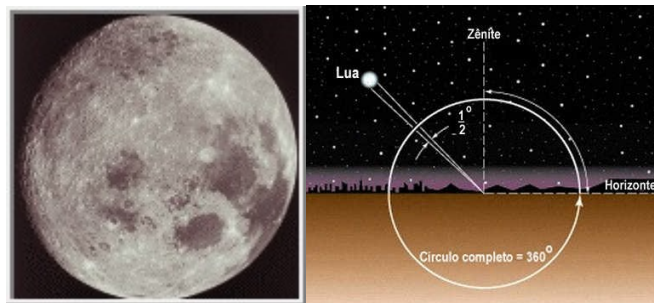
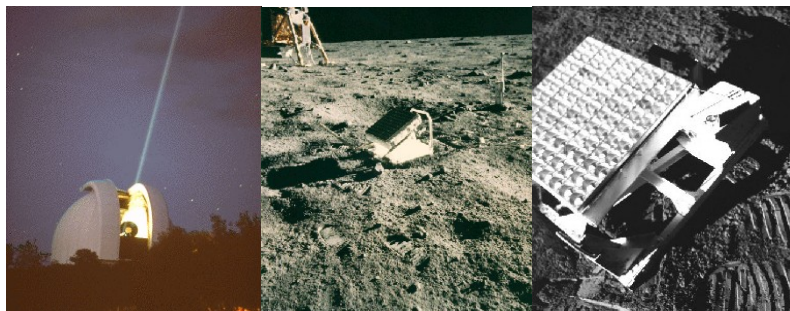


Lua e Suas Fases. Eclipses. Cálculo das Sombras e Simulações.

• Lua

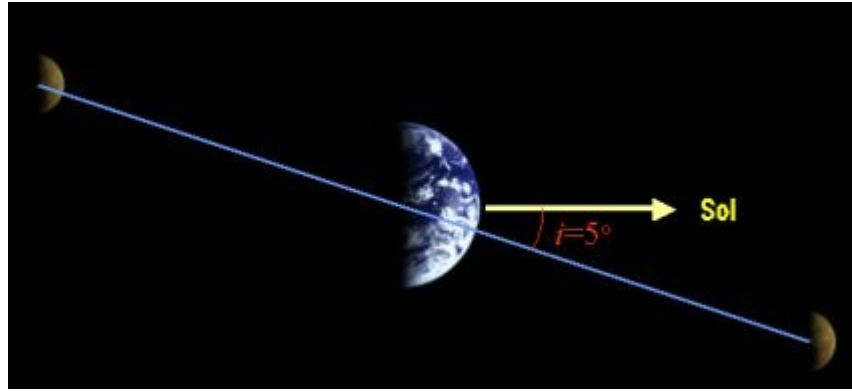


- A distância Terra-Lua foi medida por radar e por um laser.
- O valor médio do tempo de ida e vinda do laser é de 384 000 km e varia de 356 800 km a 406 400 km.



Disparo de um laser até um dos espelhos colocados pelos astronautas na Lua.

- A Lua tem três movimentos principais:
 - o Rotação em torno de seu próprio eixo.
 - o Revolução em torno da Terra.
 - o Translação em torno do Sol junto com a Terra.
- O plano orbital da Lua em torno da Terra tem uma inclinação de $5^{\circ}9'$ em relação à Eclíptica, que está inclinada $23,5^{\circ}$ em relação ao equador.



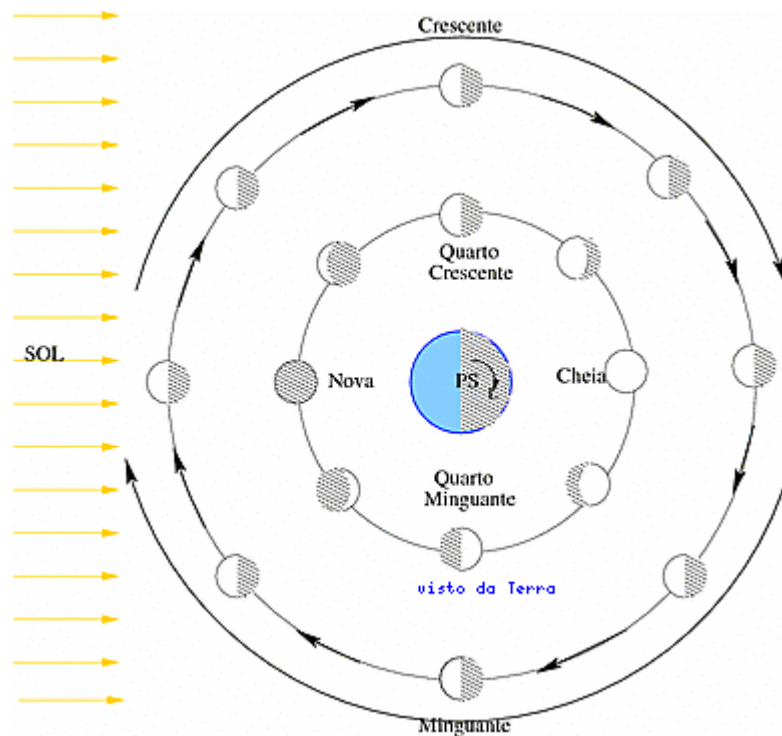
- Portanto, em relação ao equador da Terra, a órbita da Lua tem uma inclinação que varia de $18,4^\circ$ a $28,7^\circ$.
- Em relação ao equador da Lua, o seu plano orbital tem uma inclinação de menos do que 1° .
- A massa da Lua é de $1/81$ da massa da Terra.
- Devido à rotação sincronizada da Lua, a face da Lua que não podemos ver chama-se face oculta, que só pode ser fotografada pelos astronautas ou naves em órbita da Lua.



Imagem do lado oculto (esquerda) e iluminado (direita) da Lua, fotografada pela espaçonave Clementine, da NASA.

• FASES DA LUA

- À medida que a Lua viaja ao redor da Terra ao longo do mês, ela passa por um ciclo de fases, durante o qual sua forma parece variar gradualmente.
- O ciclo completo dura aproximadamente 29,5 dias.
- A face iluminada da Lua é aquela que está voltada para o Sol.
- **A fase da lua representa o quanto dessa face iluminada pelo Sol está voltada também para a Terra.**
- Durante metade do ciclo essa porção está aumentando (lua crescente) e durante a outra metade ela está diminuindo (lua minguante).
- Tradicionalmente apenas as quatro fases mais características do ciclo (Lua Nova, Quarto-Crescente, Lua Cheia e Quarto-Minguante) recebem nomes, mas a porção que vemos iluminada da Lua, que é a sua fase, varia de dia para dia.
- Por essa razão os astrónomos definem a fase da Lua em termos de número de dias decorridos desde a Lua Nova (de 0 a 29,5) e em termos de fracção iluminada da face visível (0% a 100%).
- Recapitulando, *fase da lua* representa o quanto da face iluminada pelo Sol está na direcção da Terra.



- A figura acima mostra o sistema Sol-Terra-Lua como seria visto por um observador externo olhando directamente para o pólo sul da Terra.
- O círculo externo mostra a Lua em diferentes posições relativas em relação à linha Sol-Terra, assumidas à medida que ela orbita a Terra de oeste para leste (sentido horário para um observador olhando para o pólo sul).
- **O círculo interno mostra as formas aparentes da Lua, em cada situação, para um observador no hemisfério sul da Terra.**

As quatro fases principais do ciclo são:

Lua Nova:

- Lua e Sol, vistos da Terra, estão na mesma direcção.
- A Lua nasce \approx 6h e se põe \approx 18h.
 - A Lua Nova acontece quando a face visível da Lua não recebe luz do Sol, pois os dois astros estão na mesma direcção.
 - Nessa fase, a Lua está no céu durante o dia, nascendo e se pondo aproximadamente junto com o Sol.
 - Durante os dias subsequentes, a Lua vai ficando cada vez mais a leste do Sol e, portanto, a face visível vai ficando crescentemente mais iluminada a partir da borda que aponta para o oeste, até que aproximadamente 1 semana depois temos o Quarto-Crescente, com 50% da face iluminada.

Lua Quarto-Crescente:

- A Lua tem a forma de um semi-círculo com a parte convexa voltada para o oeste.
- Lua e Sol, vistos da Terra, estão separados de aproximadamente 90° .
- A Lua nasce aproximadamente ao meio-dia e se põe aproximadamente à meia-noite.
- Após esse dia, a fracção iluminada da face visível continua a crescer pelo lado voltado para o oeste, até que atinge a fase Cheia.

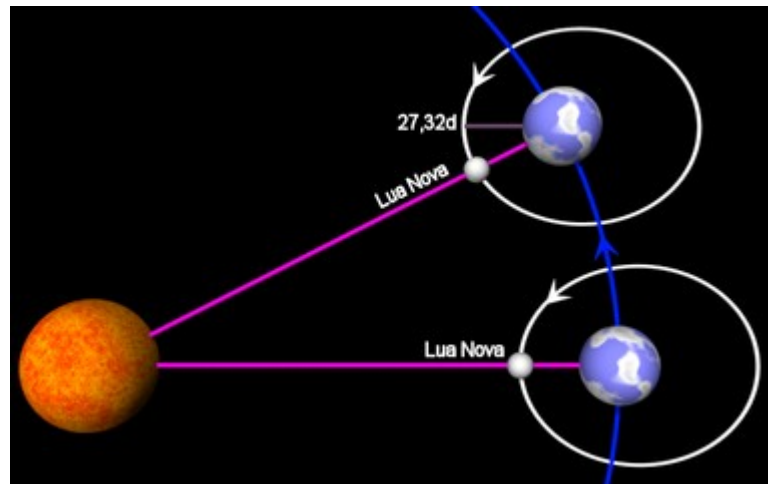
Lua Cheia

- A Lua nasce $\approx 18h$ e se põe $\approx 6h$ do dia seguinte.
 - Na fase cheia 100% da face visível está iluminada.
 - A Lua está no céu durante toda a noite, nasce quando o Sol se põe e se põe no nascer do Sol.
 - Lua e Sol, vistos da Terra, estão em direcções opostas, separados de aproximadamente 180° , ou 12h.
 - Nos dias subsequentes a porção da face iluminada passa a ficar cada vez menor à medida que a Lua fica cada vez mais a oeste do Sol; o disco lunar vai dia a dia perdendo um pedaço maior da sua borda voltada para o oeste.
 - Aproximadamente 7 dias depois, a fracção iluminada já se reduziu a 50%, e temos o Quarto-Minguante.

Lua Quarto-Minguante

- A Lua está aproximadamente 90° a oeste do Sol, e tem a forma de um semi-círculo com a convexidade apontando para o leste.
 - A Lua nasce aproximadamente à meia-noite e se põe aproximadamente ao meio-dia.
 - Nos dias subsequentes a Lua continua a minguar, até atingir o dia 0 do novo ciclo.
-
- O intervalo de tempo médio entre duas fases iguais consecutivas é de **29d 12h 44m 2.9s** ($\approx 29,5$ dias).
 - Esse período é chamado **mês sinódico**, ou **lunação**, ou **período sinódico da Lua**.

- O **período sideral da Lua**, ou **mês sideral** é o tempo necessário para a Lua completar uma volta em torno da Terra, em relação a uma estrela. Sua duração média é de 27d 7h 43m, sendo portanto $\approx 2,25$ dias mais curto do que o mês sinódico.

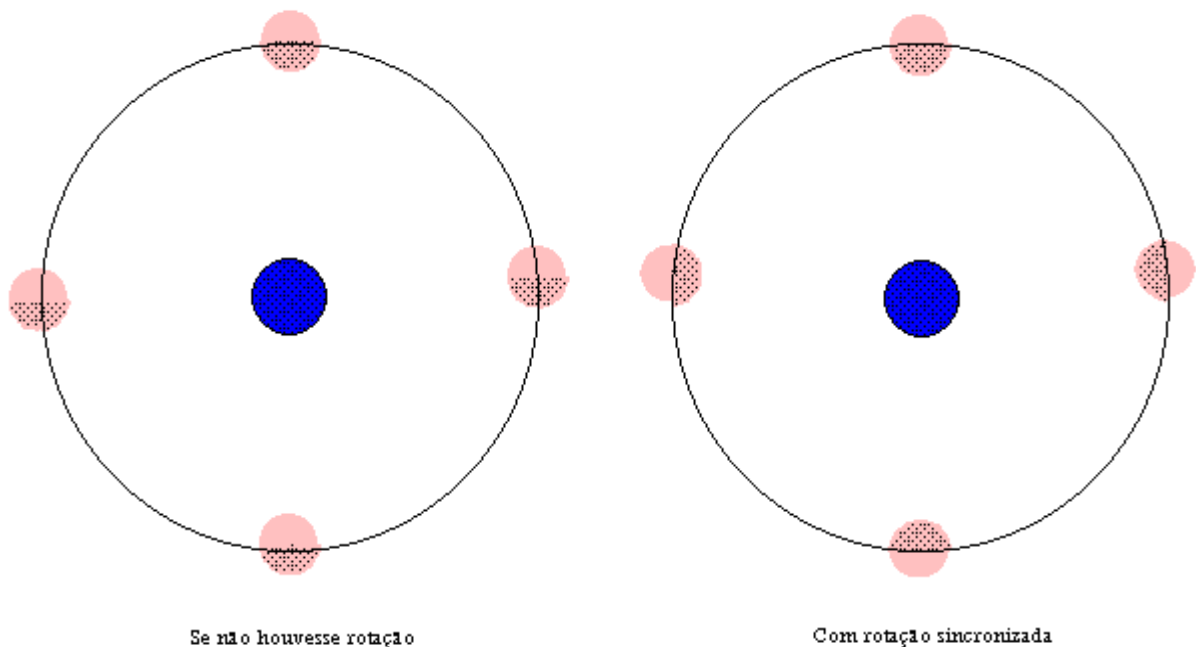


- O período sinódico da Lua, com duração de aproximadamente 29,5 dias (variando entre 29,26 e 29,80 dias), é, em média, 2,25 dias maior do que o período sideral da Lua porque nos 27,32 dias em que a Lua faz uma volta completa em relação às estrelas (o período sideral da Lua), o Sol se desloca $[360^\circ / (365,25 \text{ dias})]$ aproximadamente $27^\circ = (27 \text{ dias} \times 1^\circ / \text{dia})$ para leste e, portanto, é necessário mais 2 dias $[27^\circ / (360^\circ / 27,32 \text{ dias})]$ para a Lua se deslocar estes 27° e estar na mesma posição em relação ao Sol, que define a fase.
- **Dia Lunar:** Tendo em vista que o período sideral da Lua é de 27,32166 dias, isto é, que ela se move 360° em relação às estrelas para leste a cada 27,32 dias, deduz-se que ela se desloca para leste 13° por dia $(360^\circ / 27,32)$, em relação às estrelas. Levando-se em conta que a Terra gira 360° em 24 horas, e que o Sol se desloca 1° para leste por dia, deduzimos que a Lua se atrasa 48 minutos por dia $[(12^\circ / 360^\circ) \times (24 \text{ h} \times 60 \text{ m})]$, isto é, **a Lua nasce cerca de 48 minutos mais tarde a cada dia.**
- Recapitulando, a Lua se move cerca de 13° para leste, por dia, em relação às estrelas.

- Esse movimento é um reflexo da translação da Lua em torno da Terra, completada em 27,32 dias (mês sideral).
- O Sol também se move cerca de 1° por dia para leste, reflectindo a translação da Terra em torno do Sol, completada em 365,2564 dias (ano sideral).
- Portanto, a Lua se move cerca de 12° por dia em relação ao Sol, e a cada dia a Lua cruza o meridiano local aproximadamente 48 min mais tarde do que no dia anterior. **O dia lunar, portanto, tem 24^h48^m .**

- **Rotação da Lua:**

Rotação Sincronizada da Lua



- À medida que a Lua orbita em torno da Terra, completando seu ciclo de fases, *ela mantém sempre a mesma face voltada para a Terra.*
- Isso indica que o seu período de translação *é igual* ao período de rotação em torno de seu próprio eixo.
- Portanto, a Lua tem rotação **sincronizada** com a translação.
- É muito improvável que essa sincronização seja casual. Acredita-se que ela tenha acontecido como resultado das grandes forças de maré exercidas pela Terra na Lua no tempo em que a Lua era jovem e mais elástica.
- As deformações tipo bojos causadas na superfície da Lua pelas marés teriam freiado a sua rotação até ela ficar com o bojo sempre voltado para a Terra e, portanto, com período de rotação igual ao de translação.
- Essa perda de rotação teria em consequência provocado o afastamento maior entre Lua e Terra (para conservar o momento angular).
- Actualmente a Lua continua afastando-se da Terra, a uma taxa de 4 cm/ano.
- Note que como a Lua mantém a mesma face voltada para a Terra, um astronauta na Lua não vê a Terra nascer ou se pôr.
- Se ele está na face voltada para a Terra, a Terra estará sempre visível. Se ele estiver na face oculta da Lua, nunca verá a Terra.

- A órbita da Lua em torno da Terra está inclinada 5° em relação à órbita da Terra em torno do Sol.
- A órbita da Lua em torno da Terra é uma elipse, e a Lua está 10% mais próxima no perigeu do que no apogeu, o que faz com que seu tamanho aparente mude de um ciclo para outro.

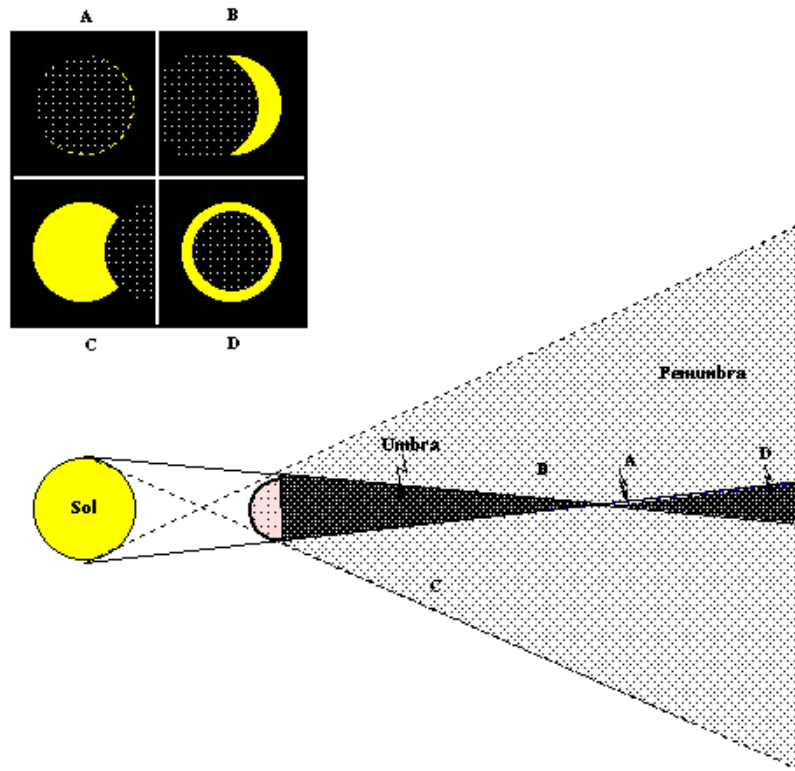
- **Eclipses**

- o Um **eclipse** acontece sempre que um corpo entra na sombra de outro.

- Assim:

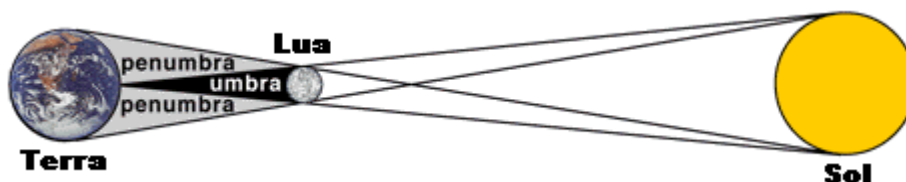
- Quando a Lua entra na sombra da Terra, acontece um **eclipse lunar**.
 - Quando a Terra é atingida pela sombra da Lua, acontece um **eclipse solar**.

o Sombra de Um Corpo Extenso



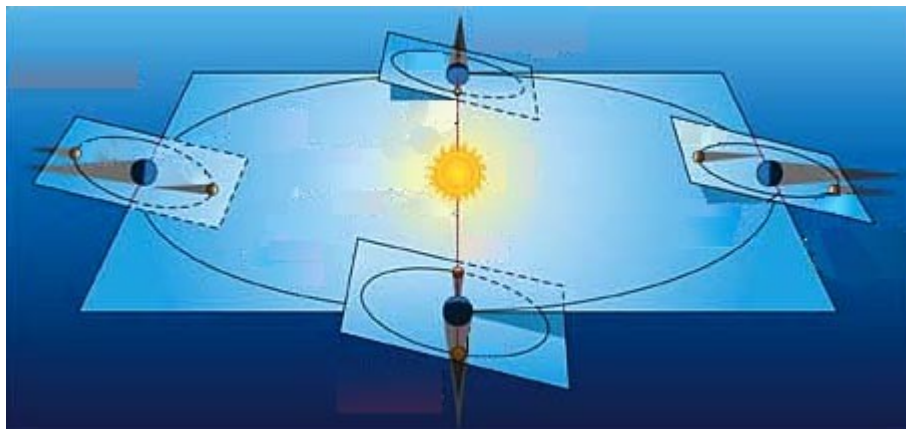
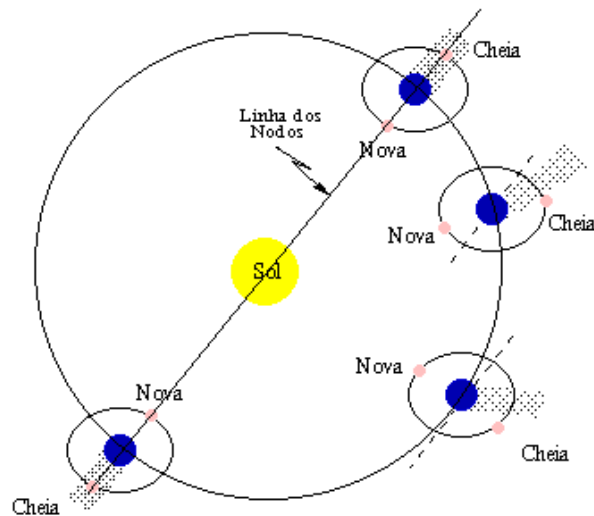
Na parte inferior da figura acima, vemos a região da umbra e da penumbra da sombra. Na parte superior, vemos a aparência da fonte para os pontos A a D na sombra.

- Quando um corpo extenso (não pontual) é iluminado por outro corpo extenso definem-se duas regiões de sombra:
 - **Umbra:** região da sombra que não recebe luz de nenhum ponto da fonte.
 - **Penumbra:** região da sombra que recebe luz de alguns pontos da fonte.

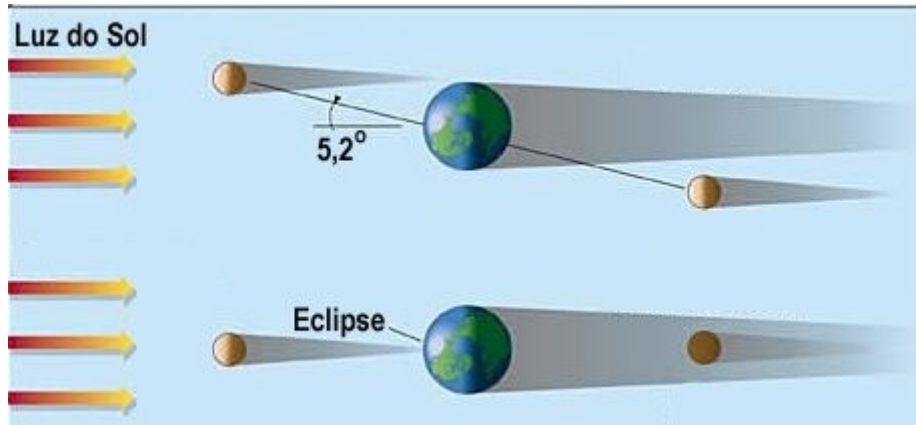


- A órbita da Terra em torno do Sol, e a órbita da Lua em torno da Terra, não estão no mesmo plano, ou ocorreria um eclipse da Lua a cada Lua Cheia, e um eclipse do Sol a cada Lua Nova.

- **Linha dos Nodos**



- O plano da órbita da Lua em torno da Terra não é o mesmo plano que o da órbita da Terra em torno do Sol.
- O plano da órbita da Lua está inclinado $5,2^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra.
- Portanto só ocorrem eclipses quando a Lua está na fase de Lua Cheia ou Nova, e quando o Sol está sobre a **linha dos nodos**, que é a linha de intersecção do plano da órbita da Terra em torno do Sol com o plano da órbita da Lua em torno da Terra.



- Eclipses do Sol e da Lua são os eventos mais espectaculares do céu.
- Um eclipse solar ocorre quando a Lua está entre a Terra e o Sol.
 - o Se o disco inteiro do Sol está atrás da Lua, o eclipse é *total*.
 - o Caso contrário, é *parcial*.
 - o Se a Lua está próxima de seu apogeu (ponto mais distante de sua órbita), o diâmetro da Lua é menor que o do Sol, e ocorre um eclipse *anular*.

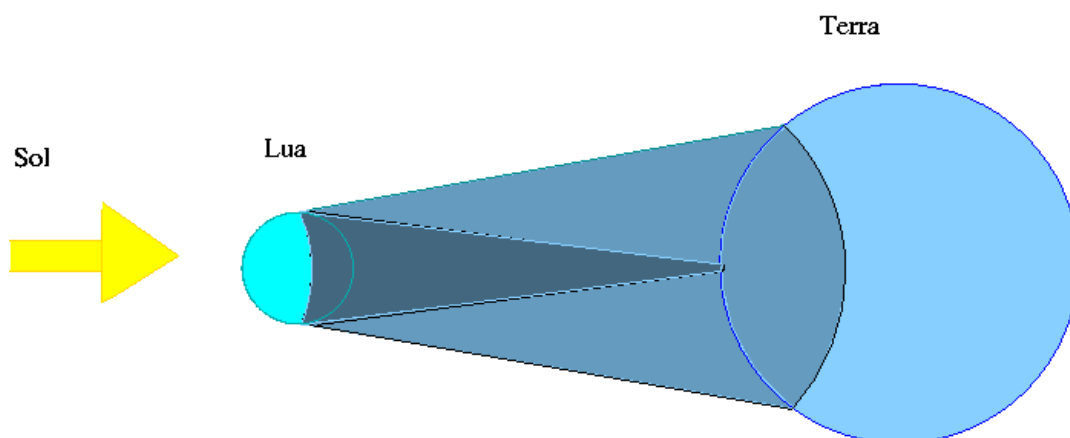


- Como a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol é de 0,0167, o diâmetro angular do Sol varia 1,67% em torno de sua média, de 31'59".
- A órbita da Lua em torno da Terra tem uma excentricidade de 0,05 e, portanto, seu diâmetro angular varia 5% em torno de sua média, de 31'5", chegando a 33'16", muito maior do que o diâmetro máximo do Sol.

- Um eclipse total da Lua acontece quando a Lua fica inteiramente imersa na umbra da Terra; se somente parte dela passa pela umbra, e resto passa pela penumbra, o eclipse é parcial.
- Se a Lua passa somente na penumbra, o eclipse é penumbral.
- Um eclipse total é sempre acompanhado das fases penumbral e parcial.
- Um eclipse penumbral é difícil de ver directamente com o olho, pois o brilho da Lua permanece quase o mesmo.
- Durante a fase total, a Lua aparece com uma luminosidade ténue e avermelhada.
 - o Isso acontece porque parte da luz solar é refractada na atmosfera da Terra e atinge a Lua.
- Porém essa luz está quase totalmente desprovida dos raios azuis, que sofreram forte espalhamento e absorção na espessa camada atmosférica atravessada.

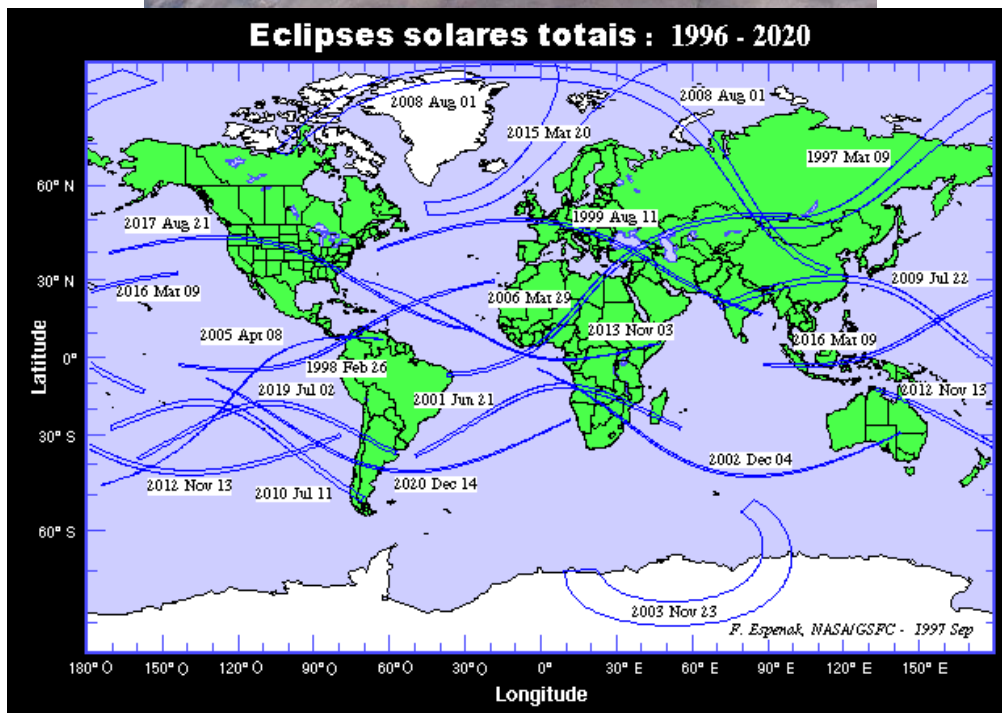


- **Eclipses do Sol**



- o Durante um eclipse solar, a umbra da Lua na Terra tem sempre menos que 270 km de largura.
- o Como a sombra se move a pelo menos 34 km/min para Leste, devido à órbita da Lua em torno da Terra, o máximo de um eclipse dura no máximo 7 e 1/2 minutos.
- o Portanto um eclipse solar total só é visível, se o clima permitir, em uma estreita faixa sobre a Terra, chamada de caminho do eclipse.

- o Em uma região de aproximadamente 3000 km de cada lado do caminho do eclipse, ocorre um eclipse parcial.



- o Como a Lua se move aproximadamente 12° por dia, **para leste**, em relação ao Sol ($360^\circ/29,5 \text{ dias} = 12^\circ/\text{dia}$), o que implica numa velocidade de:

$$\frac{12^\circ/\text{dia}}{360^\circ} \times 2\pi \times 384\,000 \text{ km} \simeq 80\,400 \text{ km}/\text{dia} \simeq 56 \text{ km}/\text{min}$$

- o A velocidade de um ponto da superfície da Terra devido à rotação **para leste** da Terra é,

$$\frac{2\pi R_{\oplus}}{1 \text{ dia}} = \frac{2\pi \times 6370 \text{ km}}{24 \text{ h}} = 1667 \text{ km/h} \simeq 28 \text{ km/min}$$

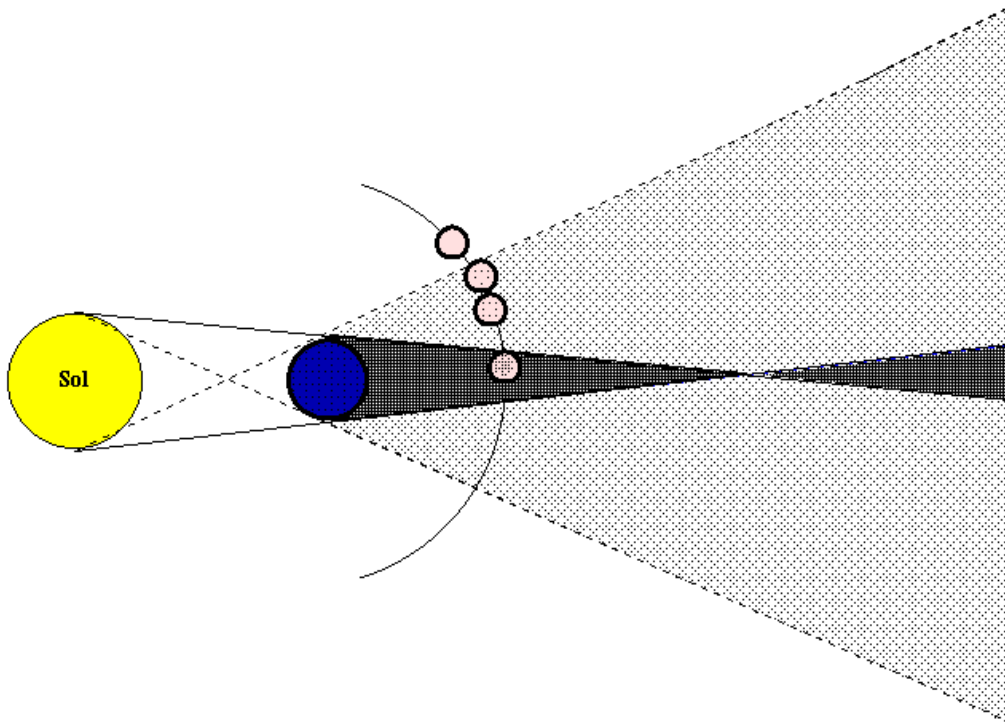
- o Como a velocidade da Lua no céu é maior do que a velocidade de rotação da Terra, a velocidade da sombra da Lua na Terra tem o mesmo sentido do movimento (real) da Lua, ou seja, para leste.
- o O valor da velocidade da sombra é, grosseiramente, $56 \text{ km/min} - 28 \text{ km/min} = 28 \text{ km/min}$
- o Cálculos mais precisos, levando-se em conta o ângulo entre os dois movimentos, mostram que a velocidade da Lua em relação a um certo ponto da Terra é de pelo menos 34 km/min para leste.
- o A duração da totalidade do eclipse, em um certo ponto da Terra, será o tempo desde o instante em que a borda leste da umbra da Lua toca esse ponto até o instante em que a borda oeste da Lua o toca.
- o Esse tempo é igual ao tamanho da umbra dividido pela velocidade com que ela anda, aproximadamente,

$$\frac{270 \text{ km}}{34 \text{ km/min}} = 7,9 \text{ min}$$

- o Na realidade, a totalidade de um eclipse dura no máximo 7 1/2 minutos.
- o Um eclipse solar total começa quando a Lua alcança a direcção do disco do Sol, e aproximadamente uma hora depois o Sol fica completamente atrás da Lua.
- o Nos últimos instantes antes da totalidade, as únicas partes visíveis do Sol são aquelas que brilham através de pequenos vales na borda irregular da Lua, um fenómeno conhecido como "anel de diamante", já descrito por Edmund Halley no eclipse de 3 de Maio de 1715.

- o Durante a totalidade, o céu se torna escuro o suficiente para se observar os planetas e as estrelas mais brilhantes.
- o Após a fase de "anel de diamante", o disco do Sol fica completamente coberto pela Lua, e a *coroa* solar, a atmosfera externa do Sol, composta de gases rarefeitos que se estendem por milhões de km, aparece.
- o **Note que é extremamente perigoso olhar o Sol directamente. Qualquer exposição acima de 15 segundos danifica permanentemente o olho, sem apresentar qualquer dor!**

• Eclipses da Lua



- Um eclipse lunar ocorre quando a Lua entra na sombra da Terra.
- À distância da Lua, 384 mil km, a sombra da Terra, que se estende por 1,4 milhões de km, cobre aproximadamente 3 luas cheias.

- Em contraste com um eclipse do Sol, que só é visível em uma pequena região da Terra, um eclipse da Lua é visível por todos que possam ver a Lua.
- Como um eclipse da Lua pode ser visto, se o clima permitir, de toda a parte noturna da Terra, eclipses da Lua são muito mais frequentes que eclipses do Sol, de um dado local na Terra.
- A duração máxima de um eclipse lunar é 3,8 hr, e a duração da fase total é sempre menor que 1,7 hr.

- **Temporada de Eclipses**

- o Se o plano orbital da Lua coincidissem com o plano da eclíptica, um eclipse solar ocorreria a toda Lua nova e um eclipse lunar a toda Lua cheia.
- o Entretanto, o plano está inclinado $5,2^\circ$ e, portanto, **a Lua precisa estar próxima da linha de nodos** (cruzando o plano da eclíptica) para que um eclipse ocorra.
- o Como o sistema Terra-Lua orbita o Sol, aproximadamente duas vezes por ano a linha dos nodos está alinhada com o Sol e a Terra.
- o Estas são as temporadas dos eclipses, quando os eclipses podem ocorrer.
- o Quando a Lua passar pelo nodo durante a temporada de eclipses, ocorre um eclipse.
- o Como a órbita da Lua gradualmente gira sobre seu eixo (com um período de 18,6 anos de regressão dos nodos), as temporadas ocorrem a cada 173 dias, e não exactamente a cada meio ano.
- o A distância angular da Lua do nodo precisa ser menor que $4,6^\circ$ para um eclipse lunar, e menor que $10,3^\circ$ para um eclipse solar, o que estende a temporada de eclipses para 31 a 38 dias, dependendo dos tamanhos aparentes e velocidades aparentes do Sol e da Lua, que variam

porque as órbitas da Terra e da Lua são elípticas, de modo que pelo menos um eclipse ocorre a cada 173 dias.

- o Entre dois e sete eclipses ocorrem anualmente.

- o Em cada temporada usualmente acontece um eclipse solar e um anular, mas podem acontecer três eclipses por temporada, numa sucessão de eclipse solar, lunar e solar novamente, ou lunar, solar e lunar novamente.

- o Quando acontecem dois eclipses lunares na mesma temporada os dois são penumbrais.

- o As temporadas de eclipses são separadas por 173 dias $[(1 \text{ ano} - 20 \text{ dias})/2]$.

- **Saros**
 - o O Sol e o nodo ascendente ou descendente da Lua estão na mesma direcção uma vez cada 346,62 dias.

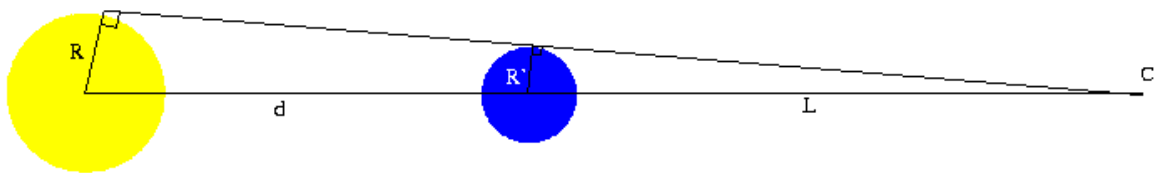
 - o Dezanove de tais períodos (=6585,78 dias = 18 anos 11 dias) estão próximos em duração a 223 meses sinódicos.

 - o Isto significa que a configuração Sol-Lua e os eclipses se repetem na mesma ordem depois deste período.

- o Este ciclo já era conhecido pelos antigos Babilônios, e por razões históricas, é conhecido como *Saros*, que significa repetição em grego.

- Como se calcula o comprimento da sombra?

- o Consideremos um corpo luminoso de raio R a uma distância d de uma esfera opaca de raio R' .



- o Por semelhança de triângulos temos que:

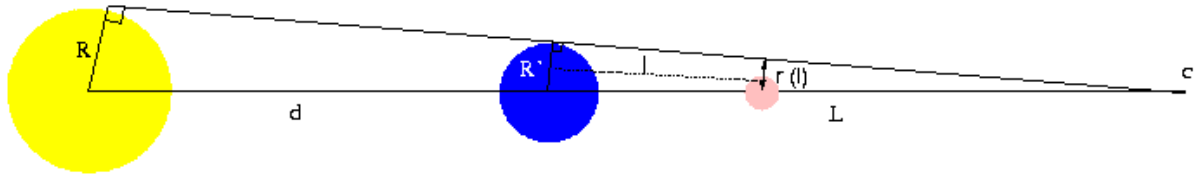
$$\frac{R'}{L} = \frac{R}{L + d}$$

- o E portanto a altura do cone de sombra (L) é:

$$L = \frac{R' d}{R - R'}$$

- Onde:
 - L = comprimento da sombra.
 - d = distância da fonte à esfera opaca.
 - R' = raio da esfera opaca.
 - R = raio da fonte.

- Como se calcula o raio da sombra da Terra à distância da Lua?



- L = comprimento da sombra.
- R' = raio da Terra.
- $r(l)$ = raio da sombra a uma distância l da Terra.
- Novamente por semelhança de triângulos temos que:

$$\frac{r(l)}{L-l} = \frac{R'}{L}$$

- E o raio da sombra à distância l da esfera opaca é:

$$r(l) = R' \frac{L-l}{L}$$

Exemplos de cálculos de eclipses - TPC

1. Calcular o comprimento médio da sombra da Terra, considerando-se:
 - o distância Terra-Sol: 149 600 000 km.
 - o raio da Terra: 6370 km.
 - o raio do Sol: 696 000 km.
2. Seja r o raio da Terra, $R = 109r$ o raio do Sol, $d = 23680r$ a distância entre o Sol e a Terra.
 - o a) Qual é o comprimento do cone de sombra formado?
 - o b) Qual é o raio deste cone a uma distância de $l = 60r$ por onde passa a Lua?
 - o c) Sendo $r_L = r/3,6$ o raio da Lua, quantos diâmetros lunares cabem nessa região da sombra?

- Simulações dos Satélites GPS e GLONASS

- o O sistema de posicionamento global GPS (Global Positioning System) é um sistema de 24 satélites lançados pelos Estados Unidos para proporcionar navegação por triangulação de ondas de rádio.
- o Similarmente, GLONASS é um outro sistema de 24 satélites lançados pela Rússia.

<http://astro.if.ufrgs.br/GPS/gps.htm>

- o Este programa simula o movimento de todos os 48 satélites em órbita da Terra. Duas vistas estão disponíveis, uma é uma projecção ortográfica a partir de um ponto acima da Terra, e a outra é uma projecção a partir da Terra. Os sinais de rádio de quaisquer quatro satélites de um dos sistemas é usado para determinar quatro variáveis desconhecidas, que são as três coordenadas espaciais de um local, e a hora (tempo) de recepção dos sinais. A precisão da determinação das coordenadas espaciais depende muito da configuração geométrica dos quatro satélites específicos usados na determinação. Um parâmetro chamado diluição geométrica da precisão (GDOP) é definido e reflecte a dependência na configuração dos satélites. Este parâmetro (GDOP) age como um multiplicador para medir os efeitos de todas outras fontes de erro na determinação das posições.

- A Lua

Tamanho

- A Lua, o único satélite natural da Terra, é o quinto satélite em tamanho, mais de dois-terços do tamanho de Mercúrio, e mais de três vezes maior do que o maior dos asteróides.
- Tem, de fato, um quarto do tamanho da Terra, com um diâmetro de 3476 km.

Distância

- Como a Lua está relativamente próxima, podemos medir sua distância por meios geométricos.
- A distância média é de 384 403 km.

Brilho

- Após o Sol, a Lua cheia é o objecto mais brilhante do céu.
- Entretanto, sua superfície não é lisa e sua cor cinza-marrom reflecte pouca luz.
- De fato, a lua é um dos mais pobres reflectores do sistema solar.
- A quantidade de luz reflectida por um corpo é chamada de *albedo*.
- A Lua reflecte somente 7% da luz do Sol que incide sobre ela, de modo que seu albedo é 0.07.

Fases

- Já é do vosso conhecimento.

O Lado Distante

- As pessoas muitas vezes se referem ao "lado escuro da Lua", mas ele não existe.
- O Sol ilumina todos os lados da Lua enquanto ela gira.
- Entretanto, existe um "lado distante da Lua" que nunca é visto aqui da Terra.
- Com o passar das eras, as forças gravitacionais da Terra reduziram a rotação da Lua sobre seu eixo até que o período rotacional fosse exactamente igual ao período de sua órbita em torno da Terra.