



# Видимое и истинное движение небесных тел

Сначала мы обсудим видимые движения небесных тел, в том числе приводящие к солнечным и лунным затмениям. Говоря о видимом движении светил, мы имеем в виду изменение их взаимного положения на небесной сфере, не включая сюда кажущееся вращение самой небесной сферы, обусловленное суточным вращением Земли.

## Фазы и либрации Луны

Самое привычное и наглядное из видимых изменений на небе — это смена фаз Луны. Мы с детства знаем, что образ Луны ежемесячно проходит через несколько характерных фаз: новолуние, первую четверть, полнолуние и последнюю четверть. Однако указать причину этого привычного явления может далеко не каждый. На днях моей маленькой внучке подарили книгу, от чтения которой у меня волосы встали дыбом, поскольку ее автор представил смену лунных фаз как ежемесячное затмение лунного диска тенью Земли. Ежемесячное лунное затмение — такого наивного представления об астрономических событиях я еще не встречал и даже не ожидал его от



Рис. 1.1. Полнолуние (слева) и первая четверть.



**Рис. 1.2.** Так происходит смена фаз Луны. В Северном полушарии — справа налево.

современного человека. Поэтому, думаю, с причиной смены лунных фаз нужно познакомиться в первую очередь.

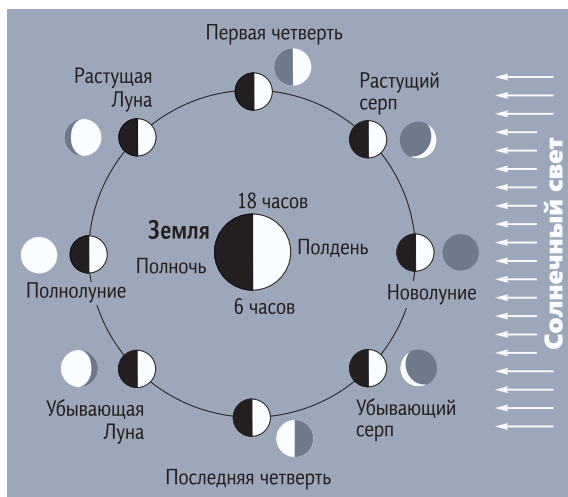
При описании внешнего вида Луны или планеты мы называем фазой определенную стадию в периодическом изменении видимой формы освещенного Солнцем полушария этих тел. Солнце всегда освещает одно полушарие небесного тела, а фаза — это понятие, связанное с наблюдателем. Фаза измеряется тем, какую часть освещенного Солнцем полушария видит наблюдатель. Смена фаз Луны — явление наглядное. Каждый следующий день мы наблюдаем этот спутник Земли в новом виде. В течение 29,5 суток, практически одного месяца, происходит полная смена фаз — проходит так называемый синодический лунный месяц.

Мы находимся на Земле, Луна движется вокруг нас, совершая за месяц полный оборот. Солнце в этой шкале времени почти неподвижно (за месяц смещение Солнца относительно Земли происходит всего лишь на  $\frac{1}{12}$  часть окружности). У лунного шара всегда освещено полушарие, обращенное к Солнцу, а мы наблюдаем лунный шар с разных сторон по отношению к направлению на Солнце, поэтому иногда видим его полностью освещенную половинку, иногда — часть, а иногда (в новолуние) к нам обращена полностью затемненная сторона лунного шара. Это и есть причина смены фаз. То есть у Луны всегда освещена одна половина и всегда в тени другая, но наша точка зрения на эти половинки в течение месяца меняется.

Тем не менее, хотя в течение месяца мы видим и светлую, и темную стороны Луны, из этого не следует, что с Земли мы можем увидеть всю лунную поверхность: к Земле постоянно обращена одна — «видимая» — сторона Луны. Почему так происходит? А потому, что два движения Луны синхронны: один оборот по орбите вокруг Земли и один поворот вокруг своей оси Луна совершает за одно и то же время — за месяц.

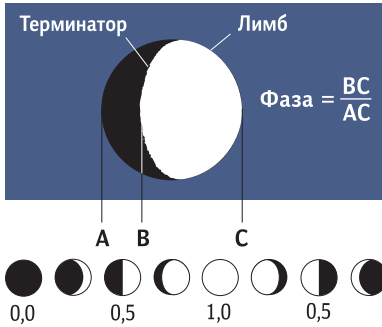
Названия фаз Луны на русском языке не очень разнообразны, их в ходу четыре: *новолуние*, *первая четверть*, *полнолуние* и *последняя четверть*. Кстати, вы не задумывались, почему мы говорим «четверть», когда освещена половина лунного диска? А потому, что от новолуния прошла четвертая часть периода — лунного месяца.

**Рис. 1.3.** Фазы Луны. Показано ее движение по орбите вокруг Земли. Вид со стороны Северного полюса. Луна движется против часовой стрелки. Рядом с орбитой показан внешний вид Луны для земного наблюдателя в Северном полушарии в соответствующие моменты синодического месяца.



В некоторых других языках существуют более разнообразные варианты названий лунных фаз. Например, в английском между новолунием и первой четвертью выделяют фазу «растущего серпа» (*waxing crescent*), а между первой четвертью и полнолунием еще есть «растущая луна», или «растущий месяц» (*waxing gibbous*). Соответствующие фазы после полнолуния называются «убывающая луна» (*waning gibbous*) и «убывающий серп» (*waning crescent*). Думаю, у некоторых коренных народов, для которых Луна и ее ночной свет гораздо важнее, чем для нас, городских жителей, есть и другие названия лунных фаз, которые дробят месяц на более мелкие периоды. Например, у эскимосов есть два десятка слов для характеристики цвета и состояния снега, потому что для них он очень актуален. Так и с Луной, вероятно.

В английском языке есть выражение «on the dark side of the Moon», есть и такая песня. Но это выражение неверно, поскольку в нем подразумевается, что сторона Луны, о которой поет Pink Floyd, всегда темная, а обращенная к нам — всегда светлая. Правильно было бы говорить «on the far side of the Moon» — «на дальней стороне Луны». А ближнюю к Земле называют «near side», поскольку на Землю смотрит всегда одно и то же полушарие, а другое всегда от нас отвернуто, и до полетов космических аппаратов мы никогда не видели дальнюю сторону. Впрочем, знатоки английского языка говорят, что у слова *dark* есть и другие значения — «скрытый, невидимый». В таком случае выражение «on the dark side of the Moon» можно было бы оправдать. Но во избежание недоразумений астрономы предпочи-

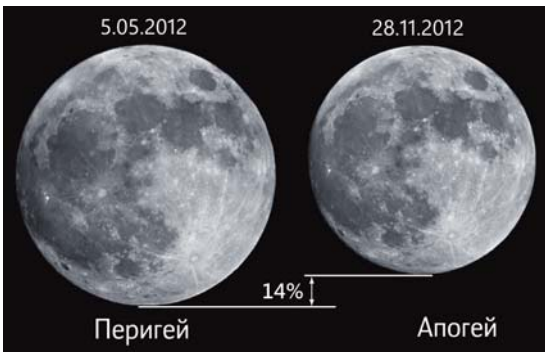


**Рис. 1.4.** Фаза Луны или планеты выражается числом  $F = d/D$ , где  $d$  — ширина освещенной части, а  $D$  — диаметр диска.

тают называть видимую и невидимую с Земли стороны Луны «near side» и «far side». Численным значением фазы называют освещенную долю диаметра диска Луны (или планеты), перпендикулярного линии, соединяющей концы серпа, или, что то же самое, — отношение площади освещенной части видимого диска ко всей его площади. Следовательно, фаза определяется числом от 0 до 1 — отношением максимального размера освещенной части диска к полному диаметру диска. Но из-за того, что фаза 0,5 соответствует и первой, и последней четверти, без дополнительного указания трудно разобраться, о какой именно фазе идет речь, — тут у астрономов недоработка. Кто любит математику, докажет простую теорему о том, что отношение  $d/D$  равно отношению освещенной площади диска к его полной площади.

Граница между освещенной и неосвещенной частями диска называется *терминатором*, и у шарообразного небесного тела она имеет форму половины эллипса, «разрезанного» вдоль большой оси.

Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите, причем заметить это довольно легко, просто измеряя видимый диаметр лунного диска. В течение месяца он меняется: когда Луна к нам ближе (ближайшая к Земле точка орбиты называется *перигеем*), лунный диск выглядит немного крупнее обычного, а когда она дальше всего, в *апогее*, — немного меньше. Впрочем, непрофессиональный глаз мо-



**Рис. 1.5.** Луна на минимальном и максимальном расстояниях от Земли.

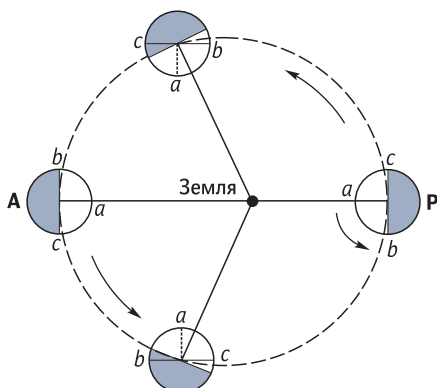


**Рис. 1.6.** Либрации Луны по долготе и широте. Их можно заметить, обратив внимание на кратеры и моря вблизи лимба (края) лунного диска. Кроме этого, заметно меняется и угловой размер диска Луны.

жет этого и не заметить, поскольку максимальная разница составляет около 14%. Разумеется, эта разница бросается в глаза, когда смотришь на помещенные рядом снимки Луны в апогее и перигее (рис. 1.5). Но при взглядах на небо с интервалом в две недели эта разница совершенно незаметна. Однако в последние годы журналисты регулярно напоминают нам о «суперлunii», утверждая, что Луна будет огромная. Не думаю, что сами они способны заметить эту разницу в 14%.

Движение Луны по эллиптической орбите вызывает одно легко наблюдаемое явление, о котором мало кто знает. Я имею в виду либрации, т. е. видимые покачивания лунного шара (от лат. *libratio* раскачивание). В течение аномалистического месяца либрации по долготе достигают почти  $\pm 8^\circ$ . Эти покачивания Луны «вправо-влево» называют либрацией по долготе, а покачивания «с ног на голову» — либрацией по широте. Отдельные моменты этого движения показаны на рис. 1.6. Смена лунных фаз не показана, поскольку это не прямые снимки с Земли, а компьютерная эмуляция на основе теории движения Луны и фотографий ее поверхности, переданных космическим зондом *Clementine* (NASA). В динамике это можно увидеть на странице Википедии <https://ru.wikipedia.org/wiki/Либрация>. Серия прямых фотографий либраций Луны есть на сайте [http://www.pixheaven.net/photo\\_us?nom=0505-070](http://www.pixheaven.net/photo_us?nom=0505-070).

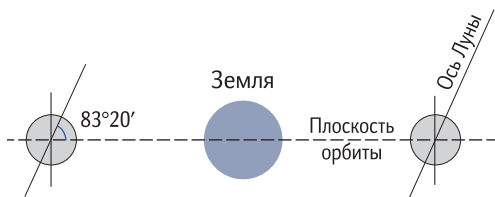
Как объяснить это явление? Оказывается, его природа чисто геометрическая. Причина покачиваний *по долготе* — форма лунной орбиты: ведь она не круговая, а эллиптическая, и это заставляет Луну двигаться вокруг Земли с переменной угловой скоростью. Астрономы называют это вторым законом Кеплера, а физически это простое проявление закона сохранения орбитального момента импульса. В то же время вокруг своей оси Луна, конечно, вращается с постоянной скоростью. Сложение этих двух движений — равномерного и неравномерного — приводит к тому, что Луна иногда показывает



**Рис. 1.7.** Причина либраций Луны по долготе — в ее неравномерном движении по эллиптической орбите. Точка А — апогей, Р — перигей. Каждый из четырех орбитальных секторов Луна проходит за одно и то же время.

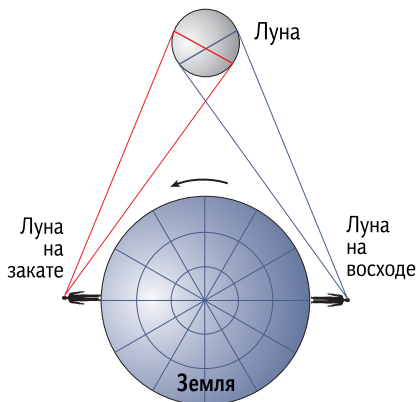
нам чуть больше своего восточного полушария, а иногда — западного (рис. 1.7). В течение аномалистического месяца либрации по долготе достигают почти  $\pm 8^\circ$ . Эти покачивания довольно легко обнаружить; о них, вероятно, знали еще до изобретения телескопа. *Широтные* покачивания Луны происходят в течение драконического месяца, достигая почти  $\pm 7^\circ$ , из-за того, что ось ее вращения не перпендикулярна плоскости ее орбиты (рис. 1.8). У Земли ось вращения тоже наклонена, поэтому полгода наша планета показывает Солнцу в большей степени одно свое полушарие, вторые полгода — другое. А при наблюдении Луны мы на Земле выступаем «в роли Солнца»: Луна полмесяца показывает нам чуть больше свое северное полушарие, а вторые полмесяца — южное.

Кроме упомянутых выше либраций, вызванных движением Луны по орбите и потому происходящих с периодом в месяц, наблюдается и небольшая суточная либрация, возникающая вследствие близости Луны к Земле. По сути, это эффект суточного параллакса, вызванный движением самого наблюдателя вместе с поверхностью вращающейся Земли. Наблюдатели, находящиеся в противоположных точках земного экватора, в один и тот же момент видят несколько различные области лунной поверхности. А каждый конкретный наблюдатель в течение ночи перемещается на расстояние порядка радиуса



**Рис. 1.8.** Наклон лунного экватора к орбите (средний —  $6^\circ 41'$ , меняется от  $6^\circ 31'$  до  $6^\circ 51'$ ).

Земли и поэтому тоже видит Луну с немного различных направлений. С Луны радиус Земли виден под углом  $57^\circ$ ; его называют *горизонтальным параллаксом* Луны. Таким образом, суточная либрация Луны может достигать (для жителей экваториальных стран) почти  $\pm 1^\circ$ . Благодаря либрациям всех типов наблюдателю за Земле доступно более половины (около 59%) площади лунного шара.



**Рис. 1.9.** Горизонтальный параллакс.

Вообще движение Луны не так-то просто описать математически. В первую очередь оно зависит от притяжения к Солнцу и к нашей планете (см. главу 3, раздел «Траектория Луны»). Учесть притяжение к Солнцу довольно легко, поскольку его форма очень близка к шарообразной: полярный и экваториальный радиусы Солнца различаются лишь на 0,001%. Но о нашей планете этого не скажешь. А поскольку Земля — не шар, а сплюснутый эллипсоид (и это только в первом приближении!), ее гравитационное поле не сферически симметричное, а значительно более сложное. Это вынуждает Луну двигаться по непростой орбите. Если бы ничего, кроме Земли, рядом с Луной не было, проблема была бы не такой сложной; но есть еще Солнце, и оно тоже влияет на движение нашего спутника. А еще на нее действует притяжение больших планет. Так что изучение движения Луны — одна из самых сложных задач небесной механики.

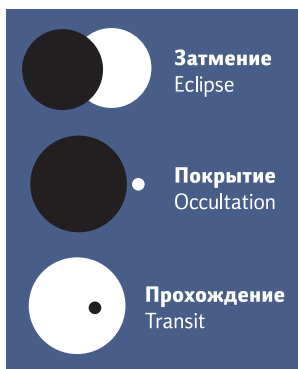
Когда говорят о теории движения Луны, подразумевают некую явную функцию времени — обычно в виде ряда (т. е. суммы) простых функций, — дающую положение и скорость Луны в прошлом и будущем. Уже в начале XX в. аналитическая теория движения Луны содержала 1400 членов. А сегодня, когда методы лазерной локации позволяют измерять расстояние до нашего спутника с ошибкой не более нескольких миллиметров, компьютерные программы движения Луны содержат десятки тысяч членов. Полагаю, что не более сотни из них понятны с точки зрения физики. В первом приближении Земля — шар, имеющий простое гравитационное поле с потенциалом  $GM/R$ . Во втором приближении Земля — сплюснутый суточ-

ным вращением эллипсоид, и тут мы получаем дополнительные гармоника гравитационного поля. Третье приближение: Земля — трехосный эллипсоид, у которого экватор — не окружность, а эллипс, от чего ситуация еще больше усложняется. К этому мы добавляем значительно более сильное влияние Солнца, а также вполне ощутимое влияние Юпитера, Венеры... Дальше идут члены, смысл которых мы в целом понимаем, но точное их значение выводим лишь путем согласования теории с наблюдениями. Современная теория движения Луны вполне удовлетворяет практические потребности космонавтики и расчета лунных и солнечных затмений, но неисправимая любознательность человека требует всё более высокой точности, поэтому теория до сих пор разрабатывается и уточняется.

### Затмения

Мы, жители Земли, время от времени наблюдаем солнечные и лунные затмения. Нам невероятно повезло, что видимые размеры лунного диска в точности соответствуют размерам солнечного. Это удивительно, потому что Луна, вообще говоря, понемногу удаляется от Земли. Но почему-то именно в нашу эпоху она находится на таком расстоянии от нас, что ее наблюдаемый размер идеально соответствует видимому размеру Солнца. Луна примерно в 400 раз меньше Солнца по физическому размеру, но и в 400 раз ближе к Земле, чем Солнце. Поэтому угловые диаметры их дисков совпадают.

В астрономии есть три разных термина, описывающих ситуацию, когда два объекта в проекции совмещаются на небе. Мы используем



**Рис. 1.10.** Затмение, покрытие и прохождение. Темный диск ближе к наблюдателю.

тот или иной из этих терминов в зависимости от того, каков относительный угловой размер этих объектов. Если их угловые размеры близки друг к другу, мы называем это *затмением*; если более крупный объект перекрывает собой более мелкий, то это *покрытие*; когда же мелкий объект проходит на фоне крупного — это *прохождение*, или *транзит* (рис. 1.10). Теперь давайте разберемся, чем эти явления могут быть полезны нам, чем они интересны.

Покрытия — очень удобный способ измерять размер маленьких небесных объектов. Диаметры звезд мы вообще не разли-

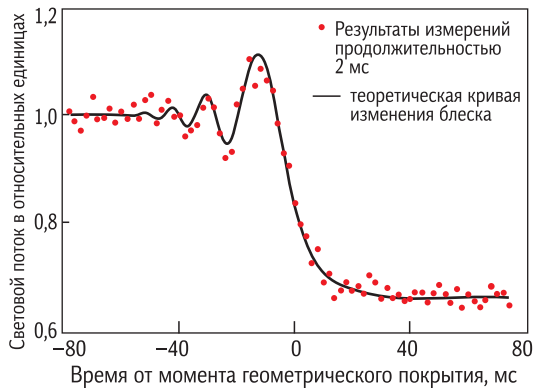


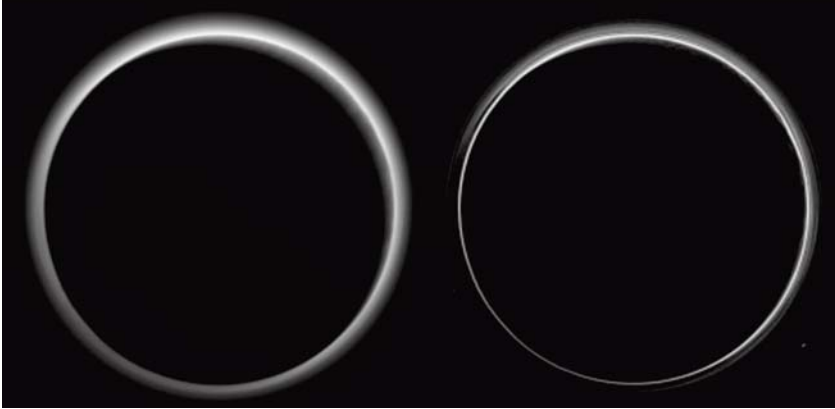


**Рис. 1.11.** Слева: покрытие Луной Юпитера (видны спутники Юпитера Ио и Европа). Справа: покрытие Луной Венеры (здесь совмещены два снимка: светлая точка справа, у ночного лимба – Венера перед началом покрытия, точка слева, у дневной части лимба – Венера сразу после окончания покрытия).

чаем даже в лучшие телескопы: они слишком малы, намного меньше одной угловой секунды. Но если Луна, двигаясь по небу, своим краем закрывает какую-нибудь звездочку, та меркнет, но ее потемнение происходит не моментально, а в соответствии с теорией дифракции: когда источник света закрывают краем плоского экрана, его яркость для удаленного наблюдателя испытывает несколько колебаний и лишь затем окончательно обнуляется. Наблюдая покрытие звезды темным краем лунного диска, можно подобрать теоретическую кривую, подходящую к измеренным колебаниям яркости звезды, и вывести из этого угловой размер объекта. В Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ), где я работаю, мои коллеги этим занимаются и получают при измерении

**Рис. 1.12.** Кривая покрытия звезды 61 Тельца темным краем Луны. Получена 2 марта 1982 г. на 0,5-м телескопе в Тянь-Шанской высокогорной экспедиции (ГАИШ МГУ). Угловой диаметр звезды составляет 0,003". Уровень сигнала после покрытия определяется рассеянным светом Луны.

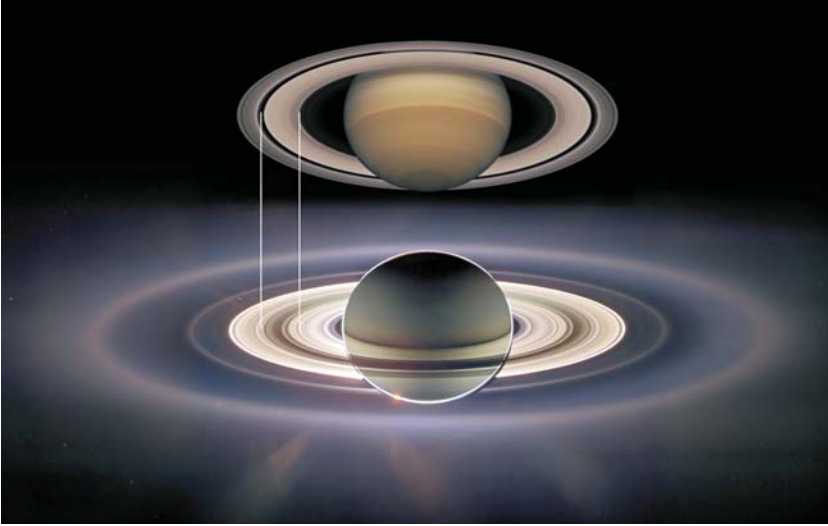




**Рис. 1.13.** Атмосфера Плутона. Справа усилен контраст. Фото: «New Horizons».

размеров звездных дисков разрешение до 0,003 угловой секунды. Это очень высокая точность, которой каким-либо другим способом не достичь. К сожалению, Луна ходит не по всему небу, поэтому измерить размеры всех звезд методом покрытий мы не можем. Луна движется вблизи плоскости эклиптики, примерно в пределах  $\pm 5^\circ$  от нее, и именно в этой полосе угловые размеры звезд хорошо измерены.

В нынешнем веке мы можем не только наблюдать за поведением Земли и Луны, но и видеть затмения-покрытия любых объектов Солнечной системы. Например, в 2015 г. мимо Плутона пролетал первый космический аппарат — «New Horizons» (NASA). Он сфотографировал планету с ночной стороны, и мы впервые увидели атмосферу Плутона. В этом положении диск Плутона закрывает собой Солнце, но солнечные лучи высвечивают по краям планетного диска плуто-нианскую атмосферу, про свойства которой мы почти ничего не знали. Если повысить контраст, то в атмосфере даже видны слои. И это очень многое говорит нам о том, из чего состоит и как устроена газовая оболочка этой далекой карликовой планеты. Оказалось, что Плутон — маленькая, но очень интересная планета. Недавно в журнале *Nature* появились две статьи, в которых весьма убедительно показано, что под ледяной корой Плутона есть жидкий водный океан. Абсолютно неожиданная вещь! Мы предполагали, что подледный океан есть у спутников Юпитера и Сатурна, но Плутон — он так далеко от Солнца, там так холодно и рядом с ним нет гигантской планеты, которая могла бы его согреть. Там все должно было замерзнуть давно и навсегда. Но оказалось, есть признаки того, что под корой Плутона —



**Рис. 1.14.** *Вверху:* Сатурн в прямом освещении солнечными лучами, каким мы видим его от Земли с помощью космического телескопа «Хаббл» (NASA). *Внизу:* Сатурн в контровом освещении (т. е. Солнце располагается за диском планеты), сфотографированный зондом «Кассини» (NASA). На нижнем фото контраст и яркость усилены, чтобы лучше были видны внешние кольца G и E. В делении Кассини (темной «щели» между двумя яркими кольцами A и B, видимыми с Земли) и внутри яркого кольца B движутся мелкие и довольно темные частицы, которые плохо отражают свет, но хорошо рассеивают его вперед, поэтому они видны только в контровом освещении и остаются незаметными при наблюдении со стороны Солнца и Земли.

океан. Он не совсем пригоден для жизни; вероятно, там много аммиака, но все же это океан — и это очень интересно.

А вот еще один замечательный пример — покрытие Солнца Сатурном (рис. 1.14). Обычно мы видим Сатурн так, как в верхней части картинки, когда он вблизи противостояния с Солнцем. Лучи Солнца освещают далекую планету «в лоб», и мы видим ее анфас. Мы давно знали о существовании этого красивого ободка — кольца Сатурна — и всегда думали, что между ним и планетой пустота — ничего нет. Когда первый искусственный спутник Сатурна «Кассини» (NASA) залетел за ночную сторону планеты, мы увидели, что между внутренним краем наблюдаемого с Земли кольца и планетой, напротив, довольно много вещества и что оно тянется до самой атмосферы. То, что это вещество незаметно в отраженном свете, но видно в рассеянном свете при контровом освещении, свидетельствует, что это очень мелкие частицы, размер которых сравним с длиной волны

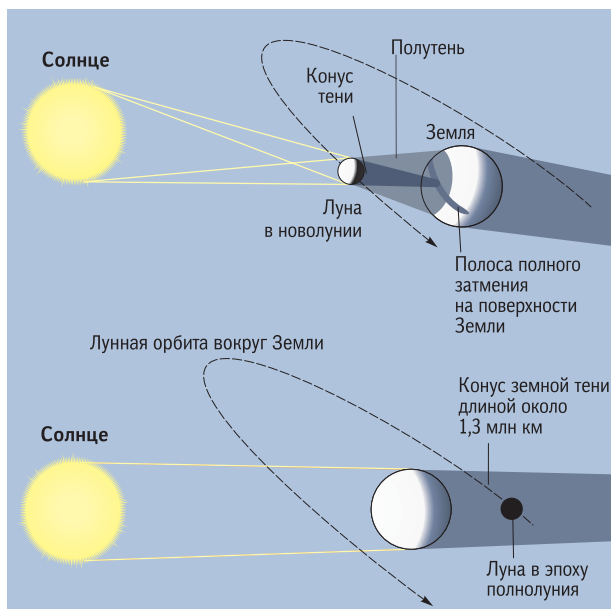
света. Такие частицы, как известно, плохо отражают свет, но эффективно рассеивают его вперед, по ходу падающего на них излучения, и немного в сторону. Поэтому в отраженном свете они почти не видны, а при контровом освещении отчетливо проявляются.

Пока непонятно, каким образом в кольце происходит сепарация частиц вещества по их размеру и почему мелкие частицы оказались ближе к планете. Простая физическая логика подсказывает, что должно быть наоборот: вблизи границы атмосферы планеты лучше сохраняются крупные частицы, поскольку у них отношение площади сечения к массе меньше, а значит, они слабее тормозятся в верхних слоях атмосферы. В природе же все оказалось не так.

Эту новую информацию о кольцах Сатурна мы получили именно благодаря тому, что использовали ситуацию затмения (покрытия) как прибор для исследования. Контровое освещение выявило много новых деталей в структуре колец.

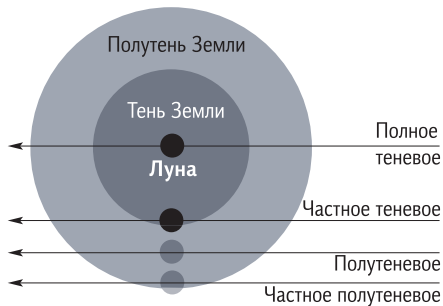
### *Лунные затмения*

Теперь мы вернемся к лунным и солнечным затмениям. Каждое небесное тело, освещенное Солнцем, отбрасывает сужающийся конус тени и расширяющийся конус полутени. Тень — это область пространства, попадая в которую наблюдатель не видит поверхность



**Рис. 1.15.** Схема солнечного и лунного затмений. Принципиальная разница между ними состоит в том, что лунная тень покрывает малую часть земной поверхности, а земная тень полностью скрывает Луну от солнечного света.

Солнца; в области полутени он видит часть поверхности Солнца. В соответствии с этим лунные затмения делят на теньевые и полутеневые. В первом случае хотя бы часть лунного диска проходит через область земной тени, во втором случае – через область полутени. В обоих случаях затмение может быть полным или частным, в зависимости от того, полный диск Луны скрывается в земной тени (полутени) или только его часть. То же и с Солнцем: если наблюдатель попадает в тень Луны, он видит полное солнечное затмение, если в полутень – частное.

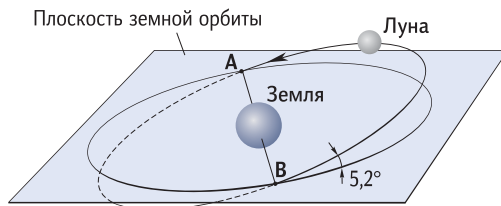


**Рис. 1.16.** Лунные затмения.

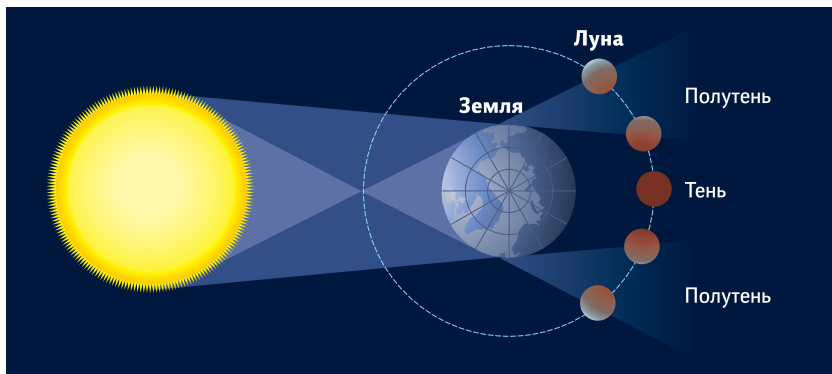
Полное затмение Солнца не заметить нельзя: днем на несколько минут наступает почти ночная темнота. Но неглубокое частное затмение Солнца, если заранее о нем не знать, вполне можно не заметить. То же и с лунными затмениями: теньевое затмение Луны выглядит эффектно, а полутеневое – невзрачно и почти незаметно.

Длительность лунного затмения зависит от того, насколько глубоко в земную тень проникает Луна. Самые длительные затмения – центральные, когда Луна проходит через центр земной тени. При этом полное теньевое затмение продолжается около 2 часов.

Итак, теньевое затмение Луны происходит, когда она попадает в тень, отброшенную Землей. Луна попадала бы туда каждый месяц в момент полнолуния, если бы плоскости лунной и земной орбит совпадали, но они не совпадают. Плоскость орбиты Луны более чем на  $5^\circ$  наклонена к эклиптике (среднее значение этого угла  $5,15^\circ$ , и он колеблется от  $4,99^\circ$  до  $5,30^\circ$ ). Центр земной тени лежит на эклиптике, а угловой радиус этой тени для наблюдателя на Земле составляет около  $0,7^\circ$ . Угловой радиус лунного диска – около  $0,25^\circ$ . Следовательно, если Луна удаляется от эклиптики более чем на  $1^\circ$ , она не попа-



**Рис. 1.17.** Взаимное расположение плоскости лунной орбиты и плоскости орбиты Земли. Точки А и В – узлы лунной орбиты.

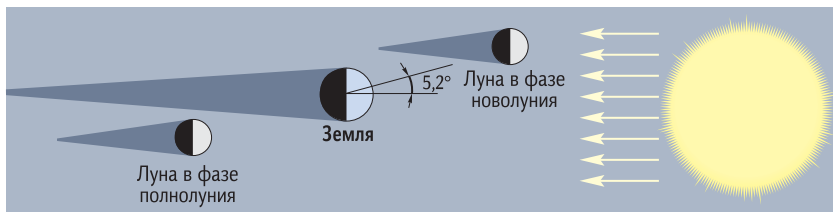


**Рис. 1.18.** Лунное затмение.

дает в тень Земли. Именно поэтому Луна чаще проходит мимо земной тени, нежели попадает в нее.

Затмения как Луны, так и Солнца происходят лишь в те моменты, когда Луна проходит вблизи *узлов* своей орбиты, т. е. пересечений ее орбитальной плоскости с плоскостью эклиптики (в которой всегда находится Солнце). Вблизи узлов Луна проходит дважды в месяц, но для затмения нужно, чтобы в эти же моменты и Солнце тоже оказалось вблизи одного из узлов: если того же узла, где Луна, то наблюдается солнечное затмение, а если противоположного, то лунное. Происходит это не так уж часто: максимальное количество лунных затмений всех типов за год — 4 (например, это произойдет в 2020 и 2038 годах), минимальное — два в год. Солнечные затмения происходят приблизительно с такой же частотой, однако шанс увидеть полное лунное затмение намного выше, чем полное солнечное. Дело в том, что при наличии ясного неба лунное затмение видят все жители ночного полушария Земли, а солнечное — только те жители дневного полушария, кому посчастливилось попасть в узкую полосу, по которой пробегает маленькая (250–270 км) лунная тень.

В процессе полного теневого затмения Луны наш спутник сначала попадает в область полутени и чуть-чуть меркнет, а затем погружается в конус земной тени. Казалось бы, солнечный свет в тень не проникает, других источников света там нет, значит, Луна, пересекая земную тень (а это длится несколько часов), должна стать абсолютно невидимой. Но этого не происходит: она все же немножко видна в темно-багровых тонах. Дело в том, что ее освещают солнечные лучи, рассеявшиеся и преломившиеся в земной атмосфере.



**Рис. 1.19.** Солнечные и лунные затмения происходят только в моменты новолуния и полнолуния соответственно. Кроме этого, Луна должна располагаться вблизи узлов своей орбиты, иначе (как на этом рисунке) тени проходят мимо цели.

Голубая часть их спектра сильно рассеивается в воздухе и поэтому почти не попадает на Луну, а красные лучи рассеиваются в воздухе значительно слабее и, преломившись из-за атмосферной рефракции, направляются в область геометрической земной тени и освещают лунную поверхность.

Поскольку полутеневое затмение Луны заметить глазом почти невозможно — настолько слабо уменьшается яркость лунного диска, — это явление редко привлекает внимание наблюдателей. А вот полные теневые затмения Луны в прошлом активно использовались для науки. Дело в том, что в момент затмения, в середине лунного дня, Солнце на несколько часов резко «выключается» и перестает освещать лунную поверхность, которая начинает понемногу охлаждаться. По тому, как быстро происходит охлаждение лунной поверхности, можно понять, какая у нее структура. Если бы Луна состояла из чистого металла — скажем, была бы плотным алюминиевым шаром, — то ее поверхность остывала бы очень медленно (из-за высокой теплопроводности вещества снизу постоянно подходило бы новое тепло). А если бы Луна была сделана из пемзы или синтепона, теплопроводность которых почти нулевая, температура поверхности падала бы быстро. Наблюдения показали, что в ходе затмения поверхность охлаждается быстро. Следовательно, она скорее «из пемзы или поролона», чем «из меди или алюминия». А если серьезно, то планетологи с помощью затмений еще до полетов на Луну роботов и людей поняли, что ее минеральная поверхность пористая и покрыта пылеобразным веществом, которое мы называем *реголитом*. Позже туда прилетели роботы и люди и подтвердили, что поверхность действительно покрыта пылью, рыхлой наверху и спекшейся в глубине. Так лунные затмения помогли астронавтам заранее узнать, по какой поверхности им предстоит ходить.

### *Солнечные затмения*

Еще более замечательное явление — затмения Солнца. Раньше только они позволяли нам увидеть самую внешнюю область солнечной атмосферы — корону Солнца. Физики испытали настоящий шок, когда в середине XX в. была измерена температура этой обла-



**Рис. 1.20.** Солнечное затмение 29 марта 2006 г. Северный Кавказ, Кисловодская солнечная станция ГАО РАН. Слева — Эльбрус. Фото: М. Лисаков, А. Юферев, Е. Казаков.



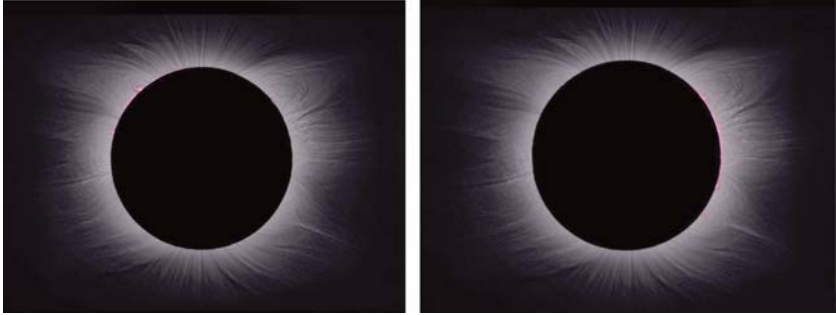
сти, ибо результаты оказались совершенно неожиданными. Что нам говорит нормальная физика? Что по мере удаления от источника тепла температура газа должна понижаться. Мы видим такие примеры сплошь и рядом. Источник тепла на Земле — ее поверхность, нагреваемая солнечными лучами, поэтому, поднимаясь на самолете, мы наблюдаем, как окружающий воздух становится всё холоднее; на высоте 10 км температура составляет  $-50^{\circ}\text{C}$ . Всё логично.

Энергия Солнца рождается в его ядре и затем просачивается наружу, а значит, снаружи температура должна быть ниже: действительно, в центре Солнца — около  $15\,000\,000\text{ K}$ , а на поверхности —  $6000\text{ K}$ : температура падает. И вдруг в области короны она опять начинает стремительно расти — до 2 млн кельвинов. С какой стати? Где источник энергии? В короне чрезвычайно разреженный газ, никакие ядерные реакции там не происходят. Задача была непростая, и решили ее не сразу. Впрочем, и сейчас еще нельзя сказать, что она решена до конца. Большую роль в исследовании солнечной короны сыграли работы советского астрофизика И. С. Шкловского. А начал он с наблюдения солнечных затмений.

Структура короны, как видите, напоминает картину расположения железных опилок, рассыпанных над двухполюсным магнитом. Явно видно, что у Солнца есть один магнитный полюс сверху и другой снизу, а по бокам — замкнутые структуры (иногда дипольные, иногда многополюсные).

Благодаря затмениям не только были открыты и исследованы солнечная корона и лежащий под ней более плотный и прохладный слой — хромосфера, но состоялись и другие важные открытия и наблюдения. В 1868 г. в спектре хромосферы обнаружили линии неизвестного в ту пору на Земле химического элемента — им оказался гелий. В спектре короны тоже обнаружили неизвестные линии, которые исследователи поторопились приписать еще одному неизвестному элементу, назвав его коронием. Но это оказались линии железа при крайне высокой степени ионизации, недостижимой в ту пору в лаборатории. В 1918 г. затмение помогло подтвердить один из выводов общей теории относительности Эйнштейна: смещение изображений звезд вблизи солнечного диска продемонстрировало искривление лучей света в гравитационном поле.

В обычное время, между затмениями, мы не видим корону Солнца, потому что ее яркость намного меньше яркости дневного неба рядом с солнечным диском. Однако в космосе этой проблемы нет.



**Рис. 1.21.** Эти два момента полного затмения разделены во времени всего несколькими минутами. На левом фото видна восточная часть хромосферы (это тонкий слой атмосферы Солнца между фотосферой и короной), а на правом — ее западная часть.

Телескопы некоторых космических обсерваторий (например, SOHO) снабжены специальным экраном, которым можно закрыть изображение солнечного диска и увидеть околосолнечные окрестности — корону, протуберанцы, плотные потоки солнечного ветра, а также небольшие кометы, которые становятся заметными, только когда пролетают вплотную к Солнцу, и о существовании которых мы ранее даже не догадывались.

Для наблюдателя на Земле лунный диск так точно совпадает по угловому размеру с солнечным, что стоит Луне чуть-чуть сместиться, и она уже открывает нам полоску фотосферы Солнца, т. е. его видимого диска (рис. 1.21). Будь Луна чуть меньше — хотя бы на 2% — или располагайся она чуть дальше от нас, своим диском она уже не смогла бы закрыть фотосферу, и мы бы никогда не увидели с Земли солнечную корону: стоит появиться маленькому кусочку солнечного диска, как его свет, рассеянный в атмосфере, делает небо ярко-голубым, и никакая корона уже не видна. Эти снимки я показываю с удовольствием, потому что они сделаны современными любителями астрономии. Кто хорошо владеет фотокамерой и Фотошопом, может увидеть то, что раньше нельзя было заметить даже с телескопом.

Один из главных вопросов, встающих перед астрономом при подготовке к наблюдению какого-то небесного явления, в данном случае затмения: куда ехать, чтобы с наибольшей вероятностью получить желаемый результат? Факторов много: и количество ясного дневного неба в сезон наблюдения, и продолжительность явления, и его высота над горизонтом, и стоимость поездки, и политическая стабильность в регионе, и еще много других факторов.



**Рис. 1.22.** Обстоятельства полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. Путь лунной тени, движущейся с запада на восток, показан черной полосой. Параллельными ей линиями отмечены области частного затмения, достигающего максимальной фазы 0,9, 0,8 ... по мере удаления от полосы полного затмения.

На всей Земле в год можно наблюдать от двух до пяти солнечных затмений, из которых не более двух – полные или кольцеобразные. В среднем за 100 лет происходит 237 солнечных затмений, из которых 160 – частные, 63 – полные, 14 – кольцеобразные. Через одну и ту же точку земной поверхности лунная тень проходит в среднем раз в 300 лет. То есть если не гоняться по планете за полными солнечными затмениями, а жить на одном месте, то шанс увидеть своими глазами солнечную корону невелик.

Поскольку  $2/3$  поверхности земного шара покрыты океаном, путь лунной тени проходит в основном по поверхности воды. Но никто не наблюдает затмения с плавающего судна, так как для оптических приборов требуется устойчивая опора. Всегда выбирают область на суше, но и здесь у астронома много своих требований: не должно быть густой растительности, сильного ветра, высоких гор, закрыва-



**Рис. 1.23.** Фото лунной тени, бегущей по облакам, в момент полного солнечного затмения. Снимок из космоса.

ющих горизонт... Например, куда бы вы поехали, чтобы наблюдать затмение, случившееся 29 марта 2006 г.? Посмотрите на карту с обстоятельствами затмения и выберите наиболее привлекательное место... Правильно, в Турцию. Погода там, как правило, хорошая, перелет из России недорог, Солнце в момент затмения высоко над горизонтом, продолжительность полной фазы затмения близка к максимальной, поскольку место расположено недалеко от середины траектории лунной тени. Поэтому многие поехали именно туда, чтобы наблюдать это полное затмение, — и не ошиблись.

Любопытно, что несколько десятилетий назад, в один из предыдущих саросов (т. е. периодов времени, через которые почти в точности повторяются обстоятельства затмений), некоторые экспедиции выбрали Египет, где вероятность хорошей погоды и ясного неба еще выше, чем в Турции. Действительно, в момент затмения (и до, и после него) небо было безоблачным, но по этой причине случилось две беды. От высокой температуры пострадала светоприемная аппаратура, прежде всего эмульсия фотопластинок, на которые в ту эпоху велось фотографирование, а из-за ветра и пыли пришлось накрывать оптическую аппаратуру полиэтиленовой пленкой, которую быстро съели местные оголодавшие козы, и пыль повредила оптику.

Если вы в момент затмения посмотрите на Землю из космоса (рис. 1.23), то сразу поймете, с какими трудностями сталкиваются астрономы: лунная тень бежит по Земле, но она же ложится на облака, и астрономы, находящиеся в этот момент под облаками, не видят Солнца. Для преодоления этих проблем существует надежный вариант — нужно вести наблюдения с борта самолета, летящего над облаками в сторону движения лунной тени. В этом случае облачность

**Рис. 1.24.** Кольцеобразное солнечное затмение 3 октября 2005 г.



уже точно не страшна — всё увидите, хотя путешествие это дорогое. А если у вас еще и очень быстрый самолет, то вы можете продлить удовольствие от созерцания и изучения солнечной короны: в вашем распоряжении будут не минуты, а часы. Когда появился гражданский сверхзвуковой самолет «Конкорд», один из первых его рейсов был направлен именно в погоню за лунной тенью. Сверхзвуковой самолет способен ее догнать. Ведь Луна, а значит, и ее тень движется по орбите со скоростью около 1 км/с, а Земля вращается в ту же сторону, причем на экваторе со скоростью около 500 м/с. Значит, по поверхности Земли лунная тень бежит со скоростью от 1 км/с (в полярных областях) до 0,5 км/с (на экваторе). Поскольку диаметр лунной тени у Земли обычно не превышает 280 км, продолжительность полной фазы затмения для неподвижного наблюдателя, как правило, составляет не более 7 минут. А сверхзвуковой самолет, летящий со скоростью 1,5 М (т. е. около 500 м/с), в районе экватора может сопровождать лунную тень в течение нескольких часов!

Иногда Луна нас подводит. Это происходит в случае, если затмение наблюдается, когда Луна находится в апогее своей орбиты и не способна перекрыть солнечный диск целиком. Тогда ее тень не дотягивается до поверхности Земли — мы видим кольцеобразное (иногда говорят «кольцевое») солнечное затмение. Это явление почти бесполезное: в течение всего затмения остается виден яркий край поверхности (фотосферы) Солнца, поэтому корона остается незаметной. Но



**Рис. 1.25.** Солнечная корона. 1 августа 2008 г. Фото: M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin. Снимок получен путем совмещения многих изображений, контраст усилен компьютерной обработкой.

польза от кольцеобразного затмения все-таки есть. Можно легко отследить моменты касания видимого диска Луны с видимым диском Солнца – всего четыре касания. Эти четыре момента времени регистрируют с высокой точностью (до  $1/1000$  секунды), что позволяет проверять точность теории движения Луны и вращения Земли.

На фотографии затмения 2008 г. (рис. 1.25) мы видим солнечную корону. Видно, что на самом деле корона нигде не кончается – это бесконечные потоки газа, которые уходят с поверхности Солнца и



**Рис. 1.26.** Солнечное затмение 11 июля 2010 г. Хорошо заметны детали лунной поверхности. Фото: M. Druckmüller, M. Dietzel, Sh. Habbal, V. Rušin.

уже не возвращаются к ней. Со скоростью звука и даже быстрее они несутся во все стороны от Солнца, в том числе и к Земле. Но обратите внимание: Луна тоже видна, хотя прямые солнечные лучи на нее не попадают. Что же подсвечивает темную сторону Луны? Это свет от Земли! В момент затмения обращенное к Луне полушарие Земли почти полностью освещено Солнцем, за исключением небольшого пятка лунной тени. Отраженный от Земли свет уходит в сторону Луны, и мы видим ее ночное полушарие (рис. 1.26). Впрочем, и вне затмений это явление легко можно наблюдать: если вы посмотрите на молодой месяц сразу после новолуния, то увидите, что темная часть лунного диска все-таки видна как бледно-серая; называется это явление *пепельным светом* Луны. И в этом случае отраженный от Земли свет подсвечивает темную сторону Луны. Поэтому на видимой стороне Луны, на ее полушарии, постоянно обращенном в сторону Земли, никогда не бывает полной ночи. Там бывают яркий солнечный день и полутемная ночь, которую условно можно назвать «земной ночью». Наш земной шар довольно ярко освещает Луну. Здесь, на Земле, в полнолуние мы можем гулять без фонаря ночью и даже читать при Луне крупный текст. А Земля на лунном небе занимает в 13 раз большую площадь и отражает солнечный свет в несколько раз лучше лунной поверхности. Так что «земной ночью» поверхность видимого полушария Луны освещена так же ярко, как если бы на нее светили несколько десятков полных Лун. Будущим исследователям Луны не придется заботиться о ночном освещении, пока они будут работать на видимой стороне. Зато на обратной стороне Земля не видна, и ночи там очень темные.

Про условия наступления затмения вкратце уже говорилось. Нам важно понять, что раз орбита Луны наклонена на 5 с лишним градусов к эклиптике, а размер видимого диска — всего 0,5°, то лунная тень, как правило, проходит мимо Земли. И только когда три тела — Солнце, Луна и Земля — располагаются на одной прямой, лунная тень попадает на Землю. То же самое с затмениями Луны: земная тень проходит либо выше, либо ниже Луны и лишь изредка попадает на нее. Причина этого — несовпадение плоскостей орбит.

### **Прохождения планет по Солнцу**

А еще астрономы очень дорожат наблюдениями прохождения планет на фоне солнечного диска. Дело тут вот в чем. Уже очень давно астрономы научились измерять относительные размеры ор-



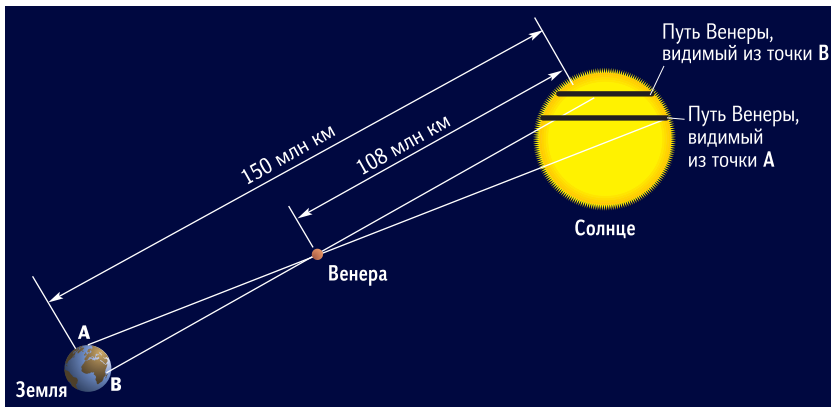
**Рис. 1.27.** Джереми Хоррокс за наблюдением прохождения Венеры по диску Солнца. Фрагмент картины английского художника В. Лавендера (1903).

бит планет. Измерить, во сколько раз диаметр орбиты Венеры меньше земной орбиты, — простая геометрическая задача. Но реально-го масштаба размеров орбит Солнечной системы мы долго не знали. Разумеется, всё было бы намного проще, если бы радиолокацию изобрели лет на 300 раньше, но у астрономов XVII–XVIII вв. не было такого метода, а значит, оставался единственный способ — наблюдать прохождение планет на фоне солнечного диска, чтобы измерить их параллакс. Лишь две планеты — Венера и Меркурий — время от времени проходят на фоне Солнца, причем Венера привлекательнее, поскольку она ближе к Земле, из-за чего ее параллакс больше и измерить его легче.



**Рис. 1.28.** Уильям Крабтри с семьей наблюдает прохождение Венеры по диску Солнца — впервые в истории человечества (фреска Ф. И. Брауна, XIX в.).

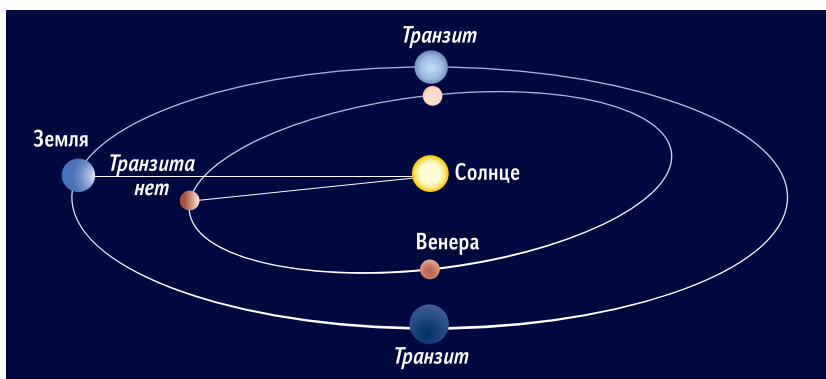




**Рис. 1.29.** Уточнение астрономической единицы путем измерения параллакса Венеры на фоне Солнца.

Случается такое явление редко. Плоскость венерианской орбиты и плоскость земной (эклиптика) не совпадают. Наблюдать Венеру на фоне Солнца можно только тогда, когда Земля и Венера находятся в районе пересечения двух плоскостей – в узлах венерианской орбиты. Впервые это явление наблюдали и описали его в середине XVII в. два англичанина – Джереми Хоррокс и его друг Уильям Крабтри.

Это небесное явление дало возможность измерить расстояние между Землей и Венерой, а значит, и между Землей и Солнцем, а затем вычислить расстояния между всеми планетами, причем не в относительных единицах, а в километрах. Так астрономы вычислили все расстояния в Солнечной системе. Это стало очень важным до-



**Рис. 1.30.** Транзиты Венеры, т. е. ее прохождения на фоне солнечного диска, можно наблюдать, когда Венера и Земля находятся вблизи узлов орбиты Венеры.

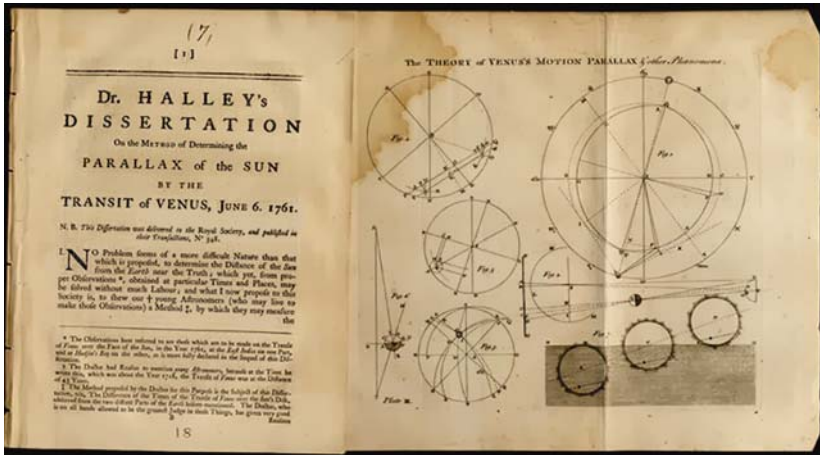


Рис. 1.31. Диссертация Эдмонда Галлея с расчетами, позволяющими вычислить расстояние между Землей и Солнцем по наблюдениям транзита Венеры.

стижением. Фактически расстояние от Земли до Венеры было измерено методом суточного параллакса. Этот метод предложил Эдмонд Галлей, он заключался в измерении продолжительности прохождения Венеры по диску Солнца при наблюдении из различных точек

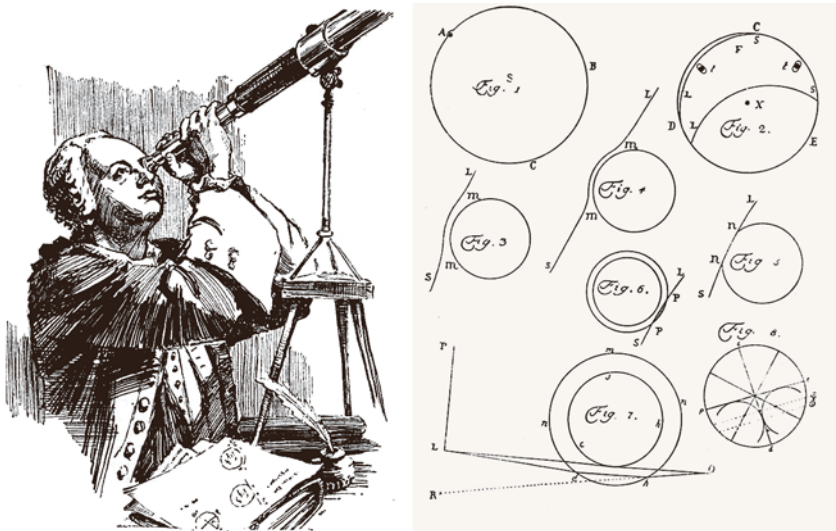
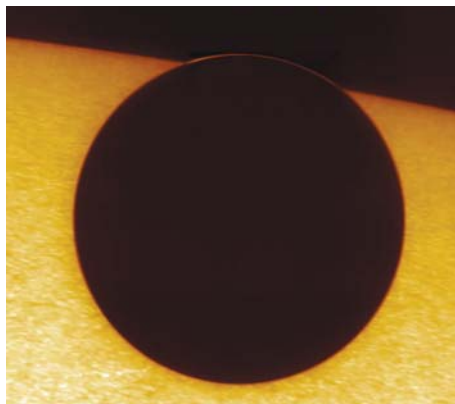


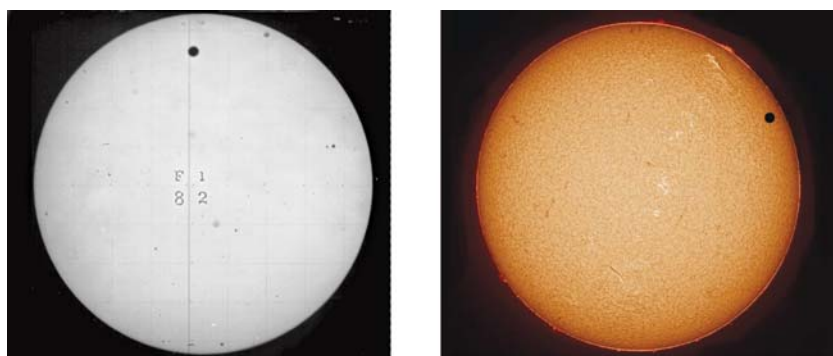
Рис. 1.32. М. В. Ломоносов наблюдает за прохождением Венеры по диску Солнца 26 мая 1761 г. из своей петербургской квартиры. Справа – иллюстрации Ломоносова в его рукописи «Явление Венеры на Солнце...» (1761).

**Рис. 1.33.** Явление Ломоносова, сфотографированное с помощью 1-метрового Шведского вакуумного солнечного телескопа на острове Ла-Пальма (Канарские о-ва).



Земли, разнесенных по широте. Так как Венера проходит не через центр солнечного диска, то по времени прохождения можно установить длину хорды видимого пути планеты, а по различию этих величин, измеренных в разных точках Земли, определить угловое смещение планеты относительно диска Солнца — ее параллакс, а значит, и расстояние до планеты. При этом наблюдения были достаточно просты, для их проведения требовались только телескоп и простые часы, чтобы измерить небольшие промежутки времени.

В 1761 г. при наблюдении прохождения Венеры неожиданное открытие сделал, как утверждает история, наш соотечественник М. В. Ломоносов. В тот год для наблюдения транзита Венеры, чтобы измерить ее параллакс, во все части света отправились многочисленные академические экспедиции с самыми квалифицированными астрономами. Ломоносову в тот момент было уже около 50 лет,



**Рис. 1.34.** Прохождение Венеры по диску Солнца. Слева — фото 6 декабря 1882 г., справа — 8 июня 2004 г.

он болел, плохо видел и никуда не поехал — остался наблюдать явление в простенький телескоп из окна своего дома в Санкт-Петербурге. И он единственный из всех наблюдателей не только заметил и описал, но и понял это удивительное явление.

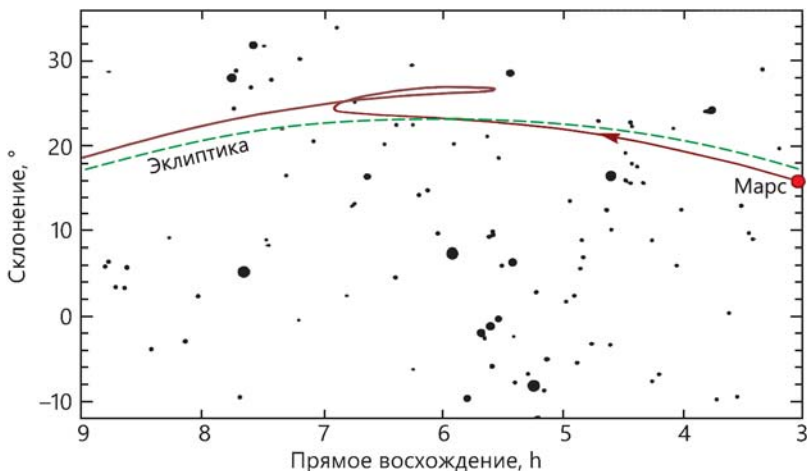
Когда темный диск Венеры подходил к краю солнечного диска, перед ним вырос, как написал Ломоносов, «пупырь», яркий ободок. Это было преломление солнечных лучей в атмосфере Венеры. Ломоносов совершенно верно интерпретировал увиденное, тогда он и написал, что у Венеры «знатная атмосфера». Загадка в том, как, учитывая все условия, он мог увидеть то, что сейчас можно увидеть отчетливо только при помощи суперсовременного вакуумного телескопа. Видимо, сработала интуиция — все-таки великий ум.

Если бы наличие у Венеры атмосферы не подтвердилось — ничего страшного, Ломоносов не утратил бы своего статуса в научном мире. Но атмосфера у Венеры есть, и значение гения Ломоносова стало еще более весомым. Это явление во всем мире называется «явлением Ломоносова», и мы используем его, когда изучаем далекие планеты — экзопланеты, находящиеся у других звезд.

### **Истинное движение планет**

Видимое движение планеты складывается из движения в пространстве наблюдателя и самой планеты. Вот посмотрите, как в 2007 и 2008 гг. Марс «гулял» на фоне звездного неба: ехал-ехал, остановился, поехал назад, вновь остановился, а затем продолжил движение вперед. Как-то странно он себя ведет, не правда ли? А ничего странного в этом нет, если вспомнить, что мы наблюдаем его с движущейся Земли.

Марс обращается по своей орбите в одном направлении, не меняя его. Мы вместе с Землей обращаемся вокруг Солнца в том же направлении, но движение Земли происходит быстрее и по более короткой орбите. При этом оно складывается с более медленным движением Марса по более длинной орбите. Вот и получаются в сумме такие «кренделя», которые сильно озадачивали древних астрономов. Вся грандиозная картина звездного неба движется идеально равномерно, а планеты на фоне звезд блуждают туда-сюда. Нужно было как-то объяснить такое поведение планет и научиться его прогнозировать, создав для этого математическую теорию. И создали, взяв за основу простую механическую модель. Планета равномерно обращается по малой окружности (эпициклу), центр которой движется по боль-



**Рис. 1.35.** Движение Марса по небу с июля 2007 г. по июнь 2008 г.

шой окружности (деференту), в центре которой – кто бы сомневался! – располагается неподвижная Земля. Складывая два равномерных круговых движения, получаем с точки зрения земного наблюдателя петлеобразную траекторию планеты. Простая и красивая идея!

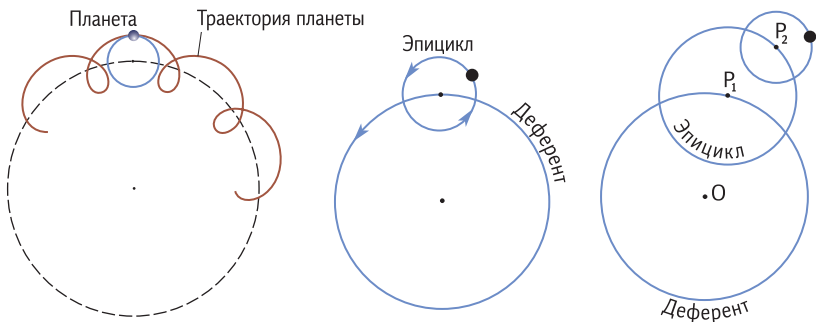
Окончательный вид этой теории придал во II веке н. э. греческий математик, астроном и географ Клавдий Птолемей в своем гениальном «Альмагесте». Он довел эту модель до великолепного состояния. Птолемей понимал, что видимое движение планет значительно сложнее, чем можно изобразить с помощью одного эпицикла, «насаженного» на деферент. Значит, эту небесную «коробку передач» нужно было усложнить. На первый эпицикл Птолемей «посадил» второй эпицикл с иным периодом, размером и наклоном; на него – третий... Что это вам напоминает? Ну конечно же, ряд Фурье! Любое циклическое движение можно разложить на сумму простых синусоидальных колебаний. Птолемей не знал Фурье-анализа, но он интуитивно представлял сложное движение планет в виде серии простых синусоидальных (гармонических) колебаний. Все это изложено в книге Клавдия Птолемея «Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати томах». В переводе с древнегреческого на русский она впервые была издана в 1998 г. Хотите заработать комплекс неполноценности – попробуйте ее прочитать.

Теорией Птолемея ученые пользовались полторы тысячи лет, до эпохи Коперника, – завидное долголетие для любой научной тео-

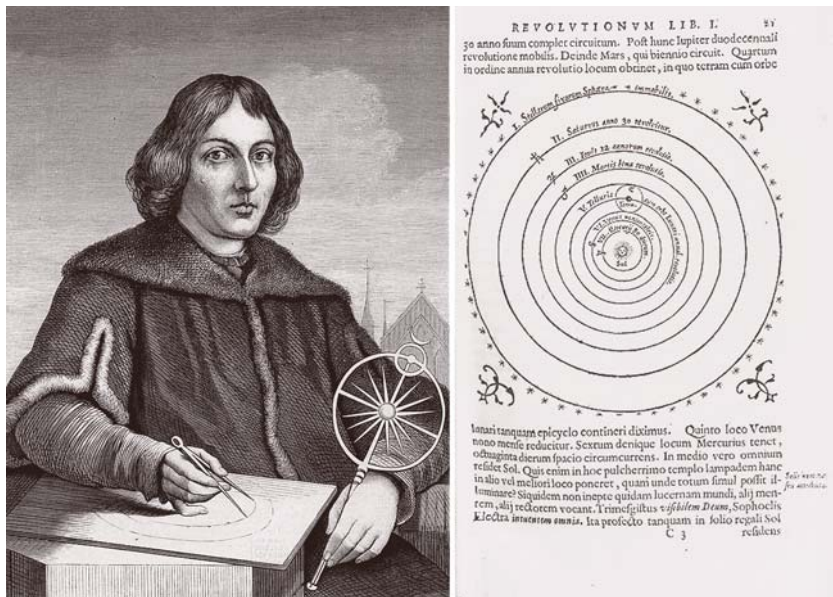


**Рис. 1.36.** Клавдий Птолемей (II век н. э.) с астрономическим посохом в руке. Условный портрет из книги XVI в. Астрономический посох (*radius astronomicus*), или «посох Якова», — простейший прибор для измерения угловых расстояний на небесной сфере. По основной градуированной линейке скользит подвижная линейка с диоптрами на концах. Глядя от основания главной линейки, малую перемещают так, чтобы диоптры совпали с объектами измерения, например двумя звездами или горизонтом и светилом.

рии. Но Коперник задался вопросом, почему у разных планет много одинаковых эпициклов с одинаковыми периодами. Он предложил поместить в центр системы не Землю, а Солнце, поскольку понимал, что на самом деле мы наблюдатели и мы движемся, поэтому и планеты перед нашими глазами синхронно описывают петли. Коперник поместил в центр Солнце, но не смог отказаться от круговых орбит. Поэтому в его системе мира у планет сохранились некоторые эпициклы.



**Рис. 1.36.** Система эпициклов по Птолемею.



**Рис. 1.37.** Николай Коперник и страница его книги «О вращении небесных сфер».

Теория Коперника была проще теории Птолемея. Почему же она не сразу завоевала признание ученых? Потому что она противоречила некоторым наблюдательным фактам. Если Земля совершает периодическое движение по орбите, то должны наблюдаться не только петли на траекториях планет, но и регулярное параллактическое смещение звезд, а его в ту эпоху заметить не удавалось. Во второй половине XVI в. точность астрономических наблюдений не превышала 1 минуты дуги, а параллаксы звезд, как мы теперь знаем, не превышают 1 угловой секунды. Астрономам понадобилось три с половиной столетия, чтобы изобрести телескоп, усовершенствовать методы наблюдения и повысить их точность в 100 раз, прежде чем они надежно зафиксировали параллаксы ближайших звезд. Но кто мог знать в эпоху Коперника, что звезды от нас так далеки!

Не знал этого и Тихо Браге — лучший астроном эпохи Коперника. Он был уверен в непревзойденной точности своих наблюдений, однако звездных параллаксов заметить не смог, а потому решил, что Земля стоит на месте. И ведь в рамках научного метода он был абсолютно прав. Сегодня, используя орбитальное движение Земли, мы измеряем расстояние до звезд именно по их параллактическому смещению. Но кто мог знать в ту эпоху, что оно такое маленькое?



Рис. 1.38. Тихо Браге.



Рис. 1.39. Иоганн Кеплер.

Опираясь на наблюдения, Тихо Браге не позволил Земле сдвинуться с места, но и теория Коперника ему тоже нравилась своей элегантностью. Поэтому Тихо создал свою, эклектическую, модель мира (рис. 1.40): Земля покоится в центре, Луна и Солнце обращают-

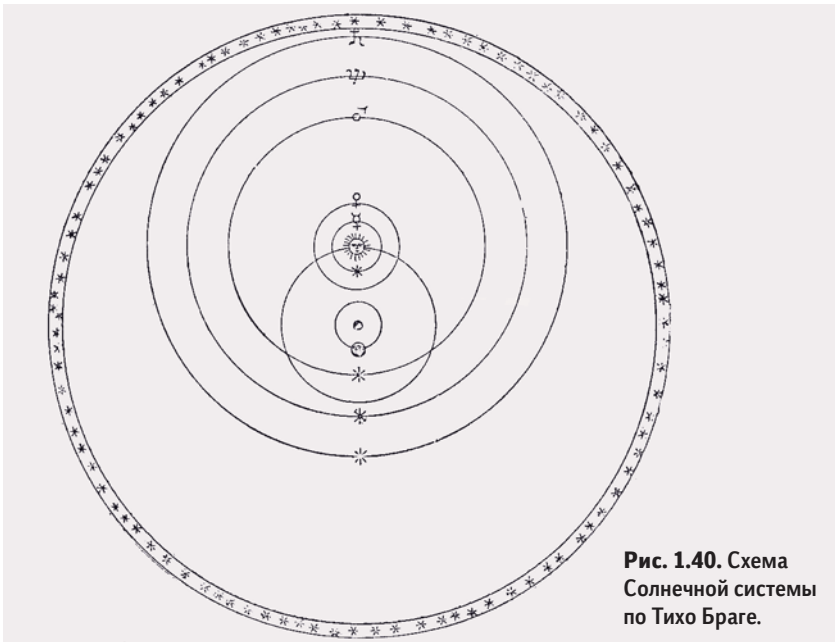
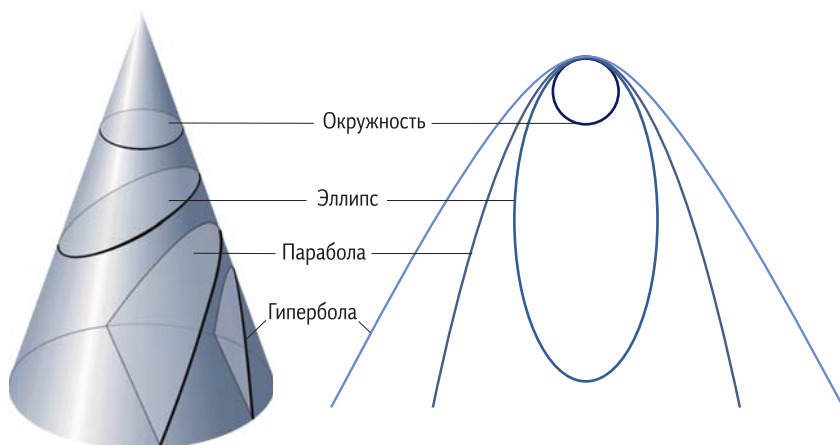


Рис. 1.40. Схема Солнечной системы по Тихо Браге.





**Рис. 1.41.** Сечения эллипса – возможные орбиты небесных тел.

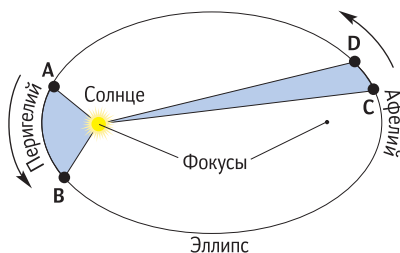
ся вокруг нее, а все остальные планеты – вокруг Солнца. В ту эпоху это была вполне научная теория, объяснявшая все наблюдательные факты. Но просуществовала она недолго. Молодой сотрудник Тихо Браге немецкий математик Иоганн Кеплер перевернул своими расчетами всю небесную механику.

К концу жизни Тихо Браге понял, что он хоть и первоклассный наблюдатель, но математик слабый, а потому для обработки своих многолетних наблюдений пригласил Иоганна Кеплера – прекрасного математика с плохим зрением, человека, который ни разу в жизни не смотрел в телескоп. Кеплер, взяв за основу теорию Коперника, нашел для орбит форму, которая наилучшим образом объясняла их видимое движение (эллипс), и вывел эмпирические законы движения планет: первый, второй и третий законы Кеплера.

Первые два закона описывают орбиту планеты и характер движения по ней, а третий закон связывает между собой орбитальные параметры двух разных планет одной системы. Вот эти законы.

1. Каждая планета обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

2. Каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем за равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, описывает равные площади.



**Рис. 1.42.** Первый и второй законы Кеплера.

3. Квадраты периодов обращения планет ( $T$ ) вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет ( $a$ ).

Эти эмпирические законы движения планет помогли Исааку Ньютону сформулировать закон всемирного тяготения ( $F \sim 1/R^2$ ) и сами получили теоретическое обоснование в рамках Ньютоновой механики. Ньютон уточнил и расширил законы Кеплера. Он доказал, что кроме эллиптических орбит, характерных для гравитационно связанных систем, возможно движение и по другим коническим сечениям – параболе и гиперболам, описывающим однократное сближение (пролет) двух гравитационно не связанных тел.

Второй закон Кеплера оказался частным случаем фундаментального закона природы о сохранении момента импульса в изолированной системе. А третий закон, сформулированный Кеплером для двух маломассивных тел (планеты 1 и 2), обращающихся вокруг одного массивного (звезда):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

Ньютон обобщил на случай двух разных двойных систем (1 и 2) с произвольными массами компонентов ( $M_1, m_1$  и  $M_2, m_2$ ):

$$\frac{T_1^2(M_1 + m_1)}{T_2^2(M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Астрономы с успехом применили эту формулу не только к спутниковым системам разных планет Солнечной системы, но и к двойным звездам, получив возможность определять их массы. Это сделало закон гравитации Ньютона поистине всемирным.

