

Система Земля-Луна-Солнце: фазы и затмения

Роза М. Рос

Международный астрономический союз, Технический университет Каталонии
(Барселона, Испания)

Краткое описание

Следующая работа посвящена фазам луны, солнечным и лунным затмениям. Эти затмения также используются для определения расстояний и диаметров в системе Земля-Луна-Солнце.

Наконец, объясняется также происхождение приливов.

Цели

- Чтобы понять, почему у Луны есть фазы.
- Чтобы понять причину лунных затмений.
- Чтобы понять, почему происходят солнечные затмения.
- Для определения расстояний и диаметров системы Земля-Луна-Солнце.
- Чтобы понять происхождение приливов и отливов

Взаимное положение

Термин «затмение» используется для обозначения самых разных явлений, но во всех случаях затмение происходит, когда один объект пересекает свет перед другим объектом; это зависит от относительного расположения Земли и Луны (непрозрачные объекты), вызывающее прерывание солнечного света.

Солнечное затмение происходит, когда Солнце закрыто Луной, когда она находится между Солнцем и нашей планетой. Такое затмение всегда происходит в новолуние (рис. 1).

Лунные затмения происходят, когда Луна пересекает тень Земли. Это когда Луна находится на противоположной стороне от Солнца, поэтому лунные затмения всегда происходят в фазе полнолуния (рисунок 1).

Земля и Луна движутся по эллиптическим орбитам, которые не находятся в одной плоскости. Орбита Луны имеет наклон 5 градусов по отношению к эклиптике (плоскости орбиты Земли вокруг Солнца). Обе плоскости пересекаются на линии, называемой линией узлов. Затмения происходят, когда Луна находится рядом с линией узлов. Если бы обе плоскости совпадали, затмения были бы гораздо более частыми, чем от нуля до трех раз в год.

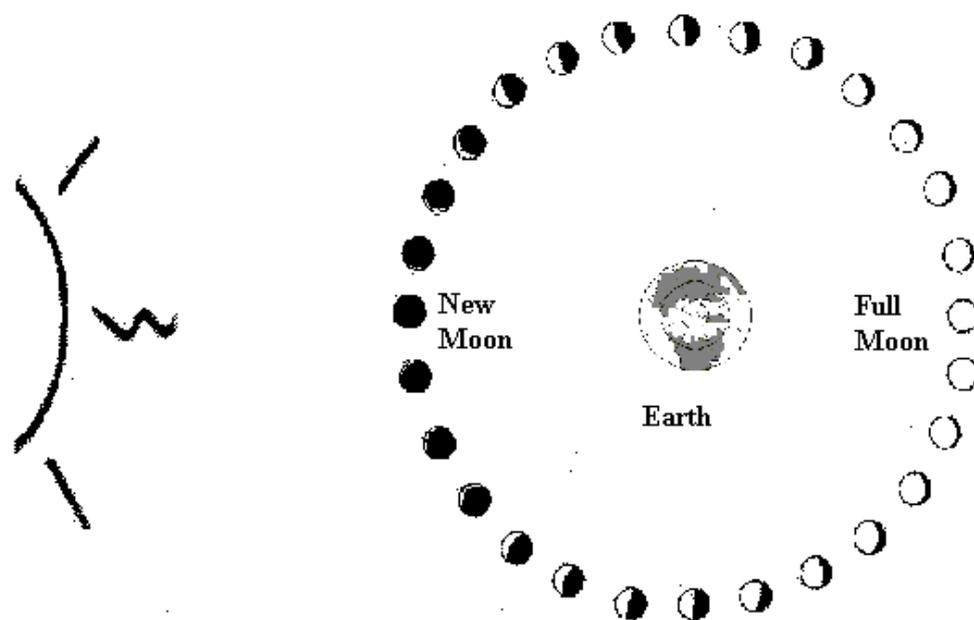


Рис.1: Солнечные затмения происходят, когда Луна находится между Солнцем и Землей (новолуние). Лунные затмения происходят, когда Луна пересекает теневой конус Земли (то есть Земля находится между Солнцем и полной Луной).

Модели

Модель скрытого лица

У Луны два движения: вращение и перемещение, которые имеют примерно одинаковую продолжительность, то есть около четырех недель. Это причина того, что с Земли мы всегда можем видеть одну и ту же половину лунной поверхности.

Мы увидим эту ситуацию на простой модели. Мы начинаем с размещения добровольца, который играет роль Земли, и только одного добровольца «Луны» с белой маской. Мы помещаем добровольца «Луна» перед Землей, глядя на Землю, прежде чем начать движение. Таким образом, если Луна движется на 90 градусов по своей орбите вокруг Земли, она также должна повернуться на 90 градусов вокруг себя и, следовательно, будет продолжать смотреть перед Землей и так далее. Мы спросим земного добровольца, видит ли он то же лицо Луны или может видеть другую часть. Мы повторяем ту же ситуацию четыре раза, всегда двигаясь на 90 градусов. Очевидно, что каждые 90°, то есть каждую неделю, Земля может видеть всегда одну и ту же часть Луны, затылок спиральной спирали никогда не виден.

Модель фаз Луны

Чтобы объяснить фазы Луны, лучше всего использовать модель с фонариком или проектором (который будет представлять Солнце) и минимум пятью добровольцами. Один из них будет расположен в центре, представляющем Землю, а другие будут

располагаться вокруг «Земли» на равных расстояниях, чтобы имитировать различные фазы Луны. Чтобы сделать это более наглядно, каждой «Луне» надеть белую маску, имитирующую цвет Луны. Все они должны быть обращены к «Земле», потому что мы знаем, что Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной (рис. 2). Мы поместим фонарик позади одного из этих добровольцев и начнем визуализировать фазы (если смотреть с Земли, то есть в центре). Очень легко обнаружить, что иногда маска полностью светлая, иногда только на четверть, а иногда совсем не (потому что фонарик «Солнце» находится за этой «Луной» и его свет ослепляет сцену). Чем больше добровольцев «Луны», тем больше фаз видно.



Рис. 2: Модель Земля-Луна с добровольцами (для объяснения фаз и видимого лица Луны).

Модель Земля-Луна

Не так-то просто понять геометрию, лежащую в основе фаз Луны, солнечных и лунных затмений. По этой причине предлагается простая модель, чтобы облегчить понимание всех этих процессов.

Вбейте два гвоздя (примерно 3 или 4 см) в доску длиной 125 см. Расстояние между гвоздями составляет 120 см. На них нужно закрепить два шара диаметром 4 и 1 см (рисунок 3).

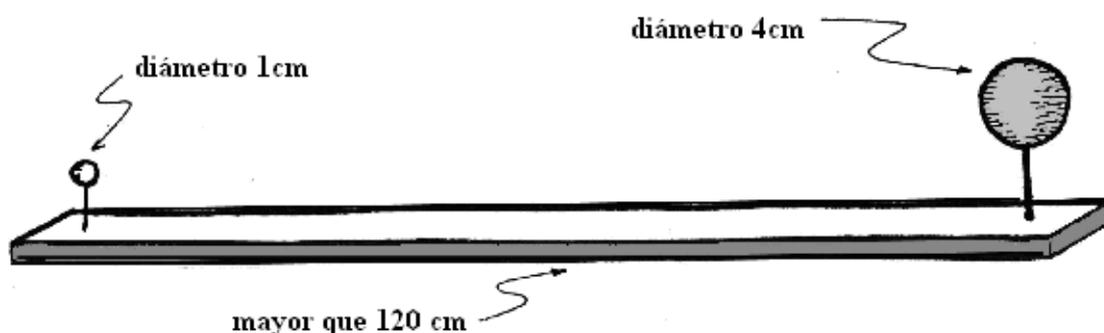


Рис. 3: Модель Земли и Луны.

Важно сохранить эти относительные размеры, поскольку они представляют собой масштабную модель системы Земля-Луна.

| | | | |
|-------------------------|---------------|---|---------------------|
| Диаметр Земли | 12800 km. | → | 4 cm. |
| Диаметр Луны | 3500 km. | → | 1 cm. |
| Расстояние Земля-Луна | 384000 km. | → | 120 cm. |
| Диаметр Солнца | 1400000 km. | → | 440 cm. = 4.4 m. |
| Расстояние Земля-Солнце | 150000000 km. | → | 4700 cm. = 0.47 Km. |

Таблица 1: Расстояния и диаметры системы Земля-Луна-Солнце

Воспроизведение фаз Луны: :

Для того, что бы увидеть Луну днем, направьте модель Луны на Солнце (рис. 4). Наблюдатель должен оставаться за шаром, изображающим Землю. Шар, представляющий Луну, будет казаться таким же большим, как настоящая Луна, и его фаза будет такой же. Изменяя ориентацию модели, можно воспроизвести различные фазы Луны при изменении освещенности, получаемой от Солнца. Шар Луна нужно перемещать, чтобы достичь всех фаз.

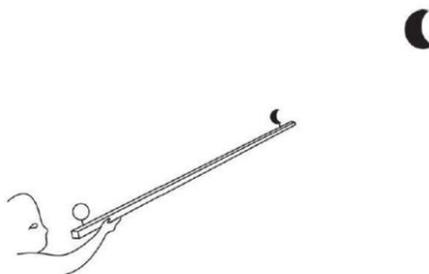


Рис.4: Использование модели во внутреннем дворе школы.

Лучше заниматься этим на открытом воздухе, но, если облачно, это также можно сделать в помещении, используя проектор в качестве источника света.

Воспроизведение лунных затмений

Модель держится так, чтобы маленький шар Земли был обращен к Солнцу (лучше использовать проектор или фонарик, чтобы не смотреть на Солнце), а тень Земли покрывала Луну (рис. 5a и 5b) как он больше Луны. Это простой способ воспроизвести лунное затмение.



Рис. 5а и 5b: Моделирование лунного затмения.



Рис. 6: Фотографии лунного затмения. Наш спутник пересекает теневой конус, создаваемый Землей.

Воспроизведение затмений Солнца

Модель размещается так, чтобы шар Луны был обращен к Солнцу (лучше использовать проектор или фонарик), а тень Луны должна проецироваться на небольшой земной шар. Таким образом, будет воспроизведено солнечное затмение, и небольшое пятно появится над областью Земли (рисунки 7а, 7b и 8).

Создать такую ситуацию непросто, потому что необходимо точно настроить наклон модели (по этой причине количество солнечных затмений меньше, чем лунных).



Рис. 7а и 7б Моделирование солнечного затмения



Рис.8: Деталь предыдущего рисунка 7а.



Рис. 9: Фотография солнечного затмения 1999 года над регионом поверхности Земли, сделанная с космической станции MIR.

Наблюдения

- Лунное затмение может произойти только в полнолуние, а солнечное затмение - в новолуние.

- Солнечное затмение можно увидеть только на небольшом участке поверхности Земли.
- Очень редко Земля и Луна выровнены достаточно точно, чтобы вызвать затмение, и поэтому оно не происходит каждое новолуние или полнолуние.

Модель Солнце-Луна

Чтобы визуализировать систему Солнце-Земля-Луна с особым акцентом на расстояниях, мы рассмотрим новую модель, учитывающую земную точку зрения Солнца и Луны. В этом случае мы предложим ученикам нарисовать и нарисовать большое Солнце диаметром 220 см (более 2 метров в диаметре) на листе, и мы покажем им, что они могут покрыть его маленькой Луной диаметром 0,6 см (менее Диаметр 1 см).

Полезно заменить лунный шар дыркой в деревянной доске, чтобы быть уверенным в положении Луны и наблюдателя.

В этой модели Солнце будет зафиксировано на расстоянии 235 метров от Луны, а наблюдатель будет на расстоянии 60 см от Луны. Студенты очень удивлены, что они могут покрыть большое Солнце этой маленькой Луной. Эту взаимосвязь, в 400 раз превышающую размеры и расстояния, нелегко представить, поэтому было бы хорошо показать их на примере, чтобы понять масштаб расстояний и реальные размеры во Вселенной. Все эти упражнения и упражнения помогают им (и, возможно, нам) понять пространственные отношения между небесными телами во время солнечного затмения. Этот метод намного лучше, чем чтение ряда чисел в книге.

| | | |
|-------------------------|----------------|--------|
| Диаметр Земли | 12 800 km | 2.1 cm |
| Диаметр Луны | 3 500 km | 0.6 cm |
| Расстояние Земля-Луна | 384 000 km | 60 cm |
| Диаметр Солнца | 1400 000 km | 220 cm |
| Расстояние Земля-Солнце | 150 000 000 km | 235 m |

Таблица 2: Расстояния и диаметры системы Земля-Луна-Солнце



Рис. 10: Модель Солнца.

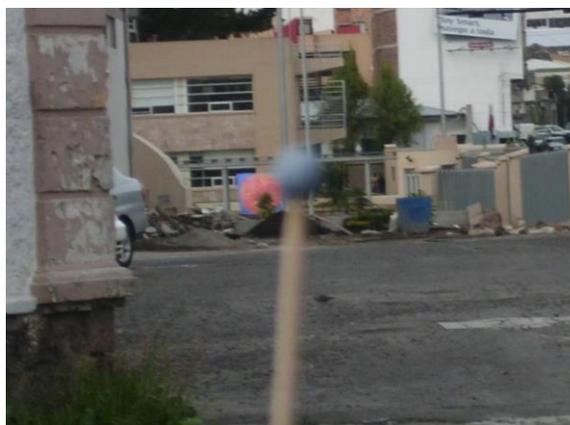


Рис. 11: Наблюдение за Солнцем и Луной в модели.

Измерение диаметра Солнца

Мы можем измерить диаметр Солнца по-разному. Здесь мы представляем простой метод с использованием камеры-обскуры. Мы можем сделать это с помощью обувной коробки или картонной трубки, которая служит центральной осью для алюминиевой фольги или полиэтиленовой пленки.

1. Мы покрыли один конец полупрозрачной плёнкой, а другой конец - листом прочной бумагой или алюминиевой фольгой, где мы сделаем отверстие с помощью тонкой булавки (рис. 12 и 13).
2. Мы должны направить конец с маленьким отверстием к Солнцу и смотреть в сторону другого конца, который закрыт полупрозрачной плёнкой. Мы измерим диаметр d изображения Солнца на пленке



Рис. 12 и 13: Модель камеры-обскуры.

Чтобы рассчитать диаметр Солнца, просто рассмотрите рисунок 14, на котором показан ход лучей.

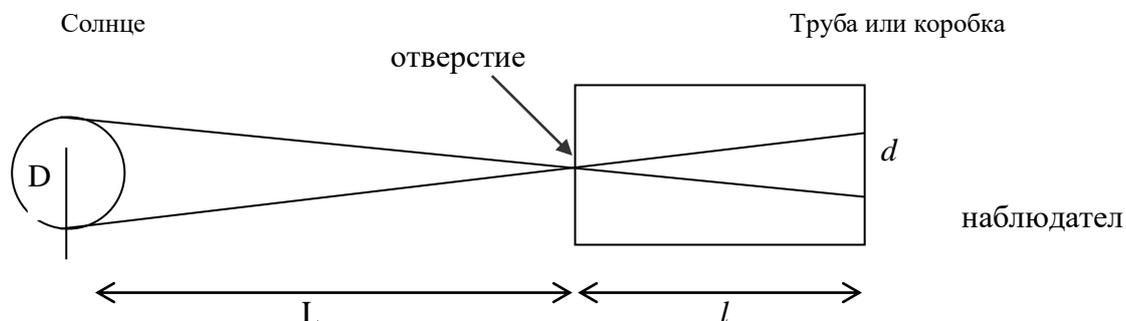


Рис. 14: Базовая геометрия расчета.

Справедливо следующее соотношение:

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}$$

Откуда можно определить диаметр Солнца, D :

$$D = \frac{d \cdot L}{l}$$

Зная расстояние от Солнца до Земли $L = 150\,000\,000$ км, длину трубки l и диаметр d изображения Солнца на экране полупрозрачной бумаги, мы можем вычислить диаметр D Солнца. (Помните, что диаметр Солнца составляет $1\,392\,000$ км.). Это же самое можно проделать с полной луной, зная, что она находится на расстоянии $400\,000$ км от Земли.

Размеры и расстояния в системе Земля-Луна-Солнце

Аристарх (с 310 по 230 г. до н.э.) вывел соотношение между расстояниями и радиусами системы Земля-Луна-Солнце. Он рассчитал радиус Солнца и Луны, расстояние от Земли до Солнца и расстояние от Земли до Луны по отношению к радиусу Земли. Спустя несколько лет Эратосфен (280-192 до н.э.) определил радиус нашей планеты, и стало возможным вычислить все расстояния и радиусы системы Земля-Луна-Солнце.

Повторим оба эксперимента со студентами. Идея состоит в том, чтобы как можно точнее повторить математический процесс и наблюдения, разработанные Аристархом и Эратосфеном.

Эксперимент Аристарха

Связь расстояний Земля-Луна и Земля-Солнце

Аристарх определил, что угол между линией Луна-Солнце и линией Земля-Солнце, когда Луна находится в фазе четверти, составляет $\alpha = 87^\circ$ (рис. 15).

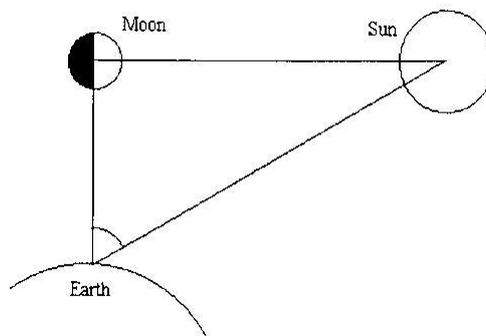


Рис. 15: Относительное положение Луны в фазе четверти.

Сегодня мы знаем, что он немного ошибался, возможно, потому, что было очень трудно определить точное время четверти луны. Фактически этот угол равен $\alpha = 89^\circ 51'$, но процесс, использованный Аристархом, совершенно верен. На рисунке 15, если мы используем определение косинуса, мы можем сделать вывод, что

$$\cos \alpha = ES/EM$$

где ES - расстояние от Земли до Солнца, а EM - расстояние от Земли до Луны. Тогда примерно,

$$ES = 400 EM$$

(хотя Аристарх вывел $ES = 19 EM$).

Связь между радиусом Луны и Солнца

Отношение между диаметрами Луны и Солнца должно быть аналогично ранее полученной формуле, потому что с Земли мы наблюдаем оба диаметра как $0,5^\circ$. Итак, оба соотношения подтверждают

$$R_s = 400 R_m$$

Связь между расстоянием от Земли до Луны и радиусом Луны или между расстоянием от Земли до Солнца и солнечным радиусом

Аристарх полагает, что орбита Луны - это круг вокруг Земли. Поскольку наблюдаемый диаметр Луны составляет $0,5$ градуса, круговой путь (360°) Луны вокруг Земли будет в 720 раз больше диаметра. Длина этого пути в 2π раза больше расстояния Земля-Луна, то есть $2 R_m \cdot 720 = 2 \pi EM$. Решая, находим

$$EM = (720 R_m)/\pi$$

Используя аналогичные рассуждения, находим

$$ES = (720 R_s)/\pi$$

Это соотношение между расстояниями до Земли, радиусом Луны, радиусом Солнца и радиусом Земли.

Связь между расстояниями от Земли до Солнца и Луны, радиусом Луны, радиусом Солнца и радиусом Земли.

Во время лунного затмения Аристарх заметил, что время, необходимое для того, чтобы Луна пересекла теневой конус Земли, в два раза превышало время, необходимое для покрытия поверхности Луны (рисунки 16a и 16b). Поэтому он пришел к выводу, что тень диаметра Земли была вдвое больше диаметра Луны, то есть соотношение обоих диаметров или радиуса было 2: 1. Сегодня известно, что это значение составляет 2,6: 1.

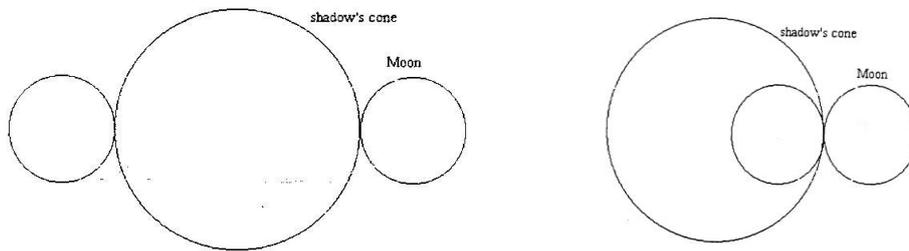


Рис. 16а: Измерение конуса тени. Рис. 16б: Измерение диаметра Луны.

Заключительное резюме

Принимая во внимание последние результаты, (рисунок 17)

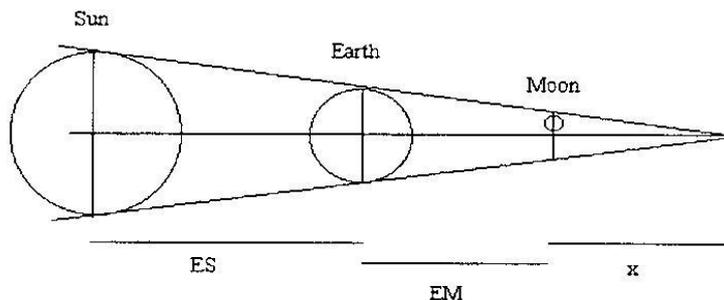


Рис.17: Конус тени и взаимное расположение системы Земля-Луна-Солнце

Можно вывести следующие соотношения:

$$x / (2.6 R_M) = (x + EM) / R_E = (x + EM + ES) / R_S$$

где x – неизвестная величина. Вводя в это выражение отношения $ES = 400 EM$ и $R_S = 400 R_M$, мы можем упростить выражение,

$$R_M = (401/1440) R_E$$

Это позволяет нам выразить все размеры, упомянутые ранее, как функцию радиуса Земли, поэтому

$$R_S = (2005/18) R_E, ES = (80200/\pi) R_E, EM = (401/(2\pi)) R_E$$

где нам нужно только подставить радиус нашей планеты, чтобы получить все расстояния и радиусы системы Земля-Луна-Солнце.

Расчеты со студентами

Хорошая идея - повторить измерения, сделанные Аристархом, со студентами. В частности, мы сначала должны вычислить угол между Солнцем и четвертью Луны.

Чтобы сделать это измерение, необходимо только иметь теодолит и знать точное время четверти луны.

Поэтому мы попытаемся проверить, составляет ли этот угол $\alpha = 87^\circ$ или $\alpha = 89^\circ 51'$ (хотя такую точность очень трудно получить).

Во-вторых, во время лунного затмения, используя секундомер, можно рассчитать соотношение между следующими моментами времени: «первый и последний контакт Луны с конусом тени Земли», т. е. измерить диаметр конуса тени Земли (рисунок 17а) и «время, необходимое для покрытия лунной поверхности», то есть мера диаметра Луны (рисунок 20b). Наконец, можно проверить, является ли соотношение между ними 2: 1 или 2,6: 1, или оно другое.

Самая важная цель этого упражнения - не результат, полученный для каждого радиуса или расстояния. Самое важное - указать ученикам, что, если они используют свои знания и интеллект, они могут получить интересные результаты. Аристарху было очень важно получить представление о размерах системы Земля-Луна-Солнце.

Также неплохо было бы измерить вместе со студентами радиус Земли по методу Эратосфена. Хотя эксперимент Эратосфена хорошо известен, мы представляем здесь его краткую версию, чтобы дополнить предыдущий опыт.

Эксперимент Эратосфена

Эратосфен был директором Александрийской библиотеки. В одном из текстов библиотеки он прочитал, что в городе Сиена (ныне Асуан) в день летнего солнцестояния, солнечный полдень, Солнце отражалось на дне колодца или палка не производила тени. Он отметил, что в тот же день, в то же время, палка не производила тени в Александрии. Из этого он пришел к выводу, что поверхность Земли не может быть плоской, но должна быть сферой (рисунки 18а и 18b).

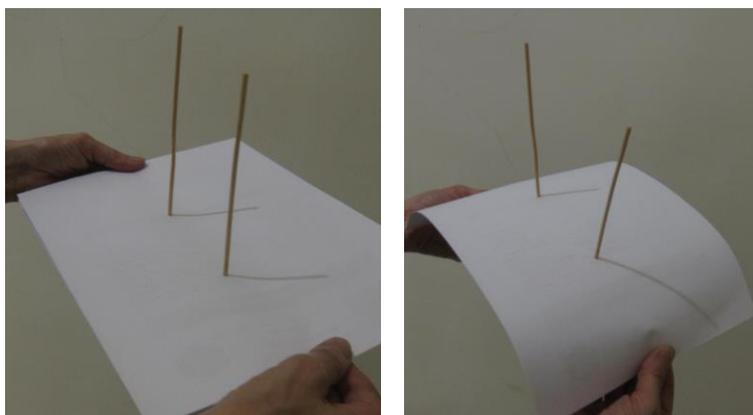


Рис. 18а и 18b: На плоской поверхности две палки создают одинаковую тень, но когда поверхность изогнута, тени разные.

Рассмотрим две палки, размещенные перпендикулярно земле в двух городах на поверхности Земли на одном и том же меридиане. Палки должны быть направлены к центру Земли. Обычно лучше использовать отвес. Следует измерить длину отвеса от земли до отметки и длину его тени от основания отвеса до тени отметки.

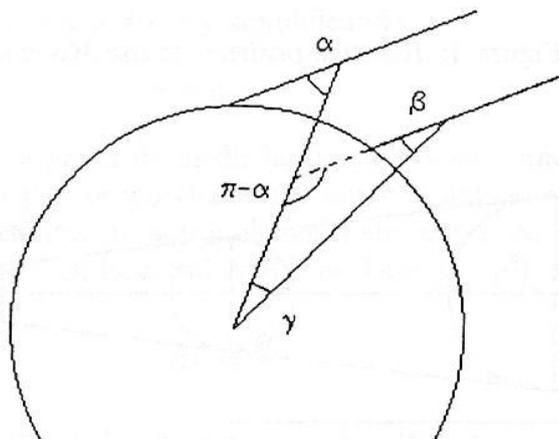


Рис. 19: Размещение отвесов и углов в эксперименте Эратосфена.

Можно предположить, что солнечные лучи параллельны. Солнечные лучи создают две тени, по одной для каждого отвеса. Мы измеряем длину отвеса и его тени и, используя определение касательной, получаем углы α и β (рисунок 19). Центральный угол γ можно вычислить, полагая, что сумма трех углов треугольника равна π радиан. Тогда $\pi = \pi - \alpha + \beta + \gamma$ и упрощая

$$\gamma = \alpha - \beta$$

Затем мы делаем вывод, что:

Finally establishing a proportionality between the angle γ , the length of its arc d (determined by the distance above the meridian between the two cities), and 2π radians of the meridian circle and its length $2\pi R_E$, we find:

$$\gamma/d = 2\pi/(2\pi R_E)$$

Then we deduce that:

$$R_E = d/\gamma$$

где γ было получено в результате наблюдения, а d - расстояние в км между обоими городами. Мы можем определить d , используя карту.

В ситуации с Эратосфеном угол β был равен нулю и $\gamma = \alpha$ и расстояние между Александрией и Сиеной, можно рассчитать радиус Земли.

Также следует отметить, что цель этой деятельности не точность результатов. Вместо этого мы хотим, чтобы учащиеся имели возможность, получить удивительные результаты.

Приливы

Приливы и отливы - это повышение и понижение уровня моря, вызванное воздействием вращения Земли и гравитационных сил, проявляемых Луной и Солнцем. Форма морского дна и берега в прибрежной зоне также влияет на приливы, но в меньшей степени. Приливы производятся с периодом примерно $12 \frac{1}{2}$ часов.

Приливы в основном связаны с притяжением Луны и Земли. Высокие приливы происходят по сторонам Земли, обращенным к Луне, и напротив Луны (рис. 20). В промежуточных точках бывают отливы.



Рис. 20: Эффект прилива. Рис. 21: Влияние на воду относительного ускорения Земли в различных областях океана.

Приливы наблюдали еще в древности, но их объяснение стало возможным только после открытия закона всемирного тяготения Ньютона (1687 г.).

$$F_g = G \frac{m_T \times m_L}{d^2}$$

Луна оказывает на Землю гравитационное притяжение. Согласно второму закону Ньютона ($F = m \cdot a$). Таким образом, ускорение, вызванное Луной на Земле, определяется выражением

$$a_g = G \frac{m_L}{d^2}$$

Где m_L масса Луны, а d - расстояние от Луны до точки на Земле.

Поверхность Земли - твердое тело, и поэтому мы можем рассматривать все ускорение этой твердой части, приложенное к центру Земли. Однако вода жидкая и претерпевает явное ускорение, которое зависит от расстояния до Луны. Таким образом, ускорение ближайшей к Луне стороны больше, чем обратной. Следовательно, поверхность океана будет образовывать эллипсоид (рисунок 21).

Этот эллипсоид всегда вытянут к Луне (рис. 20), Земля в свою очередь вращается. Таким образом, в каждой точке Земли будет прилив, за которым последует отлив дважды в день. Действительно, период между приливами и отливами составляет немногим более 12 часов, и причина в том, что Луна вращается вокруг Земли с синодическим периодом около 29,5 дней. Это означает, что она проходит 360° за 29,5

дней, поэтому Луна будет двигаться по небу почти на $12,2^\circ$ каждый день или на $6,6^\circ$ каждые 12 часов. Поскольку каждый час Земля вращается примерно на 15° , $6,6^\circ$ эквивалентны примерно 24 минутам, поэтому каждый приливный цикл составляет 12 часов 24 минуты. Поскольку время между приливом и отливом составляет примерно половину. Время, необходимое для того, чтобы приливы превратились в отливы, и наоборот, составит около 6 часов 12 минут.

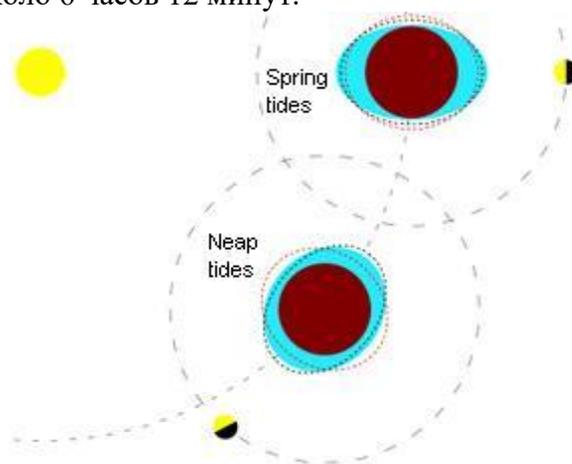


Рис. 22: Весенние приливы и отливы.

Из-за своей близости Луна оказывает сильнейшее влияние на приливы и отливы. Но Солнце также влияет на приливы и отливы. Когда Луна и Солнце в соединении (Новолуние) или противостоянии (Полнолуние) происходят приливы. Когда Луна находится в первой и последней четверти, Земля испытывает приливы (рисунок 22).

Библиография

- Alonso, M., Finn, E. *Física – um curso universitário*. Volume I. Ed. Edgard Blucher, 1972
- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía. 27 pasos hacia el Universo*, Editorial Alambra, Madrid, 1988.
- Broman, L., Estalella, R., Ros, R.M., *Experimentos de Astronomía*, Editorial Alambra, Mexico, 1997.
- Fucili, L., García, B., Casali, G., “A scale model to study solar eclipses”, *Proceedings of 3rd EAAE Summer School*, 107, 109, Barcelona, 1999
- Lanciano, N., *Strumenti per i giardino del cielo*, Edizioni junior, Spaggiari Eds, Roma, 2016
- Reddy, M. P. M., Affholder, M. *Descriptive physical oceanography: State of the Art*. Taylor and Francis. 249, 2001.
- Ros, R.M., Lunar eclipses: Viewing and Calculating Activities, *Proceedings of 9th EAAE International Summer School*, 135, 149, Barcelona, 2005.
- Ros, R.M., Viñuales, E., Aristarchos’ Proportions, *Proceedings of 3rd EAAE International Summer School*, 55, 64, Barcelona, 1999.
- Ros, R.M., Viñuales, E., El mundo a través de los astrónomos alejandrinos, *Astronomía, Astrofotografía y Astronáutica*, 63, 21. Lérida, 1993.