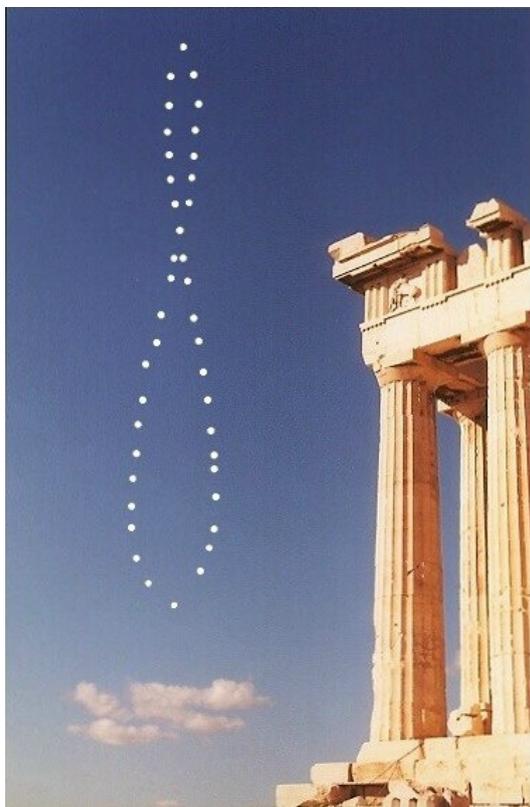


# Космография



Москва  
Издательство МЦНМО  
2009

ББК 22.1  
Ш47

**Шень А.**

Ш47 Космография. — М.: МЦНМО, 2009. — ?? с.  
ISBN 978-5-????-???-?

Разбираются основные вопросы космографии: как движутся звёзды по небу, отчего бывают зима и лето, почему Луна видна в форме серпа, когда и как происходят затмения. Помимо сведений об устройстве окружающей действительности, книга содержит задачи для самостоятельного решения.

ББК 22.1

Оригинал-макет предоставлен автором.

Фотографии на обложке (аналемма) и страницах 25 (фазы Луны), 28, 29 (затмение Луны), 30 (фазы солнечного затмения), 31 (сравнение видимого размера Луны в апогее и перигее), 32 (частное солнечное затмение), 32 (солнечная корона) и 34 (серп Луны) любезно предоставил для этой брошюры астрофотограф из Греции, Anthony Ayomamitis (сайт с его фотографиями: [www.perseus.gr](http://www.perseus.gr)).

Фотография тени Луны на с. 31: © CNES/HAIGNERE Jean-Pierre, 1999, сайт <http://cnes.photonpro.net>, разрешено использование в образовательных целях. Фотография солнечных часов в Таганроге на с. 23 (файл [Sundial\\_Taganrog.jpg](#) с сайта [commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org)) сделана Александром Миргородским для [TaganrogCity.Com](http://TaganrogCity.Com), разрешено любое использование.

Книга является свободно распространяемой; электронная версия доступна по адресу <ftp://ftp.mccme.ru/users/shen/cosmo.zip> (исходные тексты) и <ftp://ftp.mccme.ru/users/shen/cosmo.pdf> (файл книги)

Рисунки и оформление книги: Яна Елисеева

*Александр Шень*

Космография

Подписано в печать ????.2008 г. Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Печ. л. ??. Тираж ??? экз. Заказ №

Издательство Московского центра непрерывного математического образования  
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11. Тел. 241-74-83.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ФГУП «Полиграфические ресурсы».

ISBN 978-5-????-???-? © Шень А. (текст), Ayomamitis A. (фото), 2008

*Владимиру Андреевичу Успенскому,  
не боящемуся объяснять общеизвестное*

## 1. К читателю

В программах русских гимназий и школ других стран был такой предмет: «космография». Там объясняли, отчего бывают день и ночь, зима и лето, почему Луна иногда видна в виде серпа и так далее. Благодаря замечательным достижениям астрономии и техники эти сведения постепенно выпали из школьной программы — кому интересно слушать про тропики и полярный круг, когда люди побывали на Луне, получили фотографии Марса и Сатурна с близкого расстояния, открыли чёрные дыры и много других потрясающих вещей. В результате сведения из космографии попали в число прописных истин, которые мало кто знает.

Если вы относитесь к счастливому меньшинству и можете без труда сказать, восходит ли Сириус<sup>1</sup> каждый день в одном и том же месте горизонта или в разных, где и когда Солнце бывает видно в зените и может ли серп Луны быть направлен рождками в точности вниз, то в этой брошюре ничего нового для Вас не будет, и автор может только извиниться. Но если нет, то «за мной, читатель!»

## 2. Бездна звезд полна

Представьте себе, что поздним вечером вы навели телескоп на какую-то звезду и закрепили его. Звезда, двигаясь по небу, вскоре уйдёт из поля зрения. На следующий вечер, при такой же ясной погоде, вы смотрите в телескоп, ожидая появления этой звезды. Пройдёт ли она через поле зрения или мимо?

Ещё вопрос. Известно, что не все звёзды видны отовсюду.<sup>2</sup> Существуют ли звёзды, которые можно увидеть в Петербурге, но нельзя увидеть (ни в

---

<sup>1</sup> Самая яркая звезда на небе, не считая Солнца.

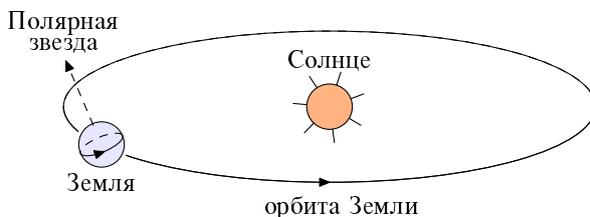
<sup>2</sup> Поэт В. Г. Бенедиктов (1807–1873) писал своему приятелю И. А. Гончарову (1812–1891), когда тот в 1852 году собирался в дальнее путешествие на фрегате «Паллада», описанное в одноимённой книге: «И ты свершишь плаучие заезды / в те древние и новые места, / где в небесах другие блещут звезды, / где свет лиет созвездие Креста». Имеется в виду созвездие Южного Креста, которое в наших широтах не видно.

какое время года) в Москве? А наоборот — звёзды, которые можно увидеть в Москве, но нельзя увидеть в Петербурге?

## Движение Земли

Если вы не сразу можете ответить на эти вопросы, то надо вспомнить гелиоцентрическую систему Николая Коперника (1473–1543). Согласно этой системе:

- Земля имеет форму шара.
- Земля вращается вокруг неподвижного Солнца по круговой орбите, делая оборот (возвращаясь на прежнее место) примерно за год.
- Земля также вращается вокруг своей оси, делая оборот примерно за сутки. Концы этой оси (точки, где она пересекает Землю) называются северным и южным полюсами.
- Земная ось сохраняет своё направление в пространстве (её северный конец остаётся направленным примерно на Полярную звезду, а южный — в район созвездия Октанта.<sup>3</sup>
- Размер Земли мал по сравнению с расстоянием до Солнца (радиусом орбиты Земли). В свою очередь это расстояние мало по сравнению с расстоянием до звёзд.



На этом рисунке не соблюден масштаб (иначе Земля выглядела бы как точка). Относительные размеры можно представить себе так:

- окружность Земли примерно 40 000 км (примерно вчетверо больше, чем современный лайнер может пролететь без посадки); свет и радиоволны проходят такое расстояние примерно за восьмую часть секунды;

<sup>3</sup>Традиционным символом южного полушария служит созвездие Южного Креста (см. цитату из Бенедиктова), но оно довольно далеко от южного полюса мира (отстоит примерно на  $30^\circ$ ). Между созвездиями Южного Креста и Октанта есть ещё созвездия Мухи и Хамелеона.

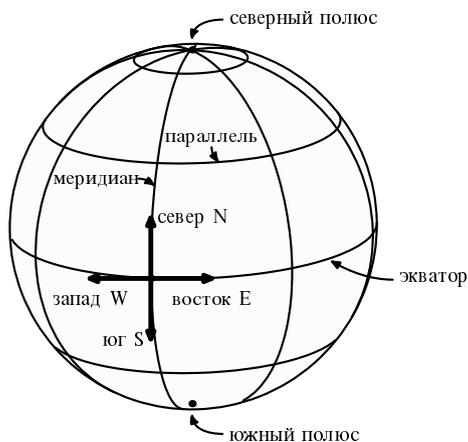
- до Солнца свет идёт гораздо дольше, около 8 минут;
- до ближайших (известных) звёзд свет идёт больше четырёх лет; до Полярной звезды — больше 400 лет.

Разница в расстояниях такова, что если нас интересует движение (кажущееся — за счёт вращения Земли) звёзд по небу, то движение Земли вокруг Солнца можно не учитывать, из-за него направление на звёзды практически не меняется. (С этой точки зрения пренебрежимо мало и собственное движение звёзд в пространстве — чтобы его заметить, нужны точные измерения с помощью телескопов за длительный промежуток времени; угловая скорость не превосходит долей угловой минуты за год.)

## Стороны света

Для начала вспомним о сторонах света. Двигаясь на север  $N$  [англ. Nord] к северному полюсу или на юг  $S$  [South], мы идём по меридиану (по дуге окружности, проходящей через полюса). Если стать лицом на юг, то слева от нас будет восток  $E$  [East], а справа — запад  $W$  [West]. (Направления на восток и запад образуют прямой угол с направлениями на север и юг.)

Двигаясь из какой-то точки всё время на восток, мы не приближаемся к полюсу и не отдаляемся от него, и через некоторое время сделаем круг (параллель). Все меридианы — круги одинакового размера, а параллели — разного. Получаются два семейства окружностей, всегда пересекающихся под прямым углом.



Земной шар и стороны света

Направление на север можно определить по компасу: один конец стрелки указывает на север, второй — на юг. (Надо только иметь в виду, что магнитные полюса Земли, на которые указывает компас, не совсем совпадают с географическими, и это существенно, если нужна больш́ая точность или если путешествовать близко к полюсу.)

Северное и южное полушария Земли разделены экватором — самой большой параллелью. Широта местности определяет, как далеко мы от экватора (на какой параллели). На экваторе широта равна нулю, северный полюс находится на  $90^\circ$  северной широты, южный — на  $90^\circ$  градусах южной. (Более формально можно определить широту как угол, который образует с плоскостью экватора луч из центра Земли в данную точку.) Помимо широты, положение точки на местности задаётся долготой. Долгота определяет, на каком меридиане находится точка. По традиции долгота измеряется от меридиана обсерватории в Гринвиче (пригород Лондона, Великобритания).

Скажем, Чукотка находится на меридиане, противоположном Гринвичскому (так что там сходятся  $180^\circ$  восточной и  $180^\circ$  западной долготы), Токио — на  $139^\circ$  восточной долготы, Хабаровск — на  $135^\circ$ , Владивосток — на  $131^\circ$ , Иркутск — на  $104^\circ$ , Новосибирск — на  $83^\circ$ , Екатеринбург — на  $60^\circ$ , Казань — на  $49^\circ$ , Москва — на  $37^\circ$ , Смоленск — на  $32^\circ$ , Минск — на  $27^\circ$ , Варшава — на  $21^\circ$ , Берлин — на  $13^\circ$ , Париж — на  $2^\circ$  (все — восточной долготы), Лондон — почти на Гринвичском меридиане (центр Лондона немного западнее Гринвича), Дублин — на  $6^\circ$  западной долготы, Рейкьявик — на  $22^\circ$ , Нью Йорк — на  $74^\circ$ , Чикаго — на  $87^\circ$ , Сан-Франциско — на  $122^\circ$ , восточный берег Берингова пролива (разделяющего Аляску и Чукотку) — на  $168^\circ$  западной долготы.

Изображение Земли на картах в координатах (долгота, широта) называют проекцией Меркатора (в честь географа XVI века).

В какую сторону вращается Земля, если смотреть с Полярной звезды (на северный полюс Земли): против часовой стрелки или по часовой стрелке? Это легко понять, если вспомнить, что на востоке России (во Владивостоке или Хабаровске) утро наступает раньше, чем на западе (в Москве или Смоленске). Значит, Земля сначала подставляет под солнечный свет восточную часть России, а потом западную, то есть вращается против часовой стрелки. Другое объяснение: раз Солнце встаёт на востоке, значит, там уже наступил день, когда у нас он только начинается. (Если эти объяснения кажутся непонятными, полезно посмотреть на глобус.)

Более практический вопрос: как найти направление на север по звёздам? Если представить себе ось Земли, направленную на Полярную звезду, то ясно, что в любой точке Земли Полярная звезда находится над горизонтом

в направлении севера. Исключением является только северный полюс, где Полярная звезда видна в зените (в точности наверху) — но там и слова «направление на север» не имеют смысла. Во всех остальных местах, где видна Полярная, надо посмотреть, над какой точкой горизонта она находится, и это будет направление на север.

А где видна Полярная звезда? Фонарь виден в тех местах, куда доходит его свет; Полярная звезда освещает северное полушарие и видна там же. Высота её над горизонтом зависит от широты местности. На экваторе широта равна нулю, и Полярная на горизонте. На северном полюсе широта равна  $90^\circ$ , и Полярная в зените. По мере движения от экватора к полюсу широта  $\varphi$  возрастает (равномерно) от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , и соответственно Полярная звезда поднимается над горизонтом (на  $\varphi$  градусов).

## Небесная сфера

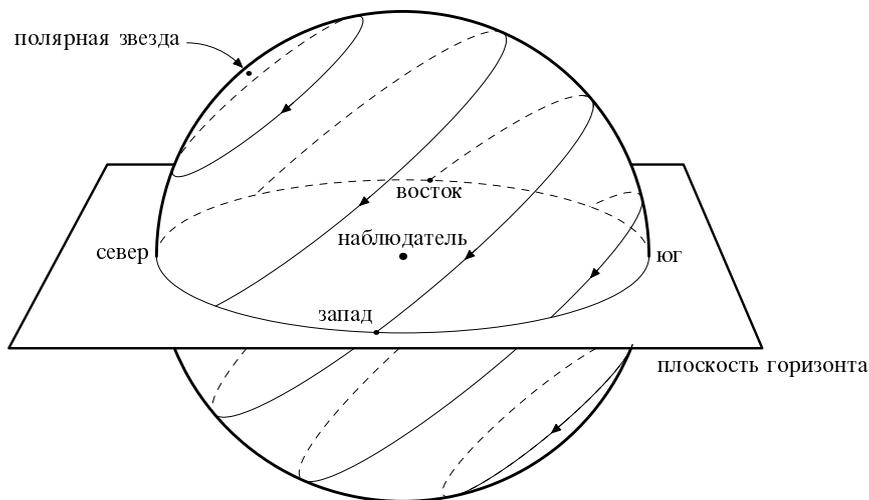
Итак, про Полярную звезду мы всё поняли: она неподвижно висит над горизонтом в северном направлении, при этом угол над горизонтом равен широте местности. Теперь уже легко понять, как движутся все остальные звёзды по небу. Это удобнее представлять себе как в древности: Земля неподвижна, звёзды (светящиеся точки — золотые гвоздики) прикреплены внутри к (чёрной) «небесной сфере», и эта сфера вращается как единое целое вокруг оси, соединяющей её северный и южный полюса. Эти полюса воображаемой небесной сферы астрономы называют северным и южным полюсами мира.

Представьте себе жука в центре вращающегося глобуса, в котором сделали маленькие дырочки и поместили на яркий свет: внутри жук увидит светящиеся точки, которые вращаются вместе с глобусом. (Нечто подобное можно увидеть, если удастся найти работающий планетарий: там проекционный аппарат создаёт на внутренней поверхности купола изображения звёзд.)

Хотя это и совсем другая картина мира, но видимое движение звёзд по небу она отражает правильно. Если нас интересует только это движение, то не важно, Земля ли вращается относительно неподвижных звёзд, или звёзды все вместе вращаются вокруг Земли. Точно так же не имеет значения, что звёзды находятся на разных расстояниях от Земли — важно лишь, что эти расстояния громадны по сравнению с орбитой Земли, и это позволяет представлять звёзды помещёнными на одну очень большую небесную сферу.

## Восход и заход звёзд

На небесной сфере каждая звезда описывает круг, и мы смотрим на него изнутри из центра сферы. Для звёзд, близких к Полярной или к южному полюсу мира, этот круг маленький, для звёзд на экваторе небесной сферы он наибольший.



Стрелки на этом рисунке указывают направление (кажущегося) вращения небесной сферы. Оно противоположно направлению вращения Земли, о котором мы говорили раньше (если мы крутимся в одну сторону, то неподвижный мир кажется нам крутящимся в другую). Заметим, что это согласуется с тем, что звёзды восходят с восточной стороны и заходят на западной.

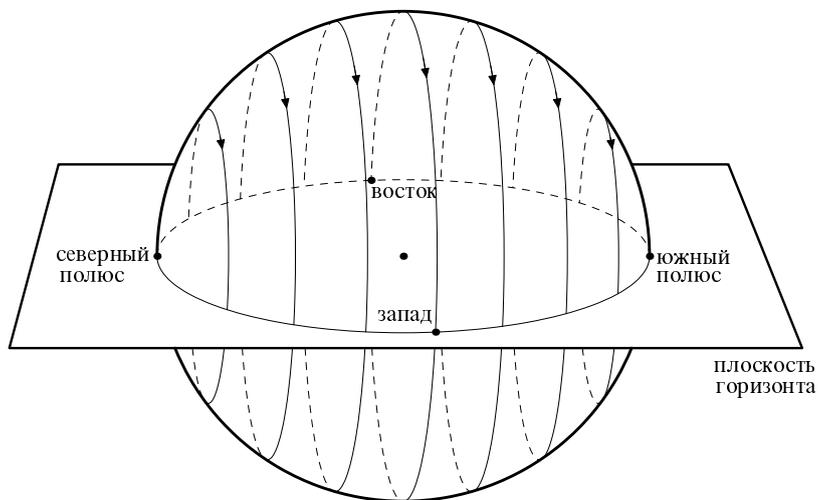
Из рисунка видно, что некоторые звёзды (близкие к Полярной) никогда не опускаются ниже горизонта, и если бы не яркий солнечный свет и голубое небо, они были бы видны всегда. Другие звёзды восходят и заходят обратно за горизонт. Наконец, некоторые звёзды (близкие к южному полюсу мира) не восходят вовсе и не видны никогда. (Наш рисунок — для наблюдателя в северном полушарии, который видит Полярную звезду над горизонтом.)

Поскольку Полярная звезда всё время в одной точке небосвода, то другие звёзды описывают одни и те же круги (ведь угловое расстояние от них до Полярной звезды постоянно). Отсюда следует ответ на один из заданных вопросов: раз пройдя через поле зрения телескопа, звезда будет повторять свой путь каждый день. (Хотелось бы сказать «звезда вновь пройдёт через поле зрения ровно через сутки», но тут есть тонкость: что такое сутки? время,

за которое Земля делает оборот вокруг своей оси — не совсем то время, которое принято называть сутками в быту. К этому мы ещё вернёмся.)

Столь же ясен ответ и на вопрос про Сириус: да, он восходит в одном и том же месте горизонта каждый день. Это не значит, что Сириус можно наблюдать круглый год: если звезда восходит днём, то её не видно.

Наконец, мы можем ответить и про звёзды, которые можно увидеть, находясь в данной точке Земли. Из рисунка ясно, что в северном полушарии Земли видны все звёзды северного полушария небесной сферы и некоторые звёзды южного полушария. Не видны те звёзды, которые близко к южному полюсу, и чем южнее находится наблюдатель, тем эта невидимая область меньше. Как показывает следующий рисунок, на экваторе вообще невидимых звёзд нет: северный и южный полюса мира мы видим у горизонта в северном и южном направлениях, а звёзды описывают круги вокруг горизонтальной оси север–юг, проводя половину времени над горизонтом, а половину — под.



Восход и заход звёзд на экваторе

## Вопросы

**1** На географических картах обычно изображают север сверху. Где в этом случае восток и запад? Почему для карт звёздного неба ответ будет другим?

[ Восток справа, а запад слева. На современных картах звёздного неба, где созвездия изображаются так, как они видны изнутри небесной сферы, восток слева, а запад справа (если север сверху). ]

**2** Человек прошёл километр, идя всё время строго на север, потом километр строго на запад, потом на юг и потом на восток. Вернулся ли он в точности в исходную точку?

[ Вообще говоря, нет, так как длина параллели зависит от широты. Но может и вернуться (например, параллели с севера и юга от экватора могут быть равными; недалеко от полюса он может сделать полный круг и вернуться в исходную точку). ]

**3** Куда придёшь, если всё время идти на северо-запад? во сколько раз путь будет длиннее кратчайшего пути в ту же точку? (Моря и горы не учитывать.)

[ На северный полюс по спирали; её длина в  $\sqrt{2}$  больше кратчайшего расстояния до полюса, так как мы движемся под углом  $45^\circ$  к направлению на полюс и составляющая скорости в этом направлении равна  $1/\sqrt{2} = \cos 45^\circ$  от полной скорости. ]

**4** В какую сторону и с какой скоростью должен лететь самолёт вдоль экватора, чтобы пассажиры всё время полёта могли наблюдать закат Солнца? восход Солнца?

[ С востока на запад, совершая оборот за 24 часа, скорость  $40\,000/24$  километров в час (что больше скорости современных дозвуковых самолётов, которые не достигают и тысячи километров в час). ]

**5** Две звезды взошли одновременно и недалеко друг от друга в Москве; первая из них ближе (на небе) к Полярной, чем вторая. Какая из звёзд раньше взойдёт в Киеве (который расположен южнее Москвы)?

[ В Киеве они восходят под большим углом к горизонту, поэтому влияние разницы в широте уменьшается (а влияние разницы в долготе остаётся тем же), так что раньше взойдёт более далёкая от Полярной. Математически это сводится к тому, что если графики  $y = \sin x$  и  $y = \sin ax$  при  $a > 1$  пересекают одну и ту же горизонтальную прямую, то второй делает это под большим углом. ]

**6** Пассажиры авиарейса на восток сдвигают часы вперёд, чтобы приспособиться к местному времени (там позже, поскольку Солнце встало раньше), а пассажиры авиарейса на запад сдвигают часы назад. Куда и на сколько должны сдвигать часы пассажиры рейса, который летит сначала точно на север до Северного полюса, а потом продолжает лететь в том же направлении на юг и приземляется?

[ Если часы с циферблатом на 12 часов, то вообще сдвигать не надо; на электронных часах с периодом в 24 часа надо сдвинуть на 12 часов вперёд или назад (что одно и то же с точки зрения времени суток). Изменение даты зависит от того, как расположены аэропорт отправления и прибытия с точки зрения линии смены дат; в первом приближении линия смены дат проходит по  $180^\circ$ -му меридиану, поэтому

если самолёт вылетел из Восточного полушария, надо сдвинуть часы назад на 12 часов, а если из Западного — то вперёд на 12 часов. ]

**7** Почему Магеллану и его коллегам в эпоху первых кругосветных путешествий было легче определять широту, чем долготу?

[ Для измерения широты достаточно посмотреть на высоту Полярной звезды над горизонтом. А определение долготы равносильно синхронизации часов с местом отправления, что требует точных хронометров, наблюдения общих явлений (скажем, затмений спутников Юпитера) или быстрой связи (скажем, по радио). ]

**8** Будем смотреть на Полярную звезду и близлежащие звёзды в течение долгого времени — тогда будет видно, что небесная сфера вращается. Вращаются ли звёзды вокруг полюса (где Полярная звезда) по часовой стрелке или против? А если смотреть в район южного полюса мира (находясь, скажем, в Австралии)?

[ Из рисунка видно, что вокруг северного полюса мира звёзды вращаются против часовой стрелки (а в южном полушарии — по часовой стрелке вокруг южного полюса мира). ]

**9** Какие звёзды восходят в точности на востоке и заходят в точности на западе? Зависит ли ответ от того, на какой широте находится наблюдатель?

[ Независимо от широты наблюдения это звёзды, которые находятся на экваторе небесной сферы. ]

**10** В северном полушарии звёзды восходят с восточной стороны, двигаясь слева направо, а заходят с западной. Что в этом описании нужно изменить, если находишься в южном полушарии? Нарисуйте картину движения звёзд (аналогичную рисунку на с. 8) для австралийской брошюры по космографии.

[ В южном полушарии звёзды восходят с восточной стороны, двигаясь справа налево, и заходят с западной. ]

**11** Какие звёзды можно увидеть в зените, если наблюдатель находится на северной широте  $\varphi$ ?

[ Только те, у которых «широта на небесной сфере», или, как говорят астрономы, склонение (угловое расстояние до экватора небесной сферы, положительное направление — в сторону северного полюса) равно  $\varphi$ . ]

### 3. Солнце восходит и заходит

Мы начали с движения звёзд по небу, поскольку с этим разобраться проще, чем с движением главной для нас звезды — Солнца (настолько главной, что её обычно и не называют звездой). После такой подготовки можно разбраться и с движением Солнца.

Если спросить, отчего летом тепло, а зимой холодно, то можно услышать такой ответ: летом Земля ближе к Солнцу и потому его тепло больше ощущается. В этих соображениях есть некоторый резон (чем ближе к огню, тем теплее, и действительно орбита Земли — не точный круг). Но с зимой и летом дело всё-таки в другом, и это легко понять. Ведь в южном полушарии лето бывает, когда у нас зима, и наоборот.<sup>4</sup> Кстати, Земля несколько ближе к Солнцу (проходит перигелий) как раз зимой, а не летом. Так что дело не в расстоянии, а в том, что летом дни длиннее и Солнце поднимается выше над горизонтом. Но почему так бывает?

Давайте разбираться. Нас интересует движение Солнца по небу в данное время года, когда Земля находится в определённой точке своей орбиты. Тогда Солнце оказывается на фоне некоторых звёзд, и вместе с ними восходит и заходит. Звёзд этих, естественно, не видно из-за яркого света от Солнца, но они там есть. Проходят месяцы, время года меняется, Земля оказывается в другой точке орбиты, и Солнце уже на фоне других звёзд. (Если звёзды — это дырки в небесном глобусе, то Солнце — ярко светящийся круглый жук, ползущий внутри этого глобуса.)

Вопрос о зиме и лете теперь разбивается на два:

- как движется Солнце по небесной сфере в течение года?
- как положение Солнца на небесной сфере влияет на длительность дня и высоту Солнца над горизонтом?

Второй вопрос по существу мы уже рассматривали, говоря о звёздах. Сделанный нами рисунок (для случая наблюдателя в Северном полушарии) показывает, что:

- звёзды на экваторе небесной сферы проводят над горизонтом половину времени, восходя точно на востоке и заходя точно на западе;
- звёзды в северном полушарии небесной сферы восходят на северо-востоке, проводят над горизонтом больше половины времени — тем больше, чем севернее они на небесной сфере (=чем ближе к Полярной), и заходят на северо-западе; звёзды южного полушария небесной сферы восходят на юго-востоке и заходят на юго-западе;

---

<sup>4</sup>Тот же И. А. Гончаров рассказывает: «Развернул я в книжной лавке, в Капштате (ныне более известно как Кейптаун, Cape Town, город в Южно-Африканской Республике), изданный там кипсек — стихи и проза. Развёртываю местами и читаю: „Прошли и для неё, этой гордой красавицы, дни любви и неги, миновал цветущий *сентябрь* и жаркий *декабрь* её жизни; наступали грозные и суровые *июльские* непогоды“ и т. д.»

- звёзды, достаточно близкие к Полярной, вообще не заходят; насколько именно они должны быть близки, зависит от широты местности — вблизи экватора таких звёзд мало, у полюса много.

Внимательно посмотрев на картинку, последнее утверждение можно уточнить так: если широта местности  $\varphi$  (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  северной широты), то не заходят те и только те звёзды, у которых склонение (так астрономы называют широту на небесной сфере; положительные значения склонения соответствуют северному полушарию, а отрицательные — южному) больше  $90^\circ - \varphi$ .

Солнце восходит и заходит так же, как и звёзды (вместе с теми звёздами, на фоне которых оно находится и которых из-за него не видно). Таким образом, Солнце восходит с восточной стороны, а заходит — с западной,<sup>5</sup> но не всегда точно на востоке или на западе (поскольку склонение Солнца меняется). Выше всего Солнце поднимается над горизонтом на юге (как это было и для звёзд; напомним, мы сейчас говорим о северном полушарии и предполагаем, что мы не в тропиках, об этом пойдёт речь дальше).

Осталось понять, как движется Солнце по небесной сфере.

## Зодиак

Направление от Земли к Солнцу в точности противоположно направлению от Солнца к Земле. Значит, круговое движение Земли вокруг Солнца мы наблюдаем как круговое движение Солнца вокруг Земли: изображающий Солнце жук ползёт по кругу внутри небесной сферы. (Точнее говоря, по большому кругу, который получается при пересечении плоскости орбиты Земли с небесной сферой.)

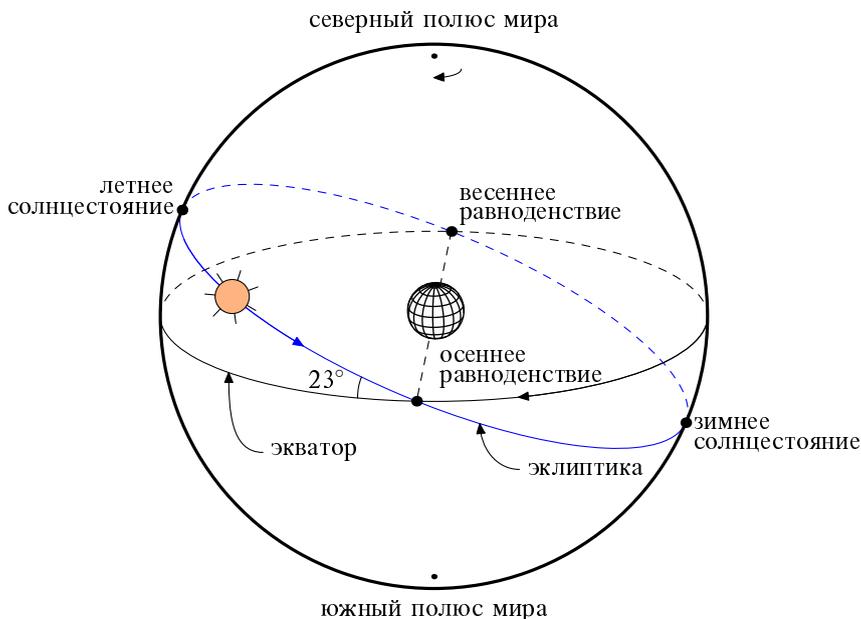
Круг этот называют эклипстикой, или зодиакальным кругом, а созвездия, через которые проходит Солнце, называют зодиакальными (не считая созвездия Змееносца, которое по традиции не включают в Зодиак). Эти созвездия (Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы) имеют большое практическое значение для астрологов, которые используют их в гороскопах, а также для сувенирной промышленности.

Для нас важнее другое: так получилось, что эклиптика не совпадает с экватором небесной сферы. Другими словами, ось вращения Земли не перпендикулярна плоскости её орбиты, то есть не параллельна оси обращения

---

<sup>5</sup>Известная байка о Пушкине (рассказанная в разных вариантах авторами воспоминаний о нём) говорит, что однажды лицеист Пушкин, услышав первую строчку «Грядёт с заката царь природы...» от одного из своих товарищей, тут же продолжил: «...и просвещённые народы/ не знают, что им предпринять:/ ложиться спать или вставать». Так что хотя у него и бывал временами нух в математике, основы космографии он знал.

Земли вокруг Солнца. Разница — угол между этими осями — составляет чуть больше  $23^\circ$ . Поэтому Солнце переходит из южного полушария небесной сферы в северное, поднимаясь до  $23^\circ$  склонения, а затем идёт обратно в южное полушарие и опускается там до  $-23^\circ$ .



Теперь можно это расставить по временам года: когда Солнце находится в самом северном положении ( $23^\circ$  склонения), то в северном полушарии Земли дни самые длинные. Это происходит примерно 21 июня и называется летним солнцестоянием. Наоборот, когда Солнце находится в самом южном положении ( $-23^\circ$  склонения), в северном полушарии дни самые короткие. Это называется зимним солнцестоянием, или солнцеворотом, и бывает примерно 22 декабря.<sup>6</sup>

Посередине (примерно) между зимним и летним солнцестоянием Солнце пересекает экватор небесной сферы. В эти дни, как мы видели, оно восхо-

<sup>6</sup>«На протяжении многих зим/ я помню дни солнцеворота,/ и каждый был неповторим/ и повторялся вновь без счёта.// И целая их череда/ составила мало-помалу — / тех дней единственных, когда/ нам кажется, что время стало.// Я помню их наперечёт:/ зима подходит к середине,/ дороги мокнут, с крыш течёт/ и солнце греется на льдине// И любящие, как во сне,/ друг к другу тянутся поспешней,/ и на деревьях в вышине/ потеют от тепла скворешни.// И полусонным стрелкам лень/ ворочаться на циферблате,/ и дольше века длится день,/ и не кончается объятье» (Борис Пастернак)

дит точно на востоке, заходит точно на западе и проводит над горизонтом половину времени; день равен ночи. Соответственно и названия: весеннее равноденствие (около 20 марта) и осеннее равноденствие (около 22 сентября).

Внимательный читатель в этот момент заметит, что на рисунке больше информации: там ещё показано, какая из точек пересечения эклиптики с экватором небесной сферы является весенним равноденствием, а какая — осенним. Другими словами, там указано направление движения Солнца по небесной сфере, и оно противоположно направлению вращения небесной сферы.

Строго говоря, последняя фраза неверна: нельзя говорить, что эти вращения происходят в противоположных направлениях, поскольку они имеют разные оси. Небесная сфера вращается вокруг оси, соединяющей северный и южный полюса, а Солнце — вокруг оси, перпендикулярной плоскости эклиптики. Аккуратнее было бы сказать так: проведём ось перпендикулярно плоскости эклиптики и возьмём точку её пересечения с небесной сферой в северном полушарии. Эта точка отстоит от северного полюса мира на  $23^\circ$ . Если смотреть из этой точки, то Солнце движется относительно небесной сферы против часовой стрелки, а если смотреть из северного полюса мира в направлении южного, то небесная сфера вращается относительно Земли по часовой стрелке. (Как мы увидим дальше, это различие в направлениях делает солнечные сутки длиннее звёздных.)

## Тропики

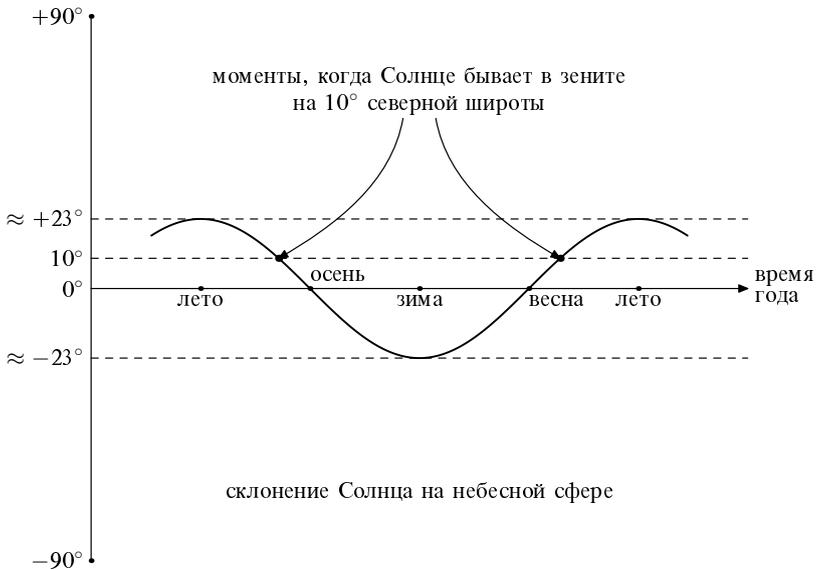
Теперь мы уже готовы ответить на вопрос, с которого начинали: в каких местах Земли можно увидеть Солнце в зените и сколько раз в году. Сначала поймём, какие звёзды можно увидеть в зените в данной точке Земли. Другими словами, направим в зенит лазер, луч которого так ярок, что достигает небесной сферы — какую линию он прочертил бы на ней, если бы она существовала?

Эта линия будет окружностью (параллелью небесной сферы). Размер этой окружности зависит от широты места, где установлен лазер: если он вблизи полюса, то окружность будет маленькая, а если вблизи экватора — то большая. На северной широте  $\varphi$  мы видим в зените звёзды, которые имеют (на небесной сфере) склонение  $\varphi$ ; на южной широте  $\varphi$  — звёзды, склонение которых равно  $-\varphi$ .

Таким образом, находясь на широте  $\varphi$ , мы можем увидеть Солнце в зените в те дни, когда его склонение равно  $\varphi$ . Мы уже знаем, что склонение Солнца на небесной сфере меняется в пределах от (примерно)  $+23^\circ$  до  $-23^\circ$ .

Вывод: Солнце можно увидеть в зените, если широта места наблюдения заключена в тех же пределах: от  $23^\circ$  северной широты до  $23^\circ$  южной. Эта кольцевая зона охватывает экватор и называется тропической. Её границы (параллели с широтой  $23^\circ$  в северном и южном полушариях) называются тропиками. Северный тропик называют также тропиком Рака, а южный — тропиком Козерога.<sup>7</sup>

Итак, мы знаем, *где* (в каких местах на Земле) можно увидеть солнце в зените. А *когда* его можно там увидеть? Нарисуем график, показывающий склонение Солнца в зависимости от времени года.



Этот график изображает то, о чём мы уже говорили: во время летнего солнцестояния Солнце достигает склонения  $+23^\circ$ , во время зимнего — склонения  $-23^\circ$ , а в промежутках пересекает экватор небесной сферы (линию нулевого склонения) в моменты весеннего и осеннего равноденствий.

Как узнать, когда мы увидим Солнце в зените, находясь (скажем) на широте  $10^\circ$  в северном полушарии? Надо провести на соответствующей высоте горизонтальную прямую и посмотреть, где она пересекает наш график.

<sup>7</sup>Судя по этим названиям, логично было бы ожидать, что Солнце достигает  $23^\circ$  северной широты, когда проходит через созвездие Рака, а южной — когда проходит через созвездие Козерога. В настоящее время это не так из-за прецессии (о которой мы говорим в последнем разделе), а названия сохранились со времени древних греков.

Видно, что это происходит дважды в году: один раз между летним солнцестоянием и осенним равноденствием, второй раз — между весенним равноденствием и летним солнцестоянием,

Из того же рисунка видно, что на экваторе Солнце бывает в зените дважды в году (в моменты весеннего и осеннего равноденствий). На линии тропиков Солнце бывает в зените раз в году во время июньского (северный тропик) и декабрьского (южный тропик) солнцестояний.

## Полярный круг

Из времён года осталось поговорить о полярном дне и полярной ночи. Полярный день — это когда Солнце не заходит несколько дней подряд. Где и почему такое бывает?

Снова вспомним о звёздах. Какие звёзды никогда не заходят за горизонт на широте  $\varphi$  (в северном полушарии)? Это Полярная звезда и близкие к ней. Необходимая близость зависит от широты  $\varphi$ . Если мы на северном полюсе ( $\varphi = 90^\circ$ ), Полярная звезда в зените и все звёзды северного полушария небесной сферы никогда не заходят за горизонт. Когда мы движемся от полюса к экватору (уменьшаем  $\varphi$  от  $90^\circ$  до нуля), Полярная звезда спускается к горизонту и круг всегда видимых звёзд уменьшается. На экваторе Полярная звезда доходит до горизонта и круг превращается в точку. Можно сказать так: на широте  $\varphi$  не заходят за горизонт звёзды, имеющие склонение  $90^\circ - \varphi$  или больше.

Теперь уже ясно, где Солнце бывает видно не заходящим за горизонт. Поскольку оно поднимается до (примерно)  $+23^\circ$ , полярный день бывает там, где широта больше  $90^\circ - 23^\circ = 67^\circ$ . Другими словами, полярный день бывает внутри круга с центром в полюсе, граница которого — параллель на широте примерно  $67^\circ$ . Этот круг называется северным полярным кругом. (Аналогично строится и южный полярный круг.)

Длительность полярного дня зависит от широты: на полюсе она максимальна (полгода), а на самом полярном круге (на его границе) уменьшается до нуля. Её можно найти по тому же графику зависимости склонения Солнца от времени: нас интересует промежуток времени, когда склонение Солнца больше  $90^\circ - \varphi$ .

Через полгода после полярного дня Солнце находится в диаметрально противоположной точке небесной сферы, и потому не восходит из-за горизонта (раз противоположная точка не заходит) — наступает полярная ночь.

## Когда бывает полдень?

Этот вопрос лишь по виду похож на «сколько стоит пятакопеечная булка» — не стоит торопиться отвечать «в двенадцать часов» (или “at noon” в английском варианте). На самом деле ответ не так прост, если под полуднем понимать «астрономический полдень» — момент, когда Солнце выше всего поднимается над горизонтом, а не 12 часов по часам.

Ведь в разных точках (на разной долготе) астрономический полдень наступает в разное время, даже если эти точки находятся в одном часовом поясе и часы показывают там одно и то же. Наоборот, в близких точках разных часовых поясов (с той и другой стороны границы) время отличается (обычно на час), в то время как астрономический полдень наступает почти одновременно.

Собственно, идея часовых поясов и есть компромисс между двумя желаниями: (1) чтобы астрономический полдень в разных местах был хотя бы примерно в одно и то же время по часам; (2) чтобы было меньше путаницы при пересчёте времени от одного места к другому. Ведь и нынешняя ситуация, когда время в разных поясах отличается на целое число часов (в экзотических местах иногда и на полуцелое), создаёт трудности для авиапассажиров. А если бы и на разных станциях электрички время было бы разным, то было бы совсем плохо.

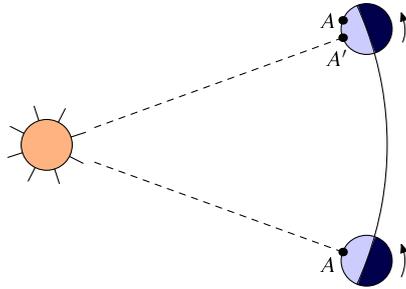
Итак, когда же бывает астрономический полдень? На первый взгляд кажется, что промежуток между двумя последовательными полуднями (астрономическими) должен быть равен периоду вращения Земли вокруг оси: ведь за это время Земля возвращается в то же положение. Но это не совсем так: за сутки Солнце успевает немного сместиться по небесной сфере. Поэтому солнечные сутки (средний интервал между полуднями) отличаются от звёздных (период вращения Земли вокруг своей оси).

Мы не случайно говорим о среднем интервале между моментами астрономического полудня — в течение года этот интервал меняется; о некоторых причинах этого мы ещё поговорим. Заметим, что средний интервал равен 24 часам: если бы это было не так, то систематическая ошибка бы со временем накопилась и полдень переместился бы на ночное время (по часам).

Насколько отличаются солнечные и звёздные сутки и в какую сторону? Можно понять, что за год накапливается разница в один день, поскольку Солнце само делает один оборот по небесной сфере, и потому числа оборотов звёзд и Солнца вокруг Земли отличаются на единицу. В день это даёт разницу примерно в  $1/365$  суток, что составляет около 4 минут.

Но в какую сторону отличаются солнечные и звёздные сутки, зависит от соотношения направлений вращения Земли вокруг своей оси и по орбите.

Как мы уже говорили, так получилось, что они вращаются в одну сторону.



Из рисунка видно, что сделав в точности оборот вокруг своей оси, Земля должна ещё немного «довернуться», чтобы снова подставить данную местность под Солнце. Поэтому солнечные сутки длиннее звёздных примерно на 4 минуты. (На рисунке разница увеличена для наглядности.)

Интересно сверить эти наши рассуждения с реальностью. По календарю, в интернете или с помощью прибора глобального позиционирования (GPS) можно найти время восхода и захода Солнца (в данной местности) на каждый день. Поскольку Солнце, как мы знаем, движется по дуге окружности, высшая точка этой дуги будет посередине, так что время полудня можно найти как полусумму времени восхода и захода. Оказывается, что оно меняется день ото дня. Почему?

Мы знаем, что момент полудня определяется положением Солнца на небесной сфере, а именно, его долготой. Астрономы, впрочем, называют это не долготой, а часовым углом. (Таким образом, часовой угол Солнца определяет момент полудня, а склонение — длительность дня.) Выходит, что долгота (часовой угол) Солнца меняется неравномерно в течение года. Почему? ведь Солнце, мы предполагаем, движется по небесной сфере равномерно?

На самом деле тут есть две причины. Одна из них состоит в неточности наших предположений: орбита Земли всё же не совсем круг, и движение по ней (и, соответственно, кажущееся движение Солнца на фоне звёзд) неравномерно. Но есть и вторая причина. Даже если орбиту Земли считать кругом, а движение по ней — равномерным, то всё равно часовой угол Солнца меняется с разной скоростью: эклиптика наклонена к экватору небесной сферы, и в моменты солнцестояния часовой угол меняется быстрее (та же скорость движения по небесной сфере даёт большую скорость изменения угла, поскольку Солнце ближе к полюсу мира и скорость его направлена по параллели).

График, показывающий, как меняется момент полудня в течение года, называется «уравнением времени» (time equation) и приведён в одной из задач.

## Вопросы

**12** Что было бы с временами года, если бы эклиптика совпадала с экватором небесной сферы? если бы эклиптика была перпендикулярна экватору небесной сферы?

[ Если эклиптика совпадает с экватором, то никаких времён года нет, Солнце всегда восходит на востоке и заходит на западе, его высота над горизонтом в полдень определяется широтой. Если эклиптика перпендикулярна экватору, но полярные круги расширяются до соответствующих полушарий и покрывают всю Землю. ]

**13** В каких местах Земли и в какие моменты Солнце восходит точно на востоке и заходит ровно на западе? (Говоря «точно», мы всё же пренебрегаем смещением Солнца по небесной сфере за день.)

[ В дни равноденствий в любой точке Земли (не считая полюсов, где место восхода плохо определено. ]

**14** Заезжий балагур рассказывает о путешествии в южное полушарие: «Солнце там восходит на западе, в полдень находится на севере, а заходит на востоке». Что правильно и что неправильно в его рассказе? Можно ли по наблюдению за движением Солнца от восхода до заката (и не имея ни компаса, ни возможности наблюдать звёзды) определить, находимся ли мы в северном или южном полушарии (вне тропиков)?

[ В южном полушарии Солнце восходит на востоке и заходит на западе, но в середине дня действительно бывает на севере. Поэтому оно движется не слева направо, а справа налево, и это легко заметить, проследив за тенью чего-нибудь в течение нескольких минут. ]

**15** Как мы видели, на экваторе Солнце достигает зенита лишь во время равноденствий. С какой стороны от зенита находится высшая (ближайшая к зениту) точка его траектории в остальные дни?

[ С севера летом (между весенним и осенним равноденствиями) и с юга зимой. ]

**16** Тот же вопрос для наблюдателя на  $10^\circ$  северной широты.

[ С севера летом (но в течение более короткого времени, чем на экваторе) и с юга зимой (в течение более длинного времени). ]

**17** На какую максимальную высоту поднимается Солнце над горизонтом во время полярного дня?

[ На широте  $\varphi$  Солнце поднимается до  $23^\circ + 90^\circ - \varphi$ . ]

**18** Когда начинается и кончается полярный день на северном полюсе? По какой траектории движется Солнце в протяжении полярного дня с точки зрения наблюдателя на полюсе?

[ Полярный день на северном полюсе начинается, когда Солнце при движении по эклиптике попадает в северное полушарие, то есть в весеннее равноденствие, и

кончается в осеннее. Солнце, двигаясь по спирали, постепенно поднимается до  $23^\circ$  над горизонтом и потом спускается. ]

**19** (Для знающих физику.) Если летом тепло, потому что день длиннее, то выходит, что жарче всего должно быть летом за полярным кругом — ведь там Солнце вообще не заходит. В чём ошибка в этом рассуждении?

[ Важен ещё и угол падения лучей на землю (поскольку от него зависит количество энергии на единицу площади поверхности). ]

**20** Во время солнечного затмения, когда диск Солнца загораживает Луну, небо темнеет и видны звёзды. Могут ли при этом стать видны звёзды, которых обычно (без затмения) в этой местности увидеть нельзя?

[ Нет: через полгода и полдня ночью будет виден тот же участок неба. ]

**21** Где летний день длиннее (а ночь короче) — в Москве или Петербурге? (Петербург находится на  $60^\circ$  северной широты, Москва — на  $56^\circ$  северной широты.)

[ В Петербурге. ]

**22** Как меняется в течение года длительность дня и ночи на экваторе?

[ Хотя для наблюдателя на экваторе траектория Солнца меняется в зависимости от времени года, оно всегда проводит над горизонтом половину суток. ]

**23** Во время первых кругосветных путешествий точных хронометров не было, и долготу измерять не умели, Тем не менее после возвращения из похода можно было убедиться, что действительно путешественники обогнули Землю и возвратились с другой стороны, наблюдая за сменой дня и ночи. Каким образом?

[ Общее число восходов (или заходов) Солнца во время путешествия на единицу отличалось от их числа в пункте отправления (эта разница вообще не зависит от времени). Для исторического направления движения на запад: они наблюдали на один восход меньше. ]

**24** Сегодня Сириус взошёл в 23 часа. Во сколько он взойдёт завтра (в той же местности)?

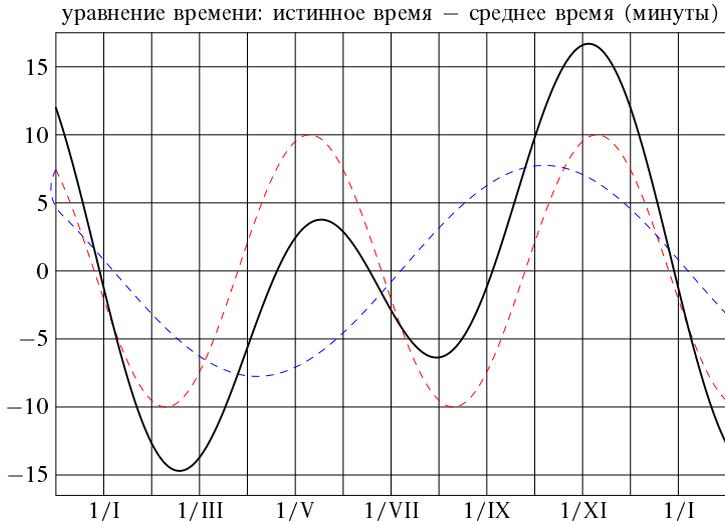
[ Примерно в 22 часа 56 минуты: через звёздные сутки, которые 4 минуты короче суток по часам. ]

**25** Мы обкатываем маленькую монету радиуса  $r$  (без проскальзывания) вокруг неподвижной большой монеты радиуса  $4r$ . Сколько оборотов вокруг своей оси сделает маленькая монета, прежде чем вернётся в исходное положение?

[ 5 оборотов (четыре, если проходить по отрезку, длина которого равна периметру большой монеты, плюс ещё один из-за поворота. ]

**26** Уравнение времени показывает разницу между «истинным» временем (показаниями солнечных часов) и средним временем (для равномерно

идуших часов) в зависимости от времени года; что из чего вычитать — дело соглашения, но осенью солнечные часы опережают равномерные, а весной отстают.



На графике (взятом с de.wikipedia.org, статья „Zeitgleichung“ на немецком языке) показано уравнение времени (кривая с разными горбами) и два составляющих её периодических изменения — с периодом в год и с периодом в полгода. Первое возникает из-за эллиптичности орбиты Земли (раз в году Земля приближается к Солнцу и в этот момент направление Земля–Солнце меняется быстрее). Второе возникает из-за наклона эклиптики к экватору (когда солнце приближается к полюсам, его часовой угол меняется быстрее). Определите по графику, в какое время года Земля приближается к Солнцу (проходит перигелий, как говорят астрономы) и когда Солнце приближается к полюсам.

[ Когда Земля проходит перигелий, направление на Солнце меняется максимально быстро, то есть Солнце смещается вперёд (за сутки по часам) максимально, и разность на графике (истинное время минус среднее) убывает максимально быстро. Мы говорим сейчас о той части разности, которая имеет годовую периодичность (одногогорбой кривой), и видно, что перигелий случается чуть позже Нового года. Вторая компонента ускоряет движение Солнца в момент солнцестояний, что и подтверждается графиком. ]

**27** Более наглядное изображение того же явления (сдвига астрономического полудня относительно полудня по часам) можно получить, если в

течение года в одно и то же время по часам (скажем, в полдень) фотографировать Солнце и наложить все фотографии друг на друга. Полученная траектория Солнца называется analemmой; её фотография приведена на обложке. Определите на фотографии, какая часть траектории соответствует весне, осени, зиме и лету. Оцените широту места, где сделана фотография.

[ Широту места можно оценить по высоте Солнца над горизонтом, взяв среднее арифметическое между максимумом и минимумом. Масштаб фотографии можно оценить, зная, что разница между нижней и верхней точками траектории составляет  $46^\circ$ . (Правда, о положении горизонта мы можем только догадываться, так что проще ориентироваться на архитектуру Парфенона:-) Верхняя точка соответствует лету, нижняя зиме, правая половина — это моменты, когда астрономический полдень опережает средний, то есть когда истинное время больше среднего (верхняя часть графика). Поэтому верхняя дуга проходит против часовой стрелки, а нижняя — по. ]

**28** Солнечные часы позволяют определить «солнечное время» (число часов до или после астрономического полудня), глядя на тень от стержня. Почему этот стержень (на фотографии роль стержня играет наклонная сторона угольника) делают наклонным? Каков должен быть его угол наклона?



[ Желательно, чтобы не только астрономический полдень приходился бы на одно и то же деление (это было бы и при вертикальном стержне и делении на юге), но чтобы один и тот же час (относительно астрономического полудня) приходился бы на одно и то же деление. Это будет так на полюсе, а также если стержень поставить параллельно оси Земли. ]

## 4. Светит месяц

### Отчего Луна видна не полностью?

Трудно найти человека, который бы не видел на небе серп Луны. Но почему Луна бывает видна не полностью, а в виде серпа? На этот вопрос многие отвечают: потому что на неё падает тень от Земли.<sup>8</sup> Между тем небольшое размышление показывает, что это не просто неверный ответ, но и очевидно неверный ответ: ведь Луна бывает видна не только в виде серпа, но и в виде полукруга, и даже бывает больше полукруга, как на этой фотографии — и чтобы отбросить такую тень, Земля должна быть вогнутой!



Если этого довода недостаточно, вот ещё один: Луна бывает неполной большую часть времени, и было бы странно, чтобы она почему-то так часто попадала в тень Земли. Наконец, все слышали о частных лунных затмениях — и это отдельное редкое явление...

Конечно, на самом деле дело в другом: Солнце освещает Луну с одного бока, и этот освещённый бок не всегда обращён к Земле, и видна только его часть. В момент полнолуния мы видим освещённую часть целиком (или

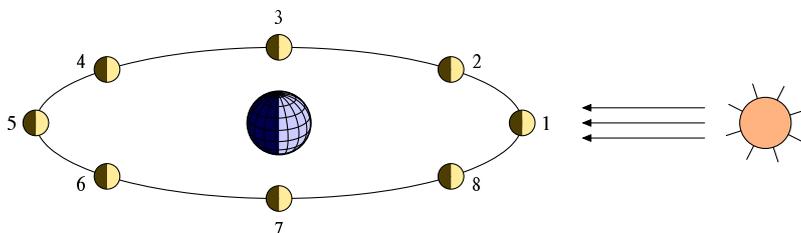
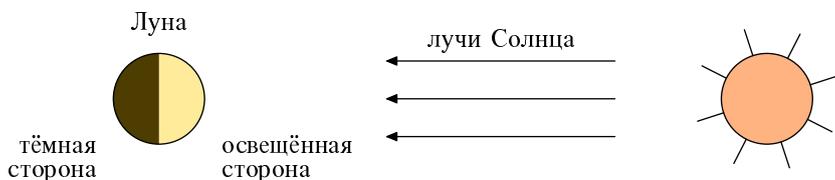
---

<sup>8</sup>Интересно было бы провести опрос на эту тему как следует; небольшой опыт автора показывает, что доля таких ответов довольно велика (хотя обычно и не превышает половины) независимо от того, спрашивать ли шестиклассников или кандидатов физико-математических наук. Даже в физико-математическом журнале для школьников «Квант» (№ 5 за 2005 год) опубликовано нечто очень похожее на такой неверный ответ:

*«На плоскости расположен белый круг. Из бумаги вырезали синий круг и наложили его на белый круг. Какая часть белого круга останется видимой?»*

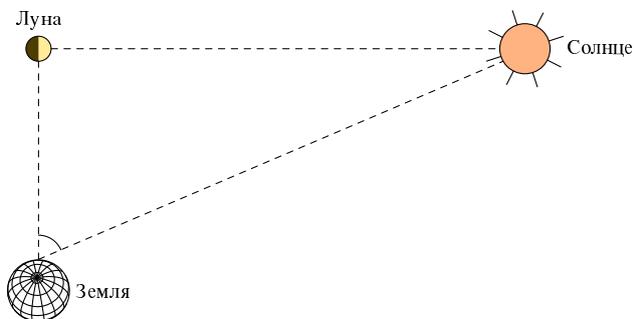
Чертёж к этой задаче (а также и ответ) можно увидеть на ночном небе. Белый круг — это Луна, синий круг, точнее, часть синего круга, — это тень на Луне от Земли. Во время полнолуния мы видим лунный круг, при лунном затмении тень от Земли полностью закрывает Луну. В промежуточных положениях мы видим либо растущий лунный серп (молодая Луна), либо уменьшающийся (старая Луна).»

почти целиком), в момент новолуния — не видим совсем или видим только узенький серп.



Соответствие между положением Луны на орбите и видимой частью Луны показано на рисунке цифрами: 1 — новолуние, 3 — первая четверть, 5 — полнолуние, 7 — последняя четверть. (Напомним на всякий случай ещё раз, что рисунок условный — соотношение размеров и расстояний в нём не выдержано!)

Другими словами, фаза Луны определяется углами в треугольнике Земля — Луна — Солнце, точнее, углом в его лунной вершине (между направлениями Луна — Солнце и Луна — наблюдатель).



### Измерение отношения расстояний до Луны и Солнца по Аристарху

Это обстоятельство было использовано Аристархом (греческим астрономом, жившим в третьем веке до нашей эры) для оценки отношения расстояний до Луны и до Солнца. Он попытался выбрать момент, когда видна ровно половина Луны, и измерить второй угол этого треугольника: между направлениями Земля–Солнце и Земля–Луна. В принципе это можно сделать, если Солнце и Луна видны на небе одновременно, но практические трудности определения нужного момента и измерения угла привели к тому, что Аристарх занижил расстояние до Солнца в несколько десятков раз. Тем не менее эта оценка показала, что угол близок к  $90^\circ$ , а Солнце далеко (и потому большое — ведь угловой размер его мы знаем из наблюдений), что наводит на мысль, что маленькая Земля обращается вокруг большого Солнца, а не наоборот.

### Движение Луны

Что можно сказать про движение Луны, наблюдая за ней с Земли? Угловой размер Луны остаётся примерно одинаковым всё время (около половины градуса; тот факт, что у горизонта Луна кажется больше, чем высоко в небе — свойство нашего восприятия, что легко проверить, держа линейку вытянутой рукой и отмечая, сколько делений занимает Луна). Значит, относительно Земли Луна движется по орбите, близкой к круговой.

Наблюдения за фазами Луны показывают также, что плоскость орбиты Луны близка к плоскости эклиптики. Если бы эти плоскости сильно отличались, то полнолуния были бы возможны лишь в определённые периоды года, когда направление Земля–Солнце приближается к линии пересечения этих плоскостей. (В этом рассуждении мы предполагаем, что обе плоскости сохраняют положение в пространстве; в первом приближении это согласуется как с наблюдениями, так и с законом сохранения момента импульса в

механике. Более точные наблюдения и анализ показывают, что это не совсем так, см. с. 40 о прецессии лунной орбиты.)

За сколько дней Луна совершает один оборот вокруг Земли? Как и с сутками, ответ на этот вопрос зависит от того, что считать оборотом: возвращение к той же фазе или к тому же положению относительно звёзд на небесной сфере. Эти периоды имеют свои названия: фазы Луны повторяются, когда пройдёт синодический месяц (29,53... суток);<sup>9</sup> положения на небесной сфере повторяются после сидерического месяца (27,32... суток).

То, что сидерический месяц короче, означает, что Луна вращается по орбите вокруг Земли в ту же сторону, что и Земля вокруг Солнца. Благодаря этому в году на один сидерический месяц больше:

$$\frac{365,24 \dots}{27,32 \dots} - \frac{365,24 \dots}{29,53 \dots} = 1.$$

Сравнивая фотографии разных фаз Луны, мы замечаем, что видим там одни и те же детали поверхности, только при разном освещении. Другими словами, Луна обращена к Земле одной и той же стороной — период её вращения вокруг оси удивительным образом точно совпадает с периодом обращения вокруг Земли. На самом деле, как объясняют учёные-механики, это не совпадение: те же самые причины, которые вызывают приливы на Земле (различие в силе притяжения для разных точек), сравнивали эти две скорости вращения. (Кстати, приливы замедляют и вращение Земли.) В результате первые фотографии обратной стороны Луны были получены только в 1959 году с космического аппарата Луна-3.<sup>10</sup>

## Лунные затмения

Затмения происходят, когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной прямой. Когда тень от Земли задевает Луну, это называется лунным затмением. В этот момент Земля находится между Солнцем и Луной, и затмение приходится на полнолуние.

---

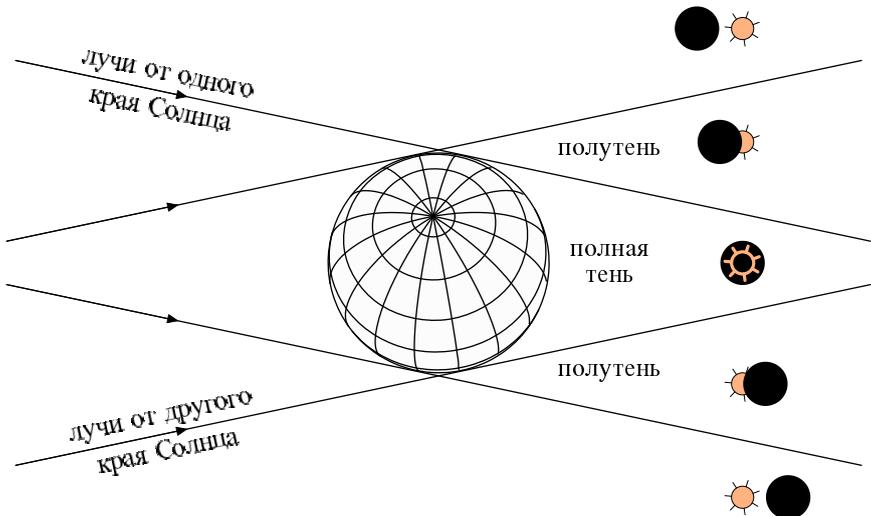
<sup>9</sup>Поскольку орбита Земли эллиптическая и движение по орбите не совсем равномерно, синодический месяц слегка меняется в промежутке между 29 и 30 днями; здесь указано среднее значение.

<sup>10</sup>В статье В. А. Ефимова в журнале «Информация и космос» (№4 за 2005 г., см. <http://www.infocosmo.ru>) приводятся подробности решения этой сложнейшей задачи: помимо запуска аппарата, нужно было произвести съёмку на плёнку, эту плёнку прямо в космосе проявить, затем передать по радио информацию о изображении и восстановить изображение на Земле. Это замечательное достижение стало примером успешного — хотя и не очень обычного — международного сотрудничества в исследованиях космоса: подходящую фотоплёнку советская промышленность не выпускала, и была использована плёнка со сбитых американских воздушных шаров, запущавшихся над СССР с разведывательными целями.

Поскольку орбиты Земли и Луны не точно лежат в одной плоскости, затмения случаются не в каждое полнолуние и не всегда Луна целиком попадает в тень Земли. Эта фотография показывает максимальную фазу (момент наибольшего покрытия тенью) частного затмения.



Почему граница тени нерезкая? Прежде всего это связано с тем, что диск Солнца не очень мал, и лучи света от Солнца приходят в разных направлениях. Каждая точка Солнца, если бы светила только она, давала бы чёткую тень, но тени эти в разных местах. Там, где они все накладываются, возникает полная тень; там, где они накладываются только частично — полутень.



С точки зрения наблюдателя на Луне: в тени диск Земли полностью закрывает диск Солнца; в полутени Земля закрывает Солнце лишь частично (чем бóльшая часть закрыта, тем меньше света доходит, и освещённость плавно уменьшается по мере приближения к полной тени). На самом деле фотографическая обработка и неоднородность поверхности Луны скрадывают часть полутени: ширина полосы полутени примерно равна диаметру Луны (ср. ниже о кольцевых затмениях).

Наблюдая за лунным затмением (длительностью частного и полного затмений, формой тени), можно оценить соотношение размеров Земли и Луны. Сразу же ясно, например, что Луна меньше Земли, поскольку в некоторые моменты целиком попадает в её тень. (Первым такую оценку сделал уже упоминавшийся Аристарх.)

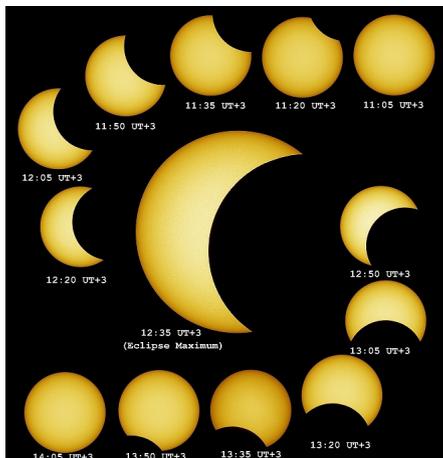
Соотношение размеров Луны и тени Земли хорошо видно на рисунке, где фотографии разных фаз затмения наложены друг на друга так, чтобы совместить тень Земли:



## Солнечные затмения

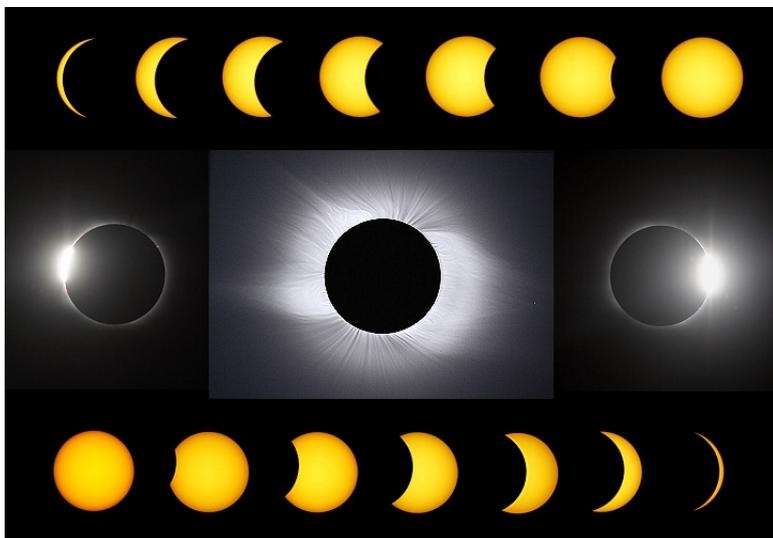
При солнечном затмении тень от Луны падает на Землю. Это происходит, когда Солнце, Луна и Земля оказываются на одной прямой (в этом порядке), так что солнечные затмения приходится на новолуния. С точки зрения наблюдателя на Земле диск Луны (невидимый, так как в этот момент она обращена к нам тёмной стороной и находится вблизи от Солнца, где небо яркое) закрывает Солнце. Если не весь диск закрыт, это называется частным затмением, если весь — то полным.

Наблюдатель солнечного затмения видит, как Луна постепенно закрывает Солнце (они оба движутся по небу из-за суточного вращения Земли, но с разной скоростью, так как Луна к тому же обращается вокруг Земли).



На рисунке показаны различные фазы частного затмения (3 октября 2005 года), искусственно соединённые в одном кадре; в середине — наибольшая фаза затмения (для места съёмки) в увеличенном масштабе. Цифры показывают время съёмки.

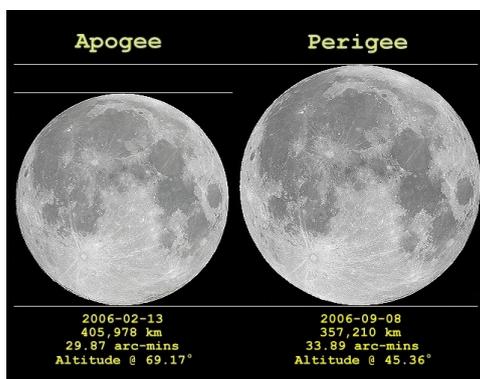
Аналогичный снимок для полного затмения 2008 года, сделанный в Новосибирске:



Эти снимки показывают картину затмения в одном и том же месте, но в разное время. Со спутника можно сфотографировать тень от Луны на поверхности Земли целиком. Вот фотография, сделанная в 1999 году французским космонавтом Jean-Pierre Haignere с борта станции «Мир» в рамках программы Perseus (фото P25736):



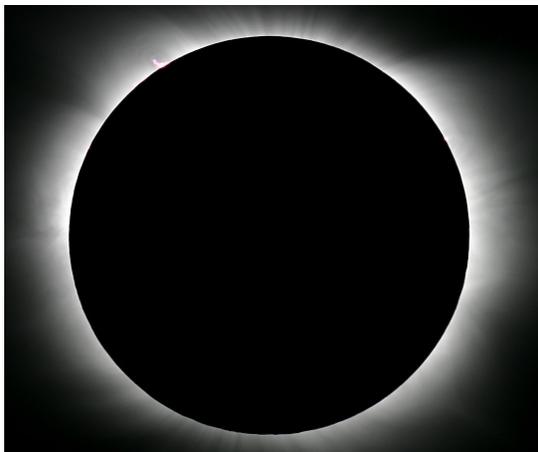
Дополнительную красоту солнечным затмениям придаёт то обстоятельство, что видимые угловые размеры Солнца и Луны близки. Более того, поскольку расстояние до Луны (как и до Солнца) немного меняется, то меняется и её угловой размер. Это хорошо видно при сравнении двух фотографий Луны, сделанных в одинаковом масштабе в моменты наибольшего (апогей) и наименьшего (перигей) расстояния до Земли:



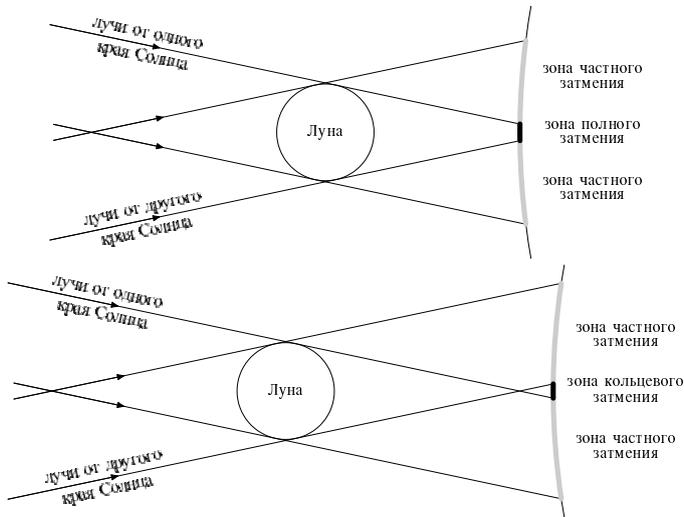
Когда угловой размер Луны меньше размера Солнца (если приглядеться, то именно это происходит на фотографии частного затмения выше), то затмение не будет полным ни в какой точке Земли; в центре тени затмение будет кольцевым — диск Луны заслоняет центральную часть Солнца и видно лишь яркое кольцо. Разница между размерами Луны и Солнца лучше видна на следующей фотографии:



Если же угловой размер Луны достаточен, чтобы закрыть Солнце, и мы находимся в нужной точке Земли (внутри зоны полной тени), то наступает почти что ночь, становятся видны наиболее яркие звёзды и из-за чёрного лунного диска видны куски солнечной короны (которая светится гораздо менее ярко, чем само Солнце, и может быть самой разной формы в зависимости от солнечной активности):



Схему солнечного затмения можно изобразить так (сверху — полное затмение, снизу — кольцевое)



## Луна и Солнце на небе

Затмения — явление редкое, но и с повседневным поведением Луны связано много интересных (и не всегда очевидных) вопросов. Начнём с такого: бывает ли в Москве полная Луна видна в зените?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо сообразить, где должно находиться Солнце в этот момент. Если Луна полная, то её положение на небесной сфере в точности противоположно положению Солнца, то есть Солнце находится вертикально внизу (как иногда говорят, в надире). А этого в Москве не бывает — по тем же причинам, почему Солнце не бывает в зените вне тропиков. (Можно ещё заметить, что если сейчас Солнце в надире, то через полгода, когда Земля будет в том же положении относительно неподвижных звёзд а Солнце будет в противоположной точке небесной сферы, оно окажется в зените.)

Немного более сложный вопрос: а вообще бывает ли в Москве Луна (в любой фазе — не обязательно полная) в зените? Некоторое размышление показывает, что и это невозможно. Ведь орбита Луны расположена в плоскости обращения Земли вокруг Солнца (как мы обсуждали, это следует из того, что полнолуния бывают каждый месяц). Поэтому на небесной сфере Луна перемещается там же, где и Солнце — вдоль эклиптики, и потому,

как и Солнце, в Москве в зените не появляется. (Это же относится ко всем планетам.)

Таким образом мы получили ответ о возможном положении Луны на небе. Но есть ещё вопросы о направлении «рогов» лунного серпа и о соотношении положений Луны и Солнца. (Поскольку Луна достаточно яркая, её можно увидеть одновременно с Солнцем, если она достаточно далеко от Солнца.)

Поскольку Луна светит отражённым от Солнца светом, то Солнце находится на продолжении оси симметрии лунного серпа, с его выпуклой части (противоположной рогам). Угловое расстояние между Луной и Солнцем можно оценить по толщине серпа: чем дальше мы от новолуния, тем толще серп и тем больше угловое расстояние. Мы уже упоминали, что в момент первой четверти угол почти равен  $90^\circ$  (именно отклонение от  $90^\circ$  безуспешно пытался измерить Аристарх). Вообще-то геометрические соотношения связывают толщину серпа не с земным, а с лунным углом в треугольнике Луна–Земля–Солнце, но они связаны, поскольку Солнце далеко и угол там совсем маленький.

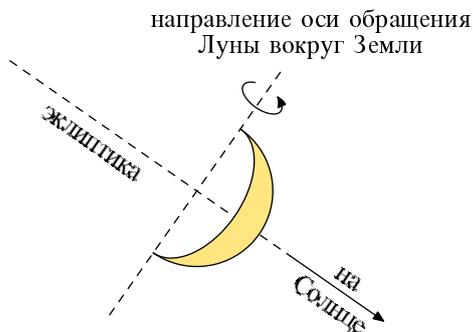
А вот на этой картинке



ясно видно, что Солнце должно быть внизу и справа от Луны, при этом совсем недалеко от неё, поскольку серп тонкий, но под горизонтом, поскольку небо тёмное. Обратите внимание, кстати, что здесь виден не только серп, но и заметна вся остальная, не освещённая Солнцем, часть лунного диска (по крайней мере в компьютерном варианте брошюры — при печати едва освещённые участки могли пропасть). Откуда берётся освещение этой части? Оказывается, что это отражённый свет Земли. В самом деле, когда у нас новолуние, у них на Луне — «полноземлие», и большой и яркий диск Земли (благодаря облакам Земля отражает свет гораздо лучше Луны) освещает как раз ту часть Луны, которую мы видим.

На самом деле по картинке можно определить, сделана ли эта фотография до или после новолуния, если знать, что наблюдатель в Северном полушарии Земли и не в тропиках (если не знать — тоже можно, но надо всматриваться в детали Луны в плохо освещённой части). Есть такое правило: если серп Луны направлен выпуклостью вправо, то это растущий месяц (после новолуния до полнолуния), а если влево, то убывающий. Мнемоническое правило для русскоязычных: месяц бывает Растущий и Стареющий (и первая буква напоминает о направлении месяца).

Почему это так? Глядя на Луну, легко понять, как проходит эклиптика — ведь Луна и Солнца находятся в плоскости эклиптики, и ось симметрии лунного серпа (проходящая через Солнце) будет пересечением этой плоскости с небесной сферой.



Из этого ясно, как проходит прямая, перпендикулярная эклиптике: она параллельна хорде, соединяющей концы рогов месяца. Один из концов этой прямой упирается в небесную сферу в  $23^\circ$  от Полярной звезды, и раз мы в Северном полушарии и вне тропиков, то это верхний конец прямой. Глядя с этого конца, мы видим Луну движущейся против часовой стрелки, то есть удаляющейся от Солнца. Значит, месяц растущий, как и говорит наше правило.

Это же рассуждение позволяет установить, где на Земле можно увидеть месяц «лодочкой», с рогами вверх (симметрично относительно вертикали). Как мы видим, в этот момент ось обращения Луны вокруг Земли горизонтальна, а эклиптика вертикальна. А это бывает, как мы уже видели, в тропиках (чтобы Солнце попало в зенит, нужно ровно то же самое условие: вертикальность плоскости эклиптики).

А где месяц бывает направлен рогами точно вниз? То же самое рассуждение говорит, что это может быть только в тропиках, но на самом деле это

увидеть почти невозможно. Ведь в этом случае Солнце должно быть сверху от месяца и недалеко от него, а днём трудно разглядеть месяц вблизи Солнца.

## Вопросы

**29** Почему полные лунные затмения можно увидеть сравнительно часто, никуда не уезжая, а для наблюдения полных солнечных затмений люди ездят в специальные экспедиции?

[ Потому что уж если лунное затмение видно, то оно видно во всех местах, где видна Луна, то есть в целом полушарии, а солнечное затмение видно только в узкой полосе. ]

**30** Толщина лунного серпа составляет половину радиуса Луны. Оценить угловое расстояние между Луной и Солнцем в этот момент.

[  $60^\circ$  (поскольку  $\cos 60^\circ = 1/2$ ). ]

**31** С Земли виден тонкий растущий лунный серп. Как видят в этот момент Землю астронавты с Луны?

[ Почти полностью освещённой Солнцем. ]

**32** Луна строго в первой четверти, и граница света и тени строго вертикальна. Где в этот момент находится Солнце?

[ На горизонте: направление на него перпендикулярно вертикальной плоскости, проведённой через наблюдателя и границу освещённой части Луны. ]

**33** Двигаясь по небесной сфере, Луна закрывает звёзды («покрытие звёзд Луной»). С какой стороны лунного серпа звезда исчезает (с освещённой или тёмной) и с какой появляется вновь?

[ Когда серп растущий, то звёзды заходят под его тёмную сторону и выходят с его светлой стороны; при убывающем серпе наоборот. ]

**34** Как направлена плоскость эклиптики на фотографии разных фаз частного затмения, приведённой на с. 30?

[ Мысленно совместив солнечный диск, видим, что Луна движется в направлении из правого верхнего угла в левый нижний. ]

**35** Как меняются фазы Земли и её положение на небе с точки зрения обитателей лунной космической станции?

[ Положение на небе почти не меняется, так как Луна обращена к Земле одной стороной; фазы меняются с тем же периодом, как у нас фазы Луны: новолуние соответствует полноземлю и так далее. ]

**36** Оцените ширину полосы частного солнечного затмения, исходя из расстояния до Луны и углового размера Луны и Солнца (примерно половина

градуса). Как соотносится ширина этой полосы с размером Луны? Какова ширина зоны полутени (на Луне) во время лунного затмения?

[ Диаметр Луны примерно равен 3 тысячам километров. Ширина полосы частного затмения примерно вдвое больше диаметра Луны, поскольку угловые размеры Луны и Солнца близки (и полоса полного затмения узкая, когда она есть). Ширина зоны полутени на Луне равна ширине этой же зоны на Земле, то есть примерно равна диаметру Луны. ]

**37** До и после полной фазы лунного затмения освещённая часть Луны напоминает серп (хотя и не такой, как обычно — граница тени более расплывчатая и имеет другую форму). Применимо ли в этой ситуации правило Растущего/Старого серпа (верно ли, что в северном полушарии в начале затмения уменьшающийся серп направлен рожками вправо, как в С, а в конце растущий серп направлен рожками влево, как в Р)?

[ Как раз наоборот: растущий серп и последующая за ним частичная фаза затемнены с одной стороны, но серп растёт, а освещённая часть Луны убывает. ]

## 5. А напоследок я скажу. . .

Как мы уже несколько раз отмечали, описанная картина мира является лишь приближённой и требует многочисленных уточнений.

### Форма Земли

Земля имеет форму шара лишь в первом приближении. Более точно её можно описать как эллипсоид (сплюснутый шар). Расстояние до центра земли на полюсе примерно на треть процента меньше, чем на экваторе. Связано это с вращением Земли: центробежная сила гонит воду Мирового океана с полюсов на экватор, пока разница уровней не компенсирует этот эффект. (Это относится не только к воде, но и к Земле в целом — внутри она скорее жидкая, чем твёрдая, если речь идёт о больших промежутках времени.)

### Движение звёзд

Мы говорили, что звёзды настолько далеко по сравнению с размерами солнечной системы, что движение Земли по орбите незаметно. Это не совсем так: более точные изменения с помощью телескопов и фотоснимков позволяют его заметить и измерить. Оказывается, что сделанные в разное время года фотографии звёздного неба не совсем одинаковые: одни звёзды смещаются на фоне других. (Как в движущемся поезде: близкие предметы смещаются

на фоне дальних.) Смещения эти невелики (меньше одной угловой секунды, то есть  $1/3600$  градуса), но вполне заметны. Это позволяет измерить расстояние до ближайших звёзд. Есть даже специальная единица измерения, парсек — это расстояние, когда параллакс равен угловой секунде, то есть расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в одну секунду. Несложно подсчитать, что это чуть больше трёх световых лет (свет проходит это расстояние за три с лишним года).

## Абберрация

На самом деле даже если бы звёзды были очень-очень далеко, всё равно нельзя было бы говорить, что направления на них не меняются при движении Земли по орбите. Тут вступает в игру другой фактор — конечность скорости света. Когда едешь в дождь в поезде, дождь кажется косым (это видно и по следам капель на окнах). Падение капель складывается с движением поезда, и кажется, что капли падают не сверху, а наклонно. Можно подсчитать, что тангенс угла их наклона есть отношение скоростей поезда и дождя.

Для света нужно быть аккуратнее, так как сложение таких больших скоростей требует знания теории относительности, но порядок величины этого эффекта получается правильный. Скорость движения Земли по орбите примерно 30 километров в час, а света — 300 000 километров в час, поэтому тангенс угла наклона примерно  $1/10\,000$ . Для малых углов наклона тангенс примерно равен углу, измеренному в радианах, так что получается  $1/10\,000$  радиан. Видно, что этот эффект заметно больше предыдущего (несколько десятков угловых секунд, а не доли секунды). С другой стороны, заметить его труднее, так как для близких звёзд отклонение одинаково и на фотографиях небольшого участка неба относительное расположение звёзд не меняется.

## Прецессия

Мы говорили, что ось вращения Земли направлена всё время на Полярную звезду, как бы ни двигалась Земля по орбите. На самом деле это не совсем так — направление это медленно меняется, хотя угол между осью вращения Земли и перпендикуляром к плоскости эклиптики остаётся примерно равным  $23^\circ$ . Таким образом, ось Земли описывает конус, вращаясь вокруг этого перпендикуляра; один оборот происходит примерно за 25 тысячи лет. Это не так уж и долго в исторических масштабах, так что явление это (называемое прецессией) довольно заметное и было открыто уже древнегреческим астрономом Гиппархом около 130 года до Р. Х. В результате прецессии получается, что «Полярная звезда» — титул временный, поскольку в разные

моменты разные звёзды оказываются ближе к оси вращения Земли.

Тот странный факт, что хотя земная ось не сохраняет направление, но сохраняет угол с плоскостью эклиптики,<sup>11</sup> объясняет механика. Примерно так же ведёт себя волчок, запущенный неровно: он наклоняется, но не падает, а вместо этого ось вращения описывает круги. Это называется гироскопическим эффектом — если быстро вращающийся предмет попробовать наклонить, взяв за концы оси, то он отклонится не туда, куда действует сила наклона, а перпендикулярно направлению действия силы. (Покачайте как-нибудь включённый внешний жёсткий диск, присоединённый к компьютеру. Знатоки механики смогут даже определить таким образом направление вращения диска, не разбирая и не выключая его.) Поэтому сила тяжести, стремясь наклонить волчок к земле, лишь заставляет его кружить. В случае Земли роль силы тяжести играет то же гравитационное притяжение со стороны Луны и Солнца (в большей степени первое, так как Луна ближе и поле от неё более неоднородное); в сочетании с эллиптической формой Земли оно стремится развернуть ось Земли перпендикулярно к эклиптике, но заставляет лишь вращаться вокруг этого перпендикуляра.

Последствием прецессии является смещение точек равноденствия и солнцестояния по эклиптике.

### **Смещение перигелия**

Земля, как мы уже говорили, обращается вокруг Солнца не совсем по кругу — скорее по эллипсу, и расстояние до Солнца меняется от минимального (около 147 миллионов километров в перигелии) до максимального (около 152 миллионов километров в афелии). Более того, эллипс — это тоже лишь приближение, поскольку орбита Земли незамкнута. Следующее приближение — медленно поворачивающийся эллипс, в котором точка перигелия от года к году смещается.

Так что при попытке совсем точно определить, что такое год, накладываются разные эффекты, и есть несколько вариантов: тропический год определяется исходя из равноденствий, сидерический год — исходя из положения Земли относительно звёзд, аномалистический год — из прохождения перигелия и афелия); есть и другие. Отличия, впрочем, не так велики — не больше нескольких сотых дня (между тремя названными).

Все эти годы содержат нецелое число дней, и это приводит к необходимости округления в ту и другую сторону, но это уже не астрономия, а история календарей. Про разницу между старым и новым стилем (юлианским

---

<sup>11</sup>На самом деле этот угол тоже не совсем постоянен, а немного колеблется; эти колебания называют нугацией.

и григорианским календарями) знают все, но как и отчего она возникла — интересный исторический вопрос.

### **Луна не совсем в плоскости эклиптики**

Плоскость обращения Луны вокруг Земли близка к плоскости эклиптики, но не совсем с ней совпадает (угол между ними равен примерно  $5^\circ$ ). Поэтому, хотя полнолуние мы можем наблюдать каждый месяц (для него отклонение в  $5^\circ$  почти незаметно), затмения возможны только в определённые периоды (когда направление на Солнце приближается к линии пересечения эклиптики и плоскости обращения Луны вокруг Земли). Умение предсказывать затмения издавна было мечтой астрономов, и они обнаружили разные закономерности (например, что затмения приблизительно повторяются примерно через 18 лет; этот период иногда называют саросом), но точные предсказания — где и когда можно будет наблюдать затмение и в какой фазе — стали возможны лишь с развитием небесной механики. Отметим ещё, что плоскость лунной орбиты также подвержена прецессии (с периодом, близким к саросу, но не совпадающим с ним).

### **Либрации**

Мы говорили, что Луна повёрнута к Земле всегда одной и той же стороной, но это не совсем так. Действительно, большую часть обратной стороны Луны мы не видим никогда, но тем не менее Луна немного колеблется, и благодаря этим колебаниям можно увидеть больше половины поверхности Луны. Колебания связаны с тем, что орбита Луны — эллипс и движение по этому эллипсу неравномерно, так что оно не может быть в точности согласовано с более равномерным вращением Луны вокруг своей оси.

Либрацию можно заметить на фотографиях разных фаз Луны (см. выше): видно, что детали лунной поверхности немного смещаются от одной фотографии к другой.

### **Благодарности**

Автор признателен всем участвовавшим в подготовке брошюры и предоставившим материалы для неё (см. оборот титула), а также А. В. Спиваку, предложившему прочесть лекцию на «малом мехмате», и В. Г. Сурдину, который указал на разнообразные ошибки автора (ныне исправленные) и сообщил ему правильную астрономическую терминологию. (Оставшиеся ошибки — на совести автора.)