplus}$, площадь поверхности Земли, доступную взгляду космонавта можно вычислить как площадь круга: $s = \pi D^2$. А полная площадь поверхности Земли вычисляется как площадь шара: $S = 4\pi R_{\oplus}^2$. Отношение этих площадей составляет

$$\frac{s}{S} \approx \frac{h}{2R_{\oplus}} = 3\%.$$

5.9. Морской узел

С какой скоростью, выраженной в узлах, движется спутник на низкой околоземной орбите?

Решение: Узел — это одна морская миля в час; а сама морская миля равна длине дуги земного экватора, стягивающей угол в $1'$. Спутник на низкой орбите делает один оборот ($360^\circ = 21\,600'$) за 1,5 часа. Следовательно, его скорость $21\,600/1,5 = 14\,400$ узлов.

5.10. Артиллерийская задача

Будут ли одинаковы скорость вылета и дальность полета снаряда при выстреле из одной и той же пушки на Земле и на Луне (сопротивлением земной атмосферы пренебречь)? [5, № 147]

Решение: Кинетическая энергия снаряда зависит только от энергии заряда и соотношения масс пушки (M) и снаряда (m). Если масса пушки велика, то снаряд уносит с собой всю энергию выстрела (E):

$$\begin{cases} MV + mv = 0 & \text{Закон сохранения импульса,} \\ \frac{MV^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = E & \text{Закон сохранения энергии,} \end{cases}$$

откуда

$$v^2 = \frac{2E}{(1 + m/M)}.$$

Поэтому скорость вылета снаряда не зависит от того, на каком небесном теле произведен выстрел. А вот дальность его полета — зависит. Пусть α — угол наклона ствола пушки к горизонту. Тогда время полета составит $t = 2v \sin \alpha / g$ (где g — ускорение силы тяжести), а дальность полета

$$S = tv \cos \alpha = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha.$$

Как видим, при одинаковых α и v дальность полета обратно пропорциональна значению g . Например, на Луне та же пушка выстрелит в 6 раз дальше, чем на Земле (а с учетом сопротивления воздуха — еще дальше!) Космическим инженерам стоит задуматься об этом.

5.11. Спутник в периоде

Искусственный спутник Земли движется со скоростью 6,9 км/с по круговой орбите в плоскости экватора в направлении вращения планеты. С каким периодом времени он будет проходить через зенит пункта, лежащего на экваторе? [5, № 158]

Решение: Поскольку роль центростремительной силы (mV^2/R) играет сила гравитационного притяжения Земли (GmM_{\oplus}/R^2), мы приравняем их друг другу и найдем скорость движения спутника по круговой орбите:

$$V = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R}}.$$

Отсюда легко найти орбитальный период:

$$P_{\text{orb}} = \frac{2\pi R}{V} = 2\pi \frac{GM_{\oplus}}{V^3}.$$

Теперь используем уравнение синодического движения, учитывая, что спутник обращается в направлении движения Земли, имеющей период $P_{\oplus} = 24^{\text{h}}$:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{P_{\text{orb}}} - \frac{1}{P_{\oplus}},$$

откуда

$$T = \frac{P_{\text{orb}} P_{\oplus}}{P_{\oplus} - P_{\text{orb}}} = 140 \text{ минут.}$$

5.12. Прогулки по Луне

Может ли космонавт, пролетая на высоте 100 км над Морем Холода (Луна), различить с помощью 20-кратного бинокля гуляющего там астронавта?

Решение: Приняв размер астронавта равным 2 м, определим угол, под которым он виден с расстояния в 100 км:

$$\alpha = 206\,265'' \frac{2 \text{ м}}{100 \text{ км}} = 4''.$$

Даже при 20-кратном увеличении этот угол ($80''$) практически неразличим для глаза, имеющего предел около $100''$. Однако, вспомним, что Море Холода находится в районе северного полюса Луны, где лучи Солнца падают под малым углом к горизонту и отбрасывают длинные тени. Если тень астронавта достигает, скажем, 10 м в длину и при этом перемещается, то он без труда может быть замечен.

5.13. Космодром на экваторе

В романе Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.) герои собираются тайно построить космодром для запуска ракеты на Венеру. В главе III «О пользе экватора» они обсуждают выбранное для строительства космодрома место в северной части южноамериканских Анд:

«— А почему, собственно, для старта выбрано это дикое, пустынное место?

— Именно потому, что оно дикое, пустынное, нелюдимое... Конспирация.

— Но ведь пустынных мест немало на земном шаре, взять хотя бы Южный полюс. Там нам никто не помешал бы, даже вездесущие репортеры. Почему именно здесь? Я хотел бы знать, чем определялся выбор.

— На это были свои, и немаловажные, основания. Именно здесь существуют наиболее благоприятные условия для взлета...»

Вопрос: какие именно условия, облегчающие взлет ракеты, хотели использовать герои этого романа, затеяв строительство космодрома в горах, расположенных близ экватора?

Решение: При выборе места для строительства космодрома горы на экваторе привлекательны по четырем обстоятельствам:

1. Вращение Земли наиболее сильно проявляется на экваторе. При разгоне ракеты на восток к ее скорости добавляется скорость вращения земной поверхности, которая на экваторе составляет почти 0,5 км/с.

2. Наша планета в результате вращения немного сжата у полюсов: точки экватора (на уровне моря) на 21,4 км дальше от центра Земли, чем точки полюсов. Это немного ослабляет гравитацию Земли на экваторе.
3. На вершине горы, более удаленной от центра Земли, чем ее подножие, гравитация также немного ослаблена.
4. Слой атмосферы, который предстоит преодолеть ракете при взлете, тем тоньше, чем выше место запуска. Поэтому горные космодромы, в принципе, предпочтительнее равнинных. Правда, их строительство и обслуживание обходится значительно дороже.

Если ограничиться строительством космодрома на равнине вблизи экватора, то одно это даст выигрыш в полезной массе запускаемого ракетой груза почти вдвое по сравнению с космодромом, расположенным в высоких широтах.

5.14. Комов на Леониде

В повести братьев Стругацких «Полдень, XXII век» герой попадает на планету Леонида, очень похожую на Землю:

«Среди мигающих звезд неторопливо прошло через зенит яркое белое пятнышко. Комов приподнялся на локтях, следя глазами за ним. Это был «Подсолнечник» — полуторакилометровый десантный звездолет сверхдальнего действия. Сейчас он обращался вокруг Леониды на расстоянии двух мегаметров от поверхности. Стоит подать сигнал бедствия, и оттуда придут на помощь».

В этот раз Комов не подал сигнал. Когда ему представится такая возможность в следующий раз? И еще: хорошим ли зрением обладал Комов?

Решение: По поводу зрения заметим, что звездолет показался Комову «пятнышком», а не «звездочкой», т. е. имел различимый угловой размер. Поскольку он проходил через зенит, расстояние до него было 2 млн метров, или 2 000 км. Объект размером в 1,5 км виден с такого расстояния под углом $3\,438' \times 1,5 / 2\,000 = 2,6'$. Такой угловой размер имеет копейка с расстояния в 20 м. Так что зрение у Комова было хорошее.

Пусть у планеты Леонида будут такие же размер и масса, как у Земли. Тогда радиус орбиты звездолета составлял $2\,000 + 6\,400 = 8\,400$ км. Из третьего закона Кеплера следует, что период спутника зависит от радиуса орбиты как $R^{3/2}$. На низкой околоземной орбите период спутника равен 1,5 часа, значит на орбите звездолета он составит $1,5 \times (8\,400 / 6\,400)^{3/2} = 2,3$ часа. Через это время звездолет вновь пройдет через зенит того места, где был Комов, но его там уже не будет: вращение планеты переместит его к востоку. Насколько далеко?

Это зависит от широты места, которую мы не знаем. Но не дальше, чем на 40 тыс. км $\times (2,3ч/24ч) = 4$ тыс. км, если Комов находится на экваторе. Расстояние, на котором Комов окажется от плоскости орбиты звездолета, зависит также от наклона его орбиты к экватору, и может составить от 0 до 4 тыс. км. Значит звездолет пройдет от Комова не далее, чем в $\sqrt{2^2 + 4^2} = 4,5$ тыс. км. Окажется ли он при этом за горизонтом? Из теоремы Пифагора легко найти расстояние до горизонта при небольшой высоте наблюдателя (h) над планетой радиуса (R):

$$L = \sqrt{2Rh} = \sqrt{2 \times 6\,400 \times 2\,000} = 5\,060 \text{ км.}$$

Поэтому звездолет в любом случае окажется в пределах видимости Комова и с ним можно будет связаться.

5.15. Пропал спутник

Дело было летом. В ясную июльскую полночь мы наблюдали в телескоп Крымской обсерватории геостационарный спутник, висящий над точкой экватора с долготой 20° к востоку от Гринвича. Внезапно спутник стал меркнуть и вскоре совсем погас. «Спутник исчез!» — закричали студенты. «Да нет, просто зашел в земную тень» — улыбнулся опытный астроном-наблюдатель. Кто из них прав?

Решение: Геостационарная орбита лежит в плоскости земного экватора на расстоянии около $R_{gs} = 40$ тыс. км от ее центра. На этом расстоянии земную тень еще можно считать цилиндром. Чтобы тень пересекала орбиту спутника, нужно, чтобы Солнце было удалено от небесного экватора на угол не более

$$\arctg \frac{R_{\oplus}}{R_{gs}} = \arctg \frac{6\,370}{40\,000} = 9^\circ.$$

Очевидно, что в июле оно значительно выше, поэтому затмения геостационарных спутников в это время не происходят, и опытный наблюдатель в данном случае оказался не прав.

5.16. Небо Марса

Пилотируемая экспедиция «Марс-2010» прибыла в район марсианского экватора в местную полночь. Космонавты вышли из спускаемого аппарата и залюбовались звездно-бархатным марсианским небом, рассматривая очертания знакомых созвездий. «А вон та яркую звезду я не узнаю», — сказал один. «Да ведь это наша

Земля!», — воскликнул другой. «Боже, как она хороша! Никогда бы не подумал, что она может блеснуть ярче гиганта-Юпитера».

Оцените это описание с астрономической точки зрения.

Решение: Земля видна с Марса так же, как Венера с Земли — по утрам и вечерам. Наибольшая элонгация Земли при наблюдении с Марса 42° . Поэтому в полночь Земля на небе Марса не видна. Возможно, космонавты увидели Юпитер, который там в 1.3 раза ярче, чем на Земле.

5.17. Куда же делся спутник?

Для тех, кто легко справился с задачей 5.15, есть вопрос посложнее (ведь надо же выяснить, что случилось с геостационарным спутником, который неожиданно пропал из виду): быть может он был накрыт лунной тенью? Определите, возможно ли это.

Решение: Нет, это невозможно, даже если Луна в этот момент находится в перигее орбиты, на расстоянии 356 400 км от центра Земли. Поскольку длина лунной тени 385 000 км, она не дотянется до спутника примерно на 10 000 км. Правда, полутень Луны будет довольно плотная. Если спутник имел блеск вблизи предела телескопа, то попав в полутень, он может стать невидимым.

5.18. Теплые носки для космонавтов

Почему космонавты, работая на орбитальной станции, часто жалуются, что у них мерзнут ноги?

Решение: Обычно на этот вопрос отвечают так: «На Земле притяжение действует вниз и помогает сердцу перекачивать кровь к ногам. А в невесомости этой помощи нет, и сердце не справляется.» Этот ответ не полный и, с точки зрения простой физики, даже неверный. Поскольку система кровообращения замкнутая, кровь по сосудам спускается к ногам и вновь поднимается к сердцу. Поэтому статическое давление на входе в сосуды ног не зависит от того, есть сила тяжести (т. е. опущены ноги вниз на Земле) или ее нет (как на орбите, или когда ноги вытянуты горизонтально на Земле).

Правильное решение такое. Перекачивая кровь, сердце преодолевает так называемое «сосудистое сопротивление», т. е. трение крови о стенки сосудов, которое, как это известно из гидродинамики, очень сильно возрастает с уменьшением диаметра сосудов: поток жидкости через трубу диаметра D при фиксированном перепаде давления на ее концах $\propto D^4$. В свою очередь, диаметр сосудов зависит

от давления крови. На Земле кровь в нижней части ног имеет большее давление, чем на орбите (примерно на 0,1 бар при длине ног в 1 м). Поэтому на Земле сосуды ступней расширены сильнее, что облегчает кровоток и улучшает теплообмен.

Есть и сопутствующие факторы. В первые дни полета космонавты ощущают сильный прилив крови к голове (именно в этом случае на Земле сердце создает избыток давления, чтобы поднять кровь в голову!). Затем происходит адаптация: снижается активность сердца, сужаются сосуды. Это выравнивает поток крови через голову, но снижает его через ноги. Второй фактор — меньшая активность ног в невесомости, которая также ведет к сужению сосудов.

5.19. Парадокс небесной механики

В Энциклопедии Коллиера автор статьи о межпланетных зондах написал следующее:

«Удивительно и на первый взгляд невероятно, что для запуска аппарата на бесконечное расстояние от Земли (т. е. для разгона до второй космической скорости) требуется лишь на 41 % больше энергии, чем для его запуска на низкую околоземную орбиту».

Оцените справедливость этого утверждения с точки зрения небесной механики и ракетной техники: так ли уж мала разница в затратах ракетного топлива, необходимого для запуска одинаковых аппаратов на эти орбиты. Попробуйте также определить различие в массах космических аппаратов, которые можно вывести на эти разные орбиты при помощи одинаковых ракет-носителей.

Решение: Автор статьи перепутал скорость и кинетическую энергию: он указал относительную разницу 1-й и 2-й космических скоростей ($\sqrt{2} - 1 \approx 0,42$). В действительности аппарату нужно сообщить энергию не на 41 % больше, а вдвое больше ($E_{\text{kin}} \propto v^2$). Поэтому с точки зрения небесной механики утверждение автора неверно.

Теперь обратимся к ракетной технике. Пусть запуск полезного груза (т. е. космического аппарата) производится с помощью простейшей одноступенчатой ракеты, имеющей невесомую конструкцию, топливо массой $M_{\text{т}}$ и полезный груз массой $M_{\text{пг}}$. Тогда, в соответствии с формулой Циолковского, скорость груза после окончания работы двигателей составит

$$V = u \ln \left(1 + \frac{M_{\text{т}}}{M_{\text{пг}}} \right),$$

где u — скорость истечения сгоревшего топлива из двигателей ракеты, которая обычно составляет около 2,4 км/с. Отсюда найдем, во сколько раз (N) больше топлива понадобится для запуска одного

и того же груза на межпланетную орбиту ($V_1 = 11,2$ км/с) по сравнению с околоземной ($V_2 = 7,9$ км/с):

$$N = \frac{e^{V_1/u} - 1}{e^{V_2/u} - 1} \approx \exp \left\{ \frac{V_1 - V_2}{u} \right\} \approx 4.$$

Как видим, разница не так уж мала. Для ракеты-носителя определенного типа это означает, что на низкую орбиту она может вывести вчетверо больший груз, чем на траекторию межпланетного полета. Разумеется, наш расчет очень упрощен, однако его результаты не далеки от истины. Например, ракета «Протон» выводит на низкую орбиту около 20 т, а на траекторию полета к Марсу — около 4,7 т.

5.20. Черную дыру — в лабораторию!

В глубинах Вселенной обнаружена небольшая черная дыра. Для детального изучения ее решено транспортировать поближе к Земле. Как это сделать? [14, с. 122]

Решение: У черной дыры нет материальной поверхности; ее нельзя зацепить канатом и отбуксировать в нужное место. По той же причине к черной дыре не приделаешь реактивный двигатель. Но можно в качестве «каната» использовать силу гравитации: подвести к черной дыре массивное тело, например, астероид, снабженный реактивными двигателями. Черная дыра начнет падать на астероид, а мы, включив двигатели, будем его уводить в нужном направлении от черной дыры со скоростью, равной скорости ее падения. Этим мы обеспечим равноускоренное движение черной дыры в нужном направлении. Торможение осуществляется аналогично.

Есть и другие способы. Например, можно подвести астероид к черной дыре так, чтобы она вышла на орбиту вокруг астероида; после этого черная дыра будет следовать за всеми маневрами астероида, если они осуществляются без слишком больших ускорений. Можно направить на черную дыру струю вещества или луч света — поглощая их, черная дыра приобретет импульс в направлении потока частиц или квантов и придет в движение. Однако наша установка при этом получит импульс в противоположном направлении и скоро удалится от черной дыры, если не предпринять специальных мер. Поэтому способ «гравитационного каната» является оптимальным.

5.21. Какая встреча!

С какой максимальной и минимальной скоростью может столкнуться метеорное тело с искусственным спутником Земли, находящимся на низкой круговой орбите?

Решение: Скорость ИСЗ на этой орбите 7,9 км/с. А скорость подлетающего к Земле метеорита не может быть меньше второй космической (11,2 км/с). Значит минимальная скорость столкновения $V_{\min} = 11,2 - 7,9 = 3,3$ км/с. В принципе, возможна встреча с метеоритом, обращающимся по околоземной орбите, хотя на низких орбитах таких естественных метеоритов практически нет. В этом случае $V_{\min} = 0$.

Максимальной скорость метеорита будет в том случае, если он приближается к орбите Земли по параболической траектории. Тогда его скорость вблизи земной орбиты будет третьей космической $= \sqrt{2}V_{\text{orb}} = \sqrt{2}30$ км/с = 42 км/с. При удачной ориентации она может сложиться с орбитальной скоростью Земли: $42 + 30 = 72$ км/с. А вблизи Земли за счет ее притяжения она возрастет еще (складываются энергии, т. е. квадраты скоростей): $(72^2 + 11,2^2)^{1/2} = 73$ км/с. Такова максимальная скорость метеорита вблизи Земли. И еще к ней может добавиться скорость спутника. В результате получим максимальную скорость столкновения: $V_{\max} = 73 + 7,9 = 81$ км/с.

5.22. Трудная задача

В романе Айзека Азимова «Немезида» космическая станция движется по круговой околоземной орбите так, что, «если смотреть со станции, то Земля и ее естественный спутник никогда не разделялись более чем на 15 градусов». При этом «в небе станции Земля и Луна постоянно изменяли положение и фазы». Может ли это быть?

Решение: По теореме об углах треугольника, вписанного в окружность, мы определим, что точки, из которых радиус лунной орбиты R_M виден под углом менее 15° , находятся за пределом фигуры вращения, образованной окружностью радиуса $R = R_M / (2 \sin 15^\circ) = 743$ тыс. км, проходящей через центры Земли и Луны и вращающейся вокруг прямой, их соединяющей. В проекции на плоскость лунной орбиты (которую будем считать совпадающей с плоскостью эклиптики) это две окружности, пересекающиеся в точках Земли и Луны. К тому же эта фигура с периодом в 1 месяц вращается вокруг оси, перпендикулярной эклиптике и проходящей через центр масс системы Земля—Луна (для простоты будем считать его совпадающим с центром Земли).

Итак, требованию задачи безусловно удовлетворяют все точки за пределом поверхности этой второй фигуры вращения, которая практически представляется шаром радиуса около $R_{\min} = 1,5 \cdot 10^6$ км. Может ли быть у ИСЗ орбита такого радиуса? Сравним ускорение

к Земле (a_E) и приливное ускорение к Солнцу (a_\odot):

$$a_E = \frac{GM_E}{R^2},$$

где M_E — масса Земли;

$$a_\odot = \frac{2GM_\odot}{R_E^3}R,$$

где $R_E = 1$ а. е. — радиус земной орбиты. Очевидно, при $a_E \leq a_\odot$ спутник не может двигаться по околоземной орбите. Отсюда найдем максимальное расстояние спутника:

$$R_{\max} = R_E \left(\frac{M_E}{2M_\odot} \right)^{1/3}$$

Получаем $R_{\max} = 1,7 \cdot 10^6$ км, что очень близко к R . Это указывает на крайнюю неустойчивость орбиты спутника. Существует лишь одна возможность стабильно двигаться на таком расстоянии от Земли — это зависнуть в одной из двух прямолинейных точек Лагранжа системы Земля—Солнце. Найти ее расстояние от Земли (R_L) можно, приравняв разность ускорений ($a_E(R_L) - a_\odot(R_L)$), действующих на спутник, центростремительному ускорению, необходимому для обращения вокруг Земли с периодом $P = 1$ год:

$$a_E(R_L) - a_\odot(R_L) = \frac{v^2}{R_L} = \frac{(2\pi R_L)^2}{P^2 R_L} = \frac{(2\pi R_L)^2 GM_\odot}{(2\pi)^2 R_L R_E^3} = \frac{GM_\odot}{R_E^3} R_L,$$

$$R_L = R_E \left(\frac{M_E}{3M_\odot} \right)^{1/3} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ км.}$$

Как видим, полученное значение R_L как раз совпадает с R_{\min} . Значит, находясь в точек Лагранжа системы Земля—Солнце, спутник будет видеть Луну на расстоянии не более 15° от Земли. Однако у Земли при этом не будет наблюдаться смены фаз (ведь спутник постоянно находится на прямой Земля—Солнце), а у Луны разность фаз составит $\pm 15^\circ$ от полной, что практически незаметно. Значит найденное решение не отвечает условию задачи.

Вспомним, однако, что существует и вторая возможность решения: если спутник обращается вокруг Земли синхронно с Луной, то ему достаточно быть вне первой фигуры вращения, т. е., если ограничиться плоскостью эклиптики, то — вне двух пересекающихся окружностей, проходящих через Землю и Луну. Синхронное с Луной обращение обеспечивается равенством радиуса орбиты спутника большей полуоси орбиты Луны. Нарисовав окружность такого радиуса с центром в точке Земли, мы видим, что ее небольшая дуга попадает в нужную область. Практически это означает, что спутник должен двигаться по круговой орбите близкой к лунной, находясь

на расстоянии менее 15° от антиподной точки Луны. Тот факт, что сама Луна движется по эллиптической орбите, будет вызывать ее периодическое смещение относительно Земли. При этом смена фаз Луны и Земли будет происходить в полной мере.

5.23. Марсианские полярники

Пилотируемая экспедиция «Марс-полар-2020» прибыла на южный полюс планеты в середине полярной ночи, поскольку главной целью экспедиции был поиск марсианских светлячков. Космонавты вышли из спускаемого аппарата и залюбовались черным марсианским небом. «А что это медленно движется среди звезд?» — удивился один из космонавтов, геолог. «Так это же Фобос!» — воскликнул его напарник, специалист по марсианским светлячкам.

Оцените эту догадку с астрономической точки зрения.

Решение: Простой расчет показывает, что спутники Марса с полюсов не видны — они там всегда под горизонтом.

5.24. Даешь Венеру!

В романе Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.) дано детальное описание того, как ракета инженера Цандера достигла Венеры:

«Приближался самый ответственный и рискованный момент межпланетных путешествий — посадка. Цандер все больше задерживал полет ракеты, перейдя к скоростям порядка одиннадцати-двенадцати километров в секунду. Венера блистала на небе огромным шаром. “Ковчег” приближался к планете по параболе. Еще несколько часов полета, и ракета начала описывать вокруг Венеры эллипс, то приближаясь, то удаляясь от нее. По расчетам Цандера, весь спуск должен был продолжаться около земных суток. При обходе Венеры по эллипсу в первый раз ракета приблизилась к планете настолько, что вошла в ее стратосферу, а затем начала удаляться. Когда ракета оказалась на противоположном конце большой полуоси эллипса, расстояние от ближайшей точки до этого конца полуоси равнялось почти двадцати пяти тысячам километров. Этот первый облет по эллипсу продолжался почти десять земных часов, и путешественники... могли наблюдать интересное зрелище, как Венера то увеличивалась в размерах, закрывая почти все видимое из окна пространство, то уменьшалась, то снова увеличивалась, когда ракета пошла к дальней точке эллипса во второй раз. Снова она задела стратосферу планеты и затем ушла на двенадцать тысяч километров. Этот второй облет занял около пяти

часов. При каждом новом облете большая полуось эллипса укорачивалась, и эллипс начинал приближаться к кругу. Продолжительность полета по пятому эллипсу заняла всего один час десять минут. Оставался последний облет планеты — по кругу, на расстоянии всего семидесяти пяти километров над поверхностью, и спуск по косой линии через атмосферу — около трех с половиной тысяч километров, на что требовалось немногим более получаса».

В этом отрывке много замечательных деталей, указывающих на глубокое знание писателем основ космонавтики — чисто теоретической дисциплины в те годы, когда только начинались первые опыты с крохотными моделями ракет. Это описание посадки на Венеру дает немалый материал для размышлений и расчетов. Начните свой анализ с простейшего вопроса: прав ли был Александр Беляев, указав, что продолжительность полета по пятому эллипсу составила один час десять минут. Используйте современные данные о Венере.

Решение: Третий закон Кеплера указывает, что продолжительность полета по любому эллипсу больше, чем по круговой орбите радиусом, равным расстоянию в перигентре этого эллипса (проверьте это утверждение сами). Следовательно, по утверждению Беляева, период облета Венеры по низкой круговой орбите должен быть короче чем 1 час 10 минут.

Но тот же третий закон Кеплера говорит нам, что у разных планет этот период обратно пропорционален средней плотности планеты ($T = 2\pi\sqrt{R^3/GM}$). Кратчайший орбитальный период вокруг Земли длится около 90 минут, а плотность Венеры чуть меньше, чем у Земли, следовательно Венеру невозможно облететь за время, короче 1 часа 30 минут. Эту ошибку писателя трудно объяснить, поскольку в те годы уже было точно известно, что плотность Венеры составляет примерно 90 % плотности Земли.

5.25. Купание при Луне

В недалеком будущем космонавт прибыл на лунную базу. Узнав, что на базе есть бассейн, он решил искупаться. Товарищ предостерег: «Глубина здесь более 3 метров. Надеюсь, ты умеешь плавать?» «Представь себе, нет, — улыбнулся космонавт. — На Земле я не утонул бы только в Мертвом море! Но ведь мы на Луне: мою 1/6 веса даже здешняя пресная вода уж как-нибудь вытолкнет к поверхности». Какой совет вы дадите космонавту? [18, с. 6]

Решение: Вес воды, а значит и ее выталкивающая сила на Луне также уменьшается в 6 раз. Поэтому напрасно космонавт надеется без усилий удержаться на поверхности. Плавать человек в лунном

водоеме будет такая же, как в земном. Если не прикладывать усилий, то утонуть и здесь и там одинаково легко. Но, поскольку отрицательная плавучесть космонавта по сравнению с земной уменьшится в 6 раз, ему будет легче противостоять погружению. Не исключено, что именно на Луне он наконец научится плавать.

5.26. Вокруг Земли за полчаса

Артур Кларк в книге «Черты будущего» [17] утверждает, что человек ни при каких условиях не способен совершить кругосветное путешествие быстрее чем за 0,5 часа. Прав ли он?

Решение: Пусть транспортное средство, например, ракета обладает неограниченными возможностями — запас топлива, мощность двигателей, и т. п. Если оно совершает облет Земли по орбите радиуса R за время T с постоянной скоростью V , то пассажир испытывает центробежное ускорение $a = V^2/R = 4\pi^2 R/T^2$. При фиксированном T оно минимально, когда радиус орбиты равен радиусу Земли ($R = R_\oplus$). При свободном полете ИСЗ по низкой орбите облет Земли продолжается 90 минут и центробежное ускорение в точности уравнивает притяжение Земли ($a = g$); отсюда — состояние невесомости. В принципе, можно совершить облет и за более короткое время, но для этого необходимо двигателями ракеты создавать ускорение к центру Земли. При этом перегрузка, которую испытает пассажир, составит $[(90^m/T)^2 - 1]$ единиц g . При $T = 30$ минут перегрузка составит $8g$. Такую нагрузку человек может выдержать лишь непродолжительное время, порядка минуты.

5.27. Лунная база НЛО

На Луне в кратере Тихо обосновались пришельцы. Они готовят первую экспедицию летающей тарелки на Землю. Начальник базы напутствует командира тарелки:

— Пока у нас нет спутников связи, поэтому мы сможем поддерживать с вами лишь прямой контакт по лучу лазера или по радио, в УКВ-диапазоне. Значит, перерывы между возможными сеансами связи будут составлять от ... до ..., в зависимости от того, где вы приземлитесь. В периоды отсутствия связи вы сможете рассчитывать только на свои силы. Будьте внимательны: судя по перехваченным телесигналам, от землян можно всего ожидать!

Приготовления закончены; тарелка взлетела и устремилась к Земле. Скоро посадка. Командир НЛО решил выбрать такое место, где можно спокойно заняться научными исследованиями, и где бы лунные коллеги подольше не доставали его своими советами. Однако ученый муж забыл наставления начальника

базы. Он никак не может вспомнить продолжительность потери связи с Луной. Нужно ему помочь!

Решение: Итак, связь с Луной возможна лишь при ее видимости на земном небе. В экваториальных областях Земли Луна половину времени проводит над горизонтом, половину — под ним. Поскольку восходы Луны происходят там приблизительно через каждые 25 часов, период невидимости Луны длится около 12,5 часов.

С приближением к полярным областям Земли все сильнее начинает сказываться наклон лунной орбиты к экватору. Для простоты будем считать, что Луна движется по эклиптике, как Солнце, но завершает свой оборот по ней не за год, а за 27,3 сут. Тогда на полярных кругах — Северном и Южном — период невидимости Луны может достигать суток, а на самих полюсах — двух недель (полная аналогия с полярной ночью в режиме «месяц за год»).

Таким образом, чтобы подольше избегать радиоконтакта с Луной, пилоту НЛО следовало бы приземлиться на Северном или Южном полюсе, а именно, на том, который в данный момент скрыт от Луны. Впрочем, на Южном полюсе лучше не садиться: там постоянно работают десятки полярников, которые сами тотчас начнут исследовать НЛО. Не намного легче и у Северного полюса: теперь там часто появляются туристы и экскурсанты, которые непременно захотят сфотографироваться рядом с НЛО и выпить с его пилотами шампанского.

Поэтому на вашем месте я бы посоветовал командиру НЛО приземлиться... в небольшом русском городе, скажем, в Великом Гусляре, где никто не обратит на него внимание, и спокойно, не отвечая на запросы лунной базы, заниматься исследованием нашей замечательной планеты.

5.28. Момент пуска

В какое время суток и в каком направлении выгоднее всего запускать искусственные спутники Земли и межпланетные аппараты?

Решение: ИСЗ выгоднее запускать в направлении вращения Земли, т. е. на восток, чтобы использовать скорость вращения планеты (около 0,5 км/с на экваторе). Межпланетные аппараты обычно запускают с промежуточной околоземной орбиты; если на нее аппарат был выведен в восточном направлении, то к внешним планетам его выгоднее запускать на полуночной стороне орбиты, а к внутренним — на полуденной, чтобы использовать скорость орбитального движения ракеты.

5.29. Кратчайшая кривая

Почему космические корабли не могут передвигаться внутри Солнечной системы по кратчайшим путям, т. е. прямолинейно? [6, № 240]

Решение: Обычно на этот вопрос отвечают так: потому что их пути искривляются под действием притяжения Солнца и планет. Однако более глубокий анализ движения тел в гравитационном поле приводит к новой и весьма красивой формулировке ответа: свободно движущееся в гравитационном поле тело перемещается по кратчайшему пути в 4-мерном пространстве-времени, которое к физическом 3-мерном пространстве выглядит искривленной линией. Такой ответ дает Общая теория относительности, т. е. теория гравитации Эйнштейна. В рамках этой теории присутствие массивных тел — Солнца, планет — изменяет геометрические свойства пространства-времени. Некоторую аналогию этому можно увидеть в движении тел по искривленной 2-мерной поверхности, например, по поверхности Земли: если на плоскости кратчайшие пути между точками — прямые, то на поверхности шара — дуги больших кругов. Можно сказать, что свободные тела движутся по кратчайшим линиям, но геометрия пространства диктует форму этих линий.

5.30. Искусственный спутник Москвы

«Устраивать такие (космические) городки будут на разных высотах, но расстояние в 35 900 км, возможно, покажется особенно подходящим. Почему 35 900? Потому что на этом удалении все сооружение оборачивается вокруг Земли в точности за одни сутки. Преимущество явное — станция будет видна постоянно в одном месте небосвода! В Москве, например, ее можно укрепить в точке неба, где стоит Солнце в полдень в середине сентября».

Как доказать, что именно на расстоянии около 36 тыс. км от поверхности Земли искусственный спутник будет совершать один оборот в сутки? И в какие именно сутки? Как точнее указать местоположение станции на московском небе? И будет ли это положение в точности соответствовать описанному? [6, № 238]

Решение: Речь идет, разумеется, о геостационарном спутнике, движущемся по круговой экваториальной орбите с запада на восток синхронно с вращением Земли. Третий закон Кеплера позволяет вычислить период орбитального движения (P) в зависимости от массы

центрального тела (M) и радиуса орбиты спутника (R):

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н м}^2 \text{ кг}^{-2}$ — постоянная тяготения. Масса Земли $M_{\oplus} = 5,978 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, а период ее вращения $P = 23$ часа 56 минут 4 секунды (а почему не 24 часа?). Таким образом, радиус геостационарной орбиты получается у нас $R = [(P/2\pi)^2 GM]^{1/3} = 42\,090 \text{ км}$. Если вспомнить, что Земля не идеальный шар, и решать задачу более точно, с учетом сплюснутости Земли, то получим $R = 42\,165 \text{ км}$. Такой спутник постоянно висит над точкой земного экватора на высоте 35 787 км или, если орбита наклонена к экватору, совершает колебания в окрестности этой точки на высоте около 35 800 км (подробнее см. в книге В. И. Левантовского [35]). В процитированном в условии задачи отрывке автор допустил маленькую неточность относительно высоты орбиты.

Теперь выясним, как будет виден такой спутник из Москвы. Очевидно, автор хотел сказать, что экваториальный геостационарный спутник можно будет «укрепить» на меридиане Москвы. Однако при этом он не будет виден там, где полуденное Солнце пересекает небесный экватор. Причина — суточный параллакс, особенно заметный для столь близкого объекта. Его величину (в радианах) определим как отношение удаленности Москвы от плоскости экватора ($R_{\oplus} \times \cos 56^\circ$) к расстоянию до спутника (около 40 тыс. км); в градусной мере получим этот угол равным около 5° . Следовательно, максимальная высота над горизонтом, на которой в Москве может быть виден геостационарный спутник, составляет 29° , тогда как равноденственное Солнце поднимается на 34° .

5.31. Искусственная тяжесть

«...Вам подтвердят, что покуда Атавия вертится только вокруг Земли. Так вот, если мы заставим Атавию вращаться вокруг собственной оси, то тем самым создается искусственная сила тяжести, которая удержит нашу атмосферу от рассеивания в космической бездне». Здесь речь идет об искусственной тяжести на небольшом спутнике Земли — Атавии, с которого воздух быстро улетучивался в мировое пространство. Разберитесь в предлагаемом проекте создания такой тяжести [6, № 243].

Решение: Вращение Атавии вокруг ее собственной оси могло бы создать эффект тяжести для предметов, прикрепленных к внутренним стенкам спутника; при этом направление «искусственной тяжести» было бы от оси вращения наружу. Для вовлеченной во вращение

атмосферы станции это лишь ускорило бы улетучивание воздуха в мировое пространство.

5.32. Марсоход

Операторы с Земли управляют по радио движением марсохода, который демонстрирует им телепанораму до расстояния 25 м от себя. Какова при этом безопасная скорость марсохода? [проф. В. В. Иванов]

Решение: Это зависит от расстояния между Землей и Марсом, которое меняется от 0,5 до 2,5 а. е. Следовательно, задержка во времени при распространении сигнала туда-обратно составит от 8 до 40 минут. Чтобы оператор мог вовремя остановить марсоход перед препятствием, скорость не должна превышать 1–5 см/с.

5.33. Солнечный зайчик

В 1993 и 1999 гг. на российской орбитальной станции «Мир» проводился эксперимент «Зная»; он состоял в отражении на Землю солнечного света с помощью раскрываемого плоского зеркала диаметром несколько метров. Сообщалось [38], что в неудачном эксперименте 1999 г. диаметр зеркала был 25 м. Оцените яркость солнечного «зайчика» от этого зеркала при его наблюдении с поверхности Земли. Не будет ли он опасен для зрения наблюдателя?

Решение: Считая зеркало идеально отражающим и абсолютно плоским, можно принять, что в него мы видим кусочек солнечной поверхности с угловым размером, равным размеру зеркала. С высоты орбиты около 400 км зеркало диаметром 25 м видно под углом $\alpha = 3438' \cdot 0,025/400 = 0,2'$. Такой угол неразрешим для невооруженного глаза, поэтому «зайчик» будет восприниматься как яркая звезда. Оценить ее звездную величину можно по отношению видимой площади зеркала к площади солнечного диска. Это отношение составляет $(0,2'/30')^2 = 5 \cdot 10^{-5}$. В звездных величинах это составляет около 14^m . Учитывая, что видимая звездная величина полного диска Солнца равна $-26,6^m$, получим величину «зайчика» около $-12,5^m$. Это близко к потоку света от полного диска Луны. Учитывая, что этот поток сконцентрирован в точечном объекте (т. е. попадает на малый участок сетчатки) и появляется внезапно, это может быть весьма опасно для адаптированного к темноте глаза. Если же наблюдение ведется в бинокль, то очевидно глаз будет поражен. В данном случае

успокаивает лишь то, что сделать из подобного зонтика идеальное зеркало довольно трудно.

5.34. Великое противостояние

Орбиты Земли и Марса — эллипсы, причем орбита Марса заметно вытянута. Поэтому противостояния Марса происходят при различных расстояниях между планетами. Когда противостояние происходит на месте наибольшего сближения орбит, расстояние до Марса (55 млн км) вдвое меньше, чем при наименее благоприятном противостоянии. В это время лучше всего рассматривать Марс в телескоп и совершать к нему космические перелеты. Как часто происходят эти особо благоприятные, «великие» противостояния Марса, если период его обращения около Солнца равен 1,880705 года? (При решении этой задачи Я. И. Перельман советует воспользоваться свойством непрерывных дробей.) [4, № 405]

Решение: Допустим, что происходит такое противостояние. Следующее из них произойдет в том же месте пространства через промежуток времени, заключающий целое число оборотов Земли (x) и целое число оборотов Марса (y). Следовательно,

$$\frac{x}{y} = 1,880705 = \frac{1\,880\,705}{1\,000\,000} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{7 + \frac{1}{3 + \dots}}}$$

Ограничиваясь первыми тремя звеньями, имеем $\frac{x}{y} = \frac{15}{8}$, т. е. великие противостояния происходят каждые 15 лет (через каждые 8 полных оборотов Марса).

5.35. Солнечный парус

Чрезвычайно перспективным средством передвижения по Солнечной системе и даже за ее пределы считается солнечный парус, использующий давление солнечных лучей на огромный экран из тонкой светоотражающей пленки. Говорят, что маневрирование с солнечным парусом аналогично управлению обычной яхтой; что под ним тоже можно идти против ветра. Так ли это?

Решение: Действительно, это так. Когда обычная яхта идет против ветра галсами, она, кроме давления ветра на парус, использует также реакцию воды, которая давит на корпус и киль. Роль этой второй силы для солнечного паруса играет гравитационное притяжение Солнца. Разворачивая парус под разными углами к падающим лучам, можно использовать их давление для увеличения или уменьшения

механической энергии и момента импульса аппарата. В соответствии с этим он будет удаляться от Солнца или приближаться к нему.

5.36. Загадочный объект

Некоторое тело, находясь от Солнца на расстоянии 0,72333 а. е., имеет в этот момент скорость относительно Солнца 35,0 км/с. Определите вид конического сечения, описываемого телом. Знаете ли вы, какое это тело? [4, № 709]

Решение: Параболическая скорость на заданном расстоянии равна 49,5 км/с. Следовательно, можно с уверенностью сказать, что тело движется вокруг Солнца по замкнутой эллиптической орбите. Более того, его скорость в заданный момент в точности равна круговой. Если бы эта скорость была направлена перпендикулярно радиусу-вектору (т. е. направлению на Солнце), то без всякого сомнения можно было бы определить это тело — Венера. Однако о направлении скорости нам ничего не известно, следовательно, можно лишь предполагать, что в задаче речь идет о Венере, хотя не исключено, что это астероид из группы малых планет, движущихся внутри орбиты Земли.

5.37. Студенческий спутник

Сообщение информационного агентства: «После десяти лет проектирования и трех лет строительства в полном объеме заработал новый американский космодром, расположенный на острове Кадьяк (шт. Аляска, США). 30 сентября 2001 г. с его стартовой площадки ушла в космос ракета-носитель “Афина-1” с четырьмя небольшими спутниками на борту. Наиболее интересен из них студенческий аппарат “Старшайн-3”, на корпусе которого установлено 1500 зеркал, позволяющих увидеть спутник с помощью простейших оптических приборов и даже невооруженным глазом. Предполагается, что “Старшайн-3” будут наблюдать школьники во время уроков астрономии».

Оцените, какой блеск будет иметь спутник в момент вспышек, если его диаметр около метра, а высота орбиты около 450 км.

Решение: Площадь поверхности шара $S = 4\pi R^2 = 4\pi(0,5)^2 \approx 3 \text{ м}^2$. Значит, каждое зеркало (будем считать его плоским квадратом) имеет площадь 20 см^2 и размер $4,5 \times 4,5 \text{ см}$. С расстояния 500 км такое зеркало видно под углом $206\,265'' \times 0,045/450\,000 = 0,02''$. Именно такого углового размера кусочек солнечной поверхности увидит наблюдатель на Земле, когда спутник отразит в него «солнечный зайчик». Этот кусочек по видимой площади в $(32'/0,02'')^2 = 9,2 \cdot 10^9$ раз меньше солнечного диска. В звездных величинах это составит

$2,5 \lg (9,2 \cdot 10^9) \approx 25^m$. Приняв видимую величину Солнца за $-26,6^m$, получим звездную величину вспышки $-1,6^m$. Такой блеск имеют ярчайшие звезды, которые без труда видны даже в лунную ночь на городском небе. Значит, эта «искусственная звезда» будет сиять ярко и станет доступна любому невооруженному (оптическим прибором) наблюдателю.

5.38. Рефракция на орбите

Космонавты на орбитальной станции готовятся к выполнению эксперимента. Штурман читает инструкцию: «Начать эксперимент следует в тот момент, когда верхний край Солнца коснется горизонта. С учетом атмосферной рефракции это означает, что для наблюдателя в этот момент диск Солнца должен быть виден полностью, и его нижний край должен чуть-чуть оторваться от горизонта».

Командир перебивает его:

— Что там насчет рефракции? Ты проверил?

— Да, все точно, — докладывает штурман. — Согласно «Справочнику» Куликовского рефракция у горизонта составляет $35'$, а диаметр Солнца — $32'$, так что все сходится: когда диск будет виден целиком, его верхний край в действительности как раз приблизится к линии горизонта.

А вы, любитель астрономии, согласны с этими рассуждениями?

Решение: «Справочник» приводит значение рефракции для наблюдателя на поверхности Земли. Но для наблюдателей на орбите это значение должно быть удвоено (рис. 5.1). Поэтому для космонавтов рефракция у горизонта составит около $70'$. Когда они увидят диск Солнца целиком, в действительности он будет еще глубоко под горизонтом. Кстати, для космонавтов удваивается не только значение рефракции, «сдвигающей» центр светила, но и значение дифференциальной рефракции, искажающей его форму; поэтому на космических снимках солнечно-

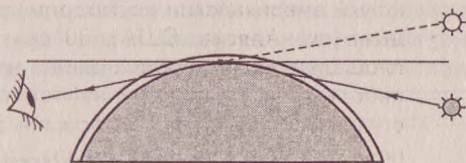


Рис. 5.1

го и лунного дисков у горизонта Земли они так сильно «сплющены».

5.39. Старт с Ио

С какой скоростью следует запустить зонд с поверхности Ио, чтобы он достиг одного из астероидов группы троянцев?

Решение: Поскольку Ио и троянцы движутся по одной и той же орбите (по орбите Юпитера), то кажется, что зонду достаточно преодолеть притяжение Ио, чтобы добраться до троянцев. Зная массу Ио ($8,9 \cdot 10^{22}$ кг) и ее радиус (1820 км), легко вычислить вторую космическую скорость на поверхности этого спутника: она равна 2,6 км/с. Однако, выпущенный с такой скоростью зонд покинет Ио, но останется на его околоюпитерианской орбите, поскольку при ее радиусе 422 тыс. км и периоде обращения по ней Ио в 1,77 сут., спутник движется по ней со скоростью 17,3 км/с, а значит, вторая космическая скорость на орбите Ио равна 24,5 км/с. Следовательно, мы должны просуммировать кинетические энергии, необходимые зонду для того, чтобы вырваться из поля Ио и Юпитера. Ответ: зонд должен быть запущен со скоростью $(2,6^2 + 24,5^2)^{1/2} = 24,6$ км/с.

5.40. Земля-ракета

Нашим потомкам понадобилось исправить орбиту Земли. Могут ли они для этой цели использовать реактивный двигатель, и если да, то какой? [39, № 20]

Решение: Если использовать реактивный двигатель на химическом топливе, как у современных ракет, скажем, укрепив его за пределом атмосферы на башне высотой 100–150 км, то такой двигатель окажется... бесполезным. Скорость выброса газов у химического ракетного двигателя составляет 2–3 км/с, поэтому выброшенный газ просто упадет на Землю. Для превращения Земли в космический корабль нужен ядерный, а еще лучше — электрический ракетный двигатель, разгоняющий вещество до скорости более 11 км/с.

5.41. Из пушки на Луну

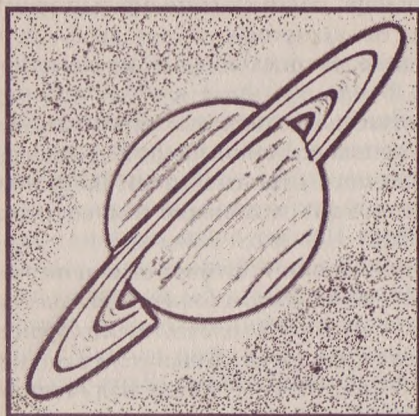
Герои замечательных романов Жюль Верна «С Земли на Луну» (1865 г.) и «Вокруг Луны» (1870 г.) отправляются к Луне в снаряде, которым выстрелили из гигантского орудия, отличного в глубокой вертикальной шахте на юге США. Поскольку предполагалась посадка на поверхность Луны, полет непременно должен был состояться в полнолуние. Проконсультировавшись с астрономами, путешественники узнали, что при таких условиях единственным возможным временем для экспедиции оказывается декабрь. А почему?

Решение: В полнолуние Луна располагается вблизи эклиптики, в области, противоположной Солнцу. Поскольку южная граница США проходит вблизи Северного тропика, полная Луна проходит там через

зенит (куда направлено орудие) в декабре, когда Солнце оказывается в зените на Южном тропике.

Задача решена. Позволю себе одно отступление. Если вы еще не читали упомянутых романов Ж. Верна, которые вместе обычно называют коротко — «Из пушки на Луну», то прочтите обязательно. Любителя астрономии в них заинтересует и поразит многое, но совершенно особое впечатление у вас оставит прямо-таки мистическая прозорливость писателя по поводу первой пилотируемой экспедиции к Луне, которая состоялась ровно через 100 лет после создания романов. Неважно, что вместо пушки для этого была использована ракета; очевидно, что и пушку тоже можно было бы использовать (кстати, попробуйте оценить длину такого орудия). Кроме тех обстоятельств путешествия, которые в середине 19-го века можно было рассчитать (траекторию и длительность полета), Жюль Верн угадал столь многое, что в это просто не верится.

Например, им было точно указано место старта (Флорида, США), количество членов экипажа (3 человека), размер и вес снаряда, а также материал, из которого он был изготовлен, — алюминий. Было угадано, что первая экспедиция к Луне ограничится ее облетом, без посадки на поверхность. Был точно указан метод возвращения на Землю — приводнение. Прочитав романы, вы найдете и другие замечательные совпадения; разумеется, найдете и промахи. Любители астрономии обнаружат в сюжете двойного романа одно любопытное совпадение (или предсказание?), которого по-моему еще никто не отмечал: к моменту полета на Луну крупнейшим телескопом мира был пятиметровый рефлектор. Наконец, еще одно «попадание» прямо касается условия нашей задачи: первый пилотируемый полет к Луне («Аполлон-8», 1968 г.) действительно состоялся в декабре! Впрочем, было ли это простым совпадением, или для этого есть астрономические основания?



Глава 6

Природа Солнечной системы

6.1. Терминатор

Может ли терминатор совпадать с экватором планеты?

Решение: В принципе, терминатор может совпадать с экватором планеты, но лишь в том случае, если ось вращения планеты лежит в плоскости ее орбиты, и лишь в те моменты, когда эта ось направлена точно на Солнце. Ближе всех к выполнению таких условий подходит Уран, ось которого всего на 8° не совпадает с плоскостью его орбиты. Поэтому дважды за орбитальный период на Уране терминатор почти совпадает с экватором.

6.2. Мягкий климат Земли

Почему на поверхности Луны температура от дня к ночи меняется на сотни градусов, а на Земле — всего лишь на несколько градусов?

Решение: После захода Солнца поверхность любой планеты или спутника начинает охлаждаться, в основном, излучая в пространство инфракрасные лучи. На планетах и спутниках, лишенных атмосферы (Меркурий, Луна, ...) этому ничто не препятствует, и охлаждение происходит быстро. На планетах с атмосферой (Земля, Венера, ...) инфракрасное излучение не может свободно уходить в космос, поскольку некоторые газы (пары воды, углекислый газ, и др.) его поглощают. Нагретая этим излучением атмосфера, в свою очередь, греет поверхность, не давая ей быстро остывать по ночам.

В тех местах на Земле, где атмосфера тонкая (высоко в горах) или почти лишена паров воды (в пустыне) температура поверхности по ночам быстро понижается, иногда опускаясь за ночь на десятки градусов.

Второй фактор, облегчающий остывание лунной поверхности, — это значительно большая продолжительность ночи на Луне (2 недели), чем на Земле (около 12 час). Длинные «лунные» ночи на Земле наблюдаются лишь в районах полюсов; там в это время температура сильно понижается.

Существует и третий фактор, усиливающий вымерзание поверхности Луны. Дело в том, что к остывающей поверхности планеты тепло устремляется снизу, из более глубоких слоев. Если грунт хорошо проводит тепло, поверхность сильно не остынет; если же плохо — верхний слой почвы быстро отдаст свое тепло излучению и сам вскоре остынет очень сильно. Земной грунт неплохо проводит тепло, поскольку в нем циркулируют жидкости и газы. Еще лучше циркулирует тепло в океане, покрывающем большую часть земной поверхности. А вот лунный грунт — мелко раздробленный, абсолютно сухой реголит, — очень плохо проводит тепло, он прекрасный теплоизолятор. Поэтому даже в течение длинной лунной ночи грунт промерзает в глубину лишь на несколько дециметров; с больших глубин тепло к поверхности подойти не успевает, поэтому лунная поверхность остывает очень сильно. Такая же ситуация и на Меркурии. Да и на Марсе, почти лишенном атмосферы и влаги, колебания температуры поверхности скорее напоминают Луну, чем Землю.

6.3. Теплое местечко

Когда мы ближе к Солнцу — зимой или летом? [8, I.1]

Решение: Земля проходит перигелий орбиты в первых числах января; в этот момент она ближе всего к Солнцу. В Северном полушарии в это время зима.

6.4. Загадай желание

Какие метеорные потоки можно наблюдать на Луне? [8, III.29]

Решение: Метеор — это явление, наблюдаемое в атмосфере при влёте в нее из космоса быстро движущегося предмета: пылинки, фрагмента кометы или астероида, космического аппарата, и т. п. Быстрое движение в атмосфере приводит к сильному нагреву поверхности предмета и окружающих его газов. Их свечение мы видим на фоне

темного ночного неба, называя это явление метеором. Сам предмет может полностью «сгореть» (испариться) в атмосфере, а может и частично сохраниться, упав на поверхность Земли в виде метеорита. На Луну тоже падают метеориты, но явления метеоров там не наблюдается, поскольку у Луны нет атмосферы.

6.5. Долгий век метеора

Метеорит падает на землю под углом 45° . Оцените, сколько секунд будет наблюдаться явление метеора в атмосфере.

Решение: Свечение метеоров происходит на высотах ниже 130 км. Следовательно, максимальную длину пути можно оценить как $130 / \sin 45^\circ = 184$ км. Скорость влета метеороида в атмосферу может составлять до 72 км/с, но не менее 11,2 км/с (вторая космическая скорость). Если не учитывать снижение скорости при полете в атмосфере, то длительность полета составит от $184/72 = 2,6$ с до $184/11,2 = 16$ с. Однако, в большинстве случаев сгорание мелких частиц происходит на высотах от 120 до 80 км, а скорости влета составляют около 30 км/с; поэтому явление метеора наблюдается около 2 с.

6.6. Простой вопрос

Почему бывают зима и лето?

Решение: Как ни странно, на этот вопрос можно услышать самые противоречивые ответы даже от весьма серьезных людей. Например, отвечают так: потому что летом Земля ближе к Солнцу; потому что изменяется наклон земной оси; потому что зимой дни короче. Что же на самом деле? В течение года наклон земной оси, практически, не изменяется. Именно поэтому одну половину года к Солнцу сильнее обращено Северное полушарие, а вторую половину года — Южное. В эти периоды года дни там длиннее и, главное, солнечные лучи более отвесно падают на землю и лучше ее нагревают. Это и есть причина смены времен года. А что касается расстояния Земли от Солнца, то оно действительно изменяется, но весьма незначительно: когда в Северном полушарии зима, наша планета немного ближе к Солнцу; это не отменяет нашу зиму, но делает ее чуть мягче. В Южном полушарии наоборот — зимой Земля чуть дальше от Солнца, что усиливает различие зимней и летней температуры. Однако в Южном полушарии нет таких крупных континентов, как в Северном, поэтому в целом климат там не более жесткий, чем у нас.

6.7. Полуночица

Планета видна на Земле в полночь. Ближе или дальше от Солнца, чем Земля, находится эта планета? [8, II.28]

Решение: Дальше, независимо от того, в какой части небосвода видна планета: гипотенуза всегда длиннее катета.

6.8. Это возмутительно!

Какие тела Солнечной системы испытывают наибольшие возмущения в своем движении и почему? [9, II.П2.1.1]

Решение: Величина возмущений характеризуется тем, насколько быстро изменяется орбита тела под влиянием притяжения к постоянным объектам. Например, каждая планета двигалась бы вокруг Солнца по эллипсу, если бы не возмущающее притяжение других планет, прежде всего — массивного Юпитера. При этом степень отклонения реальной траектории от невозмущенной (эллиптической) зависит только от параметров возмущающего тела и не зависит от массы возмущенного: движущаяся по орбите Земли пылинка точно в той же степени отклоняется притяжением, скажем, Юпитера, как и сама Земля. Следовательно, орбиты тел, обращающихся вокруг Солнца, испытывают наибольшие возмущения в тех случаях, когда они проходят близко от массивных планет. Основные возмущения в движение тел Солнечной системы вносит Юпитер; особенно сильно он отклоняет траектории близких к нему астероидов и пролетающих вблизи него комет.

С другой стороны, спутники планет двигались бы вокруг них по эллиптическим орбитам, если бы не возмущающее влияние Солнца, которое, из-за разницы в расстояниях, по-разному притягивает к себе планету и ее спутник. Особенно сильно это проявляется в движении далеких спутников планет, например, внешних спутников планет-гигантов и, как это ни странно, — Луны, орбита которой вокруг Земли весьма быстро изменяется под действием солнечного притяжения.

Таким образом, наибольшие гравитационные возмущения в Солнечной системе испытывают астероиды главного Пояса и внешние спутники планет. Но кроме этого, возмущения могут производиться негравитационными силами. Например, нагретое Солнцем ядро кометы испытывает сильную реактивную отдачу со стороны оттекающих газов. А мелкие пылинки ощущают давление солнечного света.

6.9. Туда — сюда

Движение какого небесного тела вызывает периодические приливы и отливы на море?

Решение: Непосредственная причина приливов, как известно, — это притяжение Луны и, в меньшей степени, Солнца. Однако, если бы суточное вращение Земли отсутствовало, то морские приливы практически не ощущались бы. Ведь притяжение Луны изменяет уровень моря всего на 50 см, а притяжение Солнца — вдвое меньше. Если бы это изменение уровня происходило медленно, то не имело бы никакого практического значения и с трудом было бы замечено на морском побережье. Именно так и происходит в открытом море, вдали от берегов.

Однако суточное вращение Земли приводит к тому, что невысокая приливная волна стремительно «обегаёт» Землю, дважды в сутки наталкиваясь на берега континентов. Именно высокая скорость приливной волны относительно берегов вызывает значительный нагон воды, который в некоторых узких бухтах поднимает ее уровень на 15–18 метров. Таким образом, большая высота приливов вызвана быстрым вращением Земли вокруг оси. Кстати, приливы весьма заметно тормозят это вращение.

Вращение же Луны вокруг Земли лишь немного изменяет высоту приливов: в новолуние и полнолуние, когда Земля, Луна и Солнце лежат на одной прямой линии, влияние Луны и Солнца складывается, вызывая на Земле более высокие *сизигийные* приливы; а в моменты первой и последней четвертей Луны ее влияние действует в противофазе с солнечным, вызывая низкие *квадратурные* приливы.

6.10. Марсианская астрономия

Можно ли с поверхности Марса различить глазом размеры Фобоса и Деймоса?

Решение: Используя приведенные в справочном разделе задачника данные, составим следующую таблицу:

Таблица 6.1

Спутник	Радиус орбиты, км	Минимальное расстояние от поверхности, км	Диаметр спутника, км	Угловой диаметр спутника
Фобос	9 400	6 000	≈ 24	13,8'
Деймос	23 500	20 100	≈ 14	2,4'

Как видим, Фобос весьма хорошо различим с поверхности Марса: его угловой размер почти равен половине лунного диска, наблюдаемого с Земли. А вот Деймос будет казаться практически точечным объектом.

6.11. Затмение на Марсе

Происходят ли на Марсе солнечные затмения?

Решение: Из решения задачи 6.10 мы знаем угловой диаметр спутников Марсе: наибольший у Фобоса ($13,8'$). Поскольку Марс в 1,5 раза дальше Земли от Солнца, угловой диаметр солнечного диска на Марсе равен $30'/1,5 = 20'$. Следовательно, Фобос не сможет полностью закрыть собой солнечный диск и произвести полное солнечное затмение. Его прохождение по диску Солнца можно назвать кольцевым затмением.

6.12. Явления лунного неба

Можно ли наблюдать на Луне солнечные затмения, метеоры, кометы, полярные сияния, радугу, серебристые облака, искусственные спутники?

Решение: Метеоры, полярные сияния, радуга и серебристые облака — это атмосферные явления, а на Луне атмосферы нет; значит они там не наблюдаются. А вот затмения Солнца Землей, искусственные спутники Луны и кометы на Луне наблюдаются даже лучше, чем на Земле, поскольку не мешает атмосфера.

6.13. Аэростат на Венере

Готовится автоматическая станция-аэростат для исследования атмосферы Венеры. Какой газ можно предложить для наполнения баллона: водород, гелий, азот, водяной пар, двуокись углерода?

Решение: Атмосфера Венеры состоит почти из чистого углекислого газа (CO_2). Поэтому двуокись углерода (CO_2) не будет обладать там подъемной силой. Азот также весьма тяжел: его молярный вес $\nu(\text{N}_2) = 28$ составляет $2/3$ от веса молекул атмосферы $\nu(\text{CO}_2) = 44$. Водород и гелий трудно хранить, поскольку они сжижаются при крайне низкой температуре. К тому же они очень летучи (особенно водород), отчего быстро покидают оболочку аэростата. Среди перечисленных газов наиболее приемлемым для аэростатов, предназначенных к полету на уровне облаков Венеры ($H \approx 53$ км) в области «комнатных

условий» ($T \approx 10^\circ\text{C}$; $P \approx 1$ атм), является гелий. Он и был использован в 1985 г. для заполнения аэростатных зондов «ВЕГА-1 и -2», в течение нескольких дней дрейфовавших в атмосфере Венеры.

Однако в более низких слоях атмосферы, под нижней кромкой облаков, где температура превышает 100°C , более выгодным наполнителем баллона аэростата может быть водяной пар. Его подъемная сила весьма велика: $\nu(\text{H}_2\text{O}) = 18$. А точка кипения воды в атмосфере Венеры находится на высоте около 43 км, где $T = 140\text{--}150^\circ\text{C}$ и давление $P = 3\text{--}4$ атм. Транспортировка воды не представляет проблем, а ее способность закипать при указанных условиях автоматически обеспечит полет аэростата вблизи нижней кромки облаков, что очень интересно для научных исследований.

6.14. Интуиция не подведет?

Не производя расчета, попробуйте догадаться, какое расстояние прошла Земля за время своего существования, обращаясь вокруг Солнца? Варианты ответа:

- а) до ближайшей звезды и обратно;
- б) до центра нашей Галактики и обратно;
- в) до ближайшей галактики и обратно.

Решение: За 4,5 млрд лет, двигаясь со скоростью около 30 км/с, Земля прошла 150 кпк. Это чуть больше, чем расстояние до ближайших галактик Магеллановы Облака и обратно.

6.15. Проверь воображение

Вообразите себе планету, которая вращается, «лежа на боку» (как Уран), и при этом движется по вытянутой орбите (как Меркурий). Ее сутки намного короче года (как у Земли). Ось вращения планеты, лежащая в плоскости ее орбиты, ориентирована так, что в моменты прохождения перигелия и афелия плоскость экватора планеты направлена на Солнце. Вы уже заметил, наверное, что описанная планета по характеру своего движения весьма похожа на Плутон. Итак, вообразите эту планету и попробуйте описать, как меняются сезоны года на ее полюсах и на экваторе.

Решение: Смена сезонов на планете очень контрастная: в полярных областях день и ночь длятся по полгода, это и есть для них «лето» и «зима». Различие между полюсами в том, что на одном из них Солнце после восхода быстро, по крутой спирали поднимается к зениту и медленно, по пологой спирали опускается к горизонту; а на другом полюсе — наоборот: медленно поднимается и быстро

опускается. Соответственно, на одном полюсе будет короткая бурная весна и долгая мягкая осень. А на другом — наоборот.

На экваторе в течение года будут два лета (когда суточный путь Солнца проходит вблизи зенита) и две зимы (когда Солнце ходит вдоль горизонта). Но одно лето будет жаркое (в перигелии орбиты), а второе — прохладное (в афелии).

6.16. Приливы

Почему приливы и отливы продолжаются не по 12 часов, а по 12 часов 25 минут? [6, № 231]

Решение: Период приливов в основном определяется движением Луны относительно Земли. Вращение Земли и обращение вокруг нее Луны происходит в одном направлении, поэтому через 24 часа Луна еще не встанет против того меридиана на Земле, против которого она стояла сутки назад. Чтобы этот меридиан вновь оказался обращенным к Луне, понадобится еще 50 минут.

6.17. Зодиакальный свет

В какие сезоны года лучше всего наблюдается вечерний и утренний зодиакальный свет в средних широтах Северного полушария Земли?

Решение: Вечерний зодиакальный свет, наблюдаемый на западе, лучше всего виден весной; а утренний, на востоке — осенью. Это объясняется тем, что в указанные моменты эклиптика на сумеречной стороне неба располагается выше небесного экватора и круто уходит под горизонт. Поэтому после окончания астрономических сумерек можно наблюдать расположенные на меньших углах от Солнца яркие области зодиакального света. К тому же они видны на больших высотах, где небо темнее.

6.18. Каникулы у всех!

Может ли так быть, чтобы сезоны года сменялись на всей планете синхронно, а не как на Земле или Марсе, где в северном и южном полушариях они сменяются в противофазе?

Решение: Да, может. Для этого планета должна иметь нулевой наклон экватора к плоскости орбиты и при этом заметно эллиптическую орбиту. Тогда сезоны, зависящие только от потока тепла, будут

по всей планете определяться только ее положением на орбите, а значит будет везде меняться синхронно. Примером этого мог бы служить Меркурий, однако у него трудно различить суточный и годичный ход температуры. А у Плутона, также имеющего весьма вытянутую орбиту, очень сильно наклонена ось вращения. Это сложный случай: у Плутона характер смены сезонов зависит от ориентации оси вращения планеты к большой оси орбиты.

6.19. В огороде бузина, ...

Как известно, угловые размеры Солнца и Луны одинаковы, а высота лунных приливов на море вдвое больше, чем солнечных. Зная это, найдите отношение средних плотностей Луны и Солнца.

Решение: Высота прилива пропорциональна $M/r^3 = \rho(R/r)^3$, где M , R и ρ — масса, радиус и средняя плотность вызывающего прилив тела (т.е. Луны или Солнца), r — расстояние до этого тела [13]. Поскольку у Луны и Солнца угловые размеры одинаковы, то одинаково и отношение R/r (это вполне справедливо для таких малых углов, как $0,5^\circ$). Следовательно, относительная высота прилива в данном случае определяется лишь отношением средних плотностей Луны и Солнца. Итак, наши вычисления показывают, что Луна должна быть примерно вдвое плотнее Солнца. Действительно, средняя плотность Луны $3,3 \text{ г/см}^3$, а Солнца — $1,4 \text{ г/см}^3$.

6.20. Хвост кометы

Перед восходом Солнца на юге у горизонта видна комета. Как относительно горизонта направлен ее хвост? Наблюдение проводится в Северном полушарии. Варианты ответа: а) влево; б) вверх; в) вправо; г) вниз [16, с. 156].

Решение: Если это нормальный (не аномальный) хвост кометы, то он должен быть направлен от Солнца, т.е. вправо.

6.21. Полное ли затмение?

Почему во время полного лунного затмения Луна все же видна и имеет красный цвет?

Решение: Во время затмения на Луну попадает свет, прошедший сквозь земную атмосферу и преломленный ею. Вспомним, что максимальный угол рефракции для наблюдателя на поверхности Земли около $0,5^\circ$. Выходя из нижних слоев атмосферы в космос, свет еще

раз испытывает преломление на $0,5^\circ$. Итого около 1° . А диаметр геометрической земной тени у Луны около $1,5^\circ$. Значит преломленный в атмосфере Земли свет попадает во все области геометрической тени у поверхности Луны.

Красные лучи солнечного света менее других рассеиваются и поглощаются в земной атмосфере (вспомним красное солнце у горизонта); они-то в основном и доходят до Луны сквозь земную атмосферу.

6.22. Невесомость

Искусственные спутники, обращаясь вокруг Земли, как бы непрерывно падают на нее, а потому все предметы в них находятся в состоянии невесомости. Но ведь и Земля, обращаясь вокруг Солнца, тоже все время падает на него. Почему же все тела на Земле весомы? [6, № 242]

Решение: Потому что Земля значительно массивнее спутника и заметно притягивает к своему центру находящиеся на ней тела. А вот притяжения Солнца мы не ощущаем, хотя оно не так уж мало (см. задачу 6.45). По отношению к Солнцу Земля и ее обитатели находятся в состоянии невесомости. Впрочем, это не вполне идеальная невесомость: в разных частях Земли притяжение Солнца немного различается, отчего возникает приливный эффект. Он вдвое слабее лунного прилива, но вполне заметен.

6.23. Астероид раскололся

Сферический астероид разделился на две равные сферические части. Как изменился их суммарный блеск по сравнению с блеском исходного астероида? Выразить в звездных величинах.

Решение: Поток отраженного света увеличится пропорционально возросшей суммарной площади. Радиус каждого куска составил $0,5^{1/3}$ радиуса исходного астероида, и площадь поверхности, соответственно $0,5^{2/3}$. Полная площадь двух кусков возросла по сравнению с исходной в $2(0,5^{2/3}) = 2^{1/3} = 1,26$ раза. В звездных величинах это составляет $2,5 \lg(1,26) = 0,25^m$.

6.24. Вокруг Луны на электромобиле

Лунная экспедиция решила совершить кругосветное путешествие на луноходе, двигатели которого работают от солнечных батарей. Средняя скорость лунохода 10 км/ч . Возможна ли такая экспедиция?

Решение: Возможна. Выхав утром на запад и вернувшись в исходную точку вечером, можно провести в пути на дневной стороне Луны $3/2$ синодического периода Луны, т. е. $(3/2)29,5 = 44,25$ сут. = 1 062 часа. Примем максимальный интервал времени в пути за 1 000 часов. Значит луноход способен пройти 10 тыс. км. А длина экватора Луны $2\pi \times 1\,737$ км = 11 тыс. км. Следовательно, нужно двигаться не по экватору, а по одной из параллелей к северу или к югу от него.

6.25. Планета стала ярче

Сколько времени прошло от соединения до противостояния планеты, если блеск ее за это время увеличился на $0,85^m$? Орбиту планеты считать круговой и лежащей в плоскости эклиптики.

Решение: Около 200 дней. Расстояние между планетами в соединении $(R + r)$, а в противостоянии $(R - r)$. Тогда отношение потоков света от планеты

$$\frac{(R + r)^2}{(R - r)^2} = 2,512^{\Delta m},$$

где Δm — разность блеска. Отсюда

$$\frac{R}{r} = \frac{2,512^{\Delta m/2} + 1}{2,512^{\Delta m/2} - 1}.$$

Из 3-го закона Кеплера орбитальный период планеты составляет

$$P = (R/r)^{3/2} \text{ лет},$$

а время от соединения до противостояния (t) найдем из соотношения

$$\frac{1}{1 \text{ год}} - \frac{1}{P} = \frac{1}{2t}.$$

6.26. Эксперимент на свою голову

Познакомьтесь с отрывком из романа Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.):

«Этот день закончился эффектным зрелищем: с горной площадки, обращенной к океану, в двенадцать часов ночи была пущена первая пробная ракета без людей, с самопишущими автоматическими приборами. Она имела два метра высоты и была укреплена почти отвесно, с легким наклоном в сторону океана... На глаз отклонение ракеты от вертикали почти не было заметно, и Блоттон сказал:

— А вдруг она упадет нам на голову?

Цандер, улыбаясь, ответил:

— Много лет тому назад, в семнадцатом столетии, монах Мерсен и военный Пти произвели такой опыт: они поставили пушку вертикально, как им казалось, и выстрелили, наблюдая, вернется ли ядро на Землю. Они несколько раз повторяли этот опасный опыт. Но так как у них не оказалось достаточно искусства, чтобы заставить ядро угодить им прямо в голову, то они сочли себя вправе заключить, что оно повисло в воздухе, где и пробудет, без сомнения, достаточно долгое время. Не только в то время, но и теперь редко можно найти пушку, безукоризненно калиброванную для такого опыта, и трудно установить ее совершенно вертикально. Ну, а теперь отойдите. Пускаю ракету».

Итак, инженер Цандер считал, что ядро не упало на голову экспериментаторам, потому что пушка была неточно ориентирована по вертикали. Предположим, мы взяли идеальную пушку (или ракету) и выстрелили точно по вертикали. Упадет ли снаряд в точку выстрела?

Решение: Подойдем к решению в несколько этапов, постепенно делая условие задачи все более реалистическим.

а) Пусть Земля плоская и неподвижная, сила тяжести не изменяется с высотой, атмосферы нет. Эти условия отвечают старту снаряда с небольшой начальной скоростью. Очевидно, что вертикальный выстрел в таких условиях приведет к строгому возвращению снаряда в точку старта — в ствол пушки.

б) Учет вращения Земли при тех же прочих условиях и не сильном выстреле не изменит решения, поскольку на небольшом промежутке времени вращения можно представить как прямолинейное перемещение точки старта (вспомним принцип относительности Галилея).

в) Пусть Земля идеально сферическая, без атмосферы и не вращается. При вертикальном выстреле снаряд движется по прямой, проходящей через центр Земли и возвращается в точности обратно, но лишь в том случае, если скорость старта не превосходит второй космической скорости.

г) Пусть Земля идеально сферическая, без атмосферы, но вращается, причем период вращения сравним с временем полета снаряда. Его движение (при старте со скоростью менее второй космической) происходит по дуге эллипса, плоскость которого проходит через центр Земли. Подчеркнем, что это будет не радиальная траектория, а именно эллипс, поскольку к вертикальной скорости снаряда добавляется скорость вращения точки старта. Но раз вектор этой скорости перпендикулярен оси Земли, а плоскость орбиты проходит через центр Земли, то географическая параллель, по которой вращается точка старта, касается орбитальной плоскости лишь в самой

точке старта и нигде более (разумеется, в том случае, если старт происходит не с экватора планеты!). Следовательно, траектория снаряда может после старта вторично пересечься с орудием лишь в том случае, если они оба одновременно окажутся в точке старта. Для орудия это возможно: один раз в сутки оно проходит через эту точку. Но для снаряда — нет, поскольку двигаясь по эллипсу, оказаться вторично на том же расстоянии по фокуса (т. е. от центра Земли) можно только в том случае, если в точке старта лежал перицентр орбиты, а для этого в момент старта у снаряда не должно быть радиальной (вертикальной) компоненты скорости. Итак, лишь стреляя с экватора планеты и очень точно подобрав вертикальную скорость снаряда, можно, в принципе, заставить снаряд упасть обратно на орудие.

д) Последнее, что осталось учесть — наличие атмосферы. Здесь все просто: ее турбулентное движение совершенно невозможно учесть в момент выстрела. Поэтому в реальных условиях снаряд никогда не вернется точно к орудию.

6.27. Солнце как звезда

В романе Александра Беляева «Прыжок в ничто» (1933 г.) инженер Цандер создал замечательную ракету — космический «ковчег»:

«Цандер победил пространство. Теперь “ковчег” мог вылететь далеко за пределы солнечной системы. Достигнуть предельных скоростей, близких к скорости света, — вот что было целью Цандера.

Но Цандер все же не решался улетать слишком далеко от Солнца — источника жизни и тепла для людей и оранжерей: на расстоянии десяти миллиардов километров — за орбитой Плутона — Солнце стало всего лишь яркой звездой».

Правда ли на таком расстоянии блеск Солнца сравним с блеском яркой звезды, например, Сириуса?

Решение: Даже если бы «ковчег» Цандера удалился от Солнца вдвое дальше Плутона, на расстояние 15 млрд км, он был бы от Солнца в 100 раз дальше Земли. При этом поток солнечного света уменьшился бы в 10 тыс. раз, а видимая звездная величина Солнца — на 10^m . Учитывая, что для земного наблюдателя Солнце имеет блеск -27^m , для пассажиров «ковчега» оно блестело бы как светило -17^m , т. е. почти в 50 раз сильнее полной Луны ($-12,7^m$) и в миллион раз ярче Сириуса! Правда, для оранжереи этого освещения все равно было бы маловато.

Можем ли мы сказать на основе сделанного выше расчета, что писатель Беляев был не прав, сравнив Солнце, наблюдаемое от Плу-

тона, со звездой? Попробуйте определить, виден ли диск Солнца с такого расстояния; возможно, писатель имел в виду именно это?

6.28. Где легче?

Где на Земле тела легче всего? Вам показалось, что вопрос этот похож на задачу-шутку: «Почему птица летает?» (По чему? По воздуху!) Но наш вопрос не таков; если хорошенько подумать, что на него можно дать вполне обоснованный ответ. Какой? [18, с. 5]

Решение: Из всех мест земного шара легче всего тела будут, конечно, на экваторе. Перемещаясь к полюсу, они тяжелеют. Электровоз, весящий в Москве 200 т, становится по прибытии в Архангельск на 20 кг тяжелее, а в Одессу — на столько же легче.

Кто же похищает эти 20 кг веса у электровоза? Главным образом похищает их центробежная сила: она уменьшает вес всякого тела близ экватора на $1/290$ долю по сравнению с весом того же тела у полюсов. А так как земной шар у экватора слегка вздут, т. е. поверхность Земли там несколько дальше от центра планеты, то это еще немного уменьшает вес предметов близ экватора. В общей сложности потеря веса на экваторе достигает $1/200$ доли по сравнению с весом того же тела на полюсе.

6.29. Кто тяжелее?

Два исследователя одинаковой массы (братья-близнецы) отправились в путешествия: первый опустился в батискафе на глубину 8 км в Тихом океане, а второй поднялся на высоту 8 км в Гималаях. Какой из них в этот момент больше весил?

Решение: Считая Землю сферической и однородной, легко показать (известная теорема Ньютона об отсутствии силы тяжести внутри сферической оболочки), что с приближением к центру Земли сила тяжести ($F \propto M(R)/R^2$) ослабевает пропорционально R/R_{\oplus} (поскольку масса внутренней части планеты, притягивающая путешественника, быстро уменьшается: $M(R) \propto R^3$). Если глубина погружения h , то относительное уменьшение веса составит $\Delta F/F = -h/R_{\oplus}$. С другой стороны, удаляясь от поверхности Земли, путешественник также теряет в весе пропорционально $(R_{\oplus}/R)^2$. Поскольку $R = R_{\oplus} + h$, можно записать изменение силы тяжести над Землей как $F \propto (R_{\oplus}^2/(R_{\oplus} + h)^2 \propto (1 + h/R_{\oplus})^{-2})$. Используя бином Ньютона (для школьников) или ряд Тейлора (для студентов), запишем последнее выражение при малых значениях h/R_{\oplus} в виде $F \propto (1 - 2h/R_{\oplus})$. Как видим, с удалением от поверхности Земли изменение силы тяжести составляет $\Delta F/F = -2h/R_{\oplus}$, т. е. происходит вдвое быстрее,

чем при опускании на такую же глубину под поверхность однородной планеты. Докажите сами, что и для неоднородной планеты наш ответ остается в силе.

6.30. Закон Архимеда

Судно водоизмещением в 20 000 т, стоявшее раньше в Архангельске, прибыло в экваториальные воды. Известно, что с приближением к экватору все тела становятся легче; разница в весе на широте Архангельска и на экваторе равна $1/250$. Можете ли вы сказать, сколько тонн воды будет вытеснять это судно в экваториальных водах? [18, с. 5]

Решение: Перейдя из Белого моря в экваториальные воды, судно делается на $1/250$ легче. Но ровно на столько же делается легче и вода: она тоже весит близ экватора на $1/250$ меньше, чем в Белом море. Значит, водоизмещение судна во все время плавания остается одно и то же — 20 000 т.

6.31. Метеорит замерз

В 1860 г. в Индии упал метеорит. Прочертив на небе огненный след, раскаленное добела тело упало в болото. Каково же было удивление подбежавших людей когда на месте падения метеорита они обнаружили глыбу... льда. Итак, «небесный огонь» принес в знойную Индию лед! Как объяснить этот парадокс природы? [23, № 53]

Решение: Полет метеорита сквозь земную атмосферу длится всего несколько секунд. За такое короткое время тепло, возникающее при трении метеорита о воздух, не успевает проникнуть в его толщу, так как теплопроводность метеоритного вещества, как и пород земной коры, мала. Поэтому, хотя поверхность метеорита, как правило, оплавлена, в его глубине сохраняется температура, которую он имел перед встречей с Землей. Если метеорит имел светлую поверхность, хорошо отражающую солнечные лучи, то его температура в космосе могла быть существенно ниже 0°C . При падении в воду поверхностные слои метеорита быстро охлаждаются до температуры окружающей воды, а затем охлаждаются еще больше из-за оттока тепла во внутреннюю часть метеорита. Поэтому через непродолжительное время после падения поверхность метеорита может стать очень холодной.

Может ли это привести к замерзанию воды вокруг метеорита, с полной определенностью сказать трудно. Утверждается [23, задача 53], что брошенный в воду сильно охлажденный кусок железа покрывается тонким слоем льда. Было бы интересно произвести этот опыт

с охлажденным камнем. Во всяком случае, факт, описанный в задаче, не выдуман: сообщения о нем приводились в научной печати.

6.32. А без друга жизнь плохая, ...

У каких космических тел обнаружены спутники [29, с. 7].

Решение: ...Двойственность и кратность — распространенное явление во Вселенной. Одиночных объектов любого масштаба сравнительно мало; большинство объединено в гравитационно связанные системы. Если при этом в системе один из объектов имеет выдающуюся массу, то все другие принято называть его спутниками. Крупные галактики часто имеют спутниками карликовых галактик. Многим звездам служат спутниками маломассивные звезды или планеты. В Солнечной системе почти у всех больших планет есть спутники. Но на этом цепочка пока обрывается: ни у одного спутника планеты пока не обнаружены собственные естественные спутники. Были, правда, искусственные — у Луны.

Долго бытовало мнение, что спутники могут быть только у крупных тел, таких как планеты, поэтому нет спутников у спутников. Однако все оказалось интереснее. Ровно 100 лет назад впервые был поставлен вопрос о существовании спутников у астероидов: в 1901 г. Ш. Андре из Лионской обсерватории, наблюдая периодические изменения блеска у астероида 433 Эрос, высказал предположение о его двойственности. Сейчас известно, что Эрос не имеет крупных спутников, но еще 10 лет назад он был весьма вероятным кандидатом в двойные астероиды. Многие годы гипотеза Андре осталась незамеченной. Проявление интереса к возможным спутникам астероидов началось лишь в конце 1970-х годов. При наблюдении покрытий звезд астероидами 6 Геба и 532 Геркулина были обнаружены кратные ослабления блеска, которые интерпретировали как прохождение перед звездой группы тел, причем было высказано предположение об их гравитационной связанности. По данным нескольких наблюдений были определены размеры спутников и их расстояния от главного тела. Метод покрытий стал популярен, и в последующие несколько лет число двойных и, возможно, кратных астероидов быстро увеличивается (табл. 6.2 и 6.3).

Двойственность астероидов обнаруживается также методом радиолокации. Радиоэхо от малой планеты (4 Веста) впервые было получено в 1979 г. в обсерватории Аресибо. С тех пор радарные исследования проведены для многих астероидов. Время запаздывания эхо-сигнала позволяет измерить расстояние до объекта, доплеровское смещение по частоте — его скорость. Уширение эхо-сигнала является результатом вращения астероида. Бимодальная («двугорбая») форма эхо-сигнала указывает на возможную двойственность. К сожалению,

Таблица 6.2

Астероиды со спутниками

Астероид	Радиус орбиты спутника, км	Диаметр астероида, км	Диаметр спутника, км
45 Eugenia	1 580	215	13
87 Sylvia	1 200	150	7
90 Antiope	170	80	80
107 Camilla	1 000	220	10
243 Ida	100	58 × 23	1,5
762 Pulcova	800	140	20

Таблица 6.3

Некоторые астероиды, заподозренные в двойственности

Астероид	Предполагаемый радиус орбиты спутника, км	Диаметр астероида, км	Предполагае- мый диаметр спутника, км
9 Metis	1 100	153	60
146 Lucina	1 600	137	5,7
216 Kleopatra	110	145	
532 Herculina	977	213	46
1 620 Geographos	3,17	2,6 × 1,0 × 0,9	0,78
4 179 Toutatis		2,7	
4 769 Castalia		1,3	

радиолокация дает надежный результат лишь на небольшом расстоянии, поэтому данный метод применяют только к сближающимся с Землей астероидам.

Самым ярким эпизодом в поиске спутников у астероидов был пролет американского межпланетного аппарата «Галилео» вблизи астероида 243 Ида. Посланный к Юпитеру, этот зонд по пути пролетел вблизи двух астероидов типа S (Ида и Матильда), получил их детальные изображения и сфотографировал окрестности. Пролетая 28 августа 1993 г. мимо астероида Ида размером км, «Галилео» открыл у него маленький (диаметр 1,5 км) спутник, названный Дактилем. К сожалению, передающая параболическая антенна «Галилео» была повреждена, поэтому информацию на Землю он передавал медленно. Изображения с Дактилем были получены только в 1995 г. Именно тогда и состоялось открытие.

Всплеск интереса к двойным астероидам происходит в последние два года. Связан он, в первую очередь, с улучшением качества наземных наблюдений, а именно — с появлением адаптивной оптики. Ее использование позволило открыть за это время 5 спутников астероидов. Тот факт, что эти открытия произошли без длительного поиска, означает, что наличие спутников у астероидов — явление обычное.

Пока не ясно, существуют ли спутники у ядер комет. Вообще говоря, это вполне вероятно. Но само открытие еще впереди.

6.33. Темная ночь, ...

На какой стороне Луны ночь темнее?

Решение: Темнее на обратной, поскольку ее не освещает Земля. Известно, что освещенность поверхности Земли от всего ночного безлунного неба составляет 0,0003 лк. Источниками этого света приблизительно в равных долях служат атмосфера Земли, звезды и рассеянное межпланетной пылью излучение Солнца (зодиакальный свет). Последние два освещают и Луну; «безземной» ночью ее поверхность должна быть освещена с интенсивностью около 0,0002 лк. С другой стороны, освещенность, создаваемая Землей на Луне в новолуние, составляет около 15 лк (это в 60 раз выше освещенности, создаваемой полной Луной в зените на поверхности Земли). Таким образом, на видимой стороне Луны ночью в полноземелие в $(15/0,0002) = 75\,000$ раз светлее, чем ночью на невидимой стороне Луны.

6.34. Анти-парник

Парниковый эффект — обычное явление для любой планеты с атмосферой. А на какой из планет иногда наблюдается «анти-парниковый» эффект и в чем его причина?

Решение: Вспомним, что называют «парниковым эффектом». Если атмосфера планеты прозрачна для оптических лучей, но задерживает инфракрасное излучение, то она удерживает тепло у поверхности планеты и таким образом повышает ее температуру. Действительно, солнечные лучи свободно проникают сквозь воздушную оболочку к поверхности и греют ее. Остывание же поверхности в основном происходит за счет ее инфракрасного излучения. Но если атмосфера для него непрозрачна, то она его поглощает, сама при этом нагревается и становится источником тепла, посылая дополнительные потоки инфракрасного излучения обратно к поверхности. Итак, энергия Солнца, пройдя сквозь атмосферу в виде света и преобразовавшись в тепловое излучение, оказывается «запертой» у поверхности планеты. Таким же свойством обладает и стеклянный домик садового парника; отсюда и название эффекта.

Парниковый эффект заметно поднимает температуру у поверхности Венеры, Земли и Марса. Однако в атмосфере Марса время от времени наблюдается и обратный эффект — «антипарниковый». Происходит это в период пылевых бурь, когда из-за большого количества очень мелкой пыли атмосфера Марса становится непрозрачной

для солнечного света. В то же время, она остается прозрачной для инфракрасных лучей, которые уносят тепло с поверхности планеты. В эти периоды температура поверхности падает на десятки градусов.

6.35. Планета-химера

Какая планета похожа на Луну снаружи и на Землю внутри?
[29, № 207]

Решение: Меркурий. Его покрытая кратерами поверхность очень похожа на лунную. А по средней плотности, указывающей на химический состав, и, вероятно, по наличию мощного железного ядра Меркурий очень напоминает Землю.

6.36. Страх поспорил с Ужасом?

Почему спутники Марса — Фобос и Деймос — постепенно удаляются друг от друга?

Решение: Действительно, наблюдения показывают, что радиус орбиты ближайшего к Марсу спутника — Фобоса постепенно уменьшается, тогда как более далекий Деймос, по крайней мере, остается на своей прежней орбите, но, скорее всего, постепенно удаляется от Марса [32]. Причиной эволюции орбит этих спутников, так же как и спутников других планет, служит *приливное трение*. Суть этого эффекта в том, что спутник своим притяжением немного искажает тело планеты, чуть-чуть вытягивая его вдоль оси, соединяющей центры планеты и спутника (вспомните приливы на Земле, вызванные Луной). Если бы оба тела оставались неподвижными или вращались синхронно с орбитальным движением (как это делает Луна), то приливные выступы на теле планеты были бы постоянно ориентированы строго по линии центров. Но если период суточного вращения планеты не совпадает с орбитальным периодом спутника, приливные выступы из-за вязкости тела планеты будут «сноситься» в ту сторону, куда вращается планета относительно направления на спутник (рис. 6.1). Это приводит к тому, что сила взаимодействия между спутником и планетой приобретает нецентральный характер.

Рассмотрим для примера случай, когда планета вращается в ту же сторону, куда движется спутник, но с большей угловой скоростью (как у Земли с Луной). Тогда ближний к спутнику приливный выступ будет отклонен вперед по его движению и будет своим притяжением сильнее ускорять движение спутника, чем противоположный выступ будет его тормозить. Спутник будет увеличивать свою

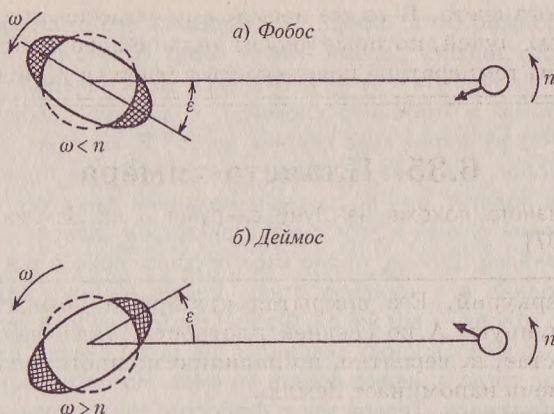


Рис. 6.1

механическую энергию и орбитальный момент, радиус его орбиты будет возрастать. Разумеется, вращение планеты при этом будет тормозиться. Именно это происходит в системе Земля—Луна. Именно по этой причине Луна на несколько сантиметров в год удаляется от Земли, а земные сутки постепенно удлиняются.

Но если бы планета вращалась так, что отставала от орбитального движения спутника, то она тормозила бы его движение. При этом орбита спутника сокращала бы радиус и он приближался бы к планете. Лишь двигаясь по синхронной орбите, спутник избегает действия приливного трения. У Земли эта орбита хорошо известна: на ней работают сотни искусственных спутников.

Вернемся к Марсу. Влияние приливного трения на Фобос и Деймос происходит в различном направлении, поскольку Фобос опережает суточное вращение Марса, а Деймос отстает от него. По этой причине Фобос тормозится, его орбита снижается, и приблизительно через 50 млн лет он упадет на Марс. Деймос же медленно удаляется от Марса.

6.37. Пропал Фобос

Из воспоминаний участника первой экспедиции на Марс: «Ну и шутник этот Фобос; никогда не забуду своей первой встречи с ним. На поверхность Марса мы опустились под вечер. Я решил не терять времени и уже в темноте вышел из корабля и занялся обустройством лагеря. Установил, как полагается, флаг; повесил табличку <До Земли 100 000 000 км>; сориентировался по звездам и стал на песке стрелки рисовать — север, юг, восток, запад. И вдруг, прямехонько на западе, поднимается из-за горизонта светило. Я уж подумал, что ошибся с “географией”, но вспомнил,

что это, должно быть, Фобос. Полюбовался его быстрым восходом и вновь занялся делами. Минут через 40 смотрю, а он уже высоко — на полпути к зениту. Отвлекся это я ненадолго (нужно было образцы в контейнер сложить), поднимаю голову — нет Фобоса! Что за шутки, куда спутник делся? Я, конечно, не астроном, а геолог, но тоже понимаю, что спутник не птичка, куда хочешь не полетит, ему по законам механики двигаться положено. На всякий случай я этот факт в диктофон записал и своими делами занялся. Думаю, около часа прошло, пока я все контейнеры заполнил и к кораблю отнес. Решил немного отдохнуть, поднимаю голову — вот же он, Фобос! Висит, как ни в чем не бывало, только уже к востоку склонился, на закат, значит, движется. Признаюсь, тогда я ничего понять не смог. Но позже астрономы мне все объяснили. Теперь мы с Фобосом друзья; очень полезный для космонавтом спутник. Я теперь по нему календарь вести могу — марсианские сезоны определять».

А вы, уважаемые любители астрономии, можете объяснить странное поведение Фобоса? Почему он восходит на западе и заходит на востоке? Куда он неожиданно пропадает? Как определить сезон, наблюдая за Фобосом?

Решение: Фобос в своем орбитальном движении опережает суточное вращение Марса, поэтому он восходит на западе и заходит на востоке. Неожиданное исчезновение спутника вызвано его заходом в тень планеты. Поскольку орбита Фобоса практически лежит к плоскости экватора Марса и проходит сравнительно близко к поверхности планеты, он регулярно попадает в ее тень в периоды равноденствий, но минует тень планеты летом и зимой. Постарайтесь проверить все эти утверждения собственными вычислениями. Возможно, вы обнаружите новые удивительные особенности в поведении Фобоса.

6.38. Столкновение с кометой

В 2024 г. астрономы заметили гигантскую комету, направляющуюся в сторону Земли. По предварительным оценкам радиус ее ядра составлял 300 км, но мог достигать и 500 км! В одном из газетных сообщений об этом было сказано: «Ученые сообщают, что период обращения этой кометы составляет несколько тысячелетий. Пршлое ее появление вблизи Земли, вероятно, вызвало Всемирный потоп, описанный в Библии, а в этот раз неминуемо произойдет столкновение с кометой, отчего Земля сойдет со своей орбиты и упадет на Солнце». Предположим на секунду, что действительно произойдет столкновение Земли с кометой; упадет ли от этого наша планета на Солнце?

Решение: Диаметр Земли (12 742 км) более чем в 12 раз превышает возможный диаметр ядра кометы, плотность Земли ($5,5 \text{ г/см}^3$) тоже выше, чем у ядер комет ($1,5\text{--}2 \text{ г/см}^3$). Поэтому масса Земли более чем в 2 000 раз больше массы кометы. Поскольку комета движется по эллиптической орбите, ее скорость у Земли не может быть больше третьей космической (скорость ухода с орбиты Земли, равная 42 км/с). Поэтому, даже если комета ударит Землю «в лоб», орбитальный момент импульса планеты изменится не более чем на 1/1 000 долю. А для падения Земли на Солнце, практически, необходимо остановить орбитальное движение Земли. Следовательно, столкновение даже с гигантской кометой почти не изменит параметры земной орбиты.

6.39. Вечная весна

«Какие же удивительные подвиги может совершить человек теперь, а тем более в будущем? Изменит ли он наклон земной оси, чтобы на всей планете установить праздник вечной весны?» Можно ли при каком-нибудь постоянном наклоне земной оси к плоскости ее орбиты добиться на всей поверхности земного шара «вечной весны»? [6, № 78]

Решение: Действительно, если бы удалось «выровнять» земную ось, сделав ее перпендикулярной плоскости орбиты, то Земля вечно освещалась бы Солнцем так, как она освещается в дни весеннего и осеннего равноденствия. Таким образом, наша планета была бы в состоянии вечной весны (или осени).

6.40. Солнечный Кавказ

«На Кавказе Солнце — два наших Солнца! — воскликнул москвич». Приняв среднюю широту Кавказа за 43° , проверьте, насколько это заявление отклоняется от действительности [6, № 89].

Решение: Сначала сравним освещенность горизонтальной земной поверхности Солнцем в летний полдень в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$) и на Кавказе ($\varphi \approx 43^\circ$). Пусть это будет день летнего солнцестояния; тогда максимальная высота Солнца в Москве будет $57^\circ 41'$, а на Кавказе около 70° . Поскольку площадь проекции земной поверхности пропорциональна синусу угла падения на нее солнечных лучей, найдем отношение синусов этих углов: $0,942/0,845 = 1,12$. Итак, поток солнечного света на Кавказе всего на 12 % больше, чем в Москве, но почему-то москвичи едут греться на Кавказ! Парадокс? Нет, просто неполное решение задачи.

Нужно было сравнивать не мгновенные потоки тепла, а среднесезонную или среднегодовую инсоляцию. Она зависит от длительности светлого времени суток, прозрачности атмосферы, облачности, высоты над уровнем моря и т. п.

Оказывается [33], что на указанных широтах среднегодовая инсоляция за пределом атмосферы различается на 25 %, у поверхности на уровне моря на 50 %, а с учетом горного рельефа Кавказа — почти вдвое. Выходит, прав был москвич!

6.41. Танец Венеры

Предположим для простоты, что Венера и Земля движутся по круговым компланарным орбитам.

- Какова лучевая (радиальная) скорость Венеры относительно Земли в верхнем и нижнем соединениях?
- Каковы максимальная и минимальная лучевая скорость Венеры относительно Земли и в каких конфигурациях Венеры они наблюдаются?

Решение: а) Нулевая. б) Пусть V_v — орбитальная скорость Венеры, а V_{\oplus} — Земли; r_v — радиус орбиты Венеры (0,72 а. е.), а r_{\oplus} — Земли. Тогда их относительная лучевая скорость составляет

$$\Delta V = \left(V_v - V_{\oplus} \frac{r_v}{r_{\oplus}} \right) \sin \alpha = \left(V_v \frac{r_{\oplus}}{r_v} - V_{\oplus} \right) \sin \beta,$$

где β — геоцентрический угол между направлениями на Солнце и Венеру, α — Солнце—Венера—Земля. Очевидно, максимальное (по модулю) значение Δ достигается при $\alpha = 90^\circ$, которому соответствует $\beta = 46^\circ$ — наибольшая элонгация Венеры в этой модели (для реальных орбит она достигает 48°):

$$\Delta_{\max} = V_v - V_{\oplus} \frac{r_v}{r_{\oplus}} = \pm 13,4 \text{ км/с.}$$

Таким образом, в наибольшей восточной элонгации Венера имеет лучевую скорость относительно Земли $-13,4$ км/с, а в наибольшей западной элонгации $+13,4$ км/с. В этом диапазоне лежат все значения лучевой скорости Венеры.

6.42. Терминатор на Луне

Какова ширина лунного терминатора?

Решение: На поверхности планеты или спутника терминатором называют линию перехода от дня к ночи. Если бы поверхность была

гладкая, а Солнце имело бесконечно малый угловой размер, то ширина терминатора была бы нулевая. Конечный угловой размер светила делает терминатор размытой полосой, планетоцентрическая угловая ширина которой равна угловому диаметру Солнца ($0,5^\circ$). На поверхности гладкой Луны этому углу соответствует отрезок в 15 км. Земному наблюдателю он виден под углом $8''$, неразличимым не только невооруженным глазом, но и в бинокль. Именно поэтому лунный терминатор кажется нам абсолютно резкой границей между лунным днем и лунной ночью.

Значительно сильнее искривляют и размывают терминатор неровности лунной поверхности. Если вспомнить решение задачи 1.27, то легко понять, что лунную вершину высотой H заходящее Солнце может осветить на расстоянии $L = \sqrt{(R+H)^2 - R^2} \approx \sqrt{2RH}$ от формального терминатора (здесь $R = 1737$ км — радиус Луны). Скажем, вершину высотой $H = 6,5$ км солнечный луч заденет на расстоянии 150 км от математического терминатора. Это расстояние, вообще говоря, заметно для зоркого глаза и уж подавно — в бинокль.

6.43. Движение планет

Если представить себя на северном полюсе Солнца, то в какую сторону будут обращаться вокруг него планеты — по направлению движения часовой стрелки или против него? [6, № 225]

Решение: Против часовой стрелки.

6.44. Фазы планет

У внутренних планет — Меркурия и Венеры — наблюдаются фазы; наблюдаются ли они у внешних планет? [6, № 226]

Решение: Наблюдаются, но сколько-нибудь заметны лишь у Марса.

6.45. Солнечное тяготение

С какой силой вас притягивает Солнце: килограммы (т. е. десятки ньютонов), граммы, миллиграммы?

Решение: При массе вашего тела в 50 кг сила притяжения, действующая на вас со стороны Солнца составляет

$$\frac{GmM}{R^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2\text{кг}^{-2} \times 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} \times 50 \text{ кг}}{1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^2} = 0,3 \text{ Н.}$$

Это около 30 г; столько весит магнитофонная кассета — вполне ощутимая сила.

6.46. Приливы будущего

При нынешнем положении Луны океанские приливы и отливы чередуются приблизительно через каждые 6 часов и вдали от берега имеют высоту около 50 см. А как бы изменились высота и промежуток времени между приливами, будь Луна вдвое дальше от Земли?

Решение: Период между приливами почти не изменился бы (ведь он определяется в основном вращением Земли), а высота лунных приливов уменьшилась бы значительно. Сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами ($\propto 1/R^2$), а приливы возникают из-за различия этой силы на разных сторонах Земли, которое определяется отношением размера Земли к ее расстоянию до Луны (R_{\oplus}/R); поэтому величина приливного эффекта меняется как $1/R^3$ [13]. При удалении Луны вдвое ее приливное влияние уменьшится в $2^3 = 8$ раз. Во столько же раз уменьшится высота лунных приливов. Но поскольку существуют еще и солнечные приливы, уступающие сегодня лунным вдвое по высоте, то именно они стали бы определяющими, а лунные — второстепенными.

Итак, высота приливов уменьшилась бы вдвое и они стали бы не лунными, а солнечными. Кроме этого, немного укоротился бы период приливов, поскольку Луна кульминирует через каждые 24 часа 50 минут, а Солнце — ровно через 24 часа. Наконец, различие между сизигийными приливами (когда влияние Солнца и Луны складывается) и квадратурными приливами (когда оно вычитается) стало бы вдвое меньше, чем сейчас.

6.47. Энергия приливов

Приливно-отливное «дыхание» океана приводит к выделению большой энергии, часть которой даже используется людьми при помощи специальных приливных электростанций. Что служит источником этой энергии?

Решение: Источником энергии приливов служит вращение Земли. Под влиянием приливов вращение Земли понемногу замедляется.

6.48. Приливы затмений

Каковы бывают приливы и отливы в дни солнечных и лунных затмений? [6, № 235]

Решение: Это максимально сильные, сизигийные приливы и отливы. Возможно даже чуть более сильные, чем обычно, поскольку Луна и Солнце устанавливаются точно на одной прямой линии с Землей.

6.49. Прилив молодой Луны

«Прошлою ночью я видел Луну, ей всего четыре дня от роду, и она похожа на выгнутую хирургическую иглу, но в ней уже достаточно силы, чтобы притянуть темные воды прилива к устью моей пещеры». Правильно ли понимает автор причину возникновения приливов? [6, № 233]

Решение: Нет. Надо полагать, что он приписывал увеличение приливообразующей силы Луны росту ее видимой части.

6.50. Вечная ночь

Как должна была бы обращаться вокруг Земли Луна, чтобы одна ее половина никогда не освещалась Солнцем? [6, № 257]

Решение: На первый взгляд ответ прост: не важно, как обращается Луна вокруг Земли, главное — как она вращается по отношению к Солнцу. Если за год Луна совершает вокруг своей оси один оборот (разумеется, в восточном направлении), то одно ее полушарие всегда будет повернуто к Солнцу, а другое — всегда в тени. Но есть две проблемы, которые мешают принять это решение. Во-первых, движение Луны по ее нынешней орбите вокруг Земли вызывает для наблюдателя на Луне параллактическое «покачивание» Солнца с периодом в месяц на угол $\pm 57,3^\circ \times 0,384/150 = \pm 8,8'$. Именно на столько вечнотемное полушарие окажется меньше освещаемого.

Чтобы уменьшить параллактический угол, можно было бы сократить радиус лунной орбиты, приблизив ее к Земле. Но тогда еще острее стала бы вторая проблема — приливное влияние Земли на Луну. Именно оно давно уже синхронизовало осевое вращение Луны и ее обращение по орбите. Заставить Луну вращаться несинхронно — задача непростая. А нет ли такой орбиты, на которой Луна могла бы всегда быть обращенной одной стороной к Солнцу и одной же стороной — к Земле, да еще и не испытывать параллактического колебания относительно направления на Солнце?

Оказывается, такая орбита есть. Она проходит на расстоянии около 1,5 млн км от Земли (см. задачу 5.22). Двигаясь по ней, Луна будет постоянно располагаться на линии «Земля—Солнце», а значит, ее синхронное с орбитальным осевое вращение обеспечит постоянную ориентацию одного ее полушария на Землю, а второго — на Солнце. (А почему не одного и того же полушария?)

6.51. Форма Сатурна

Чем можно объяснить, что Сатурн при меньшей скорости вращения вокруг оси, чем у Юпитера, все-таки более сжат у полюсов, чем Юпитер? [6, № 265]

Решение: Меньшей средней плотностью Сатурна. Форма вращающегося жидкого тела определяется отношением центробежной силы на экваторе (F_c) к силе тяжести (F_g). Чем больше отношение F_c/F_g , тем сильнее сжата у полюсов планета. При массе планеты M , радиусе R и периоде вращения P центробежное ускорение равно $4\pi^2 R/P^2$, а ускорение силы тяжести GM/R^2 . Следовательно, отношение

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{4\pi^2 R^3}{GMP^2} \propto \frac{1}{\rho P^2},$$

где ρ — средняя плотность планеты. Сравнив эти отношения для Юпитера ($\rho = 1,33$ г/см³, $P = 0,41354$ сут) и Сатурна ($\rho = 0,70$ г/см³, $P = 0,44401$ сут), мы увидим, что у Сатурна оно в 1,65 раза больше, чем у Юпитера. Поэтому и сжатие Сатурна у полюсов больше.

6.52. Одинокая Луна

Один фантастический роман, в котором описывается гибель всего живого на Земле вследствие внезапного угасания Солнца, заканчивается такими словами: «Только серебристая Луна освещала мрачные оледенелые просторы мертвой Земли». Что можно сказать по поводу этого описания? [6, № 261]

Решение: Автор забыл, что Луна светит отраженным светом Солнца.

6.53. Синхронный Меркурий

Луна обращается вокруг Земли, будучи повернута к ней одной и той же стороной, поэтому мы не можем видеть другую ее сторону. В первой половине XX века астрономы полагали, что Меркурий обращается подобным же образом вокруг Солнца.

Если бы это действительно было так, то позволило бы это нам видеть все части поверхности Меркурия? [6, № 268]

Решение: Нет, так как мы можем видеть только освещенные Солнцем части Меркурия.

6.54. Венера и Галилей

Когда Галилей в свой телескоп обнаружил фазы Венеры, подобные фазам Луны, то это послужило одним из доказательств того, что Венера обращается не вокруг Земли, как до тех пор думали, а вокруг Солнца. Как же это выяснилось? [6, № 273]

Решение: Если бы Венера обращалась вокруг Земли, ее фазы по своему внешнему виду и последовательности напоминали бы фазы Луны, а они изменяются в обратной последовательности. Более того, фазы Венеры никогда не достигали бы даже «четвертей», а в действительности ее можно видеть даже в фазах, близких к «полнолуннию» (в период верхнего соединения с Солнцем).

6.55. Видимое ничто

Как было доказано, что кометы обладают такой малой массой, что один астроном даже назвал их «видимое ничто»? [6, № 291]

Решение: Кометы не вызывают ни каких возмущений в движении планет, возле которых они проходят.

6.56. Супер-комета

«Если хочешь увидеть комету, достойную внимания, надо выбраться за пределы нашей Солнечной системы, туда, где они могут развернуться, понимаешь? Я, друг мой, повидал так такие экземпляры, которые не могли бы влезть даже в орбиты наших самых известных планет — хвосты у них обязательно свисали бы наружу». Разберитесь в правдивости этого высказывания [6, № 294].

Решение: За пределом Солнечной системы и вдали от других звезд кометы не имеют хвостов и представляют холодные глыбы льда ничтожного размера.

6.57. Комета-гостя

Комета движется вокруг Солнца, имея в данный момент скорость 566 км/с и радиус-вектор 0,005543 а. е. Определить эксцентриситет кометной орбиты [4, № 710].

Решение: Вспомним, что средняя скорость движения Земли по орбите 29,79 км/с, следовательно, скорость освобождения с орбиты Земли составляет $\sqrt{2} \times 29,79 = 42,13$ км/с. А на расстоянии 0,005543 а. е. скорость освобождения составит $42,13/\sqrt{0,005543} = 565,9$ км/с. Таким образом, вблизи Солнца скорость кометы чуть-чуть превышает параболическую. Но если вспомнить, что масса Солнечной системы чуть-чуть больше массы самого Солнца, то можно с большой точностью считать, что комета движется по параболической орбите.

6.58. К центру Земли!

Фирма «Super-Deer» объявила о новом грандиозном проекте: предполагается вырыть шахту глубиной 3 км, на дне которой «горняки смогут голыми руками загребать несметные богатства Земли». Оцените перспективу этого проекта.

Решение: Главная проблема в том, что с углублением в земную кору быстро повышается температура пород: средний геотермический градиент составляет 33 метра на градус. Поэтому на глубине 3 км температура породы составит около 100 °С. В таких условиях человек работать не может, тем более — голыми руками.

6.59. Климат Земли

Влияет ли прецессия на сравнительный солярный (т. е. обусловленный лишь астрономическими причинами) климат Северного и Южного полушарий Земли? [4, № 373]

Решение: Да, потому что из-за эллиптичности земной орбиты меняется расстояние от Солнца, на котором, например, в Северном полушарии наступает лето.

6.60. Параллакс Солнца

Для определения расстояния от Земли до Солнца, которое выводится из горизонтального параллакса Солнца, астрономы в продолжение нескольких столетий применяли способ Галлея. Он заключается в том, что в момент прохождения Венеры по диску

Солнца это явление наблюдается из разных мест на Земле и таким образом определяется параллакс Венеры, а затем с помощью 3-го закона Кеплера вычисляется и параллакс Солнца. Объясните, почему для определения параллакса Солнца по способу Галлея используют только Венеру, но не Меркурий? [4, № 496]

Решение: Потому что в момент прохождения по диску Солнца Венера вдвое ближе к Земле, чем Меркурий, поэтому относительная ошибка измерения ее параллакса (а значит, и параллакса Солнца) вдвое меньше.

6.61. Пространство — время

На сколько изменится продолжительность года, если расстояние Земли от Солнца увеличится на 1 км?

Решение: Используем третий закон Кеплера для связи периода и радиуса орбиты ($T^2 \propto R^3$). Определим, как при этом небольшое изменение R отразится на T . Читателям, знакомым с основами математического анализа, достаточно взять производные от R и T ; а те, кто не знаком с дифференцированием, могут использовать бином Ньютона для $(R + \Delta R)^3$ и $(T + \Delta T)^2$. Оба метода дадут связь:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{3}{2} \frac{\Delta R}{R}.$$

Отсюда $\Delta T = 1,5(\Delta R/R)$ года = 10^{-8} года = $1/3$ секунды.

6.62. Тропик на полярном круге

При каком наклоне земной оси к плоскости ее орбиты южный полярный круг совпал бы с тропиком Козерога? [4, № 513]

Решение: При наклоне 45° .

6.63. Загадка Перельмана

Чем объяснить следующее явление: с января по июнь мы ближе к Солнцу в полдень, чем вечером, а с июля по декабрь мы ближе к нему вечером? [4, № 552]

Решение: Если бы орбита Земли была круговой, то независимо от времени года в полдень мы были бы ближе к Солнцу, чем вечером. Благодаря эллиптичности земной орбиты, наша планета в первой

половине года удаляется от Солнца, а во второй половине — приближается. При этом в среднем за полгода — с начала июля по начало января — увеличение радиуса-вектора Земли за $1/4$ суток больше радиуса Земли, на который за это время меняется расстояние до Солнца благодаря суточному вращению Земли.

Однако, здесь необходимо уточнение. Изменение расстояния Земли от Солнца происходит с переменной скоростью; когда сближение сменяется удалением (в начале января) и наоборот (в начале июля) эта скорость равна нулю. Затем она постепенно нарастает и в промежутке между этими датами достигает максимума. Поэтому в действительности мы ближе к Солнцу вечером, чем в полдень, лишь с середины августа до начала декабря.

6.64. Лунное движение

В чем причина, что от новолуния до полнолуния проходит иногда на сутки больше, чем от этого полнолуния до следующего новолуния? [4, № 608]

Решение: Главные причины — эллиптичность лунной орбиты и неравномерность движения по ней Луны. Максимум этого эффекта наступает тогда, когда направление на Солнце перпендикулярно большой оси лунной орбиты.

6.65. Странные метеоры

Как вы объясните следующую закономерность, отмеченную при наблюдении метеоров: если метеоры вспыхивают неярко и движутся по небу сравнительно медленно, то максимум такого метеорного потока наступает резко и быстро заканчивается; а если метеоры быстрые и вспыхивают ярко, то максимум такого потока медленно наступает и медленно спадает.

Решение: Все три явления — скорость метеора, яркость его вспышки и характер возрастания и спада потока зависят от того, как Земля пересекает метеорный рой. Если под большим углом, то пересекает его за короткое время, максимум наступает и спадает быстро, но относительная скорость Земли и метеорных частиц невелика, поэтому метеоры медленные и неяркие. А если направление движения роя и Земли почти совпадают и частицы летят навстречу Земле, то метеоры яркие и быстрые, но пересечение роя длится долго и максимум развивается медленно.

6.66. Эффект Ярковского

Многие любители астрономии, очевидно, помнят заметку в журнале «Звездочет» (www.astronomy.ru) № 5, 1999 г.:

«О забытом эффекте, открытом сто лет назад русским инженером Ярковским, напомнили 5 марта в журнале Science астрономы Паоло Фаринелла (Университет Триеста, Италия) и Давид Вокроухлицкий (Карлов университет, Прага, Чехия). Сущность эффекта Ярковского состоит в том, что освещенная Солнцем поверхность астероида нагревается, а когда вращение уносит ее в тень, излучает накопленное тепло в инфракрасном диапазоне. Поток теплового излучения действует как реактивный двигатель и немного изменяет орбиту астероида. Величина изменения зависит от размеров и тепловых свойств малой планеты.

Эффект Ярковского очень слаб, поэтому им обычно пренебрегают. Однако, по мнению авторов статьи в Science, за время “спокойной”, то есть лишенной столкновений жизни небольшого (до 20 км в диаметре) астероида едва заметная сила, вызванная эффектом, может постепенно изменять его орбиту. В результате этого эффекта малые планеты из главного пояса астероидов попадают в гравитационный резонанс с Марсом, и его притяжение выбрасывает их к Земле. Таким образом, забытое открытие русского ученого может оказаться важным фактором в пополнении семейства малых планет, сближающихся с Землей и, следовательно, потенциально опасных для нашей цивилизации».

Вопросы нашей задачи состоят в следующем:

- как влияет направление вращения астероида вокруг собственной оси на его перемещение в Главном поясе под действием эффекта Ярковского?
- какие из астероидов приближаются к Марсу, а какие — к Юпитеру?
- что можно сказать о влиянии этого эффекта на спутники планет?

Решение: Рассмотрим наиболее простой случай: ось вращения астероида параллельна его орбитальной оси. Тогда прямое вращение астероида (в направлении орбитального обращения) отклоняет его «фотонный двигатель» по курсу назад и таким образом ускоряет движение астероида, поднимая его орбиту и уводя его в сторону Юпитера. Соответственно, обратное вращение астероида за счет фотонной отдачи приближает его к Марсу.

Влияние эффекта Ярковского на движение спутников планет ослаблено тем, что при медленно меняющемся направлении фотонного импульса отдачи (с орбитальным периодом планеты) направление движения спутника меняется быстро (с орбитальным периодом спутника). Вероятно, наиболее сильное влияние этот эффект оказывает на мелкие спутники Сатурна, входящие в состав его кольца. Тень

планеты, в которую на каждом обороте попадают частицы кольца, дает преимущество обращенной к Солнцу дуге орбиты. Поскольку вблизи планеты приливные силы синхронизируют орбитальное и осевое вращение частиц, влияние эффекта Ярковского на этой дуге орбиты тормозит движение спутника. Следовательно, в целом эффект Ярковского вызывает приближение таких спутников к поверхности планет.

6.67. Столкновение на орбите

Вокруг Солнца по одной и той же эллиптической орбите, но в разных направлениях движутся два одинаковых астероида. В какой-то момент они сталкиваются, и их многочисленные осколки разлетаются с одинаковыми скоростями во всевозможные стороны. Какова судьба этих осколков?

Решение: Поскольку полная энергия астероидов (кинетическая плюс гравитационная потенциальная) была отрицательна, то и их осколки не покинут Солнечную систему. Когда астероиды столкнулись, их скорости были одинаковы по модулю и направлены в противоположные стороны; следовательно, их центр масс покоился. Значит, наша задача сводится к выяснению судьбы множества частиц, стартовавших из одной точки одновременно с одинаковыми по модулю скоростями.

Из любого учебника по небесной механике (например, [35]) мы узнаем, что большая полуось эллиптической орбиты (a) связана с массой центрального объекта (M), расстоянием до него (R) и скоростью старта (V) соотношением

$$\frac{GM}{a} = \frac{2GM}{R} - V^2$$

независимо от направления скорости. Отсюда следует, что большие полуоси орбит всех разлетевшихся частиц будут одинаковы. С другой стороны, как известно, орбитальный период (P) тела на эллиптической орбите составляет

$$P = 2\pi \left(\frac{a^3}{GM} \right)^{1/2}.$$

Таким образом, описав полный оборот по своим (разнообразным!) орбитам все частицы, кроме тех, траектории которых пересекутся с поверхностью Солнца, одновременно соберутся в точке старта, т. е. там, где до этого произошло столкновение их родительских астероидов. Любопытно было бы на это посмотреть; вероятно, это напоминало бы пущенное назад кино о том, как со стола падает и разбивается стакан.

6.68. Эффект П-Р

Как известно, луч света, падая на предмет, оказывает на него давление. Если свет полностью поглощается предметом, то это давление равно W/c , где W — мощность луча, c — скорость света. Если луч отражается обратно, то давление удваивается. Для тела, движущегося по орбите вокруг звезды, давление ее излучения немного ослабляет притяжение звезды; для микроскопических частиц космической пыли давление света может полностью уравновесит гравитацию или даже превзойти ее: в этом случае частица не сможет обращаться вокруг звезды, а будет ею отброшена (оцените размер таких частиц, например, для Солнца). Но для крупных частиц давление света практически не ослабляет тяготение звезды и, казалось бы, влиянием излучения можно пренебречь. Но это не так.

Вспомним, что относительное движение источника света и наблюдателя приводит к абберации света: направление луча изменяется так, что изображение источника смещается к апексу движения наблюдателя на угол V/c , где V — скорость движения. Следовательно, для тела, обращающегося вокруг звезды, направления силы тяготения и силы лучевого давления не лежат на одной прямой, а различаются на угол V/c , причем давление излучения всегда тормозит тело; астрономы называют это эффектом Пойнтинга—Робертсона. Оцените, для тел какой массы этот эффект мог играть важную роль в процессе эволюции Солнечной системы.

Решение: Пусть тело массы m и плотности ρ движется со скоростью V по круговой орбите вокруг Солнца. Вычислим составляющую лучевого давления, тормозящую это тело:

$$F = \frac{V}{c} \frac{W}{c} = \frac{V}{c} \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2 c} \pi r^2,$$

где L_{\odot} — светимость Солнца, R — радиус орбиты, $r = (3m/4\pi\rho)^{1/3}$ — радиус тела. Чтобы движение тела существенно изменилось, необходимо чтобы его орбитальный момент импульса (mVR) стал близок к произведению момента тормозящей силы (FR) на время жизни Солнечной системы (t). Отсюда найдет минимальную массу тела, на орбиту которого существенно повлияет эффект Пойнтинга—Робертсона:

$$m = \left(\frac{L_{\odot} t}{4R^2 c^2} \right)^3 \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^2.$$

Для тела со средней плотностью $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$ и времени жизни Солнечной системы $t \approx 5 \cdot 10^9$ лет получим простое выражение для критической массы тела:

$$m = 5 \text{ т} \left(\frac{1 \text{ а. е.}}{R} \right)^6.$$

Как видим, внутри орбиты Земли все древние метеороиды с массой менее 5 т должны были затормозиться и упасть на Солнце. Поэтому сразу можно сказать, что наблюдаемые нами метеоры и болиды образуются не древними частицами, сопровождавшими Землю по орбите миллиарды лет, а иными, пришедшими и внешних областей Солнечной системы.

6.69. Загадка Марса

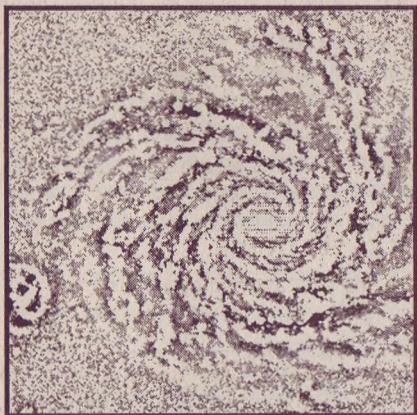
Если бы Марс был ближе к Солнцу, то его атмосфера стала бы более или менее плотной?

Решение: Если бы Марс был ближе настолько, что испарились бы его полярные шапки и дегазировалась поверхность (т.е. испарилась вечная мерзлота и слабо связанная в породах вода), то атмосфера планеты стала бы более плотной. Но если бы он приблизился к Солнцу слишком сильно, то атмосфера бы диссипировала в межпланетное пространство (как у Меркурия).

6.70. Антипарник

Предположим, что атмосфера планеты не пропускает видимый свет, но прозрачна для инфракрасного излучения. Как такая атмосфера повлияет на температуру планеты? Сравните с парниковым эффектом.

Решение: По сравнению с чернотельной (T_b), температура станет ниже, но насколько — это зависит от механизма непрозрачности атмосферы. Если она зеркально отражает солнечный свет обратно (белые облака), то температура может опуститься очень сильно. А если полностью поглощает свет и переизлучает его в ИК, то половина попадает на поверхность планеты и температура опуститься несильно ($T = T_b \cdot 0,5^{1/4} = 0,84T_b$). Для Земли это $T_b - T = 48$ К.



Глава 7

Мир звезд и галактик

7.1. Двойная — глазом

У каких двойных звезд составляющие их компоненты различимы даже невооруженным глазом? [6, № 299]

Решение: При хорошем зрении можно различить Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы, а также Эпсилон Лиры (около Веги).

7.2. Погаснет ли Солнце?

В лекции американского физика-теоретика, специалиста по теории элементарных частиц (в частности, автора идеи кварков) Марри Гелл-Мана [20] при обсуждении проблемы дефицита солнечного нейтрино сказано следующее:

«Если бы термоядерный реактор в центре Солнца перестал действовать — навсегда или временно, — мы немедленно узнали бы об этом по прекращению испускания Солнцем нейтрино. Но потребовалось бы около миллиона лет, чтобы эта “новость” достигла поверхности Солнца, — и его электромагнитное излучение прекратилось бы. Фаулер предположил, что сейчас мы находимся где-то в пределах этого миллионлетнего периода. Когда же об этом “станет известно” на поверхности Солнца, оно прекратит испускать электромагнитное излучение, и тогда мы окажемся действительно в серьезном энергетическом кризисе?»

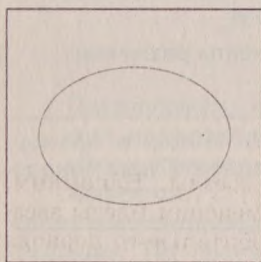
Правильно ли Гелл-Ман описал поведение Солнца в случае гипотетического отключения термоядерного реактора в его центре?

Решение: Описание Гелл-Мана неверно. При отключении термоядерного источника тепла его роль перейдет к гравитационному: сжатие Солнца под действием собственной силы тяжести будет поддерживать его высокую температуру и светимость до тех пор, пока вещество Солнца будет вести себя как обычный газ. Когда же увеличение плотности вещества в ядре приведет к резкому росту давления вырожденного электронного газа, сжатие остановится, и Солнце (теперь уже белый карлик) действительно начнет остывать.

7.3. Звездный танец

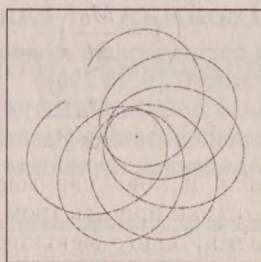
Какой из рисунков точнее изображает траекторию звезды в звездном скоплении, например, — в шаровом?

- 1 — эллипс (рис. 7.1);
- 2 — розетка перекрученная (рис. 7.2);
- 3 — розетка недокрученная (рис. 7.3);



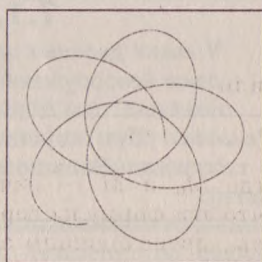
$$F=1/R^2$$

Рис. 7.1



$$F=1/R^{2.2}$$

Рис. 7.2



$$F=1/R^{3/2}$$

Рис. 7.3

Решение: Ответ: Розетка недокрученная.

Решение: Движение звезды по орбите в сферическом звездном скоплении отличается от движения, например, в двойной системе тем, что с приближением к центру скопления звезда испытывает притяжение лишь тех звезд, которые расположены ближе ее к центру скопления (теорема Ньютона). Поэтому кривизна ее траектории в районе перигентра орбиты меньше, чем была бы в случае кеплеровского движения по эллипсу. При этом ее орбита внешне похожа на эллипс, ось которого поворачивается в направлении, противоположном обращению звезды — «недокрученный эллипс». За несколько оборотов звезда описывает своеобразную розетку.

7.4. Звезда меняет массу

Планета движется по круговой орбите вокруг звезды. Каким станет эксцентриситет орбиты, если масса звезды мгновенно изменится в n раз?

Решение: Очевидно, если $n \neq 0$, то орбита планеты уже не будет круговой. Чтобы определить расстояние в перигелии (R_p) или афелии (R_a), запишем уравнение сохранения момента:

$$R_p V_p = R_a V_a$$

и уравнение сохранения энергии:

$$\frac{1}{2}(V_p^2 - V_a^2) = nGM_\odot \left(\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_a} \right),$$

где V_a и V_p — скорости в соответствующих точках. Учтем, что $V_a^2 = GM_\odot/R_a$. Решив эту систему уравнений, найдем, что $R_a/R_p = 2n - 1$ и эксцентриситет $e \equiv (R_a - R_p)/(R_a + R_p) = (n - 1)/n$.

Таким образом,

$$e^2 = \left(1 - \frac{M_0}{M} \right)^2,$$

или

$$e = \left| 1 - \frac{M_0}{M} \right|,$$

где M_0 и M — начальная и конечная масса звезды. Напомним, что эти формулы верны только при быстром изменении массы звезды, происходящим за время, много меньшее орбитального периода планеты. Практически так может произойти только взрыв звезды с соответствующей потерей массы ($M_0/M > 1$). Если при этом масса звезды уменьшится более чем вдвое, то орбита планеты станет незамкнутой ($e > 1$), т. е. планета навсегда покинет звезду.

7.5. Луна и Млечный Путь

Вот несколько описаний Млечного Пути писателями разных стран:

«А ночь была чудесная! На ясном, без единого облачка, глубоком небе, с россыпью звезд и туманной полосой Млечного Пути, сияла полная Луна?»

«Ночь была великолепная — теплая и ясная; Луна (было полнолуние) ярко сияла среди мерцающих звезд, и Млечный Путь переливался серебром?»

«Хлопец с трудом раскрыл отяжелевшие веки, но увидел только серый Чумацкий Шлях (Млечный Путь), пересекающий небо, и на нем месяц, блестевший истертой подковой?»

«Наступила ночь (в Индии). Над головой повисла серебряной лодочкой лежащая Луна. Млечный Путь поднялся мостом через весь небосвод от горизонта до горизонта. По сравнению с искрящимся звездным небом притихшая Земля казалась мрачной и угрожающей?»

Писатели, безусловно, не сговаривались между собой, однако их описания почти одинаковы. Такое сходство как будто говорит о верности описаний, и все же в них есть одна и та же ошибка. Найдите ее [6, № 300].

Решение: Свет далеких звезд, слагающих Млечный Путь, очень слаб. При лунном сиянии Млечный Путь не виден.

7.6. Далекое Солнце

Абсолютная звездная величина Солнца приблизительно равна 5^m . Могли бы современные астрономы, способные фиксировать звезды до 30^m , обнаружить звезду, аналогичную Солнцу, на другом конце Галактики? Принять, что диаметр Галактики составляет 24 кпк, а Солнечная система расположена на расстоянии 8 кпк от ее центра. Межзвездное поглощение света не учитывать.

Решение: Расстояние до звезды составляет $8 + 24/2 = 20$ кпк. По сравнению с расстоянием в 10 пк, для которого вычисляются абсолютные звездные величины, это в 2 000 раз больше. Значит блеск звезды будет ослаблен в $2\,000^2 = 4$ млн раз. Если ослабление в 100 раз соответствует увеличению на 5^m , то ослабление в 1 млн раз ($= 100 \times 100 \times 100$) — на 15^m . А в 4 млн раз — чуть менее чем на 17^m . Таким образом, блеск Солнца, удаленного на другой конец Галактики, составил бы $5^m + 17^m = 22^m$. Такой объект «по зубам» любому крупному телескопу.

7.7. Земля остановилась

Предположим, что Земля внезапно остановилась в своем движении по орбите и начала падать на Солнце. Как долго продолжалось бы это падение [1, 9.27].

Решение: Представим, что падение Земли на Солнце происходит не по радиусу, а по дуге предельно вытянутого эллипса с большой осью, соединяющей Солнце и место старта Земли (и малой осью практически равной нулю). Тогда время падения (t) будет равно половине орбитального периода по этому эллипсу, который легко

получить из 3-го закона Кеплера:

$$\frac{(1 \text{ год})^2}{(2t)^2} = \frac{(1 \text{ а.е.})^3}{(0,5 \text{ а.е.})^3},$$

откуда $t = 65$ сут. Итак, Земля падала бы на Солнце 2 месяца.

7.8. Новая звезда

Космонавты, долетевшие до α Сеп, осматривают небо. Вдруг они замечают новую яркую звезду, которой не было на земном небосводе. Что это за звезда и в каком созвездии она видна?

Решение: Двойную звезду α Сеп будем считать за одно «двойное солнце». Значит новыми яркими звездами на ночном небе могут быть только наше Солнце и далекий спутник α Сеп — Проксима Кентавра. Солнце очень похоже на α Сеп А, поэтому его блеск будет таким же, как у нее на нашем небе — около 0^m . Проксима имеет у нас 11^m и видна на расстоянии $2,2^\circ$ от α Сеп. Значит ее линейное расстояние от α Сеп не менее $1,3 \text{ пк}$ $2,2^\circ/57,3^\circ = 0,05 \text{ пк}$. Это больше, чем разница расстояний от Солнца до Проксими и до α Сеп ($\approx 0,02$) пк, поэтому ее можно не учитывать. Итак, Проксима в $1,3/0,05 = 25$ раз ближе к α Сеп, чем Солнце. На расстоянии Солнца она имела бы 11^m , а приближенная в 25 раз стала бы на 7^m ярче ($25^2 = 625 = 100 \times 6,25$). Значит она имела бы блеск около 4^m и не выделялась бы среди других звезд умеренного блеска. Итак, лишь Солнце оказалось бы новой яркой звездой на небе Альфы Кентавра.

Указать место Солнца среди звезд очень легко: если координаты α Сеп составляют $\alpha_{1950} = 14^h 36^m$ и $\delta_{1950} = -62^\circ 38'$, то Солнце будет в диаметрально противоположной точке неба с координатами $\alpha + 12^h$ и $-\delta$, т. е. $2^h 36^m$ и $62^\circ 38'$. Это созвездие Кассиопеи. При этом Солнце будет выглядеть значительно ярче главных звезд Кассиопеи, образующих фигуру «W» и имеющих блеск $2-3^m$, а фигура созвездия станет похожа на волну.

7.9. Звездный рой

В звездном скоплении Веснушки содержится 250 звезд, причем каждая из них имеет нулевую абсолютную звездную величину. Расстояние до скопления 1 кпк. Каков его блеск?

Решение: Абсолютная величина скопления $0^m - 2,5 \lg 250 = -6^m$. С учетом расстояния ($\text{mod} = +10$) получаем видимый блеск $+4^m$.

7.10. При свете Млечного Пути

В книге Саймона и Жаклин Миттон «Астрономия» встречаем такое утверждение: «пыль и газ рассеяны в глубинах космоса и загораживают от нас звезды Млечного Пути. Как много этого тумана находится в далеком пространстве? Он заслоняет так много света, что, если бы нам удалось каким-то образом сдуть его прочь, ты смог бы с легкостью читать ночью книгу при ярком свете одного лишь Млечного Пути». Насколько справедливо это утверждение?

Решение:

Кому-то светит Млечный Путь...

Диана Ромашина, 1989

Используем два способа:

1. Абсолютная звездная величина Галактики оценивается как -20 (Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии. М.: Наука, 1971, с. 556). Приняв формально расстояние Солнца от центра Галактики (около 10 кпк) как расстояние от источника света, получим видимую величину Галактики: $m = -20 + 5 \lg(10 \text{ кпк}/10 \text{ пк}) = -5$. Ясно, что это оценка снизу.

2. Если приблизиться к Туманности Андромеды с нынешнего расстояния 700 кпк до 10 кпк, то ее видимый блеск возрастет с 3^m до $3 - 5 \lg(700/10) = -6^m$. При этом часть ее излучения также поглощается пылью, хотя и гораздо меньше, чем в Галактике, поскольку мы находимся вне его слоя и наблюдаем галактику не с ребра.

Итак, можно принять с хорошей точностью, что в отсутствие пыли суммарный блеск звездного неба будет около $-5 \dots -6^m$. Это в сотни раз слабее полной Луны. А как известно, даже в полнолуние с трудом удается разобрать лишь крупный и четкий шрифт. Так что даже при полном отсутствии пыли Млечный Путь все равно был бы слабым источником света.

7.11. Супергравитация

Известный инженер и писатель-фантаст Артур Кларк в замечательной книге «Черты будущего» [17] утверждает, что техника уже кое в чем превзошла природу:

«Ультрацентрифуга Бимса, вращающаяся с колоссальной скоростью полтора миллиона оборотов в секунду (не в минуту!), создает ускорения величиной более одного миллиарда g . Уж здесь-то мы, во всяком случае, превзошли природу: крайне маловероятно, что где-либо во Вселенной существуют гравитационные поля, превосходящие по мощности земное поле больше чем к несколько сот тысяч раз?»

Согласны ли вы с этим утверждением?

Решение: Для своего времени (в оригинале книга Кларка вышла в 1962 г.) утверждение писателя было справедливым: самые сильные поля тяготения в те годы были известны на поверхности белых карликов. Поскольку эти звезды имеют массу, как у Солнца, а размер, как у Земли, ускорение силы тяжести вблизи их поверхности ($g = GM/R^2$) в сотни тысяч раз превосходит земное ($g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$).

Однако спустя пять лет, всего через год после выхода книги на русском языке, были открыты нейтронные звезды (как радиопульсары), которые при массе немногим больше солнечной имеют размер всего в несколько десятков километров, а значит ускорение свободного падения на их поверхности $g \sim 10_0^{12}$. Поэтому утверждение Кларка оказалось ошибочным.

7.12. Сверхновая в БМО

В 1987 г. на Земле наблюдалась вспышка сверхновой звезды в галактике Большое Магелланово Облако, удаленной от нас на 55 кпк. Когда в действительности произошел взрыв этой звезды?

Решение: Расстояние от Земли до галактики БМО составляет 55 000 кпк. Как известно, 1 кпк = 3,26 св. лет. Поэтому свет от взрыва звезды достиг Земли примерно через 180 000 лет после того, как он произошел. Вычислять точно год взрыва не имеет смысла, поскольку точность, с которой указано расстояние до галактики БМО, не превышает 2 %.

7.13. Какая звезда ярче?

Даны две звезды одинакового радиуса на одинаковом расстоянии от Земли, но температура поверхности у одной из них 20 000 К, а у второй 10 000 К. Какая из них ярче в оптическом диапазоне?

Решение: Первая звезда излучает больше во всех диапазонах спектра.

7.14. Вблизи мертвой звезды

Артур Кларк в книге «Черты будущего» описывает, в частности, последние этапы жизни звезд. Вот что он говорит об остывших белых карликах (напомню — в те годы еще не были известны нейтронные звезды и черные дыры):

«Такие “звездные трупы” будут принадлежать к числу самых замечательных (и самых мрачных) объектов Вселенной. Сочетание

огромной массы с ничтожными размерами обусловит существование на них гравитационных полей колоссальной мощности — в миллион раз мощнее, чем на Земле. Мир, в котором господствует такая тяжесть, должен быть идеально сферической формы: никакие горы и холмы не смогли бы подняться над его поверхностью больше, чем на несколько миллиметров, а толщина атмосферы составляла бы всего несколько метров.

При тяжести в миллион раз больше земной все тела, даже из крепчайшего металла, под воздействием собственного веса стали бы текучими, как жидкость, и растеклись бы в тонкую пленку. Человек в таких условиях весил бы столько же, сколько на Земле весит огромный морской лайнер; он расплющился бы под собственной тяжестью так быстро, что его разрушение нельзя было бы проследить невооруженным глазом: оно произошло бы менее чем за 0,001 секунды. Падение с высоты *один сантиметр* на звезде-карлике эквивалентно в земных условиях падению с вершины Эвереста до уровня моря.

И все же, несмотря на мощнейшее гравитационное поле, можно было бы приблизиться в подобному небесному телу даже на несколько сот метров. Космический корабль или космический зонд, запущенный по достаточно точно рассчитанной орбите, мог бы, во всяком случае теоретически, стремительно обернуться вокруг него, подобно тому как кометы проносятся вокруг Солнца.

Если бы вы находились на таком корабле, вы ничего особенного не почувствовали бы даже в момент максимального сближения. Под воздействием ускорения, равного миллиону g , вы оставались бы в состоянии полной невесомости, потому что совершали бы свободное падение?» [17, с. 144].

Все ли верно в этом описании?

Решение: Описывая полет вблизи поверхности компактной звезды, Артур Кларк забыл о приливном эффекте гравитационной силы. Напомню, в чем он заключается. Притяжение к точечной или сферической массе описывается законом Ньютона:

$$a = \frac{GM}{R^2},$$

где a — ускорение пробной частицы, G — постоянная тяготения, M — масса тела, R — расстояние частицы от его центра. Разница ускорений двух частиц (Δ), удаленных соответственно на расстояния R_1 и R_2 от массивного тела, составляет

$$\Delta = GM \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right).$$

Пусть расстояние между частицами значительно меньше их среднего расстояния от центра массивного тела: $\Delta R = (R_1 - R_2) \ll R_{\text{ср}} =$

$(R_1 + R_2)/2$. Тогда в формуле для Δa можно заменить произведение $R_1 R_2$ на $R_{\text{ср}}^2$ и получить простое выражение для взаимного ускорения пробных частиц:

$$\Delta a = \frac{2GM\Delta R}{R_{\text{ср}}^3}.$$

Это ускорение называют *приливным*, поскольку именно оно вызывает периодические колебания океанских вод вблизи берегов [13]. Это ускорение не перестает ощущаться при свободном падении космонавта и его корабля на звезду, поскольку это *разность* ускорений, действующих на тело в разных его частях.

Оценим приливное ускорение вблизи поверхности черного карлика. Массу звезды примем равной массе Солнца $1M_{\odot} = 3 \cdot 10^5 M_{\oplus}$. Поскольку ускорение у поверхности звезды $g = 10^6 g_{\oplus}$, радиус звезды составляет $R = \sqrt{0,3} R_{\oplus}$. Тогда приливное ускорение на разных концах тела длиной L составит

$$\Delta a = \frac{2GML}{R^3} = 4 \cdot 10^6 g_{\oplus} \frac{L}{R_{\oplus}}.$$

Для характерного размера человека $L = 1,5$ м получим $\Delta a \approx g_{\oplus}$. Это ускорение будет наблюдаться между крайними точками тела космонавта, рискнувшего пролететь вблизи поверхности черного карлика. Человек будет чувствовать себя как будто бы висящим на турнике, растянутый силой собственного (земного) веса. Разумеется, это не смертельно, но и невесомостью такое состояние назвать трудно.

7.15. Неразделимые

Какие космические объекты не могут быть разделены, тогда как их слияние возможно? [29, с. 7]

Решение: Такими свойствами обладают черные дыры.

7.16. Потемнение к краю

Почему солнечный диск выглядит ярче в центре, чем по краям:

Варианты ответа:

- а) центр солнечного диска горячее, чем его края;
- б) центр солнечного диска ближе к Земле, чем края;
- в) в центре мы видим более глубокие слои фотосферы;
- г) глаз человека в центре поля зрения чувствительнее, чем по краям;
- д) в телескопе любое изображение темнее у края поля зрения (эффект диафрагмирования наклонного пучка);
- е) солнечные лучи выходят перпендикулярно к его поверхности, поэтому лучи от краев диска на Землю не попадают.

Решение: Верен ответ «в»: наблюдая поверхность Солнца в центре диска, мы видим более глубокие, а следовательно, более горячие слои фотосферы. Дело в том, что, распространяясь перпендикулярно поверхности Солнца, эти лучи могут выйти с довольно большой глубины. А чтобы направиться в сторону Земли с края солнечного диска, лучам, родившимся на той же глубине, пришлось бы преодолеть гораздо большую толщину атмосферы — этому препятствует поглощение света вышележащими более холодными слоями газа.

7.17. Расстояния до звезд

«Достаточно сказать, что свет от ближайшей у Земле звезды доходит до нас только через восемь тысяч лет, а от дальних звезд через сотни тысяч», — говорится в одной повести 1887 г. Простительна ли автору его ошибка? [6, № 296]

Решение: Нет, так как в этом году расстояния до ближайших звезд были уже хорошо известны. Астрономы уверенно измеряли эти расстояния с 1840 г.

7.18. Первый закон Кеплера

Наблюдая визуально-двойную звезду с сильно вытянутой эллиптической орбитой, астроном заметил, что яркий компонент лежит в центре эллипса, а не в его фокусе. Следует ли из этого, что нарушен 1-й закон Кеплера?

Решение: Если орбита круговая, а ее видимая вытянутость вызвана лишь наклоном орбитальной плоскости к лучу зрения наблюдателя, то описанная ситуация вполне возможна без нарушения закона Кеплера.

7.19. Братья по разуму

Если наши «братья по разуму» с соседней звезды измеряют лучевую скорость Солнца с точностью 10 м/с, то смогут ли они заметить существование у Солнца планетной системы?

Решение: Если их звезда расположена вблизи плоскости эклиптики, то смогут. Основное влияние на Солнце оказывает Юпитер. Он и Солнце вращаются вокруг общего центра масс: Юпитер со скоростью 13 км/с, а Солнце со скоростью $V_{\odot} = V_{\text{Ю}} M_{\text{Ю}} / M_{\odot} = 13$ м/с.

Если эклиптическая широта «братьев» равна β , то проекция лучевой скорости Солнца на их луч зрения составляет $13 \text{ м/с} \cos \beta$. Значит, лишь при $\beta \geq 40^\circ$ они не смогут заметить периодического движения Солнца.

7.20. Колебания Солнца

Если жители планеты у звезды α Кентавра систематически измеряют положение Солнца с точностью $0,01''$, то смогут ли они заметить колебания в движении Солнца, вызванные обращением вокруг него планет Солнечной системы? Параллакс $\alpha \text{ Cen}$ составляет $p = 0,751''$.

Решение: Практически вся масса нашей планетной системы заключена в Юпитере, поэтому в подобных задачах можно рассматривать двойную систему Солнце—Юпитер, обращающуюся вокруг общего центра масс. Расстояние Солнца от центра масс $r_\odot = r_{\text{Ю}} M_{\text{Ю}}/M_\odot$, где $r_{\text{Ю}}$ — расстояние Юпитера от центра масс, практически совпадающее с радиусом его орбиты (5,2 а. е.). Тогда амплитуда углового перемещения Солнца при наблюдении с α Кентавра при расстоянии до нее D будет $\alpha = 206265'' r_\odot / D = p r_\odot \text{ (а. е.)} = p r_{\text{Ю}} \text{ (а. е.)} M_{\text{Ю}}/M_\odot$. Положив $M_\odot/M_{\text{Ю}} = 1000$, получим $\alpha = 0,751 \cdot 5,2/1000 = 0,004''$. Значит астрономы из системы α Кентавра не узнают, что у Солнца есть планеты.

7.21. Звезды сходятся и расходятся

В какой части неба, благодаря движению Солнечной системы в пространстве, угловые расстояния между звездами непрерывно увеличиваются и в какой они непрерывно уменьшаются? [4, № 1009]

Решение: Увеличиваются в той полусфере неба, где располагается солнечный апекс ($\alpha = 18^{\text{h}}00^{\text{m}}$, $\delta = +30^\circ$), т. е. в области созвездий Лиры и Геркулеса, а уменьшаются в противоположной части неба.

7.22. Цветные звезды

Ниже приведены фотографические и визуальные величины ярких звезд. Расположите эти звезды в порядке цвета — белые, желтые, оранжевые, красные [4, № 1058].

Таблица 7.1

Звезды	Звездные величины	
	фотографические	визуальные
Спика	0,94	1,21
Антарес	2,95	1,22
Альтаир	1,05	0,89
Капелла	0,88	0,21
Арктур	1,36	0,24
Ригель	0,30	0,34
α Кентавра	0,63	0,06

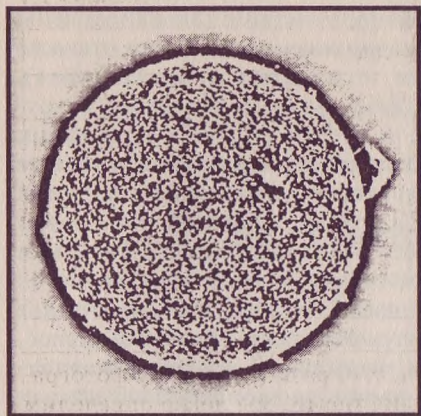
Решение: Используя показатель цвета, т. е. разность между фотографической и визуальной звездными величинами, мы легко определим эту последовательность: Спика, Ригель, Альтаир, α Кентавра, Капелла, Арктур, Антарес.

7.23. Новые законы Кеплера

Сформулируйте законы Кеплера для центральной силы, если ее значение изменяется пропорционально расстоянию: $F \sim R$.

Решение:

1. Планеты движутся по эллипсам, в центрах которых — Солнце.
2. За равные времена радиус-вектор заметает равные площади.
3. Период не зависит от размера орбиты.



Глава 8

Вокруг астрономии

Некоторые из этих задач могут показаться вам далекими от астрономии. Однако, не торопитесь с выводами. Занимаясь подготовкой к наблюдениям, изготовлением астрономических приборов, физическими и химическими опытами, решением задач практической и теоретической астрофизики, вы поймете, как полезно знать свойства материалов и конструкций, задумываться над обыденными явлениями и общеизвестными названиями, наблюдать за поведением знакомых тел в необычных условиях. Диапазон физических условий в космосе так велик, что лишь знакомство с широким кругом природных явлений и лабораторных опытов позволяет нам верно воссоздавать космические события в наших моделях.

В своей работе ученый использует два инструмента — знание и интуицию. Знания накапливаются в процессе учебы, переходя от учителя к ученику. А интуиция тренируется при постоянном самостоятельном поиске и решении задач. Их много не только в космосе, но и вокруг нас. Не проходите мимо!

8.1. Многополюсный мир

Сколько полюсов вы знаете на земном шаре? [18, с. 115]

Решение: Обычно в Арктике различают пять полюсов: географический, магнитный, холода, ветров и неприступности (или недоступности), которые довольно далеко отстоят друг от друга.

Через Северный географический полюс проходит ось вращения Земли; с ним связана сетка географических координат, в которой его собственные координаты всегда выражаются одним числом — широта $+90^\circ$.

Магнитными полюсами Земли называют точки на ее поверхности, в которых силовые линии магнитного поля Земли направлены вертикально. Поскольку в целом магнитное поле Земли похоже на диполь (или, что почти то же самое, на поле полосового магнита), то, по большому счету, таких точек две — одна в Северном, а другая в Южном полушариях. Правда, в местах сильных магнитных аномалий, таких как Курская, наблюдаются локальные магнитные полюсы, но обычно их не имеют в виду, говоря о магнитных полюсах Земли. Наименование магнитных полюсов со временем претерпело изменение: раньше магнитный полюс, расположенный в Северном полушарии, называли «южным», поскольку к нему притягивается северный конец стрелки компаса; однако, теперь это физическое определение не используют и по географической традиции полюс, находящийся в Северном полушарии, называют «северным магнитным полюсом Земли», а магнитный полюс, расположенный вблизи Антарктиды, называют «южным».

Полюсами холода называют районы с наиболее низкими температурами воздуха у земной поверхности в данном полушарии или на всем земном шаре. Северный полюс холода находится в Якутии, где наблюдаются наиболее низкие среднегодовые и среднемесячные температуры. Именно в Якутии, вблизи Верхоянска наблюдался абсолютный минимум температуры -68°C ; в Оймяконе даже в период потепления (в 1933 г.) также была зафиксирована температура около -68°C , а в более холодные годы она может по расчетам упасть до -71°C ; близкие минимальные температуры могут наблюдаться и в других межгорных котловинах Якутии. На ледниковом щите Гренландии отмечались абсолютные минимумы температуры ниже -65°C , поэтому Гренландию считают вторым полюсом холода Северного полушария. Практически там же, в центре Гренландии располагается и полюс ветров (подумайте, почему).

Полюсом неприступности Северного полушария долгое время называли совершенно неисследованный участок за Северным географическим полюсом.

В Южном полушарии, в Антарктике, большинство указанных полюсов приблизительно совпадают друг с другом: они находятся в районе Южного географического полюса, в сердце Антарктиды; и только магнитный полюс расположен обособленно. Южным полюсом холода считается станция «Восток», расположенная в Восточной Антарктиде на высоте около 3 500 м. Именно там была зафиксирована самая низкая температура воздуха на поверхности Земли, равная $-88,3^{\circ}\text{C}$. Там же, на ледниковом плато в Восточной Антарктиде, в конечном пункте санно-гусеничного похода 1958 г. была создана и две недели функционировала советская научная станция «Полюс недоступности». Она располагалась на высоте 3 719 м, в районе, наиболее удаленном от побережья ледового материка. Кстати, толщина ледникового покрова в районе станции составляет 2 980 м.

Разумеется, если существует «полюс холода», то должен быть и «полюс зноя». Многие географы считают, что он находится у города Массауа, расположенного на африканском берегу Красного моря, в северной части Эфиопии.

А какие еще полюсы на поверхности Земли вы могли бы выделить?

8.2. Опытный фотограф

В фотоателье пришел человек и попросил сфотографировать его во весь рост, а затем более крупным планом — только одно лицо. Хотя освещенность павильона оставалась неизменной и фотокамера была та же, делая второй снимок, фотограф счет необходимым несколько увеличить выдержку. Зачем он это сделал? [23, № 104]

Решение: Негативы обоих снимков будут одинаково плотными, если величина экспозиции останется неизменной. В фотографии под экспозицией (H) понимают величину, характеризующую количество света, полученное элементом поверхности фотоэмульсии:

$$H = E \cdot t,$$

где E — освещенность фотопленки, t — время экспонирования (выдержка).

Освещенность изображения прямо пропорциональна количеству световой энергии W , попадающей через объектив от предмета и обратно пропорциональна площади изображения s_1 :

$$E \propto \frac{W}{s_1}.$$

Если предмет излучает во все стороны приблизительно равномерно, то количество энергии, попадающее в объектив, прямо пропорционально телесному углу θ , под которым от предмета виден объектив:

$$W \propto \theta.$$

Считая площадь объектива равной s_0 и предмет удаленным от фотоаппарата на a_2 , получим для телесного угла приблизительно

$$\theta = \frac{s_0}{a_2^2}.$$

Комбинируя три последних выражения, имеем:

$$E \propto \frac{s_0}{s_1 a_2^2}.$$

Но площади предмета s_2 и его изображения s_1 относятся как

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{a_1^2}{a_2^2},$$

где a_1 — расстояние от объектива до фотопленки. Подставляя отсюда значение a_2^2 в выражение для E , получим:

$$E \propto \frac{s_0 s_1}{s_1 s_2 a_1^2} = \frac{s_0}{s_2 a_1^2}.$$

Так как s_0 и s_2 — постоянные величины, то

$$E \propto \frac{1}{a_1^2}.$$

Первое и последнее равенства вместе дают, что

$$t \propto a_1^2.$$

Но чем дальше удален фотографируемый объект (то есть чем больше a_2), тем меньше расстояние a_1 от объектива фотоаппарата до пленки, что следует из формулы линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}.$$

Следовательно, для более удаленного предмета выдержка должна быть меньшей, а для более близкого, наоборот, большей. Согласитесь, что на первый взгляд это выглядит довольно парадоксально.

8.3. Гипотеза Ферми

Космические лучи были открыты еще в первой трети XX века, но до сих пор не до конца ясно, как они возникают. Известно лишь, что из окружающего нас межзвездного пространства на земную поверхность непрерывно обрушивается поток электронов, протонов и ядер более тяжелых элементов — гелия, кислорода, углерода, азота и др. Энергия каждой такой частицы достигает колоссальных по земным меркам значений — до 10^{21} эВ (1 электрон-вольт = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж — энергия, которую приобретает электрон под действием разности потенциалов в 1 В). Если вспомнить, что лучшие лабораторные ускорители разгоняют частицы до энергии порядка 10^{12} эВ, становится понятным, почему физики так интересуются космическими лучами: таких мощных «снарядов» для бомбардировки элементарных частиц и исследования их внутренней структуры никогда не удастся получить в лаборатории.

Откуда же приходят к нам космические лучи и каким образом частицы в них ускоряются до столь высоких энергий? Знаменитый итальянский физик Энрико Ферми (1901—1951) выдвинул следующую гипотезу. Астрономы обнаружили, что в пространстве между

звездами движутся облака межзвездного вещества, пронизанные магнитными полями. По гипотезе Ферми встреча заряженных космических частиц с блуждающими магнитными полями как раз и приводит к ускорению этих частиц.

Однако мы знаем, что сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд (так называемая сила Лоренца), направлена перпендикулярно вектору скорости частицы и может изменить, следовательно, лишь направление, но никак не численное значение скорости.

Как же в таком случае гипотеза Ферми объясняет процесс ускорения? [23, № 117]

Решение: Объяснение эффекта Ферми можно дать на разных физических «языках». Используем самый простой — язык классической механики: уподобим взаимодействие заряженной частицы и облака упругому отражению молекулы от движущегося поршня (или теннисного мячика — от ракетки). Действительно, почему нагревается газ, сжимаемый в цилиндре поршнем? Пока поршень неподвижен, средняя скорость молекул газа v остается постоянной (считаем, что теплообмена через стенки цилиндра нет), так как соударения молекул с поршнем и стенками цилиндра носят упругий характер, и скорости остаются после соударения прежними.

Однако если поршень вдвигается в цилиндр с постоянной скоростью u , то молекулы, ударяющиеся о поршень, будут обладать относительно него скоростью $v + u$. С такой же скоростью относительно поршня они отразятся. Но так как поршень движется относительно цилиндра со скоростью u , то скорость молекул относительно цилиндра после отражения окажется равной $u + (u + v) = v + 2u$, то есть возрастет на $2u$.

Подобным же образом увеличивается скорость космического зонда, облетающего по гиперболической траектории планету в ходе гравитационного маневра [24]. С точки зрения наблюдателя, располагающегося на отражателе (то есть на поршне, ракетке или планете), взаимодействие с налетающей частицей выглядит упругим и не изменяет ее энергию (предполагаем, что масса отражателя значительно больше массы частицы). Но для внешнего наблюдателя к скорости частицы практически добавляется удвоенная скорость отражателя.

Точно так же можно рассматривать отражение заряженной частицы от пронизанного магнитным полем космического облака (рис. 8.1). Если протон, летящий со скоростью v , попадет в облако, несущее магнитное поле и движущееся ему навстречу со скоростью u , то

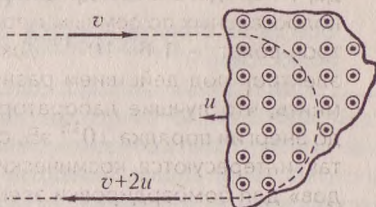


Рис. 8.1

после «отражения» магнитным полем протон будет иметь скорость $v + 2u$. Правда, протону может не повести, и он попадет в облако, движущееся в ту же сторону, куда летел он сам: тогда после отражения скорость протона уменьшится. Но точный расчет показывает, что движущиеся частицы встречают в единицу времени ускоряющих облаков больше, чем замедляющих, в результате чего эффект ускорения преобладает.

8.4. Противоросник

Зачем на переднюю часть телескопа, перед объективом, надевают короткую полую трубу — противоросник.

Решение: Как следует из названия, противоросник препятствует выпадению капелек росы на объективе телескопа. Труба противоросника затрудняет циркуляцию воздуха вблизи поверхности объектива и таким образом не позволяет новым порциям водяных паров соприкасаться с холодным стеклом.

8.5. Задача «с огоньком»

Если в банку с углекислым газом опустить горящую свечу, то она погаснет. Что произойдет, если в ту же банку опустить зажженную ленту магния? [18, с. 114]

Решение: Если зажженную ленту магния опустить в банку с углекислым газом, то магний будет гореть коптящим пламенем. Магний отнимет кислород от углекислого газа, соединится с ним и выделит свободный углерод в виде копоти.

8.6. Верный компас

Всегда ли стрелка компаса указывает направление на магнитный полюс Земли?

Решение: Далеко не всегда. Во-первых, существуют мощные местные магнитные аномалии, такие как Курская, Бразильская или Восточно-Сибирская, которые как раз и обнаруживались по «сумасшедшему» поведению стрелки компаса вблизи них. Во-вторых, магнитное поле Земли, даже в большом масштабе, не полностью соответствует полю однородно намагниченного шара (т. е. полю диполя). Поэтому магнитные меридианы не везде направлены строго к полюсам. Если представить магнитное поле Земли в виде наиболее подходящего поля однородно намагниченного земного шара,

то его ось окажется наклоненной на $11,5^\circ$ к оси вращения Земли, а полюсы диполя (их называют «геомагнитные полюсы») не совпадут с магнитными полюсами Земли. В 1970 г. географические координаты геомагнитных полюсов были следующие: в Северном полушарии $\varphi = 78^\circ 31'$ с. ш., $\lambda = 70^\circ 01'$ з. д., а в Южном полушарии $\varphi = 78^\circ 31'$ ю. ш., $\lambda = 109^\circ 59'$ в. д. Их положение постепенно меняется. Например, в 1997 г. северный геомагнитный полюс уже имел следующие координаты: $\varphi = 81^\circ 23'$ с. ш., $\lambda = 82^\circ 35'$ з. д.,

8.7. Три ноги

Существует мнение, что стол о трех ногах никогда не качается, даже если ножки его неравной длины. Верно ли это? [18, с. 126]

Решение: Трехногий стол или стул всегда может касаться пола концами своих трех ножек, потому что через каждые три точки пространства может проходить плоскость и притом только одна. Именно поэтому трехногий предмет не качается.

Вот почему так удобно пользоваться треногами для фотоаппаратов и небольших телескопов. Четвертая нога не сделала бы подставку устойчивее; напротив, пришлось бы тогда всякий раз заботиться о том, чтобы она не качалась.

8.8. Магнит в горячем цехе

Почему для переноски раскаленных болванок нельзя употреблять электромагнит? [18, с. 113]

Решение: Потому, что железо, нагретое до 800°C , совершенно не намагничивается.

8.9. Загадочные камешки

«Однажды, когда я отдыхал в Крыму, мне пришлось быть свидетелем весьма любопытного опыта. Несколько отдыхающих, собрав на побережье морские камешки, занялись тем, что стали бросать их с небольшой высоты на цементный пол санаторной галереи. Камешки отскакивали довольно странно. Так, например, маленький агат, свободно выпущенный из руки с высоты 1 метра, ударившись о пол, подпрыгнул примерно на 20 сантиметров, а после второго удара поднялся вопреки всем законам механики почти вдвое выше.

Другой камешек сначала подскочил приблизительно на 1 метр, а затем, ударившись вторично о пол, подскочил метра

на полтора. То же самое наблюдалось при некоторых бросках и с другими камешками.

Это явление казалось необъяснимым. Известно, что после первого подскока тело должно подпрыгнуть на меньшую высоту, так как часть его кинетической энергии расходуется при ударе о землю.

Чем же объяснить такое странное поведение морских камешков, противоречащее закону сохранения энергии?»

(Эта задача принадлежит члену-корреспонденту Академии наук А. Шубникову.) [18, с. 124]

Решение: Если бы камешки были шарообразной формы, то при падении на гладкий пол высота их последовательных подскоков все время убывала бы. Но морские камешки неровны, и поэтому при отскакивании они могут прийти во вращение. Кинетическая энергия, которую приобретает такой камешек после соприкосновения с полом, разлагается на две части: одна идет на поднятие камня, а другая проявляется в форме энергии вращения. Соотношение между величинами этих энергий зависит от случая. Если при первом отскоке часть энергии, идущая на поднятие камня, будет мала, а при втором отскоке велика, то естественно, что во втором случае камень поднимется выше.

8.10. Температура и яркость

Вы не задумывались, почему по-разному светятся одинаково нагретые тела? Чем, например, объяснить такой парадокс: железо, нагретое до 800°C , светится очень ярко, тогда как свечение кусочка кварца (с несколько меньшим успехом опыт можно проделать и со стеклом), имеющего ту же температуру, еле заметно? [23, № 114]

Решение: Как известно, электроны в атомах могут находиться в разных состояниях, каждому из которых соответствует различная энергия. При переходе электрона из состояния с более высокой энергией в состояние с более низкой «излишек» энергии выделяется в виде кванта электромагнитного излучения. В зависимости от энергии кванта наблюдатель видит свет того или иного цвета.

В металлах наиболее удаленные от ядра электроны (в химии их называют валентными) за счет тепловой энергии легко переходят в возбужденное состояние и так же легко возвращаются в нормальное, отдавая запасенную энергию в виде света.

Не так обстоит дело в кварце и стекле. Все электроны здесь прочно связаны с ядрами атомов и с большим трудом изменяют свое энергетическое состояние. Чтобы получить заметное свечение, в этом случае нужна значительно более высокая температура.

А теперь подумайте и ответьте: можно ли было еще до нагревания кусочков металла и кварца сказать, какой из них будет светиться ярче в нагретом состоянии?

8.11. В каком полушарии?

Посмотрите на картинку (рис. 8.2). Можете ли вы определить, в каком полушарии Земли течет эта река?



Рис. 8.2

Решение: Изображенная на рисунке река течет справа налево. Об этом можно судить по якорю лодки (он заброшен, конечно, вверх по течению, а не вниз) или по струям и водоворотам за камнями... Значит, у этой реки правый берег возвышенный, левый — низменный. Все ли реки отличаются этой особенностью? Нет. Только реки, текущие в Северном полушарии Земли; а в Южном полушарии — все наоборот. Географы называют это *законом Бэра*, поскольку подметил эту особенность речных берегов петербургский академик Карл Бэр (1792–1876). Почему же так происходит?

Посмотрим на чертеж (рис. 8.3). Извилистая речка течет на нем с севера на юг (пунктирная стрелка), а Земля вращается с запада на восток (пунктирная стрелка). Чем ближе к экватору, тем больший круг в одно и то же время (например, в сутки) пролетает каждая точка Земли. Значит вода течет из мест, вращающихся медленно, в те, которые вертятся быстрее. Поэтому вода отстает от вращения Земли. Она ударяется о западный берег (прямая стрелка В), подмывает его,

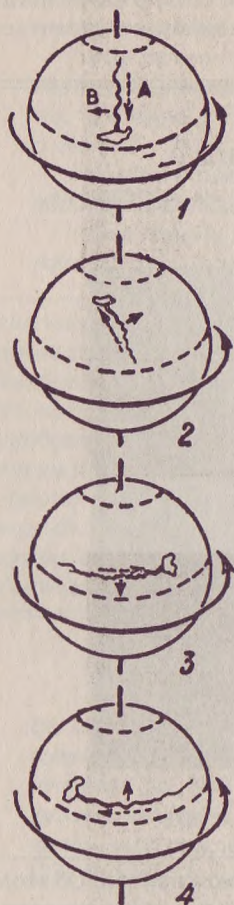


Рис. 8.3

делает обрывистым. Заметим, что западный берег на такой реке — правый.

Возьмем другую реку, текущую с юга на север (2). Тогда вода, которая быстро неслась у экватора вместе со всей поверхностью планеты на восток, будет попадать в места, где суша движется под ней все медленнее. А сама она сохранит старую быстроту движения. Значит, она будет обгонять свое русло, наплескиваться на восточный берег, размывать его. Но в этом случае восточный берег и есть правый.

Теперь допустим, что река течет с запада на восток (3), в ту сторону, куда вращается Земля. Тогда течение реки будет складываться с вращением планеты, что увеличит центробежную силу, и погонит воду реки к югу, к экватору, дальше от центра вращения... Она будет подтачивать южный берег (прямая стрелка). Но как раз он при этом окажется правым.

Наконец, возьмем последний случай (4). Положим, что река течет с востока на запад. Произойдет обратное: скорость вращения реки вокруг земной оси замедлится по сравнению с берегами, центробежная сила ослабнет, вода будет ударяться о северный берег. А он-то как раз и есть правый. Как видим, в Северном полушарии река всегда стремится подмыть правый берег. Рассуждая подобным образом, вы легко поймете, что в Южном полушарии реки всегда будут подмывать и делать обрывистым левый берег. В районе экватора этот эффект исчезает, но в средних

и высоких широтах спокойные равнинные реки следуют закону Бэра. Значит, видя на картинке реку с обрывистым правым берегом, мы имеем основание думать, что она течет в Северном полушарии.

А теперь посмотрите на этот же пейзаж зимой и летом и оцените географическую широту местности (рис. 8.4 и 8.5).

8.12. Геологическая задача

Большинство из нас привыкло к мысли, что железная руда, которую добывают сейчас, отложилась в земле миллионы лет тому назад.



Рис. 8.4



Рис. 8.5

А как вы думаете, есть такие места на земном шаре, где и теперь, в наше время, откладывается железо? [18, с. 29]

Решение: Отложение железной и марганцевой руд происходит и сейчас на дне морей. Отложение металлов происходит в виде конкреций или сплошным покровом. Конкреция — круглая, довольно правильной формы лепешка размером до 20 см, — состоит из гидратов

окислов железа (до 35 %) и марганца (до 15 %), смешанных с илом и песком. Почти всегда в середине конкреции имеется какой-либо предмет — обломки камней, раковина, трубка морского червя, — вокруг которого происходит отложение.

Железо морских отложений образуется в результате жизнедеятельности живущих на дне железобактерий, которые развиваются за счет продуктов, получаемых от окисления растворимых солей железа, содержащихся в морской воде. Процессу окисления содействует большое количество кислорода, растворенного в морской воде.

8.13. Стрелка-перевертыш

В каком месте Земли совершенно нельзя верить магнитной стрелке вследствие того, что на северном концом оказывает на юг, а южным на север? [18, с. 28]

Решение: В арктических областях Северной Америки, к северу от 75-й параллели, между географическим и магнитным полюсами стрелка компаса южным концом показывает на север.

8.14. Ледяные острова

Вы, наверное, знаете, что есть острова вулканические, коралловые, материковые и т. д. А есть ли острова ледяные? Мы имеем в виду не случайное скопление льда и не плавучие ледяные горы — айсберги, а острова, существующие не одну тысячу лет и точно нанесенные на карту [18, с. 30].

Решение: Да, есть! Это острова Новосибирского архипелага. Геологическое строение этих островов довольно простое. Нижняя часть островов состоит из мощных льдов, следов древнего обледенения, сверху прикрытых отложениями мерзлых илов. В теплое время года под влияние солнечной радиации, нагревающей воду, и разрушающей работы волн лед начинает подмываться. С гулом обваливаются куски льда вместе с илистыми наносами. Так постепенно из года в год уменьшаются и даже совсем размываются площади островов.

В 1815 г. Максим Ляхов открыл два ледяных острова. Их называли «Семеновский» и «Васильевский». Когда в 1936 г. гидрографическое судно прибыло для съемки острова Васильевского, то на месте острова была обнаружена банка глубиной до 2,5 м.

Длина острова Семеновского в 1829 г. исчислялась в 8 миль, в 1912 г. — 2,5 мили, в 1936 г. — 1,1 мили, а к середине XX века остров исчез совсем.

8.15. Реки текут вспять?

Могут ли реки иногда течь против своего обычного течения, то есть из мест более низких в более высокие? [18, с. 32]

Решение: В Карелии есть река Шуя, впадающая в Онежское озеро, а у нее есть приток Шуя, вытекающий из Укш-озера. На дне Укш-озера бьет много ключей, периодически усиливающихся и ослабевающих.

При ослаблении деятельности ключей, что чаще всего происходит зимой, уровень Укш-озера понижается, и тогда вода из Шуи устремляется в озеро в течение одной-двух недель. Когда деятельность ключей усиливается, уровень озера повышается, и вода из озера течет в Шую.

Поворот Шуи из озера, если это случается зимой, сопровождается страшным гулом, напоминающим раскаты грома или пушечные выстрелы. Лед на реке в это время синее, трескается и тает. Река посреди зимы вскрывается, из нее поднимается пар. Не кажется ли вам это удивительным: река, текущая почти на широте 62° к северу, вскрывается зимой?

Это происходит оттого, что ключевая вода зимой теплее озерной. Попадая в холодную воду озера, она и производит такие разрушения.

На юго-западе Украины есть озеро Лиман-Ялнук, связанное двумя протоками с озером Кугурмут. А из Кугурмута вытекает сеть речек, текущих в Дунай. Во время половодья, когда уровень Дуная становится выше, чем уровень в озерах, вода из Дуная течет в озеро.

А вот Западный Маныч, левый приток Дона, иногда течет вспять по другой причине. Равнинный характер местности благоприятствует его медленному течению. При встречном ветре, сила которого оказывается сильнее течения, река начинает течь в обратном направлении.

Следует также упомянуть о явлении «бора», наблюдаемом на некоторых равнинных реках, впадающих в океан. В тех случаях, когда океанская приливная волна особенно сильна, она заходит в устье реки и гонит воду вверх, против течения. О любопытных особенностях этого явления можно прочитать в замечательной книге Джорджа Дарвина «Приливы» [28].

8.16. Задача для Геракла

Вам надо повалить каменную стенку длиной в 20 метров, высотой в 3 метра и весом в 3 т. Как вы выполните эту задачу, если в вашем распоряжении нет абсолютно никаких инструментов? [18, с. 116]

Решение: Такая стенка, как легко подсчитать, имеет толщину лишь около 2 см и легко может быть повалена рукой.

Умение быстро оценивать в уме характерные значения величин основных параметров задачи — качество, совершенно необходимое для астронома, особенно — для астрофизика, постоянно сталкивающегося с непривычными масштабами явлений.

8.17. Профессор и полисмен

Один кембриджский профессор проехал на красный свет и был остановлен полицейским. Чтобы избежать штрафа, он с серьезным видом стал объяснять полицейскому, что во всем виновата физика: двигаясь к источнику красного света, в соответствии с эффектом Доплера профессор воспринял его как зеленый. Оказалось, что кембриджский полицейский знаком с физикой; он согласился с объяснением профессора и... оштрафовал его за превышение скорости. Прав ли был полицейский?

Решение: Длина волны зеленого света около 550 нм, а оранжево-красного, который используют в светофорах, около 610 нм. В соответствии с формулой Доплера при движении источника света и наблюдателя с относительной скоростью V длина волны наблюдаемого излучения смещается на $\Delta\lambda$:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V}{c},$$

где $c = 300\,000$ км/с — скорость света. Отсюда $V = c \cdot (610 - 550) / 610 \approx 30\,000$ км/с. Это явно превышает любое ограничение скорости на дорогах. Полицейский был прав.

8.18. Полет булыжника

По какой траектории движется тело, брошенное под углом к горизонту? (Соппротивление атмосферы не учитывать.)

Решение: На первый взгляд — это классическая задача из школьного курса механики. И ее классический ответ — по параболе. Однако, брошенное тело движется под действием притяжения к центру Земли, как любой искусственный спутник; а ведь спутники движутся по эллипсу! Немного подумав, мы понимаем, в чем дело. Задача с телом, брошенным под углом к горизонту, решалась в предположении однородного гравитационного поля, а задача со спутником — для центрально-симметричного поля. Поэтому и ответы получились разные. В масштабе планеты тело, конечно движется по эллипсу;

но на небольшом участке траектории, скажем, в пределах площадки для гольфа, отличие гравитационного поля от однородного крайне мало; настолько же малым получается и отличие параболической траектории от эллиптической. Кстати, рассчитывая траекторию снаряда дальнобойного орудия, артиллеристы уже вынуждены учитывать это различие.

Ну вот мы и разобрались в школьном парадоксе: выяснили, что траектория камня, брошенного под углом к горизонту, вовсе не парабола, как думают физики, вероятно, считая Землю плоской и бесконечной. В действительности, правы астрономы — камень, даже на небольшом участке траектории, движется по эллипсу. И чем сильнее, выше и дальше мы его бросаем, тем заметнее отличие эллипса от параболы. Вот мы кидаем камень еще сильнее — со второй космической скоростью — и замечаем, что летит-то он по... параболе!

Тут самое время вернуться к началу задачи и подумать еще раз, кто же прав — астроном или физик. Может ли свободно летящее тело двигаться в разных гравитационных полях по одинаковым траекториям? А если вам хочется еще парадоксов, то вспомните, что по эллиптическим траекториям движутся не только спутники Земли (сила гравитации Ньютона), но и грузик на резинке (сила упругости Гука) и даже свободно подвешенный на нитке маятник при небольшой амплитуде колебаний. Все-таки, удивительная вещь эти конические сечения!

8.19. Зодиак на циферблате

Иногда знаки Зодиака ставят вместо цифр на циферблатах часов.

Какой знак Зодиака ставят вместо числа 12 и почему? [6, № 68]

Решение: Знак Овна, отмечающий также точку весеннего равноденствия и начало звездных суток. От этой точки начинается отсчет эклиптических долгот, прямых восхождений и звездного времени. От нее же 20 веков назад, в эпоху Птолемея, начинался отсчет знаков зодиака. В наше время точка весеннего равноденствия переместилась в созвездие Рыб, однако традиционно обозначается знаком Овна.

8.20. Вскипятить океан!

За сколько времени энергией полного солнечного излучения можно довести до кипения воду во всех земных морях и океанах?

[6, № 255]

Решение: Средняя глубина океана около 4 км; «убрав» материки, мы получили бы планету, покрытую океаном глубиной около 3 км.

Поверхность Земли имеет площадь $S = 4\pi R_{\oplus}^2 = 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$, следовательно, объем Мирового океана мы оцениваем около $V \approx 1,5 \cdot 10^9 \text{ км}^3$ (что весьма близко к аккуратным вычислениям географов). Поскольку средняя температура океанской воды близка к нулю, примем интервал нагревания за $\Delta T = 100 \text{ К}$. Для простоты примем теплоемкость воды $\nu = 1000 \text{ кал}/(\text{кг К}) = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ и плотность $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Таким образом, необходимая для закипания океанов энергия составляет $E \approx V\nu\rho\Delta T = 6,3 \cdot 10^{26} \text{ Дж}$. Такую энергию Солнце излучает за... 1,5 секунды. А чтобы полностью испарить океаны (теплота парообразования воды $539 \text{ кал}/\text{г}$) потребуется еще 8 секунд. Итак, если всю солнечную энергию направить на Землю, океаны выкипят за 10 с. Это впечатляет и заставляет задуматься о перспективах солнечной энергетики.

8.21. Белые ночи

С какой географической широты начинаются белые ночи (т. е. вечерние гражданские сумерки могут, не оканчиваясь, переходить в утренние)? *Указание:* гражданские сумерки оканчиваются, когда Солнце опускается под горизонт на 6° [4, № 334]

Решение: Белые ночи наблюдаются севернее $60,5^\circ$ с. ш. и южнее $60,5^\circ$ ю. ш.

8.22. На Эльбрусе

Можно ли в ясную погоду увидеть с Эльбруса (высота $5\,630 \text{ м}$) берега Крыма, отстоящие от него на 600 км ? [4, № 524]

Решение: Полагая, что кругозор наблюдателя ограничен математическим горизонтом (т. е. не беря в учет атмосферную рефракцию), найдет приближенное выражение для расстояния до горизонта: $L = \sqrt{2HR_{\oplus}}$, где $R_{\oplus} = 6\,371 \text{ км}$ — радиус Земли, H — высота наблюдателя. По этой формуле от наблюдателя на вершине Эльбруса до горизонта 268 км . Если взять в учет рефракцию, то горизонт «отодвинется» приблизительно на 6% и расстояние кругозора (при совершенно прозрачной атмосфере) станет 285 км . Но и этого не достаточно, чтобы увидеть крымские берега.

8.23. Земля без воды

Если бы земная поверхность была лишена воды, каково было бы влияние этого на среднюю температуру, на суточный ход

температуры в каком-либо месте и на ход ее на всей поверхности Земли? [4, № 543]

Решение: Если бы сохранились свойства атмосферы, в частности, наличие в ней облаков, то при исчезновении океанов средняя температура планеты понизилась бы за счет увеличения альбеда поверхности. Но поскольку вместе с жидкой водой на поверхности наверняка исчезла бы и облачность, обладающая высоким альбедо, однозначно ответить на вопрос о средней температуре сложно. Не вызывает сомнения лишь то, что колебания температуры от дня к ночи и от лета к зиме стали бы больше.

8.24. Мезозойские сутки

Любопытный астрономический факт обнаружили палеонтологи: он относится к количеству суток в году. Цитируем по книге П. В. Рич, Т. Х. Рич и М. А. Фентон «Каменная книга. Летопись доисторической жизни». М.: Наука, 1997. с. 47:

«У современных и ископаемых животных и высших растений наблюдаются струйки, линии, морщины и кольца роста. Одни из них соответствуют суткам или ночному-дневному времени суток (струйки, тонкие линии), другие — месяцам (морщины), третьи — годам (кольца). У ископаемых животных линии и кольца роста особенно хорошо фиксируются на внешнем морщинистом слое (эпитеке) кораллов, на раковинах двухстворчатых и головоногих моллюсков. По линиям роста эпитеки ископаемых кораллов было подсчитано число дней в году в прошлые геологические периоды (Wells, 1963). Оказалось, что в кембрии год состоял из 420–425 дней, а в настоящее время — из 365,25 дней. Уменьшение числа дней в году в течение фанерозоя указывает на замедление вращения Земли вокруг своей оси при условии, что длина орбиты вокруг Солнца осталась прежней. Правомерно и другое объяснение: Земля вращается вокруг своей оси с той же скоростью, но сокращается длина орбиты, т. е. Земля приближается к Солнцу».

Вопрос: может ли астроном помочь биологам сократить число гипотез, объясняющих изменение количества дней в году в период фанерозоя (т. е. в палеозойскую и мезозойскую эры), а также указать наиболее вероятную причину, вызвавшую это изменение в движении Земли?

Решение: Предположим, что продолжительность суток остается неизменной, а сокращается длина года. Это может быть вызвано только уменьшением радиуса орбиты Земли (R) и связанного с ним по третьему закону Кеплера орбитального периода ($P \propto R^{3/2}$). Но другой

стороны, приближение к Солнцу должно было вызвать рост температуры Земли. Если ограничиться самым простым законом температуры абсолютно черного тела (поток тепла с единицы поверхности $I \propto T^4$), то зависимость температуры Земли от орбитального периода будет следующей:

$$T \propto I^{1/4} \propto R^{-1/2} \propto P^{-1/3}.$$

Следовательно, при небольшом изменении периода ($dP/P \ll 1$) соответствующее изменение температуры составит $dT/T = -dP/(3P)$. Учитывая, что современная средняя температура Земли около $+15^\circ \text{C}$ (288 K), получим для указанной в тексте прошлой эпохи

$$dT = -288 \text{ K} \times \frac{57 \text{ сут.}}{3 \times 365 \text{ сут.}} = -15 \text{ K}.$$

Итак, простой расчет приводит к средней температуре земной поверхности около 0°C . Однако следует учесть два дополнительных фактора, которые могли повлиять на температуру Земли. Во-первых, со временем немного возрастает светимость Солнца, так что в прошлом она была чуть ниже современной. Во-вторых, температура Земли связана с парниковым эффектом в ее атмосфере: углекислый газ и пары воды поглощают инфракрасное излучение земной поверхности, что приводит к росту ее температуры (в среднем почти на 40 K). При снижении температуры уменьшается количество паров воды в атмосфере (падает давление насыщенного пара) и снижается количество углекислого газа (поскольку улучшается его растворимость в воде океанов). Таким образом, при понижении средней температуры должна уменьшиться роль парникового эффекта, что еще больше усилит снижение температуры.

Следовательно, можно считать, что предполагаемая эволюция орбиты должна была привести за указанные 600 млн лет к разогреву Земли заметно более сильному, чем на 15 K. А это означает, что в начале палеозойской эры средняя температура Земли должна была быть ниже точки замерзания воды, и кораллы жить не могли бы.

Остается признать, что из двух гипотез, выдвинутых биологами для объяснения изменения числа дней в году, по астрономическим соображениям жизнеспособна лишь одна — увеличение длительности суток, т. е. замедление вращения Земли. Наиболее вероятной причиной этого служит приливное влияние Луны и Солнца.

8.25. Сон осьминога

Японский поэт Басе (1644–1694) написал такое трехстишие — хокку:

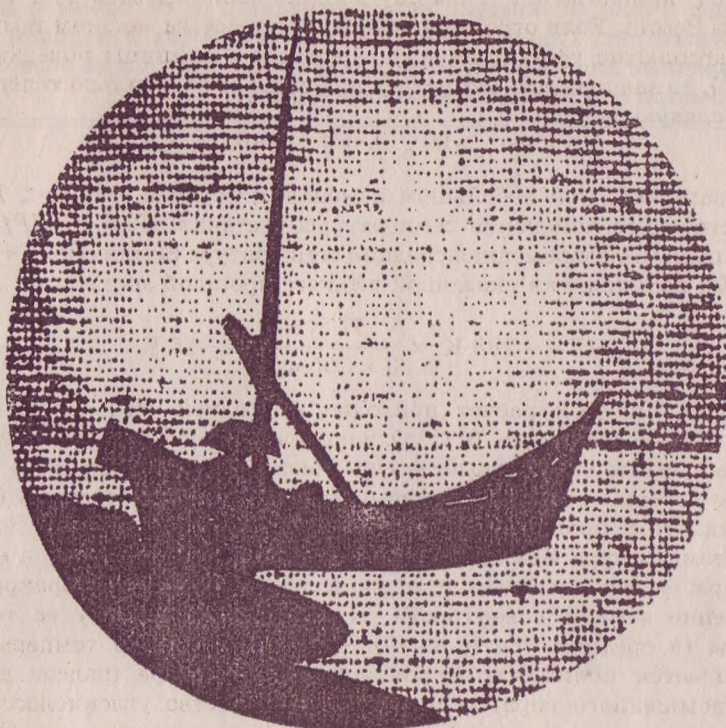


Рис. 8.6

Провожу ночь на корабле в бухте Акаси

В ловушке осьминога.

Он видит сон — такой короткий! —

Под летнею луной.

Объясните мысль поэта: почему сон осьминога был короток?

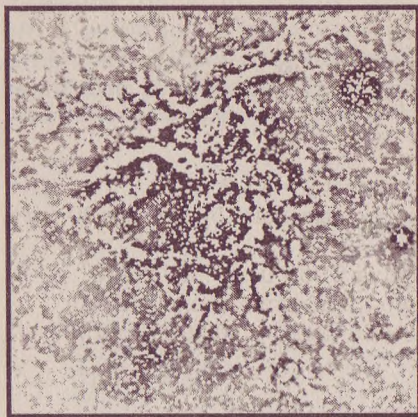
Решение: Потому что летом склонение Луны мало, и она ненадолго поднимается над горизонтом. Солнце же встает рано (его склонение велико), и рыбаки рано утром спешат к ловушкам.

8.26. Народный метод

Почему во время весенних заморозков, чтобы уберечь от холода цветущие деревья, ночью разжигают костры или ставят в саду бочки и другую посуду с водой?

Решение: Тепло от костра весьма невелико, а от бочки с водой его и вовсе нет. Главное здесь — углекислый газ и водяной пар, непрозрачные для инфракрасного излучения: они-то и не позволяют земле быстро остывать. Парниковый эффект!

ПРИЛОЖЕНИЯ



Справочные данные

I. Математические константы и обозначения

\equiv тождественно равно;

\propto пропорционально;

\simeq приближенно равно;

$\pi \simeq 3,14$ — отношение длины окружности к ее диаметру;

$e \simeq 2,72$ — основание натуральных логарифмов;

1 рад (радиан) $\simeq 57,3^\circ \simeq 3\,438' \simeq 206\,265''$; это угол, стянутый дугой окружности, длина которой равна радиусу этой окружности.

Таким образом, если за единицу расстояния принять размер тела, то мы видим его под углом в 1° с расстояния 57,3; под углом в $1'$ с расстояния 3 438 и под углом в $1''$ с расстояния 206 265.

II. Приближенные равенства

а) для малых углов ($\alpha \ll 1$ рад)

$$\sin \alpha \simeq \alpha \text{ (рад)}, \quad \operatorname{tg} \alpha \simeq \alpha \text{ (рад)};$$

б) из правила «бинома Ньютона» при $\alpha \ll 1$ легко получить:

$$(1 + \alpha)^n \simeq 1 + n\alpha.$$

III. Астрономические и физические величины

Парсек 1 пк = $3,086 \cdot 10^{16}$ м

Расстояние от Солнца до центра Галактики $R_0 \approx 8$ кпк

Скорость Солнца вокруг центра Галактики $V_0 \approx 220$ км/с

Тропический год $1^a = 3,16 \cdot 10^7$ с

Среднее расстояние до Солнца 1 а. е. ≈ 150 млн км

Скорость света $C = 300$ тыс. км/с

Постоянная тяготения $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н м²/кг²

Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг

IV. Данные о Земле

Средний радиус $R_{\oplus} = 6\,371,032$ км

Экваториальный радиус $R_{\oplus\text{э}} = 6\,378,160$ км

Полярный радиус $R_{\oplus\text{п}} = 6\,356,777$ км

Масса $M_{\oplus} = 5,978 \cdot 10^{24}$ кг

Средняя плотность $\rho_{\oplus} = 5,52$ г/см³

Критическая скорость на поверхности $V_{\text{П}} = 11,2$ км/с

Время обращения спутника на орбите высотой 150 км $T_0 = 90$ ми-

нут

Наклон эклиптики к экватору (эпоха 2000,0) $\varepsilon = 23^\circ 26' 25''$

Проходит перигелий около 3 января и афелий около 4 июля

Средняя орбитальная скорость 29,765 км/с $\approx 100\,000$ км/ч

V. Данные о Солнце

Радиус $R_{\odot} = 7 \cdot 10^8$ м

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

Критическая скорость на поверхности 618 км/с

Линейная скорость вращения на экваторе 2 км/с

Ускорение силы тяжести на поверхности $g_{\odot} = 274$ м/с²

Светимость $L_{\odot} = 3,88 \cdot 10^{26}$ Вт

Видимая звездная величина в зените в фильтре V: $-26,6^m$

Видимая болометрическая звездная величина $-26,9^m$

Средний угловой диаметр $32'$

VI. Данные о Луне

Среднее расстояние Луны от центра Земли 384 400 км; вследствие эксцентриситета орбиты оно изменяется от 356 до 407 тыс. км.

Сидерический месяц (звездный период обращения) 27,32 сут.

Синодический (солнечный) месяц 29,53 сут.

Наклонение плоскости орбиты к плоскости эклиптики (среднее) $5^\circ 09'$, оно колеблется от $4^\circ 58'$ до $5^\circ 20'$ примерно за полгода.

Узлы орбиты перемещаются по эклиптике, совершая один оборот за 6 793 сут. = 18 лет 7 мес., т. е. перемещаясь на $1,5^\circ$ в месяц.

Перигей орбиты, двигаясь к востоку, совершает оборот за 9 лет.

Ось вращения наклонена к плоскости орбиты (в среднем) на $83^\circ 20'$; изменяется в пределах от $83^\circ 10'$ до $83^\circ 31'$.

Плоскость эклиптики лежит между плоскостями экватора и орбиты Луны, и все они пересекаются по одной прямой (закон Кассини, 1721 г.).

Таким образом, плоскость лунного экватора с плоскостью лунной орбиты составляет угол $6^\circ 30'$, а с плоскостью эклиптики $1^\circ 30'$.

Вследствие равномерного вращения Луны вокруг оси и неравномерного движения по эллиптической орбите существует либрация

(качание) по долготе с периодом в один аномалистический месяц и величиной $\pm 7^\circ 54'$.

Вследствие наклона оси вращения к плоскости орбиты существует либрация по широте $\pm 6^\circ 50'$ с периодом в драконический месяц.

При наблюдении из разных точек Земли возникает параллактическая (суточная) либрация, составляющая около $\pm 1^\circ$

Видимая визуальная звездная величина в полнолунии $-12,7^m$

Визуальное альbedo 6 %

Сферическое альbedo 7 %

Освещенность, создаваемая полной Луной в зените на поверхности Земли, перпендикулярной к направлению падающих лучей: 0,25 люкса

Видимый угловой диаметр Луны: $33'32''$ (наибольший), $29'20''$ (наименьший), $31'05''$ (на среднем расстоянии от Земли)

Радиус 1 738 км

Масса $7,34 \cdot 10^{22}$ кг (1/81 массы Земли)

Средняя плотность $3,35 \text{ г/см}^3$

Ускорение силы тяжести $1,63 \text{ м/с}^2$ ($\simeq 1/6$ земного)

Параболическая скорость на поверхности 2,38 км/с

Средняя орбитальная скорость 1,023 км/с

Температура в подсолнечной точке $+130^\circ \text{C}$

Температура ночной стороны Луны -160°C

VII. Координаты Москвы

Широта $\varphi_M = 55^\circ 45'$, долгота восточная $\lambda_M = 37^\circ 37'$ (долгота в часовой мере $\lambda_m/15^\circ/\text{h} \simeq 2^{\text{h}}30^{\text{m}}$).

VIII. Формулы практической астрофизики

Дифракционная разрешающая сила объектива диаметром D :

$$\alpha = \frac{14''}{D(\text{см})}$$

Разрешающая способность человеческого глаза около $100''$

Проницающая сила телескопа диаметром D :

$$m_{\text{lim}} = 7 + 5 \lg D(\text{см})$$

IX. Формулы космической динамики

Закон всемирного тяготения: две точечные массы M_1 и M_2 , разделенные расстоянием r , взаимно притягиваются с силой

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2},$$

где $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ — постоянная тяготения.

Первая космическая скорость, с которой спутник движется по круговой орбите радиуса R вокруг планеты массы M :

$$V_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Вторая космическая скорость, имея которую на расстоянии R от планеты, аппарат может удалиться от нее «на бесконечность»:

$$V_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} \times V_I.$$

Законы Кеплера. Первый: каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй (закон площадей): за равные промежутки времени радиус-вектор планеты заметает равные площади. Для малых интервалов времени Δt и малых углов поворота радиуса-вектора $\Delta \alpha$ можно записать

$$R^2 \Delta \alpha \propto \Delta t,$$

где R — мгновенная длина радиуса-вектора.

Третий (гармонический): орбитальный период планеты (P) связан с большой полуосью ее орбиты (a) и масса звезды (M):

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}}.$$

Созвездия

Андромеда	Киль	Рыбы
Близнецы	Кит	Рысь
Большая Медведица	Козерог	Северная Корона
Большой Пес	Компас	Секстант
Весы	Корма	Сетка
Водолей	Лебедь	Скорпион
Возничий	Лев	Скульптор
Волк	Летучая Рыба	Столовая Гора
Волопас	Лира	Стрела
Волосы Вероники	Лисичка	Стрелец
Ворон	Малая Медведица	Телескоп
Геркулес	Малый Конь	Телец
Гидра	Малый Лев	Треугольник
Голубь	Малый Пес	Тукан
Гончие Псы	Микроскоп	Феникс
Дева	Муха	Хамелеон
Дельфин	Насос	Цефей
Дракон	Наугольник	Циркуль

Продолжение таблицы

Единорог	Овен	Часы
Жертвенник	Октант	Чаша
Живописец	Орел	Щит
Жираф	Орион	Эридан
Журавль	Павлин	Южная Гидра
Заяц	Паруса	Южный Крест
Змееносец	Пегас	Южная Рыба
Змея	Персей	Южная Корона
Золотая Рыба	Печь	Южный Треугольник
Индеец	Райская Птица	Ящерица
Кассиопея	Рак	
Кентавр (Центавр)	Резец	

Орбиты и движение планет

Планета	a , а. е.	$P_{\text{орб}}$	e	i , °	$P_{\text{сут.}}$	Наклон оси, °
Меркурий	0,39	88 сут.	0,206	7,0	58,6 сут.	0,0
Венера	0,72	225 сут.	0,007	3,4	243,0 сут.	177,3
Земля	1,00	1,0 год	0,017	0,0	23,94 часа	23,5
Марс	1,52	1,88 лет	0,093	1,9	24,63 часа	25,2
Юпитер	5,20	11,86 лет	0,048	1,3	9,84 часа	3,1
Сатурн	9,56	29,46 лет	0,056	2,5	10,66 часа	25,3
Уран	19,22	84,02 лет	0,046	0,8	17,24 часа	97,9
Нептун	30,11	164,79 лет	0,010	1,8	16,1 часа	29,6
Плутон	39,4	247,7 лет	0,248	17,2	6,4 сут.	122,5

Основные параметры планет

Планета	Радиус R_{\oplus}	Масса M_{\oplus}	Плотность, г/см^3	Макс. блеск	Макс. угл. диам.
Меркурий	0,38	0,055	5,4	-1,9 ^m	11"
Венера	0,95	0,82	5,2	-4,4	61
Земля	1,00	1,00	5,5	—	—
Марс	0,53	0,11	3,9	-2,0	18
Юпитер	11,2	318	1,3	-2,7	47
Сатурн	9,4	95	0,7	+0,7	20
Уран	4,1	15	1,3	+5,5	3,6
Нептун	3,9	17	1,6	+7,8	2,1
Плутон	0,18	0,002	1,7	+15,1	0,1

Условия на поверхности планет или на уровне облачного слоя у планет-гигантов

Планета	Температура, °C	Давление, бар	Сила тя- жести, g	Скорость отрыва от поверхности, км/с
Меркурий	-170...+430	0	0,38	4,3
Венера	462 ± 5	90	0,89	10,4
Земля	15 ± 20	1,0	1,00	11,2
Марс	-120...+20	0,006	0,38	5,0
Юпитер	-150	1:	2,54	59,5
Сатурн	-180	1:	1,07	35,5
Уран	-215	1:	0,8	21,3
Нептун	-217	1:	1,2	23,7
Плутон	-223	0	0,01	1,2

Спутники планет

Спутники	Блеск, зв. вел.	Радиус орбиты, тыс. км	Период орбит., сут.	Радиус, км	Масса, 10 ²⁰ кг
Земля					
Луна	-12,7	384,4	27,3	1 738	735
Марс					
Фобос	11,3	9,4	0,32	14 × 10	11 × 10
Деймос	12,4	23,5	1,26	8 × 6	18 × 10
Юпитер					
Метида	17,5	128	0,30	(20)	—
Адрастея	18,7	129	0,30	12 × 8	—
Амальтея	14,1	181	0,50	135 × 75	—
Теба	16,0	222	0,68	(50)	—
Ио	5,0	422	1,77	1815	894
Европа	5,3	671	3,55	1 569	480
Ганимед	4,6	1 070	7,16	2 631	1 482
Каллисто	5,6	1 883	16,7	2 400	1 077
Леда	20,2	11 094	238,7	(8)	—
Гималия	15,0	11 480	250,6	(90)	—
Лиситея	18,2	11 720	259,2	(20)	—
Элара	16,6	11 737	259,7	(40)	—
Ананке	18,9	21 200	-631	(15)	—
Карме	17,9	22 600	-692	(22)	—
Пасифе	16,9	23 500	-735	(35)	—
Синопе	18,0	23 700	-758	(20)	—
1999 J1	21,0	24 160	-768	(5)	—

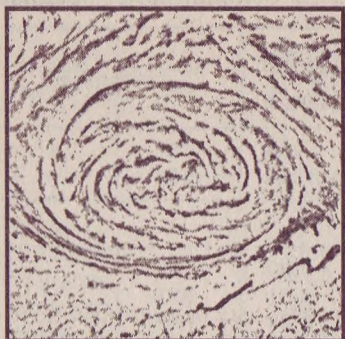
Продолжение таблицы

Спутники	Блеск, зв. вел.	Радиус орбиты, тыс. км	Период орбит., сут.	Радиус, км	Масса 10^{20} кг
Сатурн					
Пан	19,0	134	0,58	10	—
Атлант	18,0	138	0,60	20×15	—
Прометей	15,8	139	0,61	70×40	—
Пандора	16,5	142	0,63	55×35	—
Эпиметий	15,7	151	0,70	70×50	—
Янус	14,5	151	0,70	110×80	—
Мимас	12,9	186	0,94	195	0,38
Энцелад	11,7	238	1,37	250	0,84
Тефия	10,2	295	1,89	525	7,55
Телесто	18,7	295	1,89	(12)	—
Калипсо	19,0	295	1,89	15×10	—
Диона	10,4	377	2,74	560	10,5
Елена	18,4	377	2,74	18×15	—
Рея	9,7	527	4,52	765	24,9
Титан	8,3	1 222	16,0	2 575	1 350
Гиперион	14,2	1 481	21,3	175×100	—
Япет	10–12	3 561	79,3	720	18,8
Феба	16,5	12 952	–551	110	—
Уран					
Корделия	24	49,8	0,34	(15)	—
Офелия	24	53,8	0,38	(15)	—
Бианка	23	59,2	0,44	(20)	—
Крессиды	22	61,8	0,46	(35)	—
Дездемона	22	62,7	0,47	(30)	—
Джюльетта	22	64,4	0,49	(40)	—
Порция	21	66,1	0,51	(55)	—
Уран					
Розалинда	22,0	69,9	0,56	(30)	—
Белинда	22,0	75,3	0,62	(35)	—
1986 U10	23,6	76,4	0,64	(20)	—
Пэк	20,0	86,0	0,76	75	—
Миранда	16,5	129,8	1,41	235	0,7
Ариэль	14,4	191,2	2,52	580	12,6
Умбриэль	15,3	265,0	4,14	585	13,3
Титания	14,0	435,8	8,71	790	34,8
Оберон	14,2	582,6	13,46	760	30,3
Калибан	21,1	7 169	– 579	30	—
Стефано	23,5	7 942	– 676	(10)	—
Сикоракса	20,6	12 214	–1 289	60	—

Продолжение таблицы

Спутники	Блеск, зв. вел.	Радиус орбиты, тыс. км	Период орбит., сут.	Радиус, км	Масса 10^{20} кг
Просперо	22,4	16 113	-1 953	(15)	—
Сетебос	22,5	18 205	-2 345	(15)	—
Нептун					
Наяда	25	48,0	0,30	(25)	—
Таласса	24	50,0	0,31	(40)	—
Деспина	23	52,5	0,33	(90)	—
Галатея	23	62,0	0,43	(75)	—
Ларисса	21	73,6	0,55	(95)	—
Протей	20	117,6	1,12	(200)	—
Тритон	13,6	-354,8	5,88	1 350	214
Нереида	18,7	5 562,4	360,2	(170)	—
Плутон					
Харон	16,8	19,64	6,387	595	18

Примечание: знак «минус» орбитального периода спутника указывает, что его движение происходит в направлении, обратном вращению планеты.



Астрономические термины

В этом разделе приведены важнейшие астрономические термины и понятия, необходимые для решения задач и вообще для изучения астрономии. Если в толковании какого-либо понятия встречается *выделенное слово*, то и его толкование можно найти в этом разделе в алфавитном порядке.

Аббревиатуры и знаки

а. е. — астрономическая единица.

кпк — килопарсек; 1 000 парсеков.

Мпк — мегапарсек; 1 млн парсеков.

пк — парсек.

св. год — световой год.

M — каталог звездных скоплений и туманностей, опубликованный в 1782 г. французским астрономом Шарлем Мессье.

HD — каталог спектральной классификации звезд, составленный в Гарвардской обсерватории (США) под руководством Эдуарда Пикеринга и названный в честь американского врача и ученого Генри Дрэпера (Henry Draper Catalogue), одним из первых применившего фотографию в астрономии, в частности, для регистрации спектров звезд.

NGC — каталог звездных скоплений и туманностей (New General Catalogue of nebulae and clusters), опубликованный английским астрономом Йоханом Дрейером в 1887 г.

d — сутки; например, $8,5^d = 8$ суток и 12 часов.

h — час; например, $21^h = 21$ час, $3,75^h = 3$ часа 45 минут.

m — минута; например, $31^m = 31$ минута.

s — секунда; например, $55^s = 55$ секунд.

☉ — знак Солнца; например, M_{\odot} — масса Солнца, R_{\odot} — радиус Солнца.

φ — географическая широта места наблюдения.

λ — географическая долгота места наблюдения.

α — прямое восхождение.

δ — склонение.

Толковый словарь

Абсолютная звездная величина — блеск в *звездных величинах*, который имела бы звезда или иной излучающий астрономический объект, если бы он находился от Солнца на расстоянии 10 пк и отсутствовало *межзвездное поглощение света*.

Азимут — одна из двух координат горизонтальной системы: угол между *небесным меридианом* наблюдателя и вертикальным кругом, проходящим через небесный объект. В астрономии азимут измеряют от точки юга в сторону запада, а в морской навигации, географии и геодезии — от точки севера к востоку. Поэтому астрономический и геодезический азимуты различаются на 180° .

Аккреция (от англ. accretion, прирост, присоединение) — выпадение рассеянного в окружающем пространстве вещества на плотное космическое тело — планету или звезду под действием притяжения.

Альbedo (от лат. albedo, белизна) — доля света, отраженная поверхностью тела. Например, лунная поверхность отражает около 7 % падающего на нее солнечного света, т. е. ее альbedo равно 0,07. Альbedo Земли около 0,40, а Венеры — около 0,75.

Альмукантарат — малый круг небесной сферы, плоскость которого параллельна плоскости математического *горизонта*.

Альт-азимутальная монтировка — установка телескопа, позволяющая ему для наведения на небесный объект поворачиваться вокруг двух осей: вертикальной оси азимута и горизонтальной оси высоты. Слежение за звездами при этом осуществляется путем одновременного вращения телескопа вокруг двух осей с переменной скоростью.

Апогей — наиболее удаленная от Земли точка орбиты Луны или искусственного спутника Земли.

Астероиды — малые планеты, имеющие, как правило, неправильную форму и обращающиеся вокруг Солнца, в основном, между орбитами Марса и Юпитера; эту область называют «Главным поясом астероидов». Крупнейшие среди астероидов Главного пояса — Церера (диаметр 974 км), Паллада (538 км) и Веста (526 км). Еще несколько десятков астероидов имеют диаметры до 100 км, а остальные, которых не менее 100 тысяч, обладают меньшими размерами.

Орбиты некоторых астероидов пересекают орбиту Земли, что делает возможным их столкновение с нашей планетой.

Астрономическая единица — единица измерения расстояний в астрономии, очень удобная для измерений в пределах Солнечной системы. Астрономическая единица чрезвычайно близка к среднему расстоянию между Землей и Солнцем, т. е. к *большой полуоси* земной орбиты; 1 а. е. = 149 597 870 км. Точные измерения показали, что большая полуось орбиты Земли равна 1,00000023 а. е. Но при решении наших задач ее вполне можно считать равной 1 а. е. (и даже более того — считать равной 150 млн км).

Афелий — наиболее удаленная от Солнца точка орбиты планеты или иного тела Солнечной системы.

Белый карлик — маленькая звезда, размером с Землю, но при этом такая же массивная, как Солнце, и поэтому очень плотная: в миллион раз плотнее воды. Белый карлик — это сжавшееся ядро нормальной звезды, сбросившей с себя оболочку в конце эволюции.

Блеск звезды, или яркость звезды — традиционные астрономические термины для обозначения потока излучения, приходящего от светила в единицу времени на единицу поверхности Земли.

Болид — очень яркий *метеор*, иногда наблюдаемый даже днем, часто оставляющий после себя дымный след и сопровождаемый звуковыми явлениями; нередко заканчивается падением *метеоритов*.

Большая полуось — половина наибольшего диаметра эллипса.

Время, всемирное — *среднее солнечное время* гринвичского меридиана. Обозначается UT (англ. Universal Time).

Время, декретное — официально установленное время в городах и странах. Например, зимой в России официальное время на 1 час опережает *поясное время*, а летом (в период введения летнего времени) — на 2 часа. Декретное время вводят для более полного использования дневного света, особенно в летние месяцы года.

Время, звездное — *часовой угол* точки весеннего *равноденствия*; равен нулю в момент ее верхней *кульминации*.

Время, истинное солнечное — *часовой угол* Солнца; измеряется к западу от *небесного меридиана*; 15° соответствуют 1 часу. Момент пересечения Солнцем меридиана называют истинным полуднем. Истинное солнечное время показывают простые солнечные часы.

Время, поясное — время, установленное по международному соглашению в областях и странах для того, чтобы по всей планете отличие местного времени от всемирного составляло целое число часов. Вся поверхность Земли разделена приблизительно вдоль меридианов на 24 часовых пояса. Средние меридианы часовых поясов проходят по долготам 15°, 30°, 45°, ...к западу от Гринвича вдоль точек земной поверхности, в которых среднее солнечное время, соответственно, на 1, 2, 3, ... часа отстает от гринвичского. Обычно

города и прилегающие к ним области живут по времени ближайшего среднего меридиана. Линии, разделяющие зоны с различным официальным временем, называются границами часовых поясов. Обычно они следуют не строго вдоль меридианов, а совпадают с административными границами. В летние месяцы в некоторых странах для более полного использования светлого времени суток вводится летнее время, опережающее на 1 час поясное время или зимнее *декретное время*, если оно отличается от поясного.

Время, среднее солнечное — *часовой угол среднего солнца*, увеличенный на 12 часов. Когда среднее солнце на меридиане, среднее солнечное время равно 12 часам пополудни.

Высота — одна из двух координат горизонтальной системы: угловое расстояние небесного объекта от *горизонта* наблюдателя.

Галактический экватор — большой круг небесной сферы, проходящий вдоль средней линии Млечного Пути.

Галилеевы спутники Юпитера — четыре крупнейших спутника, открытые Галилеем в 1610 г. и названные С. Мариусом: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто.

Главная последовательность — основная группировка звезд в виде диагональной полосы на диаграмме «спектральный класс — светимость» или «температура поверхности — светимость» (диаграмма Герцшпрунга—Рассела). Эта полоса проходит от ярких и горячих к тусклым и относительно холодным звездам. В ней концентрируется большинство звезд, поскольку соответствующие ей физические условия отвечают самому длительному этапу в их эволюции, на котором в ядре звезды протекают термоядерные реакции с участием водорода.

Год, високосный — год, содержащий 366 *солнечных суток*; в ныне действующем григорианском календаре устанавливается путем введения даты 29 февраля в те года, номера которых делятся на 4 (например, 1996 год был високосный). Если же данным годом заканчивается столетие то високосным он считается лишь в том случае, если делится на 400. Так, 1800 г. и 1900 г. не были високосными, а 2000 г. — был. Название «високосный» связано с тем, что в Древнем Риме в качестве добавочного 366-го дня года дублировался 6-й день мартовских календ (за 6 дней до 1 марта), называвшийся *bi-sextus*, т. е. второе шестое.

Год, сидерический, или звездный — время, необходимое Земле для одного оборота вокруг Солнца, который начинается и заканчивается на линии, проведенной из центра Солнца в фиксированном направлении на небесной сфере; равен 365,2564 сут.

Год, календарный — интервал времени, близкий к тропическому году, но, из соображение удобства гражданского календаря, содержащий целое число суток. В юлианском и григорианском календарях

используют два типа календарного года — простой (365 сут) и високосный (366 сут), которые чередуются по определенным правилам.

Год, тропический — интервал времени между двумя последовательными прохождением Солнца через точку весеннего *равноденствия*; равен 365,2422 сут. Основой календаря служит именно этот год.

Горизонт — в просторечии, замкнутая вокруг наблюдателя линия, вдоль которой «земля встречается с небом». Астрономический (он же математический, или истинный) горизонт — это большой круг небесной сферы, равноудаленный от *зенита* и *надира* наблюдателя. Плоскость математического горизонта перпендикулярна линии отвеса и служит основной плоскостью в горизонтальной системе небесных координат, в которой направление на светило задается *азимутом* и высотой (или зенитным расстоянием, дополняющим высоту до 90°).

Двойная звезда — две звезды, видимые на небе близко друг к другу. Если звезды действительно расположены рядом и связаны силой тяготения, то это «физическая двойная», а если видны рядом в результате случайной проекции — то «оптическая двойная».

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела (или ...—Рессела) — диаграмма, показывающая связь между цветом (или *спектральным классом*) и *светимостью* звезд различного типа.

Долгота, галактическая — одна из координат в галактической системе; угол, измеряемый вдоль *галактического экватора* к востоку, от точки, обозначающей галактический центр, до меридиана, проходящего через небесное светило и галактические полюса.

Долгота, эклиптическая — одна из координат в эклиптической системе; угол, измеряемый вдоль *эклиптики* в сторону движения Солнца по эклиптике, между точкой весеннего *равноденствия* и меридианом, проходящим через небесное светило и полюса эклиптики.

Законы Кеплера — три закона движения планет вокруг Солнца, открытые Иоганном Кеплером в 1609–1619 гг. на основании многолетних наблюдений за положением планет, сделанных Тихо Браге в конце XVI в. Кеплер нашел, что: 1) планета движется по эллипсу, в фокусе которого расположено Солнце; 2) скорость планеты меняется так, что ее радиус-вектор (прямая, соединяющая планету с Солнцем) за равные промежутки времени описывает равные площади; 3) кубы средних расстояний планет от Солнца пропорциональны квадратам периодов их обращения вокруг Солнца. Позже, на основании законов механики и всемирного тяготения И. Ньютон дал объяснение законам Кеплера и уточнил, что при движении двух тел под действием взаимного гравитационного притяжения: 1) орбитами могут быть не только эллипс, но и другие конические сечения — гипербола и парабола; 2) плоскость орбиты неизменна в пространстве; 3) отношение куба среднего расстояния между телами к квадрату периода их взаимного обращения пропорционально

сумме масс этих тел. Если в системе более двух тел, то формально эти законы неверны. Однако, если масса одного из тел подавляюще велика (в Солнечной системе это Солнце), то законы Кеплера, уточненные Ньютоном, хорошо описывают истинное движение тел.

Затмение — ситуация, когда три небесных тела располагаются на одной прямой. При этом наблюдатель, находящийся на одном из этих тел, может видеть, как другие два тела совмещаются в проекции — одно закрывает собой другое, либо как тень от одного из тел ложится на другое. Наиболее известны солнечные и лунные затмения.

В моменты солнечных затмений Луна закрывает от нас Солнце. Если диск Луны полностью закрывает диск Солнца, то это полное затмение. Если Луна закрывает лишь часть солнечного диска, то это частное затмение. Если же в момент, когда центры дисков Луны и Солнца совместились, тонкий ободок солнечного диска оказался не закрытым (поскольку в этот момент угловой диаметр Луны меньше, чем Солнца), то такое затмение называют кольцеобразным.

В моменты лунных затмений земная тень ложится на Луну. Лунные затмения тоже бывают полные и частные в зависимости от того, покрывает земная тень весь лунный диск или только его часть. Если земная тень не касается лунного диска, но проходит вблизи него, происходит полутеневое лунное затмение. В этот момент для наблюдателя на Луне Земля закрывает собой часть солнечного диска; говорят, что на Луну ложится «полутень» Земли. Если же земная полутень покрывает лишь часть Луны, то это частное полутеневое лунное затмение (заметить его глазом очень сложно).

Звездная величина — физическая величина, характеризующая количество света, приходящего от небесного объекта к наблюдателю. Например, в звездных величинах указывают видимый блеск звезд. При этом блеск одного светила указывают путем его сравнения с блеском другого, принятого за эталон. Шкала звездных величин логарифмическая. Разница на 5 звездных величин точно соответствует 100-кратному различию в потоках света, приходящего от измеряемого и эталонного источников. Например, от 100 звезд 6-й звездной величины к нам приходит столько же света, сколько от одной звезды 1-й звездной величины.

Разность на 1 звездную величину соответствует отношению потоков света в $\sqrt[5]{100} \approx 2,512$ раза. Обозначают звездную величину латинской буквой «m» (от лат. *magnitudo* — величина) в виде верхнего индекса справа от числа. Направление шкалы звездных величин обратное, т. е. чем больше значение, тем слабее блеск объекта. Например, звезда 2-й звездной величины (2^m) примерно в 2,512 раза ярче звезды 3-й величины (3^m) и в $2,512 \times 2,512 = 6,310$ раза ярче звезды 4-й величины (4^m).

Видимая звездная величина (иногда ее называют просто — «звездная величина») определяет поток света, который наблюдатель фиксиру-

ет, непосредственно изучая объект. Ясно, что наблюдаемая яркость звезды зависит не только от реальной мощности ее излучения объекта, но и от расстояния до нее. Шкала видимых величин ведет начало от звездного каталога Гиппарха (до 161 — ок. 126 до н. э.), в котором все видимые глазом звезды впервые были разбиты на 6 классов по яркости. У звезд Ковша Б. Медведицы блеск около 2^m , у Веги около 0^m . У особо ярких светил значение звездной величины может быть и отрицательным: блеск Сириуса около $-1,5^m$ (т. е. поток света от него в 4 раза больше, чем от Веги), а блеск Венеры в некоторые моменты почти достигает -5^m (в это время поток света от нее почти в 100 раз больше, чем от Веги). Подчеркнем, что видимая звездная величина может быть измерена как невооруженным глазом, так и с помощью телескопа с фотопластинкой или другим приемником света. В данном случае «видимая» означает «наблюдаемая», «кажущаяся».

Абсолютная звездная величина указывает, какую видимую звездную величину имело бы светило в том случае, если бы расстояние от Земли до него составляло 10 парсеков и при этом отсутствовало бы *межзвездное поглощение света*. Таким образом, абсолютная звездная величина, в отличие от видимой, позволяет сравнивать истинные *светимости* небесных объектов.

Зенит — точка небесной сферы, расположенная вертикально над головой наблюдателя.

Зенитное расстояние — угол между направлениями на зенит и на данное светило. В горизонтальной системе координат одной координатой служит азимут, а второй — либо высота, либо зенитное расстояние (в сумме они составляют прямой угол).

Зодиак — зона на небе шириной по 9° в обе стороны от эклиптики, содержащая видимые пути Солнца, Луны и планет. Она проходит через 13 созвездий и делится на 12 знаков Зодиака.

Зодиакальный свет — слабое сияние, протянувшееся вдоль *эклиптики*. Лучше всего его видно сразу после окончания (или непосредственно перед началом) астрономических сумерек в той части неба, где зашло (или восходит) солнце. Оно возникает из-за рассеяния солнечного света на межпланетной пыли, сконцентрированной в плоскости Солнечной системы.

Квадратура — такое положение Луны или планеты, при котором ее *эклиптическая* долгота отличается от долготы Солнца на 90° .

Кентавры — класс малых планет Солнечной системы, движущихся между орбитами Юпитера и Нептуна. Первое такое тело обнаружил 18 октября 1977 г. американский астроном Чарлз Коуэл на Паломарской обсерватории. Этот объект, как астероид, получил очередной номер 2 060. Но уверенности в том, что это астероид, не было, поскольку на таком большом расстоянии от Солнца ядра комет еще не имеют хвостов. Поэтому объект называли Хироном в честь

легендарного кентавра, также имевшего «двойственную природу». Действительно, когда Хирон проходил в 1988 г. перигелий, у него появились газовая кома и хвост. В последующие годы было открыто еще несколько «кентавров».

Комета — малое тело Солнечной системы, в основном состоящее из льда и пыли. Приближаясь к Солнцу, ледяное тело кометы разогревается и начинает испаряться, окутывая себя газо-пылевой атмосферой — комой. Под давлением солнечного света и частиц солнечного ветра это вещество уносится от ядра кометы, образуя длинный «хвост».

Корона — внешняя часть солнечной атмосферы, протянувшаяся на миллионы километров над *фотосферой*; ее подразделяют на внешнюю корону, видимую только в моменты полных солнечных *затмений*, и внутреннюю корону, которую можно наблюдать с помощью *коронोगрафа*.

Коронोगраф — телескоп для наблюдения солнечной *короны* в периоды между *затмениями*. В его фокусе, где объектив строит изображение Солнца, находится круглая заслонка, — «искусственная Луна», закрывающая изображение яркой фотосферы, но оставляющая видимой корону. На космических телескопах и наземных телескопах с системой адаптивной оптики используют *звездный коронोगраф*, в котором затемняется изображение яркой звезды для поиска в ее окрестности слабых объектов: звезд-спутников, планет или околозвездного газо-пылевого диска.

Космические скорости — характерные скорости движения спутников вблизи массивных космических тел — планет или звезд. Если не указано конкретное тело, то подразумевается, что это Земля. «Первая космическая скорость» — это скорость обращения спутника по низкой круговой орбите, проходящей вблизи поверхности планеты; эту скорость называют также «круговой скоростью» и обозначают как V_1 , V_I или $V_{кр}$. Если масса планеты M , а ее радиус R , то величина $V_1 = \sqrt{GM/R}$. Значение V_1 у самой поверхности Земли 7,9 км/с, но там спутник летать не может из-за атмосферы. Поэтому обычно значение этой скорости приводят для низкой круговой орбиты за пределом плотных слоев атмосферы, на высоте $H = 200$ км от поверхности Земли: так $V_1 = 7,8$ км/с.

Чтобы при старте с поверхности планеты (лишенной атмосферы) вырваться из поля ее притяжения, телу необходимо сообщить скорость не меньше «второй космической» (другие ее названия: скорость убегания, скорость ухода, скорость освобождения, скорость ускользания, параболическая скорость, критическая скорость); ее обозначают как V_2 , V_{II} или $V_{осв}$. Величина $V_2 = \sqrt{2GM/R}$; у поверхности Земли она составляет 11,2 км/с.

Круг высоты — большой круг на небесной сфере, проходящий через *зенит* и данное светило.

Круг склонения — большой круг на небесной сфере, проходящий через *полюса мира* и данное светило.

Кульминация — прохождение светила через *небесный меридиан*. Пересекая меридиан в верхней кульминации, звезда (или планета) имеет максимальную высоту, а в нижней кульминации — минимальную и может находиться под *горизонтом*.

Лимб — видимый край диска Луны, Солнца или планеты.

Линия изменения даты — линия на поверхности Земли, проходящая приблизительно по *меридиану* с долготой 180° и служащая для облегчения отсчета календарных дат при трансокеанских и кругосветных плаваниях и перелетах. Пересекая линию в западном направлении, следует прибавлять сутки в своем календаре, а пересекая в восточном — отнимать.

Межзвездное поглощение света — ослабление оптического излучения, распространяющегося сквозь *межзвездную среду*. Рассеяние и поглощение света в основном обязано межзвездной пыли, поэтому оно достигает максимального значения в направлении на плотные газо-пылевые межзвездные облака, сконцентрированные в диске Галактики. В окрестности Солнца в плоскости Галактики поглощение света составляет около 2 *звездных величин* на 1 кпк пройденного светом расстояния. Это означает, что блеск звезды, удаленной от нас на 1 кпк, ослаблен межзвездным поглощением в $2,512^2 = 6,3$ раза. А если звезда находится в центре Галактики, на расстоянии около 8 кпк от Солнца, то ее блеск ослаблен межзвездным поглощением на $16^m (= 2^m/\text{кпк} \times 8 \text{ кпк})$, то есть в $2,512^{16} = 2,5$ млн раз. Именно поэтому мы не видим центральную область нашей Галактики.

Межзвездная среда — крайне разреженное вещество, заполняющее пространство между звездами в галактике. Основные компоненты межзвездной среды — это атомы и молекулы газа (в основном водород, гелий, кислород, азот, углерод и их простейшие соединения), а также мельчайшие твердые частицы космической пыли. Поскольку атомы и молекулы газа составляют более 95 % массы межзвездной среды, ее часто называют межзвездным газом.

Месяц — промежуток времени, близкий к периоду обращения Луны вокруг Земли. В солнечных календарях год делят на календарные месяцы разной продолжительности: в современном (григорианском) календаре год состоит из 12 месяцев продолжительностью от 28 до 31 суток, не согласованных с фазами Луны.

Синодический месяц — период смены лунных фаз ($29^d 12^h 44^m 02,78^s = 29,5305882$ сут; меняется от $29,25^d$ до $29,83^d$ вследствие эллиптичности лунной орбиты); служит основанием лунных календарей.

Сидерический (звездный) месяц — промежуток времени, за который Луна совершает оборот вокруг Земли и возвращается в ту же

точку небесной сферы относительно звезд; равен периоду вращения Луны ($27^{\text{d}}07^{\text{h}}43^{\text{m}}11,47^{\text{s}} = 27,321661$ сут).

Драконический месяц — промежуток времени между последовательными прохождениями Луны через один и тот же узел ее орбиты на эклиптике ($27,2122^{\text{d}}$); имеет значение при расчете затмений.

Метеор — вспышка или светящийся след, остающийся на мгновение после разрушения небольшого космического тела (метеороида), влетевшего в атмосферу Земли. Греческое слово *meteora* означает «атмосферное (или небесное) явление». В народе метеоры называют «падающими звездами». Как правило, метеороиды — это частицы комет или астероидов. Влетая с большой скоростью в атмосферу Земли, эти частицы от трения раскаляются и заставляют светиться окружающий воздух, оставляя за собой яркий след — метеор. Наиболее мощные метеоры — *болиды* — бывают видны даже днем.

Метеорит (в переводе с греческого «камень с неба») — твердое тело естественного происхождения, упавшее на поверхность Земли из космоса. Различают каменные, железо-каменные и железные метеориты. Обычно они имеют вес от нескольких граммов до нескольких килограммов. Крупнейший из найденных — железный метеорит Гоба — весит 60 т и до сих пор лежит там, где был обнаружен, — в Южной Африке. Большинство метеоритов представляют собой осколки астероидов, но некоторые метеориты, возможно, попали на Землю с Луны и даже с Марса.

Млечный Путь — светлая клочковатая туманная полоса, опоясывающая ночное небо по большому кругу, образованная светом миллионов далеких звезд диска нашей Галактики. Иногда Млечным Путем называют и саму нашу Галактику.

Надир — точка небесной сферы, расположенная вертикально вниз от наблюдателя, в направлении, противоположном *зениту*.

Небесный меридиан (лат. *meridianus*, полуденный) — большой круг небесной сферы, проходящий через *зенит* наблюдателя и точки северного и южного *полюсов мира*. Пересекается с *горизонтом* в точках севера и юга. Иногда его называют просто «меридиан» и нередко имеют при этом в виду лишь половину большого круга, обращенную в ту сторону горизонта, где светила испытывают верхнюю кульминацию (в Северном полушарии это южная сторона неба, а в Южном — северная).

Небесный экватор — большой круг небесной сферы, равноудаленный от северного и южного *полюсов мира*; лежит в плоскости земного экватора и служит основанием экваториальной системы небесных координат.

Ось мира — прямая, проходящая через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли. Вокруг оси мира совершается видимое суточное движение небесных светил.

Параллакс — видимое смещение более близкого объекта на фоне более далеких при перемещении наблюдателя с одного конца некоторой базы на другой ее конец. Например, перемещение Земли за полгода по орбите вызывает заметный параллакс у близких звезд, не превышающий, однако, 1 угловой секунды. Если угол параллакса (обозначается как π или p) мал и выражен в радианах, а длина перпендикулярной к направлению на объект базы составляет B , то расстояние до объекта равно $D = B/\pi$. При фиксированной базе сам параллактический угол может служить мерой расстояния до объекта.

Парсек — расстояние до объекта, параллакс которого при базе в 1 астрономическую единицу составляет $1''$; парсек равен 3,26 светового года или $3,086 \cdot 10^{16}$ м.

Пепельный свет Луны — темная часть Луны, слабо освещенная солнечным светом, отраженным Землей. Особенно заметна в период малых фаз Луны, сразу после новолуния, когда к Луне обращена почти вся освещенная Солнцем поверхность Земли.

Перигей — ближайшая к Земле точка орбиты Луны или искусственного спутника.

Перигелий — ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты или иного тела в Солнечной системе.

Полюса мира (северный и южный) — точки пересечения небесной сферы с осью мира, проходящей через наблюдателя параллельно оси вращения Земли. При наблюдении неба кажется, что все светила обращаются вокруг полюсов мира.

Прецессия — коническое движение земной оси вокруг полюса эклиптики с периодом около 25 800 лет, вызванное гравитационным влиянием Луны и Солнца на экваториальное вздутие Земли. Вследствие прецессии небесный экватор поворачивается с тем же периодом в направлении суточного движения светил, а точки его пересечения с эклиптической (точки *равноденствия*) перемещаются навстречу видимому годовичному движению Солнца по эклиптике со скоростью около $50''$ в год, делая более ранними (предваряя) моменты равноденствий. Слово «прецессия» происходит от латинского *praecessio* — предварение.

Предварение равноденствий делает тропический год короче сидерического (звездного) года. К тому же, медленное изменение ориентации небесного экватора и перемещение точки весеннего равноденствия вызывает изменение экваториальных координат всех небесных светил. Именно поэтому в астрономических каталогах и атласах указывается эпоха, для которой приведены координаты звезд.

Противостояние — такое расположение планеты, когда ее долгота эклиптическая отличается на 180° от долготы Солнца. В противостоянии планета пересекает небесный меридиан в полночь, располагается ближе всего к Земле и имеет максимальный блеск.

Прямое восхождение — одна из координат в экваториальной системе. Угол, измеряемый к востоку вдоль небесного экватора от точки весеннего *равноденствия* до *меридиана*, проходящего через *полюс мира* и небесное светило.

Равноденствия, точки — две точки небесной сферы, в которых *эклиптика* пересекает небесный экватор. Переходя из Южного полушария в Северное, Солнце проходит через точку весеннего равноденствия 20 или 21 марта, а обратно — через точку осеннего равноденствия 22 или 23 сентября. В эти дни по всей Земле Солнце перемещается по небу от восхода до заката почти ровно за 12 часов и, следовательно, везде продолжительность дня и ночи одинакова. Через точку весеннего равноденствия проходят нулевые меридианы в эклиптической и экваториальной системах координат. Когда астрономия складывалась как наука, около 2 000 лет назад, эта точка располагалась в созвездии Овна. В результате прецессии она переместилась примерно на 20° к западу и теперь находится в созвездии Рыб. Точка осеннего равноденствия раньше была в Весах, а теперь в Деве.

Светимость — мощность излучения небесного тела, т. е. количество энергии, излучаемой им за единицу времени. Измеряется в ваттах ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 10^7 \text{ эрг/с}$). Говоря о светимости, обычно уточняют диапазон спектра (оптическая светимость, радиосветимость) или указывают, что речь идет о суммарной мощности излучения во всех диапазонах (полная светимость).

Световой год — расстояние, которое свет проходит в вакууме за 1 земной (тропический) *год*; составляет $9,46 \cdot 10^{15}$ м или 0,307 пк.

Сидерический период обращения или вращения (лат. *sidereus*, звездный) — период, определенный в невращающейся системе координат; как было принято раньше говорить — относительно звезд.

Синодический период обращения, или вращения (греч. *synodos*, собрание, соединение) — период, определенный относительно движущейся Земли; из-за движения Земли по орбите не совпадает с сидерическим периодом. Так, синодический период вращения экваториальных слоев Солнца — 26,8 сут., а сидерический — 25,4 сут. Синодический период обращения планеты вокруг Солнца равен времени между ее двумя последовательными одноименными конфигурациями, например, нижними соединениями. Для движения по круговым орбитам можно получить связь между синодическим (S) и сидерическим (T) периодами планеты: для нижних планет $1/S = 1/T - 1/T_0$ для верхних планет $1/S = 1/T_0 - 1/T$, где T_0 — сидерический период Земли, т. е. 1 звездный год.

Склонение — одна из координат в экваториальной системе; угловое расстояние светила к северу (со знаком «+») или к югу (со знаком «-») от *небесного экватора*.

Солнцестояния, точки — две точки на *эклиптике*, в которых Солнце в течение года достигает максимального и минимального *склонения*.

Около 22 июня Солнце проходит точку летнего солнцестояния, где его склонение $+23,5^\circ$, а около 22 декабря проходит точку зимнего солнцестояния, имея склонение $-23,5^\circ$.

Спектральные классы звезд — температурная последовательность классов звезд, выделяемых по характеру их спектров. Спектральные классы тесно связаны с температурой (в меньшей степени — с плотностью и химическим составом) звездных атмосфер. Диапазону эффективных температур звезд от 50 000 до 2 000 К соответствует последовательность спектральных классов, обозначаемых буквами O, B, A, F, G, K, M, L и T. Дополнительные классы R, N и S отражают вариации химического состава холодных звезд. Промежуток между соседними классами делится на 10 подклассов — от 0 до 9 — с ростом в сторону уменьшения температуры (пример: ..., A8, A9, F0, F1, ...). Наше Солнце имеет спектральный класс G2.

Спектрограф — прибор для регистрации спектра исследуемого объекта. Основные части оптического спектрографа: щель для выделения узкой полоски изображения, коллиматор (объектив) для создания параллельных пучков света от каждой точки щели, стеклянная призма или дифракционная решетка для разложения пучка света в спектр, камера для фотографирования спектра.

Среднее солнце — воображаемая точка, равномерно движущаяся с запада на восток по *небесному экватору*, и совершающая полный оборот относительно точки весеннего *равноденствия* в течение тропического года. Введено как вспомогательное расчетное средство для установления однородной шкалы времени.

Стояние — кажущаяся остановка в видимом движении планеты при ее переходе от прямого движения к попятному и наоборот.

Сумерки — время суток, когда Солнце находится под *горизонтом* (перед рассветом или после заката), но виден солнечный свет, рассеянный в верхних слоях земной атмосферы. Гражданские сумерки заканчиваются, когда Солнце опускается на 6° под горизонт, навигационные — на 12° , а когда Солнце опускается на 18° , заканчиваются астрономические сумерки и наступает ночь. Сумерки наблюдаются на любой планете, имеющей атмосферу.

Сутки — единица времени, равная 86 400 секундам. Исторически сутки возникли как период видимого движения Солнца на небе Земли.

Сутки, звездные — промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия. Величина этого временного промежутка равна $23^h 56^m 04^s$. Звездные сутки делятся на звездные часы, минуты и секунды. Звездный час короче общепринятого часа на 9,86 с. Как единица времени звездные сутки употребляются редко, в основном при организации астрономических наблюдений.

Сутки, истинные солнечные — промежуток времени между двумя последовательными *кульминациями* Солнца. Продолжительность истинных солнечных суток в течение года изменяется приблизительно от 86 399,7 с до 86 400,4 с. Это происходит из-за неравномерности годовичного движения Солнца по *эклиптике* и вследствие наклона эклиптики к *небесному экватору*.

Сутки, календарные — промежуток времени, равный 86 400 секунд. В большинстве стран начало суток приходится на 0 часов, т. е. на полночь. Но это не всегда было так: в библейские времена, в Древней Греции и Иудее, а также в некоторые другие эпохи, начало дня приходилось на вечернее время. У римлян в различные периоды их истории начало дня приходилось на разное время суток. В астрономии до 1925 г. началом календарных суток считался полдень, поскольку тем, кто проводит наблюдения ночью, удобно весь ночной период относить к одним суткам. Сейчас астрономы пользуются обычными гражданскими сутками, но указывают дату и время суток, как правило, не по местному, а по *всемирному времени*, т. е. по Гринвичу, чтобы не допускать разночтений в моментах наблюдения небесных явлений.

Сутки, средние солнечные — промежуток времени между двумя последовательными *кульминациями среднего солнца*. Употреблялись как единица времени в астрономии до 1976 г. Длина средних солнечных суток с высокой точностью равна 86 400 с.

Терминатор — линия, отделяющая освещенное полушарие Луны или планеты от неосвещенного.

Точка весеннего равноденствия — см.: *равноденствия точки*.

Фаза — определенная стадия в периодическом изменении видимой формы освещенного полушария Луны или планеты. Например, фазы Луны — это новолуние, первая четверть, последняя четверть, полнолуние. Фаза Луны выражается численно как отношение площади освещенной части видимого диска ко всей его площади: 1 — полнолуние, 0 — новолуние, 0,5 — первая и последняя четверти, и т. п. Фаза *затмения* — доля диаметра диска Солнца (или Луны), закрытая затмевающим объектом (т. е. Луной или тенью Земли).

Фотосфера — непрозрачный нижний слой атмосферы Солнца, который мы видим в оптический телескоп и воспринимаем как поверхность Солнца. Толщина фотосферы 200–300 км, температура в ней уменьшается с высотой от 8–10 тыс. К до 4 300 К. От других слоев Солнца фотосфера отличается минимальной температурой и низкой степенью ионизации газа.

Часовой угол — угловое расстояние, измеренное вдоль *небесного экватора* на запад от *небесного меридиана* до *часового круга*, проходящего через избранную точку на небесной сфере. Часовой угол звезды равен *звездному времени* минус *прямое восхождение* этой звезды. Выражается в часовой мере из расчета 24 часа = 360°.

Часовой круг, или круг склонений — большой круг небесной сферы, проходящий через северный и южный *полюсы мира*. В экваториальной системе координат он играет ту же роль, что и земной меридиан в географических координатах.

Черная дыра — область в пространстве-времени, возникшая в ходе сильного сжатия материи, в которой гравитационное притяжение так велико, что ни вещество, ни свет не могут ее покинуть. Черная дыра окружена поверхностью, из под которой ничто не может выйти; эту поверхность называют «горизонтом событий».

Широта, галактическая — угловое расстояние светила к северу или югу от галактического экватора, большого круга, представляющего плоскость Млечного Пути.

Широта, эклиптическая — угловое расстояние светила к северу или югу от эклиптики. Вместе с эклиптической долготой образует эклиптическую систему координат.

Экзопланета — планета, принадлежащая иной, не Солнечной планетной системе.

Эксцентриситет орбиты — число, характеризующее форму орбиты космического тела, в том случае, если ее можно представить одним из конических сечений (круг, эллипс, парабола, гипербола). Эксцентриситет обозначается латинской буквой e и выражается через отношение большой (a) и малой (b) полуосей орбиты: $e^2 = 1 - b^2/a^2$. При $e = 0$ орбита круговая, при $0 < e < 1$ — эллиптическая, при $e = 1$ — параболическая, при $e > 1$ — гиперболическая.

Эклиптика — видимый путь Солнца на небесной сфере в течение *тропического года*; большой круг в плоскости земной орбиты.

Элонгация — угловое расстояние между двумя точками небесной сферы. Для планеты — разность *эклиптических долгот* планеты и Солнца.

Эфемерида — таблица предвычисленных для последовательных моментов времени положений Солнца, Луны, планет, спутников и других небесных объектов.



Литература

1. Сурдин В. Г. *Астрономические олимпиады*. М.: Изд-во МГУ, 1995.
2. Гаврилов М. Г. *Звездный мир. Сборник задач по астрономии и космической физике*. Черноголовка—Москва, 1998.
3. *Олимпиады по астрономии и космической физике* / Составитель Гаврилов М. Г. Под редакцией Сурдина В. Г. М.: Бюро «Квантум», 1998.
4. Воронцов-Вельяминов Б. А. *Сборник задач и практических упражнений по астрономии*. М.: Наука, 1977.
5. Волинский Б. А., Малахова Г. И., Стамейкина И. А. *Задачи и упражнения по астрономии для средней школы*. М.: Просвещение, 1965.
6. Орлов В. Ф. *300 вопросов по астрономии*. М.: Просвещение, 1967.
7. Лепилов В. П. *Литература и астрономия*. Астрахань, 1991.
8. Максимачев Б. А., Пшеничнер Б. Г., Чичмарь В. В. *Викторина юных астрономов и космонавтов*. М.: МГДПиШ, 1970.
9. Малахова Г. И., Страут Е. К. *Дидактический материал по астрономии*. М.: Просвещение, 1979.
10. *Астрономический календарь. Постоянная часть*. М.: Наука, 1981.
11. King H. C. *The History of the Telescope*. London: Ch. Griffin and Co., 1955.
12. Каменьщиков Н. *Астрономические задачи. Сборник для юношества*. Москва—Петроград: Государственное издательство, 1923.
13. Сурдин В. Г. *Приливные явления во Вселенной*. М.: Знание, 1986.
14. Новиков И. Д. *Куда течет река времени?* М.: Молодая гвардия, 1990.
15. Порфирьев В. В. *Астрономия: Учебник для 11 кл.* М.: Просвещение, 1997.
16. Субботин Г. П. *Сборник задач по астрономии*. М.: Аквариум, 1997.
17. Кларк А. *Черты будущего*. М.: Мир, 1966. Пер. с англ.: Clarke Arthur C. *Profiles of the Future*. New-York, 1962.
18. *Пять минут на размышление* / Сб. по материалам Л. Успенского, А. Студенцова, Я. Перельмана, Игнатьева и др. М.: Гос. изд-во культурно-просветительной литературы, 1951.

19. Кеплер И. Сон, или Посмертное сочинение о лунной астрономии // Кеплер И. О шестиугольных снежинках. М.: Наука, 1982.
20. Гелл-Ман М. Вопросы на будущее // Фундаментальная структура материи / Под ред. Дж. Малви. М.: Мир, 1984. С. 284
21. Физиология человека / Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. Пер. с англ. под ред. акад. П. Г. Костюка. Т. 1, гл. 11. М.: Мир, 1996.
22. Флиндт Р. Биология в цифрах. М.: Мир, 1992.
23. Ланге В. Н. Физические парадоксы, софизмы. М.: Просвещение, 1966.
24. Сурдин В. Г. Межзвездным перелетам помогают... звезды // Квант, 9/1991. С. 52.
25. Чернов Ю. М. Земля и звезды. Повесть о Павле Штернберге. М.: Политиздат, 1975.
26. Whiston W., Ditton H. A New Method for Discovering the Longitude both at Sea and Land. London, 1714.
27. Хауз Д. Гринвичское время и открытие долготы. М.: Мир, 1983.
28. Дарвин Дж. Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. М.: Наука, 1965.
29. Гусев Е. Б. Качественные задачи по астрономии. Рязань: Рязанский областной институт развития образования, 1996.
30. Иванов В. В., Кривов А. В., Денисенков П. А. Парадоксальная Вселенная. 175 задач по астрономии. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1997.
31. Мальшакова Н. К. Ярославские астрономические олимпиады. Ярославль: Ярославский планетарий, 2001.
32. Бернс Дж. А. Динамическая эволюция и происхождение марсианских лун // Спутники Марса / Под. ред. П. Сейделмена. М.: Мир, 1981. С. 70–94.
33. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 1994.
34. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета. М.: Наука, 1965.
35. Левантовский В. И. Механика космического полета в элементарном изложении. 3-е изд. М.: Наука, 1980.
36. Сурдин В. Г. Динамика звездных систем. М.: МЦНМО, 2001.
37. Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии / Под ред. В. Г. Сурдина. 5-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 688 с.
38. James G. Laframboise (laframboise@quasar.phys.yorku.ca), Chou B. Ralph (bchou@sciborg.uwaterloo.ca) Space mirror experiments: a potential threat to human eyes // Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 2001.

Оглавление

Предисловие	3
Задачи и решения	5
Глава 1. Координаты	6
Глава 2. Время	32
Глава 3. Видимое движение светил	59
Глава 4. Приборы и наблюдения	93
Глава 5. Космонавтика	120
Глава 6. Природа Солнечной системы	146
Глава 7. Мир звезд и галактик	181
Глава 8. Вокруг астрономии	193
Приложения	213
Справочные данные	214
Астрономические термины	222
Литература	237

При изучении наук задачи полезнее правил.
И. Ньютон

В книге собрано **430** задач

★
*У каких светил азимут
в вашем городе никогда
не равен нулю?*

★
*Когда разница между юлианским
и григорианским календарями
составит 14 дней?*

★
*Когда мы ближе к Солнцу –
зимой или летом?*

★
*Определите, где сегодня
день равен ночи?*

★
*Обыкновенно говорят, что
Солнце восходит на востоке,
а заходит на западе.
Так ли это на самом деле?*

★
*Сколько раз в году Солнце
на экваторе бывает в зените?*

★
На какой стороне Луны ночь темнее?

★
*Может ли астроном,
живущий в системе α Кентавра,
заметить в телескоп
планеты Солнечной системы?*



Часть задач – классические,
часть – совершенно новые.

Все решения составлены
автором книги и нередко
дополняют и даже
исправляют ошибки
классических решений.

Уровень задач в среднем
ниже олимпиадного,
Хотя отдельные задачи
потребуют упорной работы.

Абсолютное большинство
задач "с изюминкой"; не
торопитесь давать ответ,
даже если на первый взгляд
задача покажется простой.

НАУЧНАЯ **УРСС**
И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

