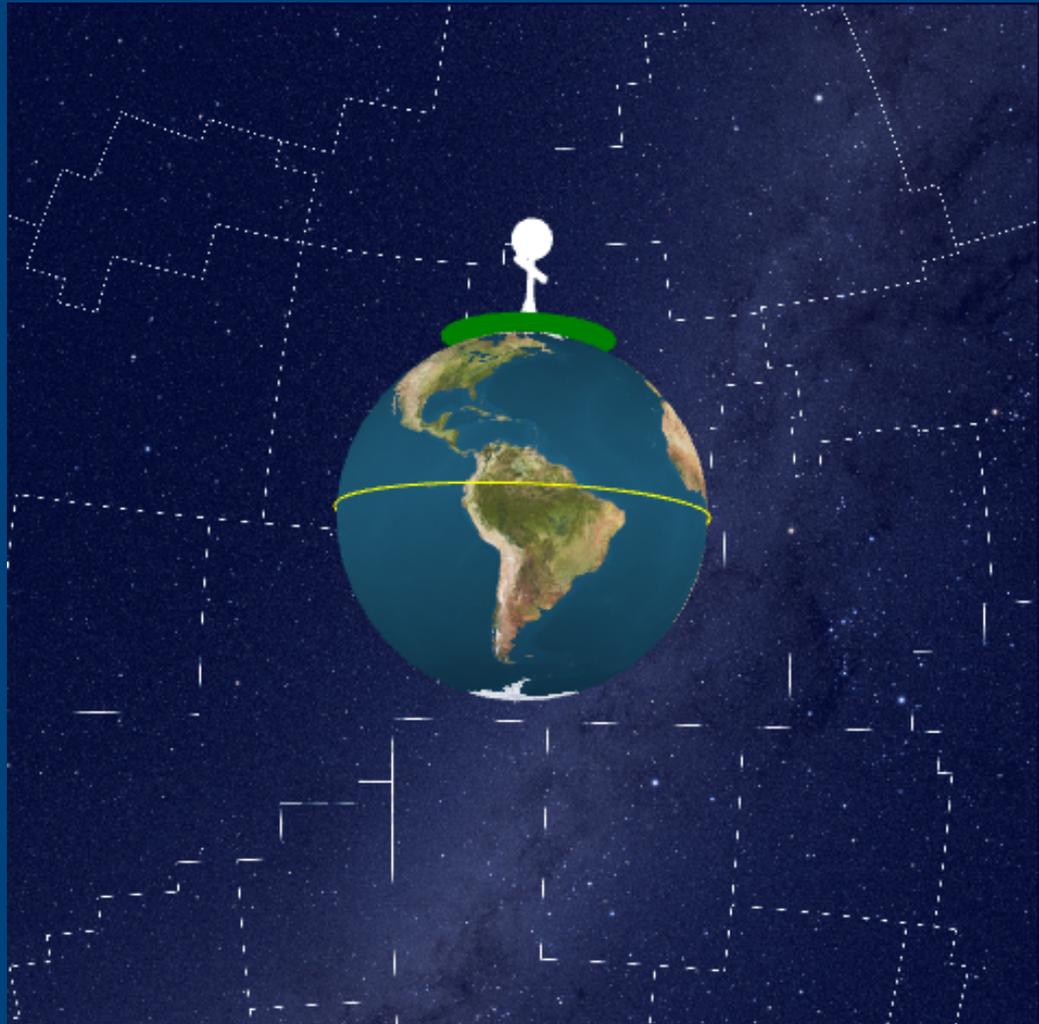




Grupo de Astronomia e Laboratório de Investigações Ligadas ao Estudo do Universo
GALILEU - UFSC



Laboratório Virtual de Astronomia e Astrofísica

Versão 1.0

Esley Scatena

Laboratório Virtual de Astronomia e Astrofísica

GALILEU - UFSC

**Grupo de Astronomia e Laboratório de Investigações Ligadas ao Estudo
do Universo**

Laboratório Virtual de Astronomia e Astrofísica

Simulações Computacionais para o Ensino de Astronomia e Astrofísica

Esley Scatena

Editora Pagalante

Contato

Para reportar algum erro ao longo do texto ou *bugs* nas simulações, por favor escreva para e.scatena@ufsc.br relatando o problema. Uma errata será mantida no endereço <https://galileu.blumenau.ufsc.br/simulacoes/>.

Direitos de uso



Laboratório Virtual de Astronomia e Astrofísica © 2022 por Esley Scatena está licenciado sob CC BY-NC-SA 4.0. Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>

Existe uma teoria que diz que, se um dia alguém descobrir exatamente para que serve o Universo e por que ele está aqui, ele desaparecerá instantaneamente e será substituído por algo ainda mais estranho e inexplicável. Existe uma segunda teoria que diz que isso já aconteceu.

– Douglas Adams, *O Restaurante no Fim do Universo*.

Sumário

Sumário	v
Sobre este material	1
Introdução	3
I ASTRONOMIA CLÁSSICA	5
1 Onde estamos?	7
1.1 Latitude e longitude	7
1.2 O Experimento de Eratóstenes	8
1.2.1 Cálculo do ângulo de incidência da luz solar	9
1.2.2 Determinação da circunferência terrestre	10
Atividade - O Experimento de Eratóstenes	12
2 A Esfera Celeste	15
2.1 O horizonte local	15
2.2 Observadores em locais diferentes	16
2.3 Coordenadas Celestes	18
2.4 As Constelações Modernas	19
Atividade - A Esfera Celeste	24
3 O Movimento Aparente do Sol	27
3.1 O movimento diário do Sol	27
3.1.1 O dia solar	28
3.1.2 Pontos Cardeais	29
Atividade - O Gnômon	30
3.2 O movimento anual do Sol	33
3.2.1 A Eclíptica	33
3.2.2 O Zodíaco	33
3.3 Estações do Ano	34
3.3.1 Equinócios e Solstícios	34
3.3.2 Variação da duração do dia com as estações do ano	36
3.3.3 As Estações do Ano	36
Atividade - Estações do Ano	40
4 Sistema Sol-Terra-Lua	43
4.1 A órbita Lunar	43
4.1.1 Mês Sinódico – Fases da Lua	43
4.1.2 Mês Sideral	47
4.1.3 Mês anomalístico	48
4.1.4 Mês draconiano	48
Atividade - As fases da Lua	50
4.2 Eclipses	54
4.2.1 Eclipses Lunares	55
4.2.2 Eclipses Solares	56
4.2.3 O ciclo de Saros	56
Atividade - Eclipses	58

5 As leis de Kepler e da Gravitação Universal	63
5.1 Leis de Kepler	65
5.1.1 1ª Lei de Kepler	65
5.1.2 2ª Lei de Kepler	66
5.1.3 3ª Lei de Kepler	67
5.2 Lei da Gravitação Universal	68
Atividade - Órbitas planetárias	70
6 Distâncias Astronômicas (Parte 1)	77
6.1 Distância relativa da Terra à Lua e da Terra ao Sol	77
6.2 Determinação de distâncias por radar	78
6.2.1 Distância Terra-Lua por radar	79
Atividade - Distância da Terra à Lua por Radar	80
6.3 Determinação de distâncias por paralaxe	81
6.3.1 Paralaxe Geocêntrica	82
6.3.2 Paralaxe Heliocêntrica	83
Atividade - Paralaxe	85
Atividade Final - Determinação da Unidade Astronômica	91
Epílogo	95
II ASTRONOMIA MODERNA	97
O Espectro Eletromagnético	99
O Espectro das Estrelas	99
Magnitudes Estelares	99
O Diagrama H-R	99
Estrelas Variáveis	99
Distâncias Astronômicas (Parte 2)	99
Atividade Final - Distância de Andrômeda	99
III APÊNDICES	99
A Ângulos e trigonometria	101
A.1 Ângulos	101
A.2 Trigonometria	102
A.2.1 Teorema de Pitágoras	102
A.2.2 Funções trigonométricas	102
A.2.3 Lei dos Cossenos e Lei dos Senos	103
B Unidades de Medida	105
B.1 Notação Científica	105
B.2 O Sistema Internacional de Medidas	105
B.3 O ano-luz	106

Sobre este material

Este material acompanha um conjunto de simulações computacionais que visam auxiliar no estudo de conceitos de astronomia e astrofísica. A *internet* está repleta de materiais do tipo, mas infelizmente sua maioria está em inglês, o que dificulta o acesso a estes materiais por parte de alunos e professores do Brasil e outros países lusófonos.

Algumas das simulações aqui presentes foram largamente inspiradas num conjunto de simulações do grupo de [Educação em Astronomia da Universidade de Nebraska-Lincoln](#), as quais se tornaram obsoletas devido a descontinuidade do *Flash*.

As simulações podem ser acessadas por meio dos QR Codes nas atividades propostas, ou pelo site do projeto [GALILEU - UFSC](#). Elas são escritas em *JavaScript* e foram criadas com o auxílio do [Easy JavaScript Simulations](#), sendo melhor utilizadas no navegador *Google Chrome*. Embora seja recomendado o uso em um computador, elas devem funcionar bem em dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets*. O navegador *Firefox* pode apresentar problemas com o zoom em imagens das simulações.

Este é um material de apoio e não tem como objetivo funcionar como um livro-texto de astronomia, de modo que as definições e demonstrações aqui presentes servem apenas como indicadores dos conteúdos a serem trabalhados nas simulações.

Ao final de cada tópico existe uma atividade para ser desenvolvida com as simulações. São capítulos independentes, elaborados para que possam ser impressos e distribuídos entre os alunos, contendo um conjunto de questões exploratórias.

Por fim, as simulações possuem caráter didático-pedagógico, representando os modelos mais simples dos tópicos que abordam. Desta forma, não devem ser utilizadas para realizar previsões detalhadas, pois nem todas estão em escala ou possuem a precisão suficiente para tal.

Façamos uma boa viagem pelo Cosmos!

Introdução

Começaremos nosso estudo da astronomia quase que de forma histórica, acompanhando as descobertas desde o cálculo do raio terrestre por Eratóstenes em II a.C. até a formulação da lei da gravitação universal por Isaac Newton no final do século XVIII. Chamaremos este período de *Astronomia Clássica*, que consiste basicamente na descrição dos movimentos dos corpos celestes e da própria Terra.

Na segunda parte discutiremos o que chamamos de *Astronomia Moderna* que, por meio da análise do espectro luminoso dos corpos celestes, nos permite identificar as características físicas e propriedades de tais objetos.

Parte I

ASTRONOMIA CLÁSSICA

Onde estamos?

1

Parte essencial da astronomia diz respeito à responder a pergunta "onde estamos?". Queremos conhecer qual a nossa posição em relação ao restante do Universo, o que está próximo de nós, o que está distante, seja no tempo ou no espaço. Como não existem posições absolutas (isto é, a posição de um objeto é dada sempre em relação a alguma outra coisa), é importante definirmos qual será a nossa referência.

Várias áreas da astronomia podem tomar diferentes pontos de referência, como por exemplo o centro da nossa galáxia, o centro do Sol (ou o centro gravitacional do Sistema Solar), ou ainda a Terra. Por enquanto vamos tomar o nosso planeta como ponto de referência, e como ele é muito grande, também será necessário especificar em qual lugar do planeta estamos. Isso será feito com a ajuda de um *sistema de coordenadas*, que funcionará como um jogo de batalha naval: para cada ponto na superfície do planeta teremos duas coordenadas, *latitude* e *longitude*.

Depois que formos capazes de identificar nossa posição no planeta, vamos olhar para o céu e entender como ele é visto por observadores em outros locais da Terra. Veremos, por exemplo, que observadores no hemisfério sul conseguem observar certas regiões do céu que os observadores no hemisfério norte não conseguem, e vice-versa.

A mudança das posições dos astros de acordo com a localização no planeta já dava uma pista aos astrônomos antigos de que a Terra seria esférica, além da própria comparação com o Sol e com a Lua, astros que claramente são redondos. Soma-se a isso o fato de, durante os eclipses lunares, a Terra projetar sua sombra em forma de disco sobre a Lua, dando evidências da esfericidade do nosso planeta.

No entanto, ainda não estava claro qual seria o tamanho do planeta. Certamente seria algo enorme, já que quando olhamos para o horizonte não conseguimos distinguir o ponto no qual a curvatura é visível. Veremos, no entanto, que um experimento genial projetado por Eratóstenes permitiu que conhecêssemos o tamanho da circunferência terrestre.

Mas, antes disso, vamos recapitular como descrevemos a nossa posição no globo terrestre.

1.1 Latitude e longitude

O fato do nosso planeta ser aproximadamente esférico faz com que observadores em posições distintas do planeta observem os outros planetas e estrelas em posições diferentes no céu. Isso traz consequências diretas à cada região, governando as estações do ano, duração dos dias e noites, o horário oficial de cada lugar e até mesmo a possibilidade de observar ou não determinadas constelações. Desta forma, quando fazemos alguma observação astronômica, é importante deixarmos claro de onde esta observação está sendo realizada.

1.1	Latitude e longitude . . .	7
1.2	O Experimento de Eratóstenes	8
1.2.1	Cálculo do ângulo de incidência da luz solar . .	9
1.2.2	Determinação da circunferência terrestre	10

Hoje em dia podemos facilmente determinar a nossa localização na superfície do planeta com o auxílio de um GPS (*Global Positioning System*), que nos mostra duas coordenadas principais: latitude e longitude, além da nossa altura em relação ao nível do mar.

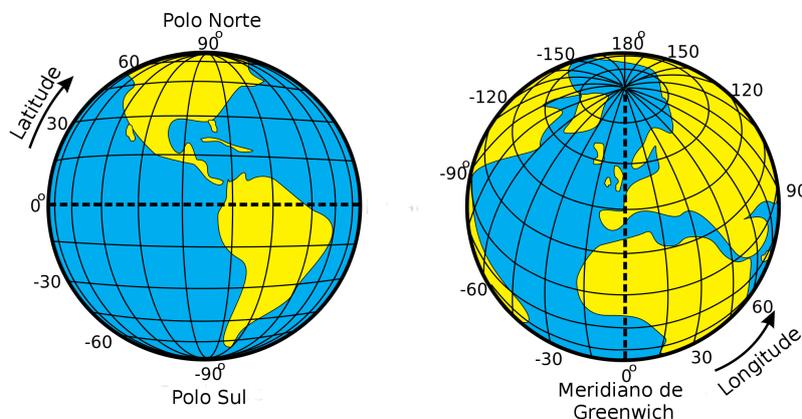


Figura 1.1: Coordenadas geográficas: latitude e longitude. (Crédito: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitude_and_Longitude_of_the_Earth.svg)

- i) **Latitude** – As linhas horizontais, chamadas de *paralelos*, marcam as coordenadas de *latitude*. A latitude varia de -90° (valor no polo sul) a $+90^\circ$ (valor no polo norte). Em especial, temos alguns paralelos dignos de nota
 - ▶ *equador* – latitude igual a 0° ;
 - ▶ *trópico de câncer* – latitude aproximadamente igual a $+23,5^\circ$;
 - ▶ *trópico de capricórnio* – latitude aproximadamente igual a $-23,5^\circ$;
 - ▶ *círculo polar ártico* – latitude aproximadamente igual a $+66,5^\circ$;
 - ▶ *círculo polar antártico* – latitude aproximadamente igual a $-66,5^\circ$.
- ii) **Longitude** – As linhas verticais, chamadas de *meridianos*, marcam as coordenadas de *longitude*. A longitude varia de 0° a 180° à leste (positivo, +) ou a oeste (negativo, -) do meridiano de Greenwich, definido como 0° de longitude.

Assim, com apenas dois números, podemos determinar um local na superfície do planeta sem nenhuma ambiguidade. Por exemplo, as coordenadas geográficas de Brasília são: **Latitude -15.7797200°** e **Longitude -47.9297200°** .

Exercício 1.1.1 Converta a latitude e longitude de Brasília para graus, minutos e segundos.

1.2 O Experimento de Eratóstenes

O astrônomo grego Eratóstenes de Cirene (séc. III a.C.) foi um dos primeiros a determinar qual o valor da circunferência da Terra, a qual já se imaginava ser esférica.

Eratóstenes sabia que na data que marca o início do verão, o *solstício de verão*, ao meio-dia, o Sol iluminava o fundo de um poço na cidade

de Siena (hoje Assuã, no Egito). Isso significa que, naquele instante, o Sol está no *zênite* (é o ponto mais alto no céu, aquele exatamente acima da sua cabeça), de modo que um *gnômon* (uma haste vertical presa perpendicularmente ao chão) não projetava sombra alguma. No entanto, em Alexandria, no mesmo dia e horário, isso não acontecia.

Eratóstenes, então, conjecturou que a diferença entre os ângulos de incidência dos raios solares entre as cidades de Assuã e Alexandria seria igual à diferença de latitude dessas cidades. Assim, no dia do solstício de verão, Eratóstenes fincou um gnômon no chão e, ao meio-dia, mediu o tamanho da sombra projetada. Com isso, conhecendo o tamanho do gnômon, ele pode calcular qual o ângulo de incidência dos raios solares em relação à vertical.

De posse desta informação e conhecendo a distância entre as duas cidades, Eratóstenes foi capaz de determinar a circunferência terrestre com apenas 2% de erro em relação ao aceite atualmente. Vamos recriar o experimento de Eratóstenes passo-a-passo.

1.2.1 Cálculo do ângulo de incidência da luz solar

A Figura 1.2 nos mostra qual o raciocínio utilizado por Eratóstenes. A linha roxa, saindo do centro da Terra, “atravessa” a superfície do planeta de modo perpendicular a esta, como se fosse um gnômon preso ao chão em Assuã. A linha rosa indica o mesmo, mas para um observador em Alexandria.

Em laranja temos os raios solares que incidem sobre a superfície terrestre. Devido à grande distância do Sol à Terra, estes raios de luz chegam praticamente paralelos ao nosso planeta. Os ângulos indicados no centro do planeta correspondem à latitude das cidades em questão.

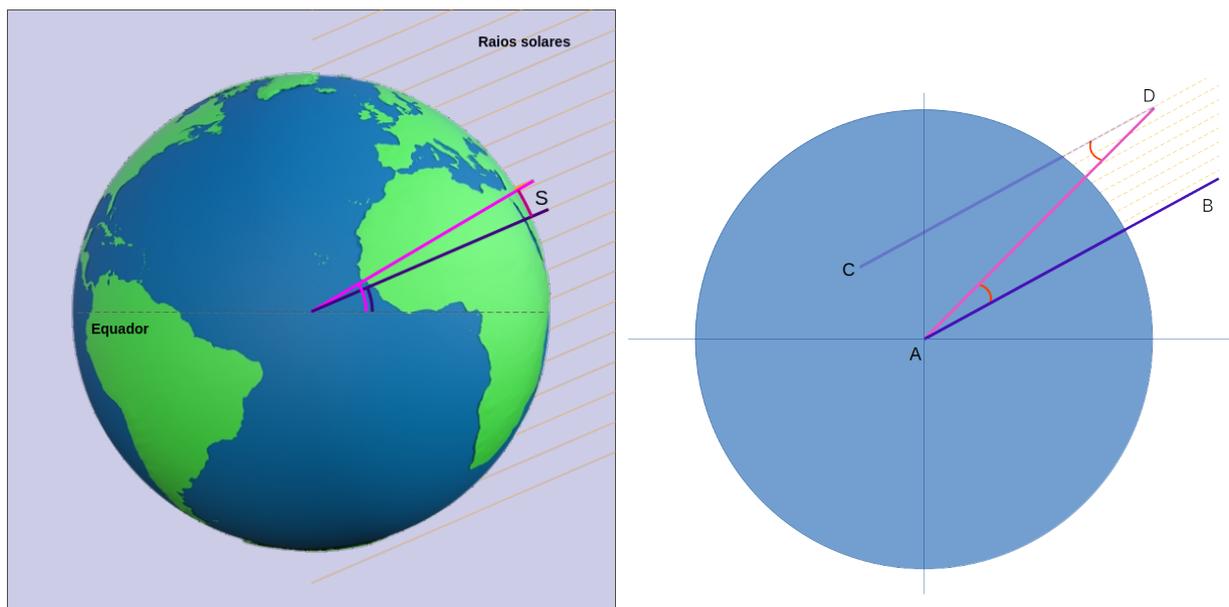


Figura 1.2: Representação do experimento de Eratóstenes para a determinação da circunferência terrestre. À esquerda é possível ver a diferença de latitude entre as cidades de Alexandria e Assuã. À direita, uma representação da geometria envolvida no problema, com ângulos mais exagerados.

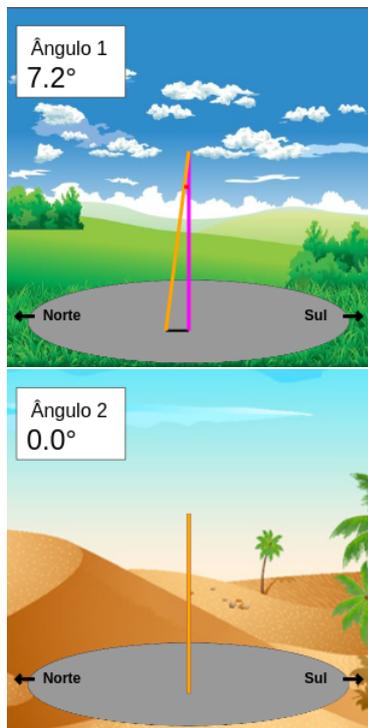


Figura 1.3: Projeção da sombra de gnômons nas cidades de Alexandria (acima) e Assuã (abaixo) durante o solstício de verão para o hemisfério norte. Note que o gnômon em Assuã não projeta sombra alguma, indicando que o Sol está exatamente à pino naquele instante.

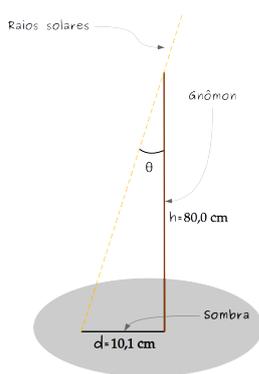


Figura 1.4: Exemplo de sombra projetada por um gnômon e determinação do ângulo de incidência da luz solar.

Na Figura 1.2, à direita, temos uma representação geométrica do problema: as retas \overline{AB} e \overline{CD} são paralelas entre si, e paralelas aos feixes de luz solar que atingem o planeta, enquanto a linha \overline{AD} une o centro do planeta à ponta do gnômon em Alexandria, por exemplo.

Devido ao paralelismo das retas \overline{AB} e \overline{CD} , os ângulos indicados em vermelho (\widehat{CDA} e \widehat{BAD}) são iguais. Isso significa que se conhecemos o ângulo de incidência dos raios solares em relação ao gnômon em Alexandria, saberemos também qual é a diferença em latitude das duas cidades!

Já a Figura 1.3 mostra como os observadores em cada cidade veriam a projeção da sombra do gnômon naquele mesmo instante. Podemos ver que a luz solar incide com um ângulo de $7,2^\circ$ em relação ao gnômon em Alexandria, enquanto incide à 0° sobre o gnômon em Assuã, indicando que o Sol está exatamente à pino naquele instante, para aquela localidade.

Se quisermos repetir este experimento, precisamos encontrar um método para determinar este ângulo. Vamos supor que no dia em que a luz do Sol incide diretamente no fundo do poço em Assuã, Eratóstenes tenha colocado um gnômon em Alexandria. Assim, ao meio dia, supondo que o gnômon tenha uma altura $h = 80,0$ cm e sua sombra projetada tenha um comprimento $d = 10,1$ cm, qual o valor da tangente do ângulo θ indicado na Figura 1.4?

Sabemos pelas relações trigonométricas (ver Apêndice A) que a tangente do ângulo θ será dada pela divisão do tamanho da sombra (cateto oposto ao ângulo) pela altura do gnômon (cateto adjacente ao ângulo). Ou seja,

$$\tan \theta = \frac{10,1 \text{ cm}}{80,0 \text{ cm}} = 0,126.$$

Assim, conhecendo o valor da tangente, podemos utilizar uma calculadora para descobrir qual o ângulo. O ângulo cuja tangente é igual a 0,126 é dado por $\theta = 7,20^\circ$.

Na verdade, essas funções trigonométricas ainda não estavam bem estabelecidas na época de Eratóstenes, mas ele estimou o ângulo como sendo $\frac{1}{50}$ de uma circunferência completa. Se a circunferência completa tem 360° , o ângulo θ é igual a $\frac{360^\circ}{50} = 7,2^\circ$.

1.2.2 Determinação da circunferência terrestre

Eratóstenes notou que se ele conhecesse a distância s entre as duas cidades e o ângulo θ medido anteriormente, ele poderia calcular a circunferência completa da Terra. A unidade de medida de comprimento utilizada na época era o *stadium*,

$$1 \text{ stadium} = 157 \text{ m.}$$

Se a distância s entre as cidades de Alexandria e Assuã é de 5.350 stadiums, em quilômetros teríamos

$$5.350 \times 157 = 839,950 \text{ km.}$$

Podemos pensar na ideia de Eratóstenes como uma pizza: sabemos o “tamanho angular” θ de uma fatia, e o comprimento s de sua borda. Para encontrar o comprimento da borda da pizza toda, basta multiplicarmos s pelo número de fatias, conforme a Figura 1.5.

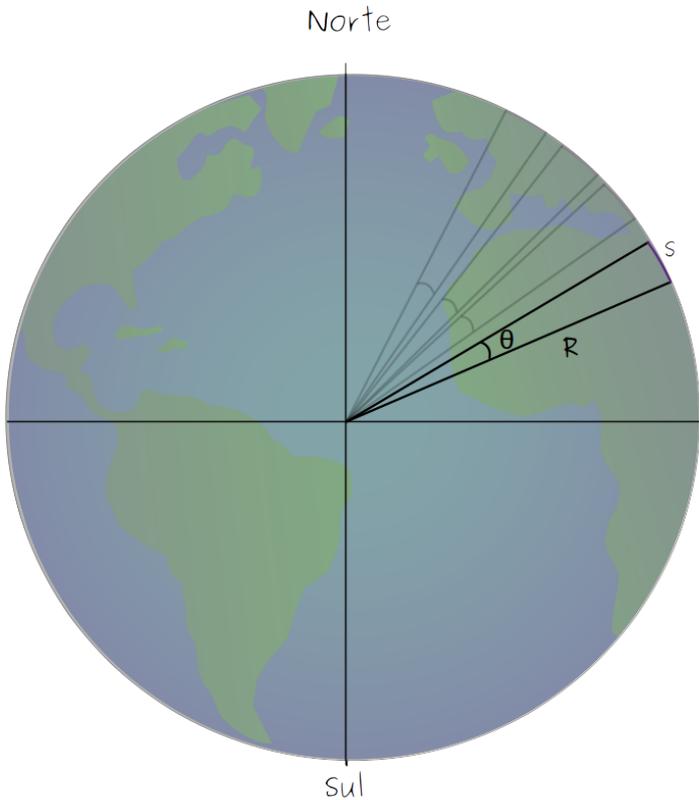


Figura 1.5: Várias “fatias” de tamanho angular θ .

Mas quantas fatias de tamanho angular θ temos? Lembre-se que o círculo completo possui 360° , então teremos $360/\theta$ fatias, ou seja, 50 fatias cuja borda tem comprimento de 839,950 km.

Com isso, multiplicando s pelo número de fatias, encontramos que a circunferência completa da Terra será

$$C = 50 \times 839,950 \text{ km} = 41.997,5 \text{ km}.$$

Se lembramos que a circunferência de um círculo é dada por $C = 2\pi R$, onde R é o raio, podemos encontrar o raio da Terra, o seja,

$$R = \frac{C}{2\pi} = \frac{41.997,5 \text{ km}}{2 \times 3,1415} = 6.684 \text{ km}.$$

Eratóstenes encontrou um valor de $R = 6.370 \text{ km}$, praticamente o valor aceito atualmente!

Atividade - O Experimento de Eratóstenes

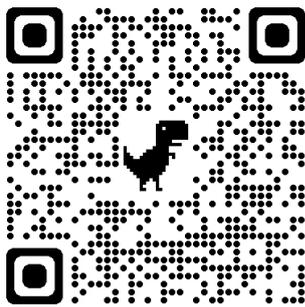


Figura 1.6: Simulação do experimento de Eratóstenes: https://scatena.sites.ufsc.br/astrologia/raio_terrestre/index.xhtml

Nesta atividade vamos utilizar uma simulação computacional para reproduzir o experimento de Eratóstenes utilizando quaisquer duas cidades que estejam em longitudes próximas e latitudes diferentes. Acesse a simulação por meio do QR Code na Figura 1.6 ou pelo link na legenda.

A simulação apresentada na Figura 1.7 nos mostra, na janela da direita, uma representação da Terra, com a linha do equador dividindo os hemisférios norte e sul. Podemos ver uma reta roxa e outra reta rosa, ambas saindo do centro do planeta e cruzando sua superfície perpendicularmente. Os ângulos indicados no centro do planeta correspondem às latitudes onde cada reta cruza a superfície terrestre. A distância entre os dois pontos nessas latitudes é dada por s e exibida com uma linha vermelha. Por fim, os raios laranjas representam os raios solares incidindo sobre o planeta.

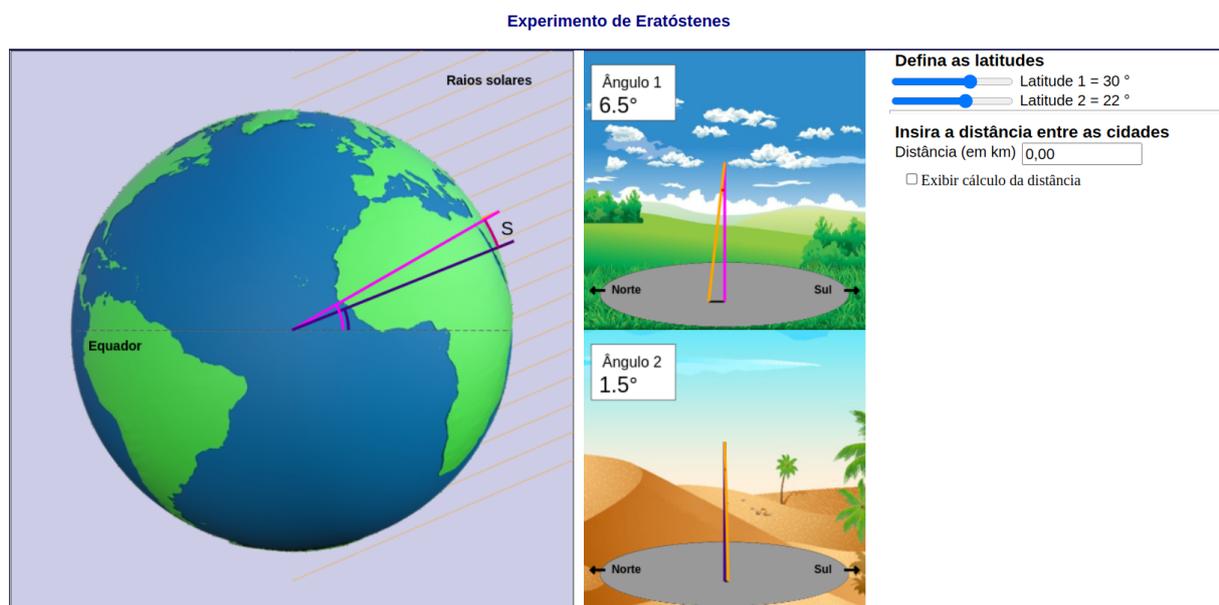


Figura 1.7: Simulação computacional do experimento de Eratóstenes.

Nas duas janelas da direita podemos ver as sombras projetadas pelos gnômons devido a incidência da luz solar em cada uma das localidades. A janela de cima indica a localidade representada pela linha rosa e a janela debaixo dela indica a localidade representada pela linha roxa. No canto superior esquerdo de cada janela podemos ver qual o ângulo de incidência dos raios solares em relação ao gnômon.

A janela da extrema direita possui os ajustes de latitude, permitindo que você escolha qual a latitude desejada para cada uma das localizações. Mova a barra deslizante para ver como as configurações da simulação se alteram. Logo abaixo há um local para inserir a distância s entre as cidades. Conhecendo os ângulos e a distância s , somos capazes de determinar o tamanho do nosso planeta!

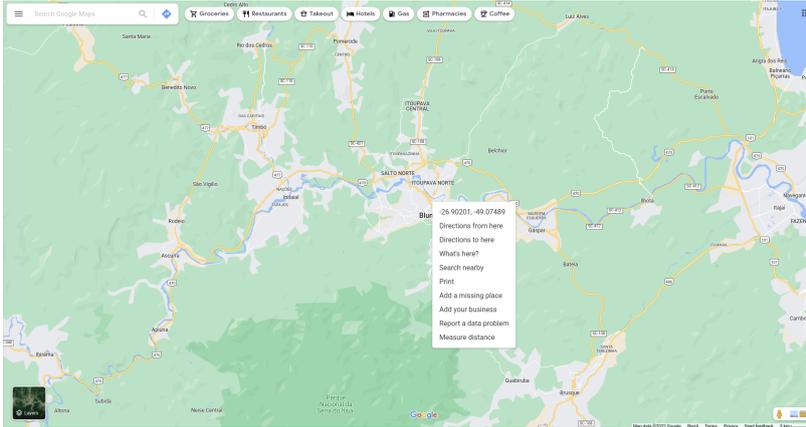


Figura 1.8: Visão do Google Maps. Vemos as coordenadas geográficas de Blumenau, latitude -26.90201° e longitude -49.07489° .

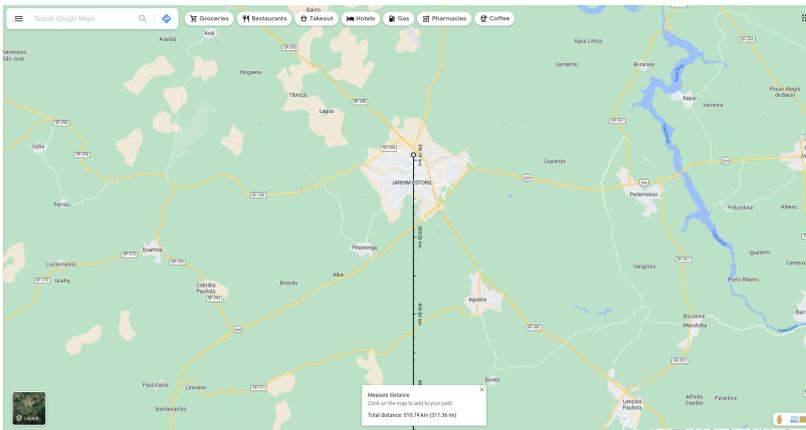


Figura 1.9: Visão do Google Maps, exibindo a distância entre duas cidades, Blumenau-SC e Bauru-SP (latitude -22.31736° e longitude -49.07515°) na caixa embaixo – “Total distance: 510,74 km” (distância total: 510,74 km).

Parte 1 - Determinando as Cidades

1. Peça para o Google Maps calcular a distância entre as duas cidades (com isso você obtém s) e anote o valor.
2. Acesse o Google Maps (QR code na Figura 1.10, ou pelo link na legenda) e busque por uma cidade de seu interesse. Clique com o botão direito do mouse sobre a cidade e as coordenadas da cidade serão exibidas, conforme a Figura 1.8. Anote o valor da latitude. Nesse mesmo menu, clique com o botão esquerdo em *Measure distance* (medir distância).
3. Selecione outra cidade aproximadamente na mesma longitude da anterior e com mais de 300 km de distância dela. Repita o procedimento anterior: clique com o botão direito para anotar a latitude, mas agora clique com o botão esquerdo sobre “Distance to here” (distância até aqui). Com isso, será exibida a distância entre as duas cidades selecionadas, como mostra a Figura 1.9. Anote o valor da distância.

De posse desses valores, já somos capazes de determinar o valor da circunferência da Terra. No entanto, vamos dar uma olhada no que está acontecendo em cada uma das localidades.

Parte 2 - Medindo o ângulo de incidência

Acesse a simulação por meio da Figura 1.6



Figura 1.10: Google Maps: <http://maps.google.com>

1. Utilize as barras deslizantes ou clique sobre a caixa para informar as latitudes das cidades, no menu da extrema direita.
2. Veja como se comportam as sombras projetadas pelos gnômons em cada cidade. Assim como as latitudes, nesta simulação os ângulos orientados ao Sul são negativos, e aqueles ao Norte são positivos. Anote os valores de *Ângulo 1* e *Ângulo 2*.
3. Calcule a diferença entre os ângulos, $\theta = \text{Ângulo 1} - \text{Ângulo 2}$. Qual o valor encontrado? Cuidado com os sinais!
4. Calcule a diferença entre as latitudes das duas cidades, determinadas anteriormente. Qual o valor encontrado?
5. Os valores dos itens anteriores são parecidos? Eles deveriam ser?

Vemos, portanto, que a determinação dos ângulos de incidência dos raios solares por meio das sombras dos gnômons em cada localidade permite que calculemos qual a diferença entre as latitudes dos dois lugares. Vamos utilizar essa informação e a distância entre as cidades para encontrar o raio terrestre na seção seguinte.

Parte 3 - Calculando o Raio Terrestre

Uma forma simples de se determinar o raio terrestre é encontrar primeiro a circunferência do planeta, e depois dividi-la por 2π . Vejamos:

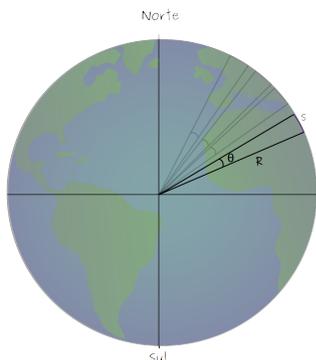


Figura 1.11: Várias “fatias” de tamanho angular θ .

1. Veja a Figura 1.11. Ela exibe uma “fatia” de tamanho angular θ , que é a diferença de latitude entre duas cidades a uma distância s entre si. Os valores de θ e s você já determinou na Parte 2. Para determinar a circunferência toda, precisamos saber quantas fatias de tamanho angular θ cabem num círculo de 360° . Quantas são?
2. De posse do número n de fatias, podemos encontrar a circunferência completa, dada por $C = n \times s$, ou seja, n fatias de comprimento s . Quanto você encontrou para o comprimento C ?
3. Por fim, sabendo que o comprimento C de uma circunferência está relacionado com o raio R da circunferência por meio da relação

$$C = 2\pi R,$$

calcule o valor de R .

Para conferir qual o valor da Terra calculado para os valores que você determinou, insira a distância entre as cidades no local correspondente da simulação e clique em *Exibir cálculo da distância* para conferir o resultado esperado.

O valor médio do raio terrestre, medido no equador, é de $R_T = 6378,137$ km. É importante notar que nosso planeta não é uma esfera perfeita, muito pelo contrário, ela possui um relevo bem acidentado. O formato do nosso planeta geralmente é chamado de *geoide*. Aqui, para todos os efeitos, estamos considerando o planeta como uma esfera perfeita.

O movimento aparente das estrelas no céu pode ser descrito como se elas estivessem fixas à uma esfera translúcida, a qual engloba o nosso planeta. Desta forma, com o passar do tempo, vemos esta dita *esfera celeste* rotacionar. O fato de dizermos que as estrelas estão presas à esfera se deve somente ao fato de que elas não parecem se mover umas em relação às outras. Contudo, de modo geral, as estrelas estão a profundidades bem diferentes entre si.

2.1 O horizonte local

Não podemos negar que quando olhamos ao redor a Terra nos parece plana. Temos essa impressão porque nosso planeta é tão grande que é preciso vê-lo de longe para enxergá-lo inteiro (conforme vimos na seção anterior, o raio terrestre é de cerca de 6.300 km).

Podemos pensar no *horizonte local* como a região na qual deixamos de ver o céu e passamos a ver a Terra. Se estivéssemos em um barco no meio do oceano, o horizonte seria toda a região na qual o céu toca o mar. Na Figura 2.1 o horizonte é a região onde o círculo verde encontra a esfera azul.

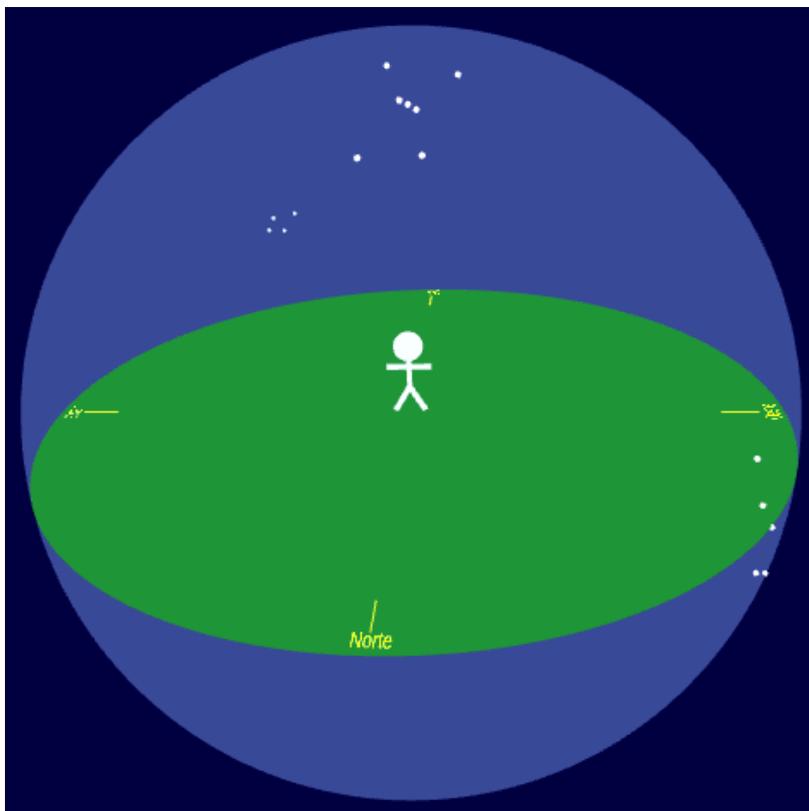


Figura 2.1: Representação do horizonte local e os pontos careais.

Podemos notar quatro marcações na Figura 2.1: *Norte, Sul, Leste e Oeste*, os quais são os *pontos cardeais*. Falaremos deles mais adiante quando

estudarmos o movimento do Sol e vamos demonstrar como encontrá-los precisamente.

Todas as estrelas que estiverem acima da linha do horizonte (circunferência do círculo verde) podem ser vistas naquele momento, enquanto as que estiverem abaixo da linha do horizonte não poderão ser avistadas. Vamos ver que este horizonte se altera dependendo da posição que estamos no planeta.

Observando a Figura 2.2, à esquerda, podemos ver o nosso planeta envolvido por uma casca esférica azulada. No polo norte temos a representação de um observador, e o seu horizonte é delimitado pelo disco verde. Esta é uma visão *geocêntrica*, ou seja, tem a Terra em seu centro.

À direita podemos ver como esse observador enxerga este horizonte, com o observador sendo o centro de referência. Esta visão é chamada de *topocêntrica*.

O planeta rotaciona no sentido anti-horário quando visto a partir do polo norte.

Por fim, a linha laranja representa o eixo de rotação terrestre. É em torno deste eixo que o planeta rotaciona, completando uma volta em relação a esfera em aproximadamente 24 horas. Assim, conforme o planeta rotaciona, temos a impressão de que as estrelas estão se movendo no céu, girando em torno de dois pontos na esfera celeste. Chamamos estes pontos de *Polo Norte Celeste* e *Polo Sul Celeste*.

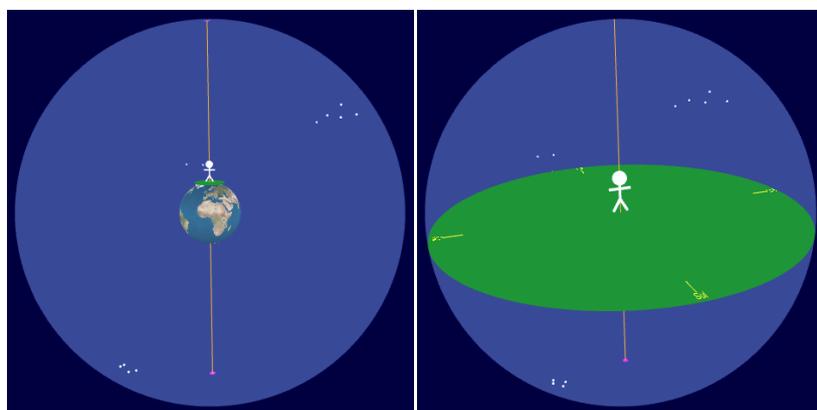


Figura 2.2: Representação do horizonte local de um observador no polo norte (latitude = 90°) nas visões geocêntrica (à esquerda) e topocêntrica (à direita). A linha laranja representa o eixo de rotação terrestre, indo do polo sul ao polo norte da esfera celeste.

2.2 Observadores em locais diferentes

Vejamos como em partes diferentes do globo terrestre as constelações são observadas em posições diferentes do céu nas visões geocêntrica e topocêntrica:

- **Observador no Polo Norte (latitude = $+90^\circ$)**

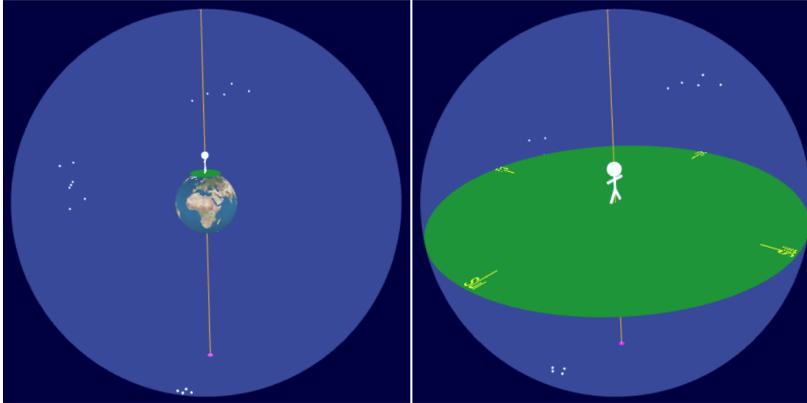


Figura 2.3: Note que o eixo de rotação terrestre está diretamente acima da cabeça do observador. Na figura da direita podemos ver, a frente do observador, duas estrelas da constelação de Órion. Acima temos a constelação de Cassiopeia, e podemos ver a constelação do Cruzeiro do Sul abaixo do horizonte. O eixo de rotação da Terra, em laranja, aponta diretamente para o ponto acima da cabeça do observador, o Polo Norte Celeste. Conforme o planeta rotaciona, as estrelas parecem rotacionar na direção contrária em torno do Polo Norte Celeste.

► Observador no Hemisfério Norte (latitude = $+45^\circ$)

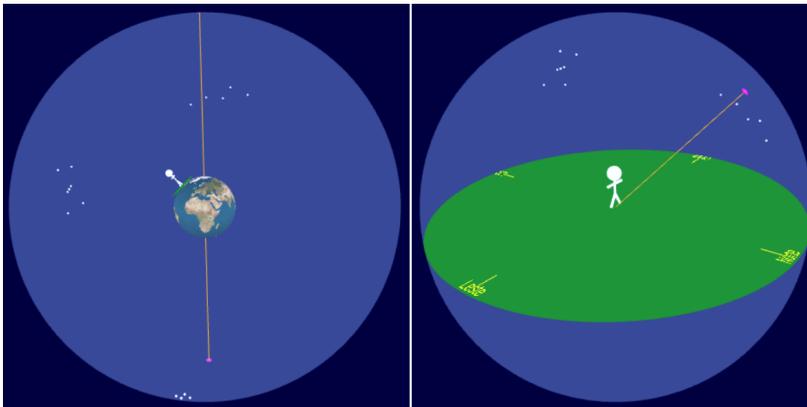


Figura 2.4: Numa latitude de 45° , a constelação de Órion já aparece por inteiro para o observador. A constelação de Cassiopeia fica um pouco mais baixa, em direção ao norte. Podemos ver também que o eixo de rotação da Terra não está mais acima da cabeça do observador, mas agora aponta a 45° acima do horizonte, na direção do ponto cardinal norte, marcando o Polo Norte Celeste.

► Observador no Equador (latitude = 0°)

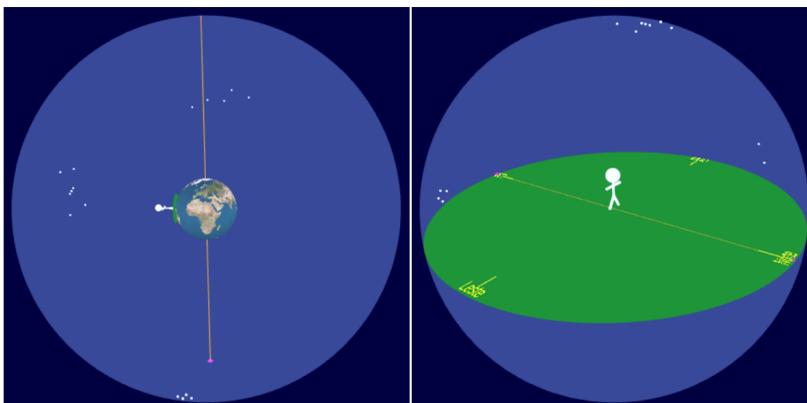
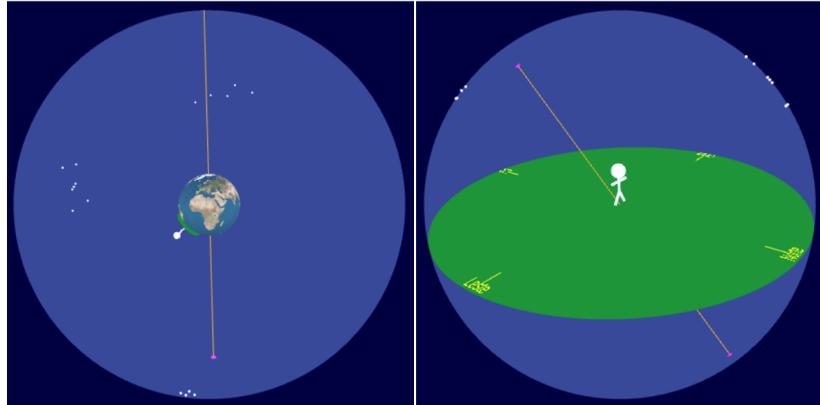


Figura 2.5: No equador podemos ver a constelação de Órion bem acima da cabeça do observador. A constelação de Cassiopeia já não aparece mais por inteira, estando abaixo da região norte do horizonte, enquanto o Cruzeiro do Sul desponha na direção oposta. Note que o eixo de rotação terrestre está na altura do horizonte, então o Polo Norte Celeste e o Polo Sul Celeste coincidem com os pontos cardiais norte e sul, respectivamente. Compare as figuras do lado direito e esquerdo e tente se colocar na posição do observador!

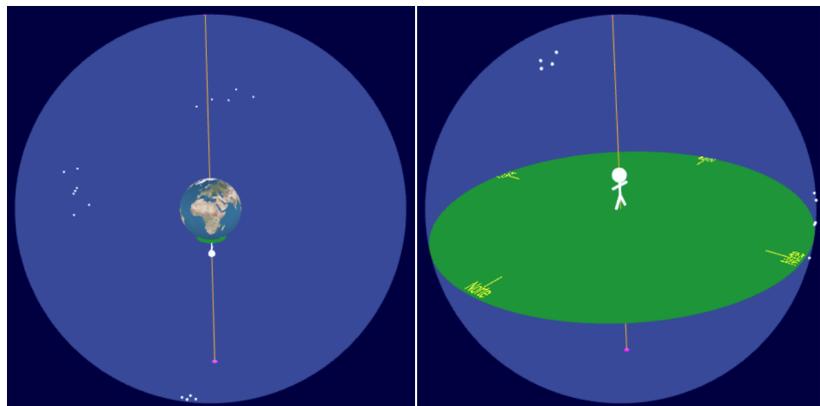
► Observador no Hemisfério Sul (latitude = -45°)

Figura 2.6: Um observador no hemisfério sul, a uma latitude de -45° observa o Polo Sul Celeste a uma altitude de 45° em relação ao ponto cardinal sul. Se este observador olha para o Sul, ele tem o Cruzeiro do Sul bem à sua frente, e a constelação de Órion atrás. A constelação de Cassiopeia não é mais visível.



► **Observador no Polo Sul (latitude = -90°)**

Figura 2.7: No Polo Sul o observador tem o Polo Sul Celeste exatamente acima de sua cabeça, em torno do qual é possível ver o Cruzeiro do Sul girar ao longo de uma noite. A constelação de Órion é visível bem baixo no horizonte norte, e a constelação de Cassiopeia não é visível.



2.3 Coordenadas Celestes

Assim como utilizamos as coordenadas de latitude e longitude para determinar um ponto na superfície terrestre, podemos utilizar um sistema de coordenadas para encontrar um ponto na esfera celeste. Existem dois sistemas de coordenadas, um chamado de *sistema equatorial de coordenadas* e o *sistema local de coordenadas*. Vamos focar por enquanto no último.

O sistema local é descrito por duas coordenadas: a *altitude* e o *azimute*.

- **Altitude** – é dada pelo ângulo formado entre o objeto celeste e o horizonte. No caso da Figura 2.8, vemos que a altitude é igual a $39,8^\circ$. A altitude possui um valor positivo entre 0° e $+90^\circ$ quando o objeto está acima do horizonte, e valores negativos entre 0° e -90° para objetos abaixo do horizonte. O ponto igual a 90° é chamado de *zênite*.
- **Azimute** – é dado pelo ângulo formado entre a direção do norte geográfico e o ponto no horizonte correspondente ao círculo vertical do astro em questão. Ele é contado no sentido de Norte para Leste, ficando entre 0° e 360° . Na Figura 2.8, o valor do azimute é de $42,1^\circ$.

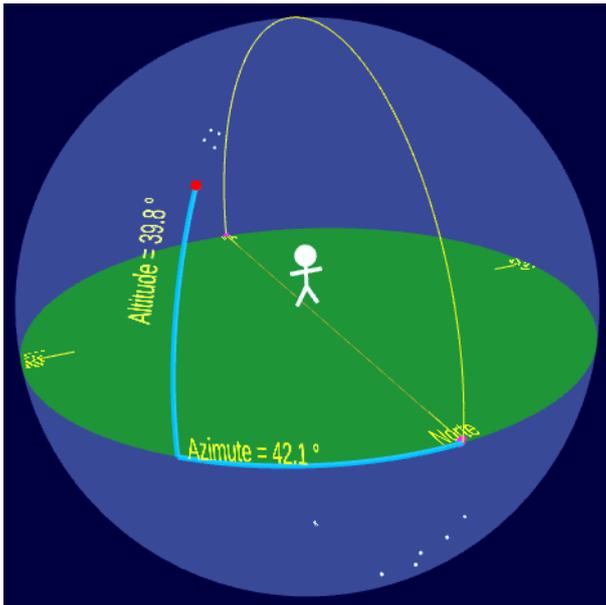


Figura 2.8: Coordenadas locais – azimute = 42.1° e altitude = 39.8° .

Como o nome diz, o sistema **local** de coordenadas descreve a posição dos objetos na esfera celeste conforme vistos a partir de um determinado local. Conforme vimos anteriormente, a posição aparente das estrelas para observadores em latitudes diferentes varia drasticamente. Assim, sempre que especificarmos um conjunto de coordenadas locais, é importante dizer qual o local (latitude e longitude) e horário nos quais aquelas coordenadas são dadas.

2.4 As Constelações Modernas

Quando falamos em constelações, uma das primeiras coisas que pensamos são nos desenhos formados pelas linhas imaginárias que unem determinadas estrelas e formam desenhos ou padrões. Por muito tempo essas eram as constelações, e tinham diversas funções, desde facilitar a identificação de regiões no céu à manter vivas histórias da mitologia de um povo.

Atualmente, as constelações são vistas como 88 regiões do céu. Assim como um mapa político da Terra apresenta as fronteiras administrativas de cada país, as constelações definem regiões do céu (Figura 2.9). A divisão atual foi definida em 1922 pela União Astronômica Internacional e buscou deixar ao menos uma estrela brilhante em cada constelação.

Na Tabela 2.1 estão listadas as constelações modernas (os nomes são dados tradicionalmente em latim) e seu significado.

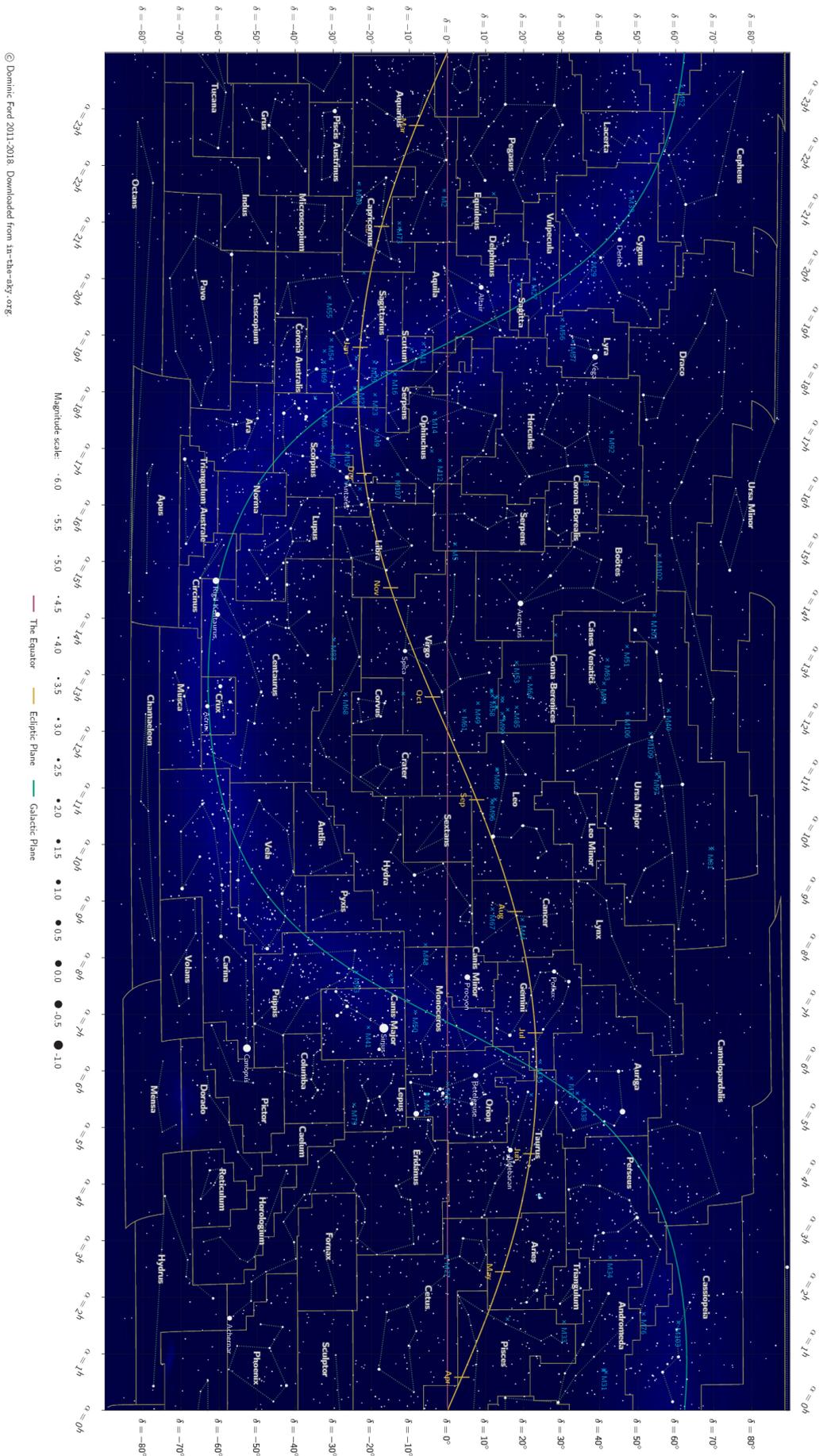


Figura 2.9: Uma parte da Esfera Celeste com as fronteiras definidas pelas constelações.

Tabela 2.1: Constelações Modernas

Nº	Constelação	Significado
1	Andrômeda	a princesa do mito grego
2	Antlia	a Máquina Pneumática, ou bomba de ar
3	Apus	a Ave-do-Paraíso
4	Aquarius	Aquário, o Aguadeiro
5	Aquila	a Águia
6	Ara	o Altar, ou Ara
7	Aries	o Carneiro
8	Auriga	o Cocheiro
9	Boötes	o Boieiro, ou Pastor.
10	Caelum	o Cinzel, ou Buril
11	Camelopardalis	a Girafa
12	Câncer	o Caranguejo
13	Canes Venatici	os Cães de Caça, ou Pegureiros
14	Canis Major	o Cão Maior
15	Canis Minor	o Cão Menor
16	Capricornus	Capricórnio, a cabra do mar, ou Amalteia no mito grego
17	Carina	a Carena (ou Quilha) do navio dos míticos argonautas
18	Cassiopeia	a rainha grega
19	Centaurus	o centauro rústico (não confundir com o Sagitário)
20	Cepheus	o rei mítico
21	Cetus	a Baleia, ou Ceto (monstro marinho do mito grego)
22	Chamaeleon	o Camaleão
23	Circinus	o Compasso
24	Columba	a Pomba
25	Coma Berenices	a Cabeleira de Berenice
26	Corona Australis	a Coroa Austral (ou Coroa do Sul)
27	Corona Borealis	a Coroa Boreal (ou Coroa do Norte)
28	Corvus	o Corvo
29	Crater	a Taça, (na verdade uma salva)
30	Crux	o Cruzeiro do Sul, ou Crucifixo (raro)
31	Cygnus	o Cisne (às vezes também chamada "Cruzeiro do Norte")
32	Delphinus	o Golfinho, ou Delfim
33	Dorado	o Peixe Dourado
34	Draco	o Dragão
35	Equuleus	Potro, o cavalinho
36	Eridanus	o Rio
37	Fornax	a Fornalha
38	Gemini	os Gêmeos
39	Grus	o Grou
40	Hércules	em grego, Hércules; filho de Zeus e maior dos heróis gregos
41	Horologium	o Relógio
42	Hydra	Hidra (a cobra-monstro aquática do mito grego) (Fêmea)
43	Hydrus	Hidra Macho
44	Indus	o Índio

N°	Constelação	Significado
45	Lacerta	o Lagarto, ou Lagartixa
46	Leo	o Leão, ou Leão Maior (raro)
47	Leo Minor	o Leão Menor, ou Lionete
48	Lepus	a Lebre
49	Libra	a Balança
50	Lupus	o Lobo
51	Lynx	o Lince
52	Lyra	a Lira
53	Mensa	a Montanha da Mesa na Cidade do Cabo
54	Microscopium	o Microscópio
55	Monoceros	o Unicórnio, ou Monóceros
56	Musca	a Mosca
57	Norma	a Régua, ou Esquadro
58	Octans	o Oitante
59	Ophiuchus	Ofiuco, ou Serpentário (tratador de serpentes)
60	Orion	o caçador mítico
61	Pavo	o Pavão
62	Pegasus	Pégaso, o cavalo alado dos gregos
63	Perseus	Perseu, o herói grego que decapitou Medusa, rainha das górgonas
64	Phoenix	a Fênix
65	Pictor	o Pintor
66	Pisces	os Peixes
67	Piscis Austrinus	o Peixe Austral, ou Peixe do Sul
68	Puppis	a Popa (do navio)
69	Pyxis	a Bússola
70	Reticulum	o Retículo
71	Sagitta	a Flecha, ou Seta
72	Sagittarius	Sagitário, o Arqueiro (o Quíron dos mitos gregos, centauro erudito e tutor dos heróis)
73	Scorpius	o Escorpião
74	Sculptor	o Escultor
75	Scutum	o Escudo
76	Serpens	a Serpente, e única constelação dividida em duas regiões: Serpens Cauda, (a Cauda), e Serpens Caput (a Cabeça)
77	Sextans	o Sextante
78	Taurus	o Touro
79	Telescopium	o Telescópio
80	Triangulum	o Triângulo
81	Triangulum Australe	o Triângulo Austral (Triângulo do Sul)
82	Tucana	o Tucano
83	Ursa Major	a Ursa Maior
84	Ursa Minor	a Ursa Menor
85	Vela	o Velame (do navio)
86	Virgo	a Virgem
87	Volans	originalmente Piscis Volans, o Peixe-Voador
88	Vulpecula	a Raposa, o raposinho, originalmente Vulpecula cum Anser, a Raposa com o Ganso



Atividade - A Esfera Celeste

Nesta atividade vamos aprender a identificar os principais elementos da esfera celeste e como podemos utilizá-la para encontrar a posição das estrelas e planetas. Para tanto, vamos utilizar o simulador da esfera celeste que pode ser acessado por meio do QR Code na Figura 6.6.



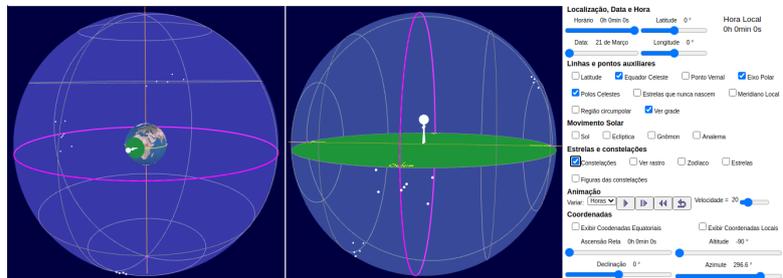
Figura 2.10: <https://scatena.sites.ufsc.br/astrologia/esfera-celeste/index.xhtml>

Você pode clicar com o botão esquerdo do mouse em qualquer uma das janelas de visualização e a arrastá-lo para mudar o ponto de vista. Você pode utilizar o botão de rolagem também para aproximar ou afastar as imagens.

À direita você encontrará os menus de controle, nos quais você pode definir a posição do observador e horário, linhas imaginárias auxiliares, o movimento do Sol pela esfera celeste, a exibição de constelações e as coordenadas celestes, bem como a possibilidade de animação.

Parte 1 - Movimento das estrelas

1. Clique com o botão esquerdo do mouse na janela da esquerda e rotacione a esfera celeste até que você consiga ver o observador sobre a Terra.
2. No menu **Linhas e pontos auxiliares** selecione as opções *Eixo Polar* e *Equador Celeste*. No menu **Estrelas e constelações**, selecione a opção *Constelações*. Com isso você deve obter uma visualização como indicado pela figura abaixo.



3. Note que o Equador Terrestre está destacado em amarelo, e o Equador Celeste é indicado pela linha rosa. O Equador Celeste pode ser imaginado como uma extensão do Equador Terrestre, que cruza a Esfera Celeste. No menu **Animação**, clique em ▶. Identifique os pontos em torno dos quais as constelações parecem girar. Clique em *Polos Celestes*, no menu **Linhas e pontos auxiliares** para conferir sua resposta.
4. Vejamos agora como observadores em pontos diferentes do planeta observam o movimento das estrelas. Sem cessar a animação, no menu **Localização, Data e Hora**, altere a latitude do observador para -36° . O que aconteceu com os polos celestes? Ainda é possível observar ambos os polos celestes acima do horizonte?
5. No menu **Linhas e pontos auxiliares**, selecione a opção “Região circumpolar”. O que você pode dizer sobre as estrelas desta região? Clique na opção “Ver rastro”, no menu *Estrelas e constelações* e verifique a trajetória dessas estrelas ao longo do dia. Existe algum momento no qual elas estão abaixo da linha do horizonte?

6. As estrelas *circumpolares* são estrelas que nunca nascem ou se poem, estão sempre no céu, mas isso depende do local de observação. Podemos dizer que a constelação do Cruzeiro do Sul é uma constelação circumpolar para a latitude de -35° ?
7. A constelação exibida do lado oposto ao Cruzeiro do Sul (Figura 2.11) é a constelação de Cassiopeia. Encontre o menor valor da latitude para que a constelação de Cassiopeia seja circumpolar.

Parte 2 - Coordenadas Celestes

Vamos explorar agora as coordenadas locais. Para tanto, reinicie a simulação clicando em reiniciar (↺).

1. No menu **Coordenadas**, selecione a opção *Exibir Coordenadas Locais* e ajuste a *altitude* e o *azimute* para 0° . Um ponto vermelho marcará a posição de uma estrela com essas coordenadas. Onde encontra-se esta estrela?
2. Clique em “Constelações” no menu **Estrelas e constelações** e identifique a constelação do “Cruzeiro do Sul”. Alterando os valores de altitude e azimute, posicione a estrela vermelha em cima de *Alpha Crucis*. Qual o valor encontrado para as coordenadas?
Altitude =
Azimute =
3. Altere a latitude para -25° e determine os valores das coordenadas locais de Alpha Crucis novamente. Veja que dependendo da posição na Terra, o valor das coordenadas locais se altera.
4. Selecione a opção “Meridiano Local”. Ajuste o horário até que Alpha Crucis esteja cruzando o meridiano e determine a sua altitude.
Altitude =
5. Selecione a opção “Ver rastro” no menu **Estrelas e constelações** e inicie a animação (▶). Em qual momento da trajetória da estrela sua altitude é maior?

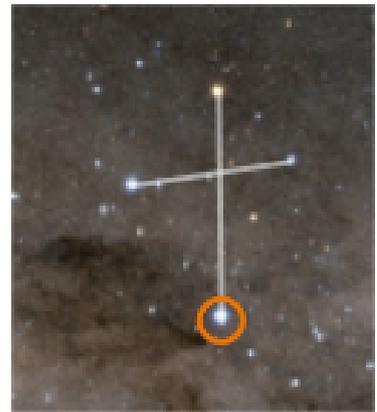


Figura 2.11: Algumas estrelas da constelação do Cruzeiro do Sul. A estrela circulado de laranja é chamada de *Alpha Crucis*.

O Meridiano Local é a linha imaginária que cruza o céu ligando o ponto cardeal norte ao ponto cardeal sul, passando pelo zênite.

Parte 3 - Determinação da Latitude

Existe uma relação direta entre a altitude dos polos celestes e a latitude de um dado local na Terra. Vamos verificar como é possível determinar a latitude de um local identificando o polo celeste. Vamos explorar agora as coordenadas locais. Para tanto, reinicie a simulação clicando em reiniciar (↺).

1. No menu **Linhas e pontos auxiliares**, selecione as opções “Equador Celeste”, “Eixo Polar” e “Polos Celestes”. Ajuste a latitude para o valor da sua cidade.

2. Selecione a opção “Exibir Coordenadas Locais” no menu **Coordenadas**. Ajuste as coordenadas de altitude e azimute de modo que a estrela vermelha coincida com o polo celeste visível.

Altitude =

Azimute =

3. Compare o valor obtido para a altitude com o valor da latitude. Eles são iguais (ou próximos)?
4. Selecione a opção “Latitude” no menu **Linhas e pontos auxiliares** para exibir o ângulo de latitude. Vemos, portanto, que se conseguirmos medir o ângulo entre o polo celeste e o ponto cardeal correspondente, conseguiremos determinar nossa latitude. Altere os valores de latitude para verificar isso.

Aproveite para explorar a simulação e ver como o céu parece diferente para observadores em outros locais. É um exercício importante tentar conciliar as duas visões diferentes (geocêntrica e topocêntrica). Um observador no Polo Norte é sempre um bom ponto de partida para entender como o céu se movimenta ao longo de um dia.

O Movimento Aparente do Sol

O movimento diário do Sol talvez seja o mais fácil de notarmos: todos os dias o Sol nasce, fica a pino no meio-dia e se põe. Será?

É comum ouvirmos dizer que o Sol nasce no Leste e se põe no Oeste, mas isso não ocorre sempre. No entanto, isso realmente acontece em duas épocas do ano, que são chamadas de *Equinócios*. Na verdade, existem também ocasiões nas quais o Sol, em determinadas latitudes, não chega nem a nascer (ou se por). Neste capítulo vamos entender melhor o movimento aparente do Sol, sua relação com as estações do ano, duração do dia e duração do ano.

Antes de tudo, é necessário relembrarmos uma condição importante utilizada para descrever as estrelas fixas numa Esfera Celeste: elas estão tão longe de nós que mal conseguimos notar seu movimento. No entanto, o Sol não é uma estrela distante, é a estrela mais próxima de nós.

Para termos uma ideia de comparação (voltaremos nisso mais tarde, quando discutirmos as distâncias estelares), a luz do Sol leva cerca de 8 minutos para chegar à Terra, enquanto a luz da estrela mais próxima do Sol leva cerca de **4 anos** para chegar até aqui! Então é possível ver que a distância entre as estrelas realmente é muito grande e não podemos ignorar o fato de estarmos próximos ao Sol.

Isso faz com que o Sol apresente um movimento na esfera celeste diferente das outras estrelas. É sempre importante lembrar que a esfera celeste **não existe**. É apenas uma forma de descrevermos a posição e o movimento dos astros do nosso ponto de vista aqui na Terra.

3.1 O movimento diário do Sol

Vamos começar notando o movimento de rotação terrestre. Nosso planeta demora aproximadamente 23 horas e 56 minutos para completar uma volta em torno do seu próprio eixo **em relação às estrelas de fixas da esfera celeste**. Uma forma de verificarmos isso é ver quanto tempo uma estrela leva para cruzar o meridiano local duas vezes. Na Figura 3.1, à esquerda, podemos ver a estrela Alpha Crucis exatamente em cima do meridiano local, no dia 21 de Março às 0h26m. A estrela voltará para o mesmo local após 23h56m (Figura 3.1, imagem do meio). Após 24h a estrela terá passado do meridiano local (olhe atentamente a Figura 3.1, à direita e compare a posição de Alpha Crucis nas outras duas).

Com isso, as estrelas fixas na Esfera Celeste vão nascer 4 minutos mais cedo todos os dias, fazendo com que o céu se movimente ao longo do ano. Após 1 ano, todas as estrelas estarão novamente no mesmo lugar, no mesmo horário.*

Para o Sol, no entanto, isso não acontece. Como o Sol está muito mais próximo do que as outras estrelas, o movimento dele em relação à Terra

* Vale lembrar que o movimento de rotação da Terra não é exatamente constante, então existem pequenas correções acerca desses valores.

3.1	O movimento diário do Sol	27
3.1.1	O dia solar	28
3.1.2	Pontos Cardeais	29
3.2	O movimento anual do Sol	33
3.2.1	A Eclíptica	33
3.2.2	O Zodíaco	33
3.3	Estações do Ano	34
3.3.1	Equinócios e Solstícios	34
3.3.2	Variação da duração do dia com as estações do ano	36
3.3.3	As Estações do Ano	36

Quando estudarmos as órbitas estelares e seu espectro veremos que existem técnicas que permitem detectar alguns movimentos de estrelas distantes.

Este intervalo de tempo é chamado de *dia sideral*.

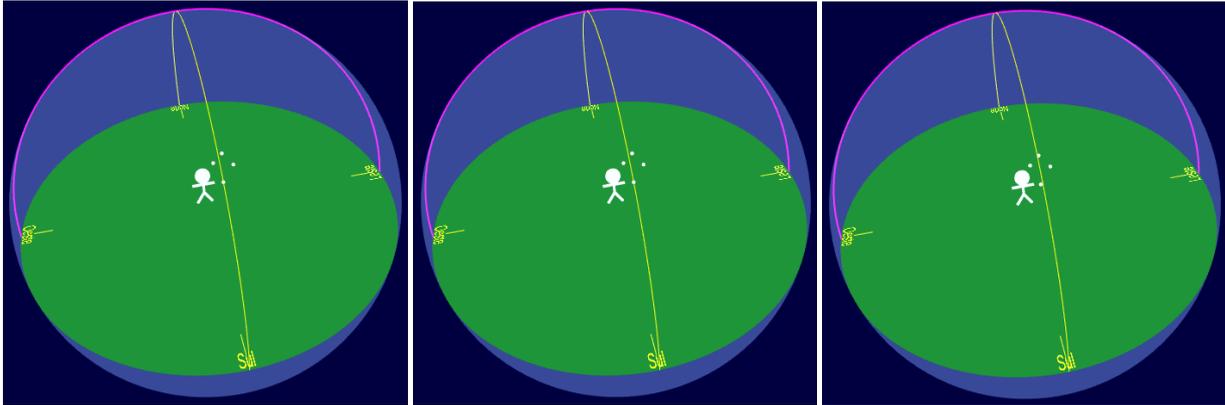


Figura 3.1: Posição da estrela Alpha Crucis, da esquerda para direita: 21 de Março, às 0h26m, cruzando o meridiano local; 22 de Março, às 0h22m, cruzando o meridiano local; 22 de Março, às 0h26m, já tendo cruzado o meridiano local.

fará com que o tempo entre duas passagens meridianas do Sol seja maior. Assim, o *dia solar* será maior que o *dia sideral*, como veremos a seguir.

3.1.1 O dia solar

Uma vez que verificamos que o ponto mais alto na trajetória do Sol ao longo do dia é aquele no qual ele cruza o meridiano, podemos fazer a nossa primeira definição, sobre o *meio-dia*.

Definição 3.1.1 O *meio-dia local* é o instante no qual o Sol está no ponto mais alto da sua trajetória, isso é, quando ele atravessa o Meridiano Local e a sombra projetada por um gnômon for a menor possível naquele dia.

Embora hoje saibamos que a Terra gira em torno do Sol, é inegável que, durante um dia, vemos o Sol nascer de um lado e se pôr do outro (ao menos para quem não está nos polos, como veremos). Este movimento periódico do Sol nos permite definir a duração de um *dia Solar*.

Poderíamos pensar em contar o dia marcando o intervalo sucessivo de dois “nascimentos” do Sol, e chamar este período de *dia*. Contudo, é muito difícil notar o exato momento em que o Sol está despontando no horizonte, de modo que existe uma definição mais prática do dia, a qual utilizaremos:

Definição 3.1.2 O *dia solar* é definido como o intervalo entre dois meios-dias. Este intervalo varia ao longo do ano, mas o seu valor médio é chamado de *dia solar médio*, e tem 24h de duração.

Quando estudarmos as Leis de Kepler no Capítulo 5, veremos que a velocidade dos planetas ao redor do Sol varia de acordo com a distância entre estes, fazendo com que a duração do dia na Terra sofra alterações, não sendo exatamente 24 horas.

Note que este “meio-dia”, definido desta maneira, é o *meio-dia local*, ou seja, ele não coincide necessariamente com o *meio-dia civil*, aquele dado pelo fuso-horário do local onde você se encontra (de acordo com o Horário de Brasília, por exemplo). A variação entre o meio-dia local e o meio-dia civil pode chegar a 16 minutos de diferença.

3.1.2 Pontos Cardeais

É possível determinarmos as direções dos pontos cardeais observando o movimento diário do Sol. Para isso, vamos utilizar um dos instrumentos astronômicos mais antigos que existem, o *gnômon*. Já falamos dele quando discutimos o experimento de Eratóstenes para a determinação do raio terrestre. Veremos agora outra utilidade do *gnômon*.

Conforme vimos na atividade anterior, uma estrela terá a sua altitude máxima quando ela atravessar o meridiano local. Com o Sol não seria diferente, o ponto mais alto da sua trajetória é quando ele passa pelo meridiano local. Desta forma, se formos capazes de determinar o instante no qual o Sol passa pelo meridiano, a sombra projetada pelo *gnômon* estará na direção norte-sul, conforme a Figura 3.3

Assim, um método possível para determinar a direção dos pontos cardeais é fincar uma haste no chão e marcar a posição da sua sombra ao longo do dia. Quando o Sol estiver em seu ponto mais alto da trajetória, ele estará passando pelo meridiano e também projetará a sombra de menor comprimento. Você pode conferir na Figura 3.6 a sombra projetada pelo *gnômon* ao longo do dia.

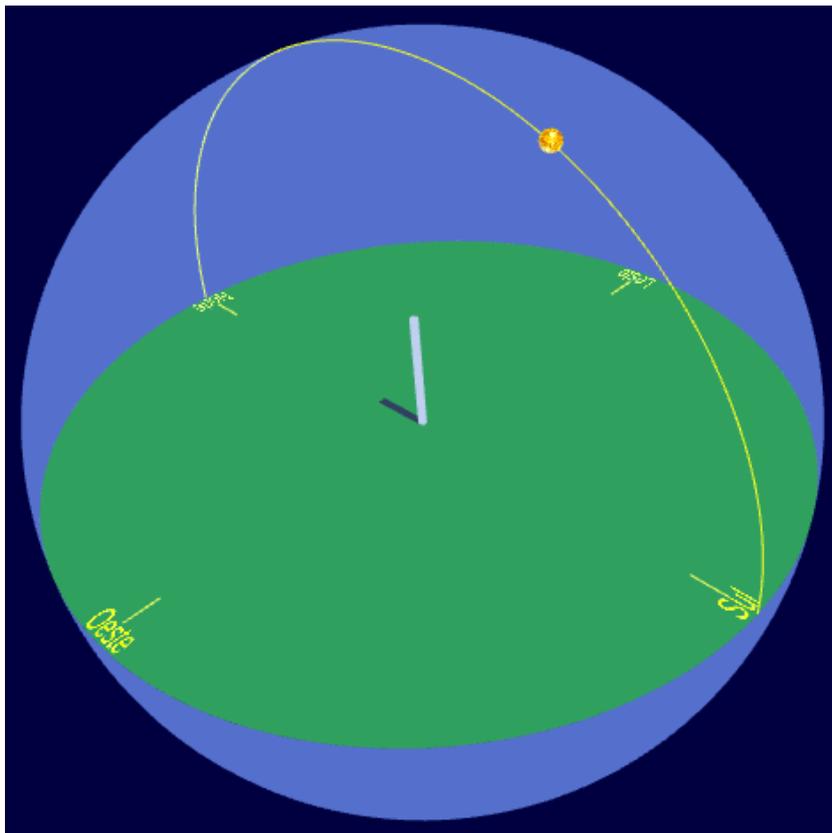


Figura 3.3: No ponto mais alto de sua trajetória diária, o Sol cruza a linha do meridiano, marcando a direção norte-sul.

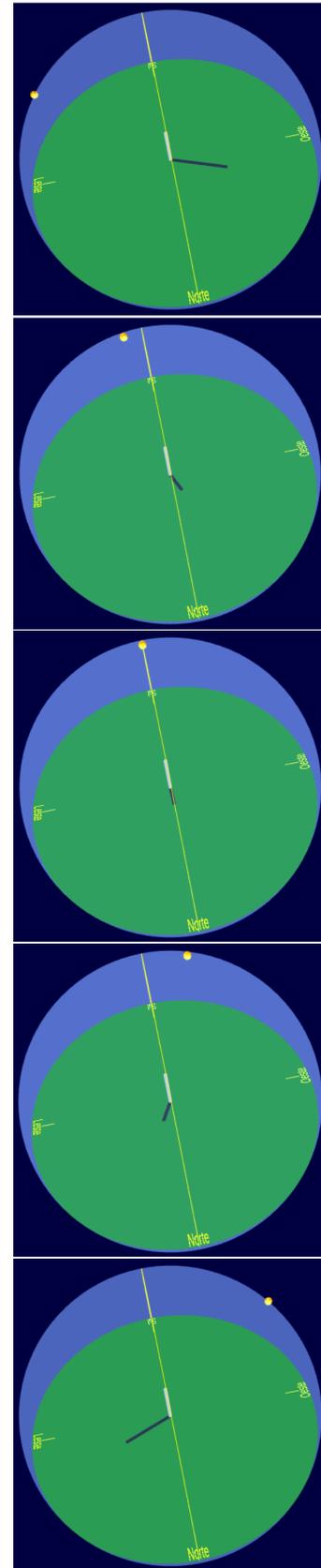


Figura 3.2: Sequência de imagens mostrando a trajetória do Sol ao longo do dia e a projeção da sombra pelo *gnômon*. Cada imagem representa a posição do Sol num determinado horário. De cima para baixo: 09h, 11h, 12h, 13h e 15h.



Figura 3.4: https://scatena.sites.ufsc.br/astrofonia/esfera_celeste/index.xhtml

Atividade - O Gnômon

Nesta atividade iremos explorar o movimento solar por meio da sombra projetada por um gnômon. Veremos que muitas informações importantes podem ser encontradas, seja analisando a sombra num dado instante, ao longo do dia ou mesmo ao longo de um ano. Para esta atividade, utilizaremos a simulação computacional da Esfera Celeste, a qual pode ser acessada por meio do QR Code na Figura 3.4. Você pode clicar com o botão direito do mouse sobre as janelas de visualização para mudar o ponto de vista, e utilizar o botão de rolagem para aproximar ou afastar a imagem (mesmo enquanto a simulação está sendo animada).

Parte 1

No menu **Localização, Data e Hora**, ajuste a data para 5 de Maio. No menu **Linhas e pontos auxiliares**, selecione as opções *Equador Celeste*, *Polos Celestes* e *Meridiano Local*. Por fim, no **Movimento Solar**, selecione as opções *Sol* e *Gnômon*.

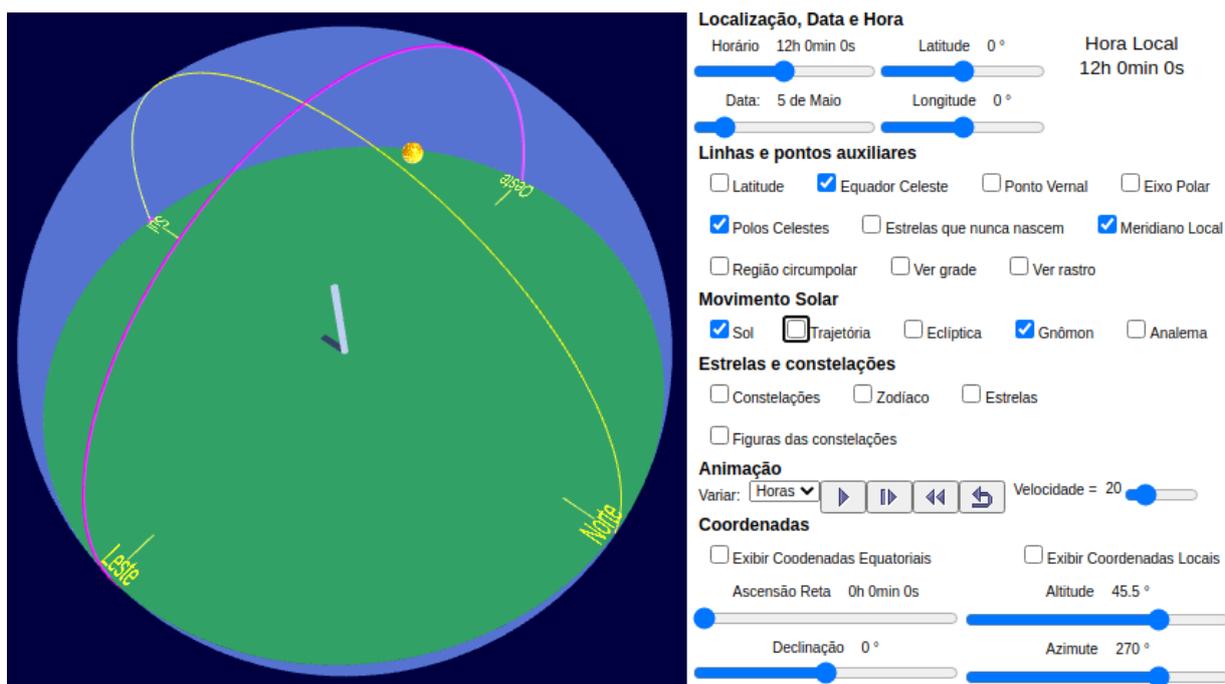


Figura 3.5: Análise da trajetória do Sol e sombra projetada por um gnômon.

1. Havíamos definido o meio-dia local como o horário no qual o Sol está cruzando o meridiano local. Qual o horário local? O Sol está cruzando o meridiano?
2. Ajuste a barra deslizante do *Horário* para encontrar em qual instante o Sol cruza o meridiano. Esse é o horário do meio-dia local. Quantos minutos de diferença há entre o meio-dia local e o meio dia marcado no relógio?
3. Ajuste a barra deslizante do *Horário* para encontrar em qual instante o Sol está nascendo (metade do disco solar está acima do horizonte).

Qual o horário encontrado? O Sol encontra-se exatamente no ponto cardeal leste?

- Ajuste a barra deslizante do *Horário* para encontrar em qual instante o Sol está se pondo (metade do disco solar está abaixo do horizonte). Qual o horário encontrado? O Sol encontra-se exatamente no ponto cardeal oeste?
- Quantas horas se passaram do nascer ao poente?

Vemos, portanto, que o Sol não nasce necessariamente no Leste e nem se põe sempre no Oeste. Vemos também que o Sol não está à pino (no zênite) ao meio-dia e, ainda mais, o meio-dia local não coincide necessariamente com o meio-dia civil.

Parte 2

Vamos marcar a trajetória do Sol, selecionando a opção *Trajatória* no menu **Movimento Solar**. Inicie a animação clicando em *iniciar* (▶), e pause (clicando em ||) quando o Sol completar uma volta, como na Figura 3.6.

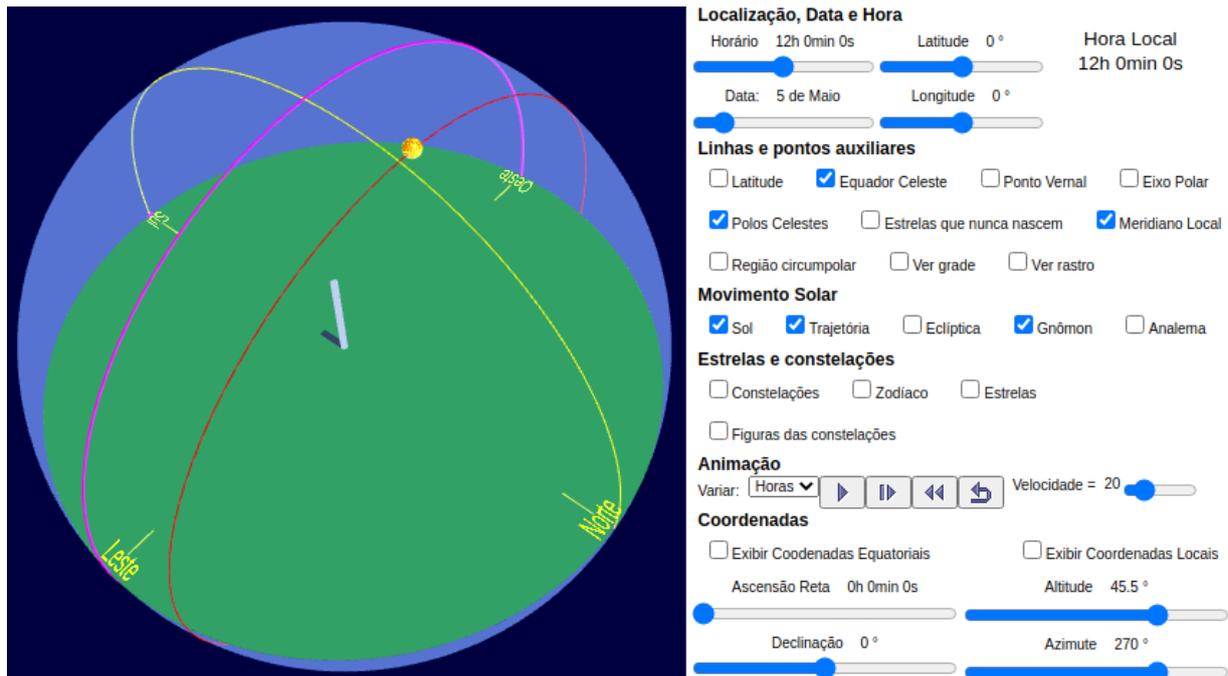


Figura 3.6: Análise da trajetória do Sol e sombra projetada por um gnômon.

- A linha vermelha exibida mostra a trajetória do Sol naquele dia. Vemos que essa trajetória é paralela ao Equador Celeste, mostrado em rosa. No menu **Localização, Data e Hora**, utilize a barra deslizante da *Latitude* para mudar a latitude para um valor de -30° . A trajetória do Sol continua paralela ao Equador Celeste?
- Como na **Parte 1**, determine o horário no qual o Sol nasce e se põe, para esta latitude. Quantas horas se passaram do nascer ao poente?
- Altere a latitude novamente, mas agora para um valor positivo de $+30^\circ$. A trajetória do Sol continua paralela ao Equador Celeste?

4. Determine o horário no qual o Sol nasce e se põe, para esta latitude. Quantas horas se passaram do nascer ao poente?
5. Os intervalos entre o nascer e o poente são os mesmos para as 3 latitudes verificadas?

Vemos, portanto, que a duração do *dia claro* (tempo entre o nascer e o poente) varia de acordo com a latitude.[†]

Parte 3

Para latitudes maiores que $66,5^\circ$ ou menores que $-66,5^\circ$, dependendo da época do ano conforme veremos na próxima atividade, ocorre um fenômeno interessante. Vamos verificá-lo agora. Para tanto, ajuste a data para o dia 30 de Junho.

1. Altere a latitude para um valor de $+80^\circ$. A trajetória do Sol continua paralela ao Equador Celeste?
2. Inicie a animação e observe uma trajetória completa do Sol. Em qual horário ele nasce e se põe?
3. Altere a latitude para um valor de -80° . A trajetória do Sol continua paralela ao Equador Celeste?
4. Inicie a animação e observe uma trajetória completa do Sol. Em qual horário ele nasce e se põe?

Podemos notar que nestas situações, um observador nos polos não verá o Sol nascer ou se pôr. O observador no Polo Norte verá o Sol sempre no céu, enquanto o observador no Polo Sul não verá Sol nenhum. Seis meses depois, conforme veremos, essa situação se inverte. Este é o chamado *Sol da Meia-Noite*.

[†] Vale notar que o tempo total do dia, entre um meio-dia e outro, continua sendo de 24h. Somente a distribuição entre dia e noite que varia.

3.2 O movimento anual do Sol

3.2.1 A Eclíptica

Vamos voltar à nossa esfera celeste. Conforme havíamos comentado, devido a proximidade do Sol ele parece se movimentar pela esfera celeste, ao contrário das outras estrelas que parecem fixas. Ainda, devido à inclinação do eixo de rotação terrestre, a trajetória que o Sol descreve na esfera celeste será inclinada de aproximadamente $23,5^\circ$ em relação ao plano do Equador Celeste. Chamamos de *Eclíptica* a linha descrita pela trajetória do Sol ao longo do ano, exibida em azul na Figura 3.7.

O movimento do Sol pela eclíptica ao longo do ano não é uniforme, sendo mais rápido quando a Terra está mais próxima do Sol (em meados de Janeiro) e sendo mais lento quando a Terra está mais distante do Sol (em Junho).

Outros corpos do Sistema Solar, como os planetas e a nossa Lua, também encontram-se próximos ao plano definido pela eclíptica, então nunca veremos um planeta próximo dos polos celestes, por exemplo. Eles estarão sempre ao redor da linha da eclíptica já que orbitam o Sol em planos muito próximos. Veremos isso em mais detalhes quando discutirmos os planetas do Sistema Solar.

A trajetória do Sol ao longo da eclíptica apresenta 4 pontos de nosso interesse:

- ▶ O ponto no qual o Sol cruza o equador celeste indo do hemisfério sul da esfera celeste para o norte é chamado de *ponto vernal* – em 21 de Março;
- ▶ O ponto no qual o Sol fica mais ao norte da esfera celeste – em 21 de Junho;
- ▶ O ponto oposto ao ponto vernal, no qual o Sol cruza o equador celeste indo do hemisfério norte da esfera celeste para o sul é chamado de *ponto de Libra* (embora atualmente esteja na constelação de Virgem!) – em 23 de Setembro;
- ▶ O ponto no qual o Sol fica mais ao sul da esfera celeste – em 21 de Dezembro.

Vale ressaltar que essas datas variam um pouco, e os horários exatos no qual o Sol passa por esses pontos também, já que o tempo que o Sol leva para retornar ao ponto vernal não é exatamente igual a 365 dias, mas sim cerca de 365 dias e 6 horas. Desta forma, a cada ano o Sol cruza esses pontos 6 horas mais tarde que no ano anterior, até que tenhamos um ano bissexto e o calendário se ajuste novamente à trajetória do Sol na eclíptica.

3.2.2 O Zodíaco

Conforme o Sol segue a sua trajetória pela eclíptica ao longo do ano, ele passa por diversas constelações da esfera celeste. É sempre bom lembrarmos que o Sol está muito mais próximo da Terra do que as outras estrelas, então o Sol passa à frente das estrelas fixas da esfera celeste.

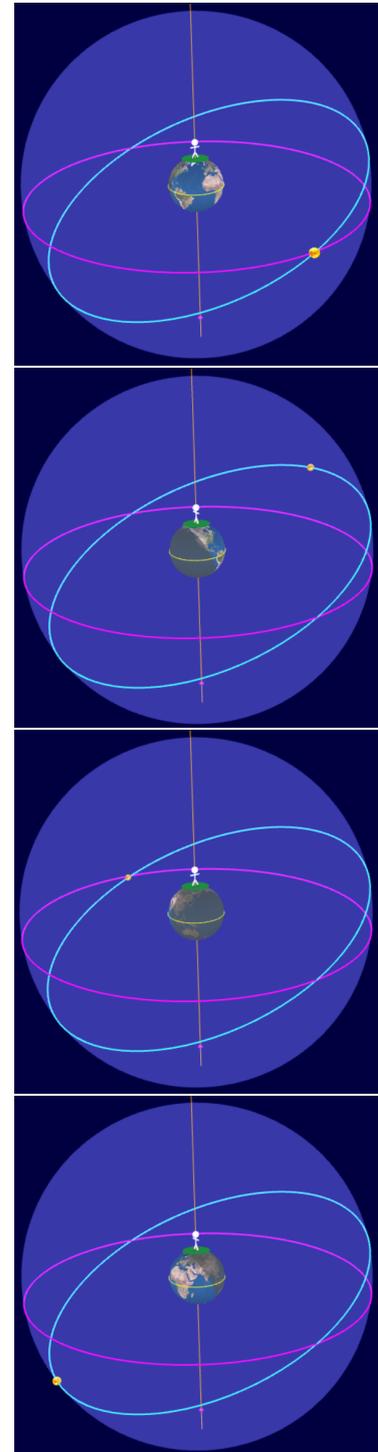


Figura 3.7: A posição do Sol na eclíptica ao longo do ano. De cima para baixo: 21 de Março, 21 de Junho, 21 de Setembro e 21 de Dezembro.

Como a eclíptica tem uma posição muito bem definida, as constelações pelas quais o Sol passa ao longo do ano são sempre as mesmas, na mesma ordem. Historicamente foi atribuída uma constelação por mês, dando origem às 12 constelações do Zodíaco[‡]. De acordo com as divisões das constelações definidas pela União Astronômica Internacional, atualmente existem 13 constelações na eclíptica. A Tabela 3.1 mostra as constelações e o tempo que o Sol fica em cada uma delas.

Tabela 3.1: As 13 constelações do Zodíaco. Note a presença da constelação de *Ophiuchus*, conhecida como a 13ª constelação do zodíaco.

Nome	Limites das Constelações	Estadia do Sol	Estrela mais brilhante
Aries	19 de Abril – 13 de Maio	25 dias	Hamal
Taurus	14 de Maio – 19 de Junho	37 dias	Aldebaran
Gemini	20 de Junho – 20 de Julho	31 dias	Pollux
Cancer	21 de Julho – 9 de Agosto	20 dias	Al Tarf
Leo	10 de Agosto – 15 de Setembro	37 dias	Regulus
Virgo	16 de Setembro – 30 de Outubro	45 dias	Spica
Libra	31 de Outubro – 22 de Novembro	23 dias	Zubeneschamali
Scorpius	23 de Novembro – 29 de Novembro	7 dias	Antares
Ophiuchus	30 de Novembro – 17 de Dezembro	18 dias	Rasalhague
Sagittarius	18 de Dezembro – 18 de Janeiro	32 dias	Kaus Australis
Capricornus	19 de Janeiro – 15 de Fevereiro	28 dias	Deneb Algedi
Aquarius	16 de Fevereiro – 11 de Março	24 dias	Sadalsuud
Pisces	12 de Março – 18 de Abril	38 dias	Eta Piscium

3.3 Estações do Ano

3.3.1 Equinócios e Solstícios

Vamos analisar o movimento do Sol nestes quatro momentos distintos ao longo do ano, para um observador em uma latitude de -27° .

► 21 de Março - Equinócio de Março

Podemos ver na primeira imagem da Figura 3.7 qual a posição do Sol na esfera celeste no dia 21 de Março. A primeira imagem na Figura 3.8 mostra a posição do Sol para um observador na latitude -27° às 06h da manhã.

Note que o Sol está nascendo **exatamente** no ponto cardeal Leste. Ainda, vemos que o equador celeste cruza o céu de Leste a Oeste e, ao longo desse dia, o Sol seguirá exatamente esta trajetória e irá se pôr exatamente no ponto cardeal Oeste.

Neste dia, os períodos diurno e [§] noturno possuem a mesma duração, de 12 horas. Vem daí o nome *equinócio*, do latim *aequus* (igual) e *nox* (noite), significando *noite igual* (ao dia).

Para os observadores do hemisfério norte dá-se início a Primavera, e então é chamado de *Equinócio da Primavera*, enquanto no hemisfério sul inicia-se o Outono, sendo chamado de *Equinócio de Outono*.

[‡] A palavra *Zodíaco* é derivada do grego, que significa *ciclo de animais*. Podemos notar o mesmo prefixo *zoo* utilizado em *zoológico*, por exemplo. Note também que as constelações do Zodíaco se referem em sua maioria a animais.

[§] Chamaremos de *diurno* aquele período no qual o Sol está no céu, e *noturno* o período sem Sol.

► 21 de Junho - Solstício de Junho

Podemos ver na segunda imagem da Figura 3.7 qual a posição do Sol na esfera celeste no dia 21 de Junho. A segunda imagem na Figura 3.8 mostra a posição do Sol para um observador na latitude -27° às 06h50m da manhã.

Note que o Sol **não** está nascendo exatamente no ponto cardinal Leste, mas sim mais ao norte dele (no hemisfério norte o Sol nasce mais ao sul). Ainda, vemos que a trajetória do Sol (em vermelho) não coincide com o equador celeste, mas é paralela a este.

Neste dia o Sol nasce às 06h50m e se põe às 17h10 (aproximadamente), então o *período diurno é mais curto* que o período noturno. Esta é também a posição máxima ao norte que o Sol chega, antes de seguir para o sul. Dizemos então que o Sol para e volta, daí o nome *solstício*, do latim *sol* (Sol) e *sistere* (parado).

Para os observadores do hemisfério norte dá-se início o Verão, e então é chamado de *Solstício de Verão*, enquanto no hemisfério sul inicia-se o Inverno, sendo chamado de *Solstício de Inverno*.

► 23 de Setembro - Equinócio de Setembro

Podemos ver na terceira imagem da Figura 3.7 qual a posição do Sol na esfera celeste no dia 20 de Setembro[¶]. A terceira imagem na Figura 3.8 mostra a posição do Sol para um observador na latitude -27° às 06h da manhã.

Note que o Sol está nascendo novamente **exatamente** no ponto cardinal Leste. Ainda, vemos que o equador celeste cruza o céu de Leste a Oeste e, ao longo desse dia, o Sol seguirá exatamente esta trajetória e irá se pôr exatamente no ponto cardinal Oeste, assim como no outro equinócio. Neste dia, os períodos diurno e noturno possuem a mesma duração, de 12 horas.

Para os observadores do hemisfério norte dá-se início o Outono, e então é chamado de *Equinócio do Outono*, enquanto no hemisfério sul inicia-se a Primavera, sendo chamado de *Equinócio da Primavera*.

► 21 de Dezembro - Solstício de Dezembro

Podemos ver na quarta imagem da Figura 3.7 qual a posição do Sol na esfera celeste no dia 21 de Junho. A quarta imagem na Figura 3.8 mostra a posição do Sol para um observador na latitude -27° às 05h05m da manhã.

Note que o Sol **não** está nascendo exatamente no ponto cardinal Leste, mas sim mais ao norte dele (no hemisfério norte o Sol nasce mais ao sul). Ainda, vemos que a trajetória do Sol (em vermelho) não coincide com o equador celeste, mas é paralela a este.

Neste dia o Sol nasce às 05h05m e se põe às 18h50 (aproximadamente), então o **período diurno é mais longo** que o período noturno. Esta é também a posição máxima ao sul que o Sol chega, antes de seguir para o norte. Para os observadores do hemisfério

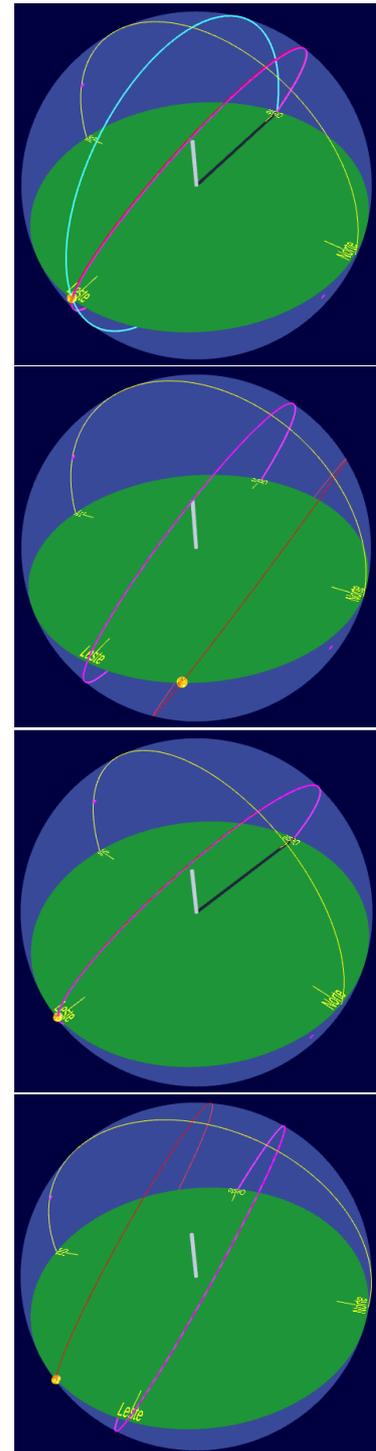


Figura 3.8: De cima para baixo: nascer do Sol no dia do Equinócio de Março, às 06h; nascer do Sol no dia do Solstício de Junho, às 6h50m; nascer do Sol no dia do Equinócio de Setembro, às 06h; nascer do Sol no dia do Solstício de Dezembro, às 5h05m.

[¶] A simulação computacional da Esfera Celeste em questão não leva em conta as variações na velocidade do Sol ao longo da eclíptica, de modo que o dia do Equinócio de Setembro não coincide exatamente com o observado, 23 de Setembro.

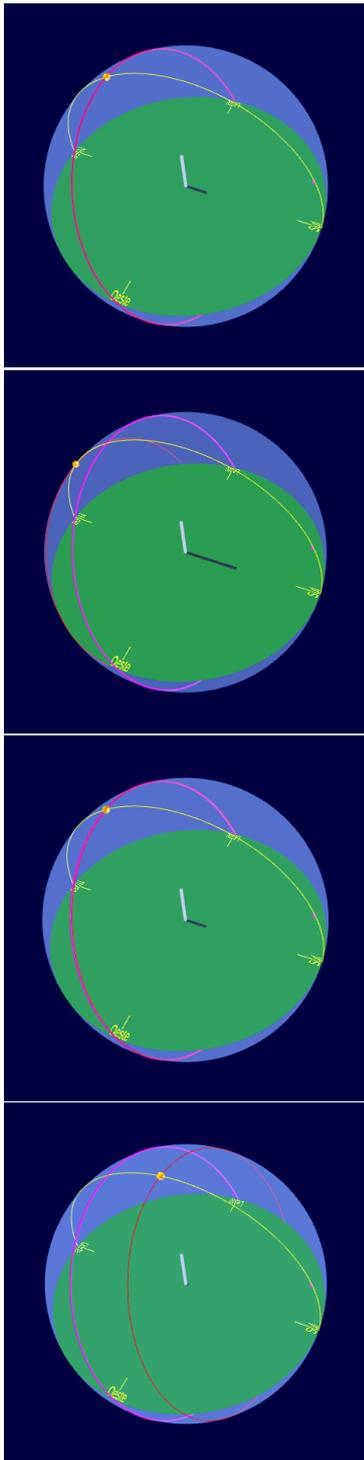


Figura 3.9: A sombra de um gnômon numa latitude de -27° ao meio-dia em diferentes datas. De cima para baixo: 21 de Março, 21 de Junho, 23 de Setembro e 21 de Dezembro.

Figura 3.10: Pontos de vista geocêntrico (à esquerda) e heliocêntrico (à direita). As figuras não estão em escala.

norte dá-se início o Inverno, e então é chamado de *Solstício de Inverno*, enquanto no hemisfério sul inicia-se o Verão, sendo chamado de *Solstício de Verão*.

3.3.2 Variação da duração do dia com as estações do ano

Nos dias de solstício, a duração dos períodos diurno e noturno são diferentes. Podemos analisar a sombra de um gnômon ao meio-dia durante os equinócios e solstícios e, desta forma, identificar o início das estações.

Quando o período diurno é mais longo (solstício de verão), o Sol descreve uma trajetória no céu alcançando sua máxima altitude possível no meio-dia. Neste instante, a sombra projetada por um gnômon é a menor possível no ano, marcando o início do verão.

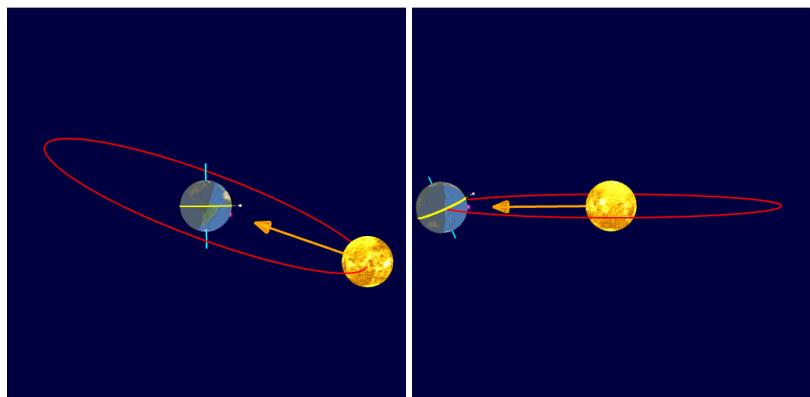
Da mesma maneira, quando o período diurno é o menor possível (solstício de inverno), a sombra projetada por um gnômon ao meio-dia será a maior no ano, marcando o início do inverno.

As sombras projetadas por um gnômon durante o meio-dia dos dois equinócios será de mesmo tamanho. A Figura 3.9 nos mostra a variação no tamanho da sombra de um gnômon ao meio-dia ao longo do ano.

3.3.3 As Estações do Ano

Observando a posição do Sol ao longo do ano para uma mesma latitude, pudemos ver que a inclinação da eclíptica em relação ao equador celeste nos traz dois efeitos: períodos diurnos e noturnos com duração diferente e ângulos de incidência da luz do Sol diferentes também (como pudemos verificar ao analisarmos a sombra projetada por um gnômon em épocas diferentes do ano). Estes dois efeitos combinados são os responsáveis pelas *Estações do Ano*.

Isso acontece porque a quantidade de energia que recebemos do Sol depende de quanto tempo o Sol fica no céu e também de como ela se distribui sobre o planeta de acordo com o ângulo com a qual incide. Para entendermos melhor estes aspectos, vamos analisar o que acontece ao longo de um ano do ponto de vista do Sol e do ponto de vista da Terra.



Contudo, a esfera celeste nos apresenta uma visão geocêntrica. Do ponto de vista do Sol, é a Terra quem está se movimentando ao longo de um ano, mas com um eixo de rotação inclinado cerca de $23,5^\circ$ em relação à perpendicular da eclíptica. Compare as duas imagens da Figura 3.10 e perceba que elas são equivalentes. Portanto, **se o eixo da Terra não fosse inclinado, não teríamos estações do ano!** Veja que isso não tem relação nenhuma com a Terra estar mais afastada ou mais próxima do Sol.

Vejamos como são os solstícios e equinócios no ponto de vista heliocêntrico, e como a inclinação do eixo terrestre influencia na quantidade de energia recebida do Sol.

► Equinócio de Março

No equinócio de março (Figura 3.12), os raios solares incidem paralelamente ao plano definido pelo equador terrestre. Desta forma, um observador no equador (latitude = 0°) ao meio-dia verá o Sol exatamente acima de sua cabeça, no zênite. A altitude do Sol no equador, ao meio dia, é de 90° .

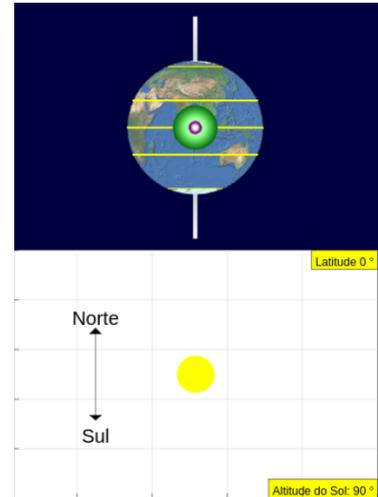
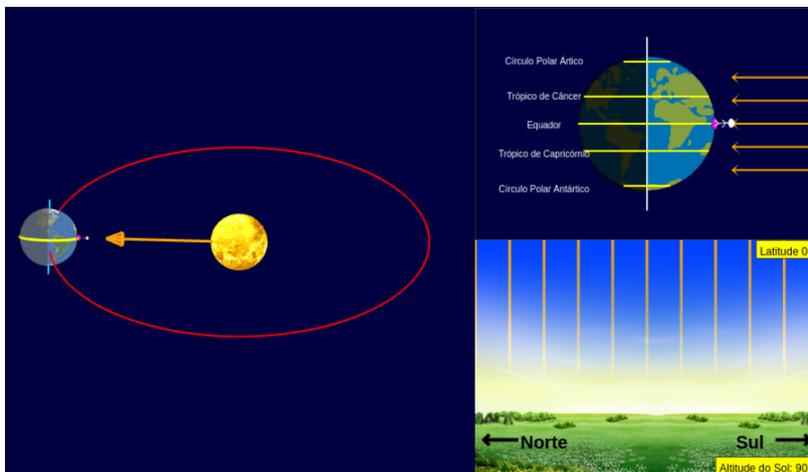


Figura 3.11: Acima: vista da Terra a partir do Sol. Podemos ver como o Sol incide exatamente sobre o equador ao meio-dia (indicado pelo ponto rosa). Abaixo: vemos a distribuição de um feixe de luz na superfície terrestre ao meio-dia.

Figura 3.12: Equinócio de março. É possível ver que os hemisférios norte e sul são iluminados de maneira igualitária.

Podemos ver na Figura 3.11 qual a visão que o Sol tem da Terra neste instante, além de uma representação de como um feixe de luz solar incide perpendicularmente à superfície terrestre.

► Solstício de Junho

No solstício de junho (Figura 3.14), os raios solares incidem $23,5^\circ$ ao norte do equador terrestre. Desta forma, a altitude do Sol no equador, ao meio-dia, é de $23,5^\circ$.

Note na Figura 3.13 como o Sol vê a Terra neste dia. A parte norte do eixo de rotação terrestre aponta em direção ao Sol, e o polo norte passa a ser visível completamente pelo Sol. Na verdade, o círculo polar ártico inteiro é visto pelo Sol (e é justamente por isso que ele é definido numa latitude de $90^\circ - 23,5^\circ = 66,5^\circ$.) Isso significa, como havíamos visto, que o Sol estará no céu o dia inteiro para qualquer observador acima da latitude de $66,5^\circ$.

O ponto rosa marcado em cima do *trópico de câncer* indica que um observador naquele local veria o Sol exatamente no zênite ao meio-dia. Observadores em latitudes maiores do que $23,5^\circ$ nunca irão ver o Sol no zênite.

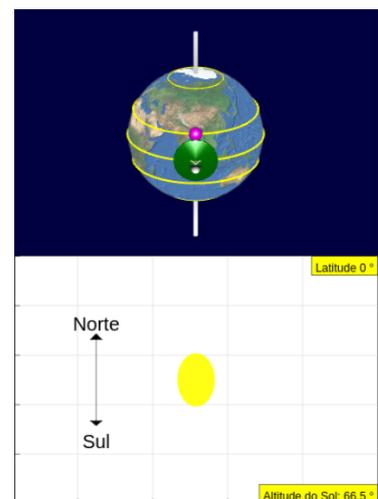
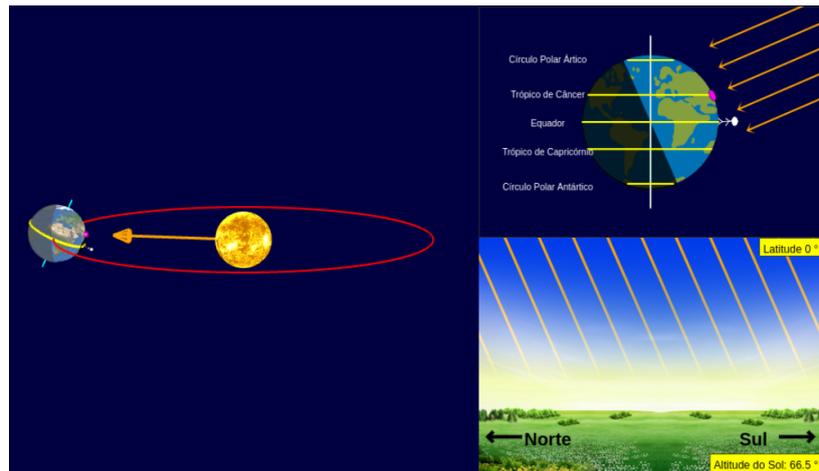


Figura 3.13: Acima: vista da Terra a partir do Sol. Podemos ver como o círculo polar ártico é completamente visível, ou seja, iluminado pelo sol. Abaixo: vemos a distribuição de um feixe de luz na superfície terrestre ao meio-dia.

Figura 3.14: Solstício de junho. Podemos ver a parte norte do eixo terrestre apontando na direção do Sol. É possível ver que o hemisfério norte é mais iluminado que o hemisfério sul nesta época. Por isso temos verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul.



Podemos ver também na imagem abaixo da Figura 3.13 como um feixe de luz do Sol é mais distribuído sobre a superfície (compare com a Figura 3.11), fazendo com que a mesma quantidade de energia se distribua por uma superfície maior e, conseqüentemente, aquecendo menos a superfície.

É importante notar que esta discussão está levando em conta um observador no equador, onde essas variações são bem menores do que aquelas observadas em latitudes fora da região tropical.

► **Equinócio de Setembro**

No equinócio de setembro (Figura 3.16), os raios solares novamente incidem paralelamente ao plano do equador terrestre. A situação é praticamente igual àquela do equinócio de março: os períodos diurno e noturno possuem a mesma duração e um observador no equador, ao meio-dia, tem o Sol no zênite. A Figura 3.15 é idêntica à

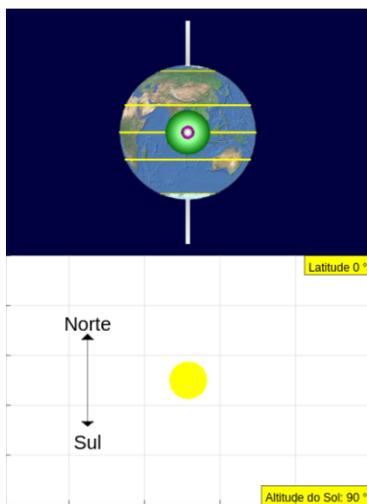


Figura 3.15: Acima: vista da Terra a partir do Sol, iluminando ambos os hemisférios de forma igualitária. Abaixo: vemos a distribuição de um feixe de luz na superfície terrestre ao meio-dia.

Figura 3.16: Equinócio de setembro. É possível ver que os hemisférios norte e sul são iluminados de maneira igualitária e como os raios solares são paralelos ao equador.

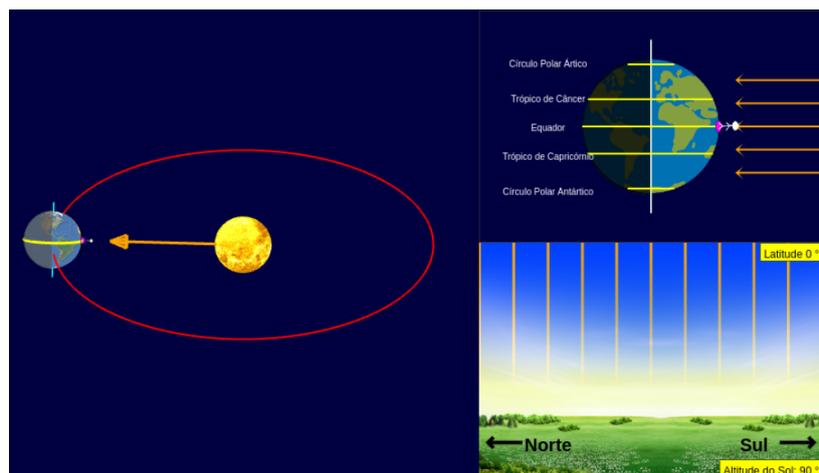


Figura 3.11, com os hemisférios norte e sul iluminados de maneira igualitária. Podemos ver também como um feixe de luz solar se distribui pela superfície terrestre.

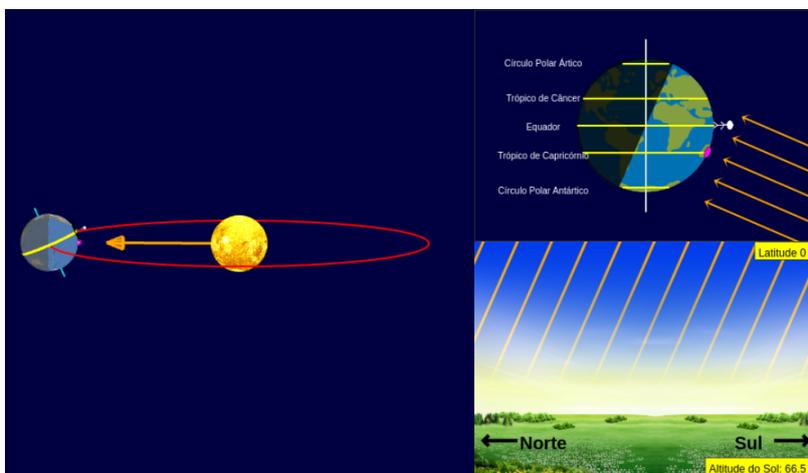
► **Solstício de Dezembro**

Isso será discutido na próxima atividade.

No solstício de dezembro (Figura 3.18), os **raios solares incidem $23,5^\circ$ ao sul do equador** terrestre. Desta forma, a altitude do Sol no equador, ao meio-dia, é de $23,5^\circ$.

Note na Figura 3.17 como o Sol vê a Terra neste dia. A parte sul do eixo de rotação terrestre aponta em direção ao Sol, e o polo sul passa a ser visível completamente pelo Sol. Assim como no solstício de junho, agora o círculo polar antártico inteiro é visto pelo Sol, e o Sol estará no céu o dia inteiro para qualquer observador abaixo da latitude de $-66,5^\circ$.

O ponto rosa marcado em cima do *trópico de capricórnio* indica que um observador naquele local veria o Sol exatamente no zênite ao meio-dia. Observadores em latitudes menores do que $-23,5^\circ$ nunca irão ver o Sol no zênite.



Podemos ver também na imagem abaixo da Figura 3.17 como um feixe de luz do Sol é mais distribuído sobre a superfície, fazendo com que a mesma quantidade de energia se distribua por uma superfície maior e, conseqüentemente, aquecendo menos a superfície.

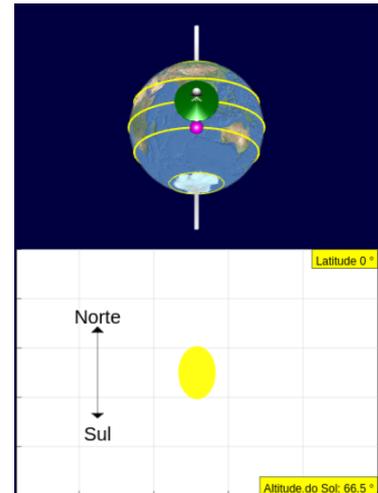


Figura 3.17: *Acima:* vista da Terra a partir do Sol. Podemos ver como o círculo polar ártico é completamente visível, ou seja, iluminado pelo sol. *Abaixo:* vemos a distribuição de um feixe de luz na superfície terrestre ao meio-dia.

Figura 3.18: Solstício de dezembro. Podemos ver a parte norte do eixo terrestre apontando na direção do Sol. É possível ver que o hemisfério norte é mais iluminado que o hemisfério sul nesta época. Por isso temos verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul.

Atividade - Estações do Ano

Vamos explorar uma simulação computacional que reproduz a posição relativa da Terra e do Sol durante um ano, o que nos permitirá verificar como observadores em latitudes diferentes percebem as estações do ano. Para tanto, acesse a simulação por meio do QR code apresentado na Figura 3.19, ou pelo link na legenda da figura.



Figura 3.19: https://scatena.sites.ufsc.br/astrologia/estacoes_ano/index.html

Parte 1

Vejamos como observadores diferentes experienciam o equinócio de março, conforme a Figura 3.20. Na janela maior, à esquerda, vemos a Terra ao centro, com o Sol emitindo luz em direção ao nosso planeta (representada pela seta amarela). A linha vermelha representa a trajetória do Sol ao longo do ano.

No canto superior direito podemos ver uma visão lateral de como esses raios solares atingem o planeta, enquanto no canto inferior direito é possível ver como os raios solares incidem sobre a superfície da Terra, indicando a altitude do Sol ao meio-dia.

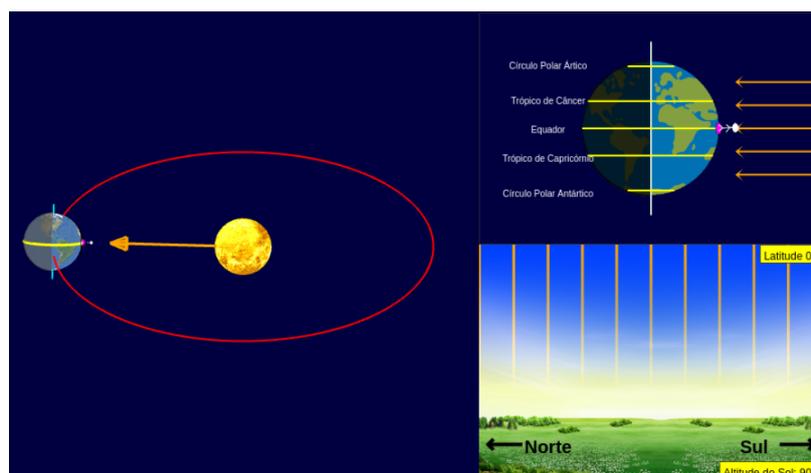


Figura 3.20: Equinócio de Março.

1. Deixe a data em *21 de Março*, e a latitude em 0° . Verifique a imagem no canto inferior direito (como na Figura 3.20). Qual a altitude do Sol neste local?
2. Altere a latitude para $+30^\circ$ e -30° . Qual a inclinação do Sol nestes locais? Elas são iguais ou diferentes?
3. Existe alguma diferença entre a direção dos feixes de luz solar para as duas latitudes utilizadas no item anterior?
4. Os equinócios podem ser utilizados para se determinar qual a latitude local. Note que os ângulos de latitude e de altitude do Sol, no equinócio, são complementares (isto é, sua soma é igual a 90°). Sabendo disso, qual deve ser a altitude do Sol durante o meio-dia de um equinócio para a sua latitude?

Podemos ver, portanto, que os equinócios são equivalentes entre os hemisférios, assim como apresentam períodos diurnos e noturnos com a

mesma duração.

Parte 2

Ajuste a data para *21 de Junho*. Avançando 3 meses, chegamos ao Solstício de Junho. É possível ver na Figura 3.21 que o Sol ilumina o planeta a partir do hemisfério norte, sendo que um observador na latitude de $23,5^\circ$ (trópico de câncer) vê o Sol com uma altitude de 90° .

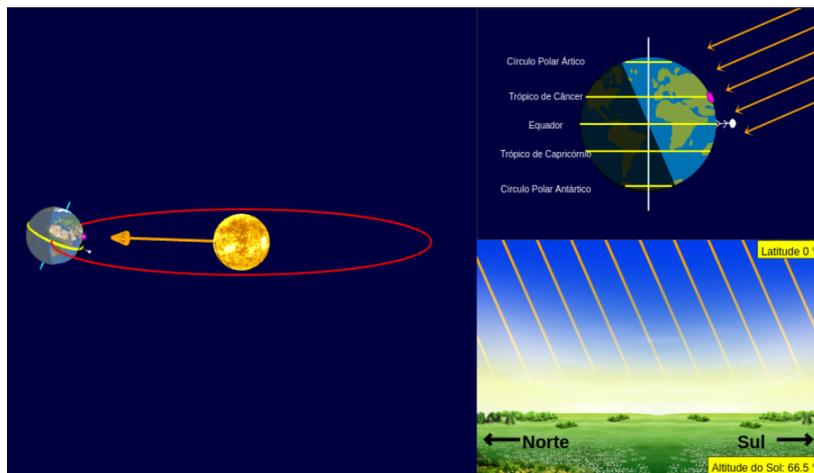


Figura 3.21: Solstício de Junho.

1. Ajuste a latitude para $+23,5^\circ$ e confira qual o valor da altitude do Sol, ao meio-dia do solstício de junho.
2. Ajuste a latitude para $-23,5^\circ$ e confira qual o valor da altitude do Sol. Ela é igual a anterior?
3. Em qual das duas latitudes o Sol parece estar mais baixo?
4. Clique na opção *Ver dispersão da luz solar*. Compare a dispersão da luz para as duas latitudes anteriores (de $\pm 23,5^\circ$). Qual das latitudes apresenta uma menor dispersão da luz solar?
5. Você diria que a luz solar é mais concentrada em qual das duas latitudes?
6. Qual a altitude do Sol para um observador na latitude de 70° , ao meio-dia? E para um observador em uma latitude de -70° ?

Com isso podemos notar que, contrário ao que aconteceu no equinócio de março, não há mais uma equivalência entre os hemisférios. O hemisfério norte recebe muito mais luz solar do que o hemisfério sul, dando origem ao verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul.

Podemos verificar isso tanto pela altitude do Sol quanto pela dispersão de sua luz sobre a superfície. Ainda, podemos ver também que observadores em latitudes menores que $-66,5^\circ$ não verão a luz do Sol ao meio-dia.

Parte 3

A situação encontrada em 23 de Setembro é equivalente àquela estudada na **Parte 1**, para o equinócio de março. Ajuste a data para *21 de Dezembro*, conforme a Figura 3.22.

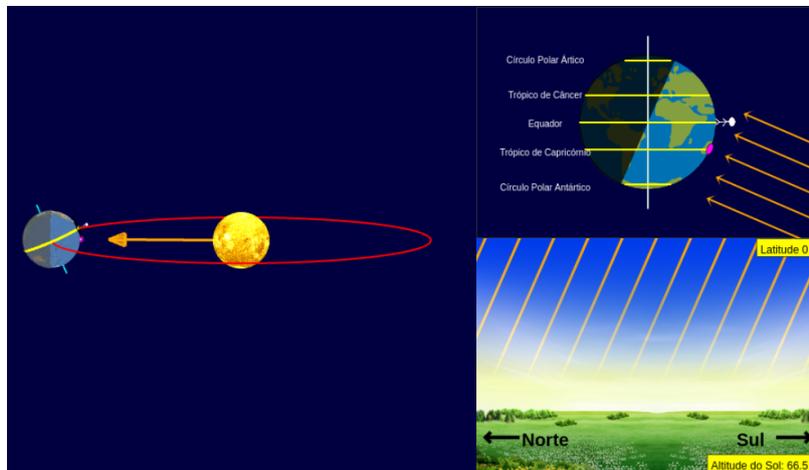


Figura 3.22: Solstício de Dezembro.

1. Ajuste a latitude para $-23,5^\circ$ e confira qual o valor da altitude do Sol, ao meio-dia do solstício de dezembro.
2. Ajuste a latitude para $+23,5^\circ$ e confira qual o valor da altitude do Sol. Ela é igual a anterior?
3. Em qual das duas latitudes o Sol parece estar mais baixo?
4. Clique na opção *Ver dispersão da luz solar*. Compare a dispersão da luz para as duas latitudes anteriores (de $\pm 23,5^\circ$). Qual das latitudes apresenta uma menor dispersão da luz solar?
5. Você diria que a luz solar é mais concentrada em qual das duas latitudes?
6. Qual a altitude do Sol para um observador na latitude de -70° , ao meio-dia? E para um observador em uma latitude de -70° ?

Vemos agora que a situação é oposta àquela da **Parte 2**: o hemisfério sul é mais iluminado pelo Sol do que o hemisfério norte, dando origem agora ao verão no hemisfério sul e inverno no hemisfério norte.

Questão Bônus

Em qual dia do ano o Sol estará no zênite, ao meio-dia, para um observador numa latitude de -16° ? Esse dia é único?

Quando isso ocorre, dizemos que temos um *dia sem sombra*, uma vez que um gnômon sob o Sol neste exato momento não projetaria sombra nenhuma (como no caso de Assuã, no Experimento de Eratóstenes).

Desde as primeiras observações astronômicas, dois corpos celestes sempre receberam atenção especial: o Sol e a Lua. Tanto um quanto o outro apresentam movimentos bem diferentes daqueles que vemos para as estrelas fixas na esfera celeste.

Além disso, a Lua apresenta uma característica única que não pode ser vista a olho nu em qualquer outro corpo do sistema solar: *a Lua apresenta fases*. Ainda, existem situações especiais nas quais a Lua e o Sol ficam alinhados com a Terra, dando origem aos *eclipses*.

Desta forma, por apresentar características tão particulares, é necessário que estudemos o movimento destes corpos um pouco mais a fundo para entendermos como estes fenômenos ocorrem. Neste capítulo vamos discutir as fases da Lua, os eclipses lunares e solares, e qual a origem destes fenômenos.

4.1 A órbita Lunar

Assim como a proximidade do Sol em relação à Terra faz com que observemos movimentos diferentes do Sol ao longo do ano pela esfera celeste, a órbita da Lua em torno da Terra dará origem a novos movimentos também.

Nas próximas subseções vamos definir algumas das principais características acerca destes movimentos, como a *lunação*, o *mês sideral*, *anomalístico* e *draconiano*. Veremos que todos esses movimentos serão essenciais para determinarmos as condições de eclipses solares e lunares também.

4.1.1 Mês Sinódico – Fases da Lua

Por descrever uma órbita em torno da Terra, o movimento aparente da Lua no céu possui várias características diferentes daquelas do Sol ou dos planetas. A primeira característica que podemos notar é que a Lua apresenta *fases*. As fases são os diferentes aspectos da Lua vistos por observadores na Terra, de acordo com a posição da Lua em sua órbita e sua porção iluminada pelo Sol. Essas fases possuem um período muito bem definido, ou seja, o tempo entre uma fase e outra é praticamente constante, variando pouquíssimo ao longo dos anos.

Um detalhe importante que historicamente se propaga diz respeito ao *lado oculto da Lua*. O período de rotação da Lua em torno do seu próprio eixo coincide com o período de revolução da Lua em torno da Terra, de modo que vemos sempre a mesma face da Lua (nunca vemos a “parte de trás”).

4.1 A órbita Lunar	43
4.1.1 Mês Sinódico – Fases da Lua	43
4.1.2 Mês Sideral	47
4.1.3 Mês anomalístico	48
4.1.4 Mês draconiano	48
4.2 Eclipses	54
4.2.1 Eclipses Lunares	55
4.2.2 Eclipses Solares	56
4.2.3 O ciclo de Saros	56

Lua Nova

- ▶ nascimento: 06h;
- ▶ passagem meridiana: 12h;
- ▶ poente: 18h.

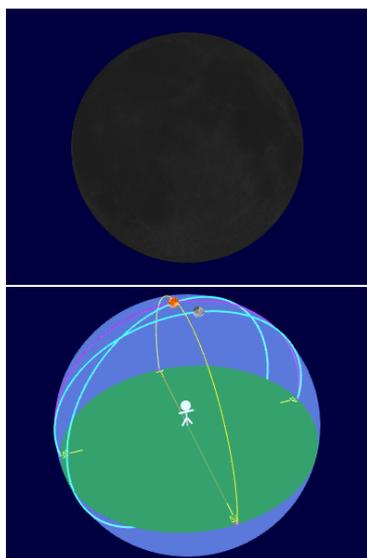


Figura 4.1: A Lua Nova não é visível, pois a face que está voltada para a Terra não está iluminada pelo Sol. A figura é apenas uma representação, mostrando a Lua “apagada”. A Lua Nova estará no ponto mais alto da sua trajetória ao meio-dia.

O período que a Lua leva para sair de uma fase e retornar à mesma fase é chamado de *lunação*^{*}, e tem uma duração de **29 dias, 12 horas, 44 minutos e 2,9 segundos**[†]. O intervalo médio entre cada fase é de 7,38 dias.

Vale a pena notar que existem fases nas quais a Lua aparece durante o período diurno, sendo que somente a Lua Cheia fica durante a noite toda no céu, já que ela nasce às 18h e se põe às 06h do dia seguinte.

Uma forma de visualizar este efeito é pensar que você está no centro de um carrossel e observa alguém na borda do carrossel, virado para você. Enquanto o carrossel gira, você estará sempre olhando para a frente da pessoa, mas alguém de fora do carrossel verá esta pessoa por todos os ângulos enquanto o carrossel gira. Discutiremos isso em detalhes em uma das atividades.

Outros corpos do Sistema Solar apresentam fases também, sendo Vênus e Mercúrio os únicos dois planetas que vemos em fase. Contudo, isso só pode ser percebido por meio de um telescópio e foi justamente com o auxílio de um que Galileu Galilei conseguiu observar as fases de Vênus pela primeira vez, o que reforçou a teoria do Sistema Heliocêntrico. Falaremos mais disso quando discutirmos o nosso Sistema Solar.

Por enquanto, vejamos como essas fases lunares são observadas daqui da Terra.

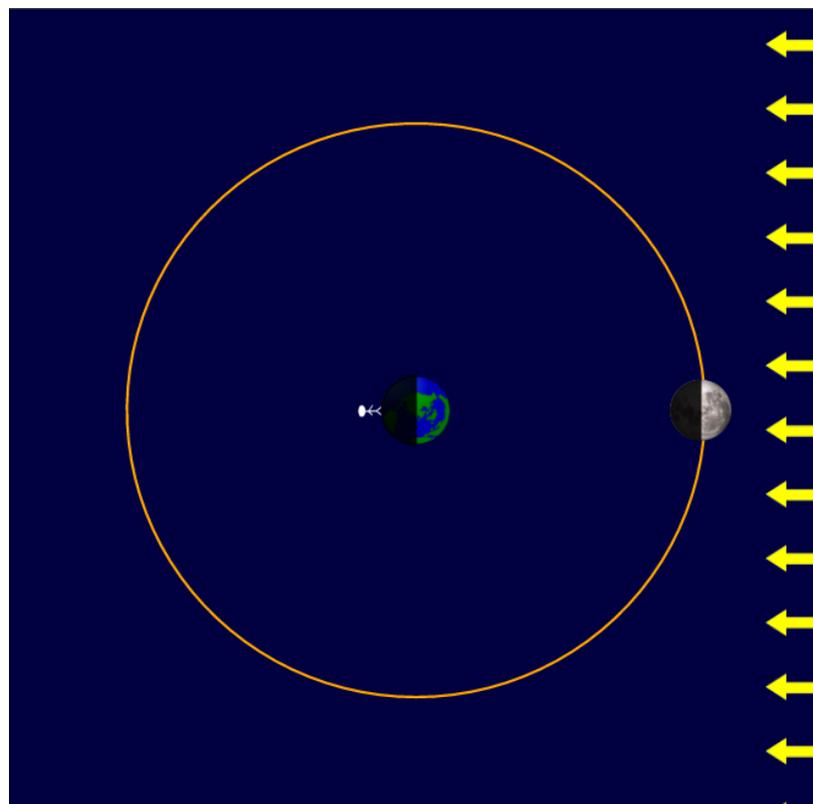
Lua Nova

Figura 4.2: Lua Nova – note que a parte iluminada da Lua não está visível para um observador na Terra.

^{*} Também pode ser chamado de *período sinódico*, ou *mês sinódico*

[†] O que corresponde a 29,530589 dias.

A *Lua Nova* é caracterizada por ter 0% da sua superfície visível para a Terra iluminada. Neste instante, a Lua e o Sol estão passando pelo meridiano local, ou seja, a Lua estará no ponto mais alto da sua trajetória ao meio-dia. Desta forma, não é possível observarmos a Lua Nova no céu (exceto num eclipse solar, como veremos nas próximas seções).

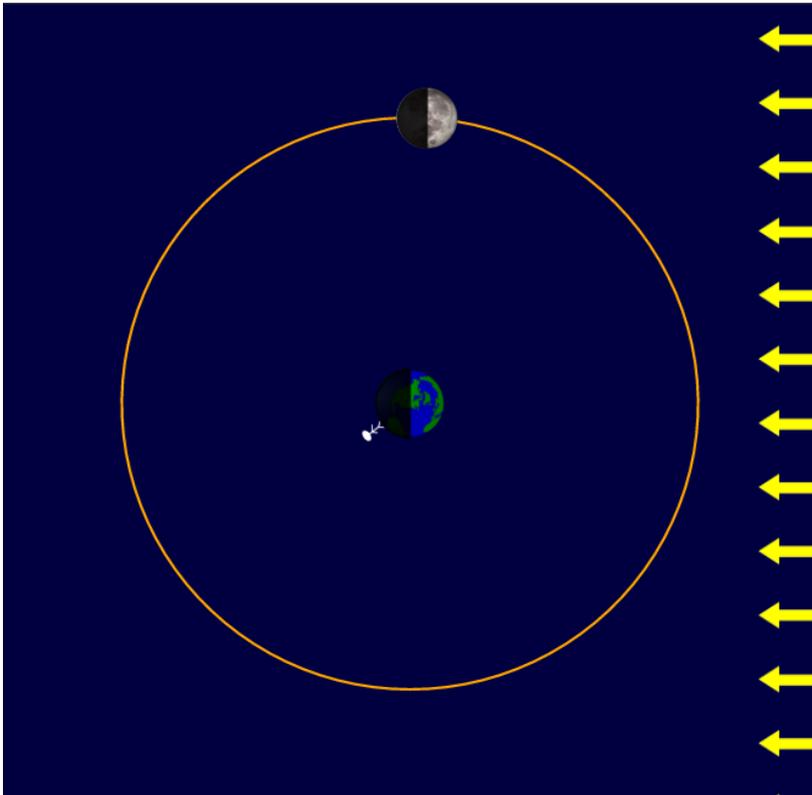
Ela nasce às 06h, passa pelo meridiano às 12h e se põe às 18h ficando no céu durante toda a parte diurna do dia.

Lua Crescente

A *Lua Crescente* é caracterizada por ter 50% da sua superfície visível para a Terra iluminada (Figura 4.3, imagem de cima). Neste instante, a Lua forma um ângulo de 90° com o Sol e a Terra. Ela nasce às 12h, passa pelo meridiano às 18h e se põe às 0h.

A Lua Crescente é ótima para a observação por telescópios, uma vez que os raios solares atingem a superfície lunar formando um ângulo suficiente para projetar as sombras do relevo lunar, dando um maior contraste e uma noção de profundidade que se perder quando observamos a Lua Cheia, por exemplo.

Vale notar que a porção iluminada da Lua é a sua porção oeste, de onde chega a luz do Sol. Podemos ver também, na Figura 4.3 (imagem de baixo) que no momento em que a Lua está cruzando o meridiano, o Sol está se pondo.



Lua Crescente

- ▶ nascimento: 12h;
- ▶ passagem meridiana: 18h;
- ▶ poente: 0h.

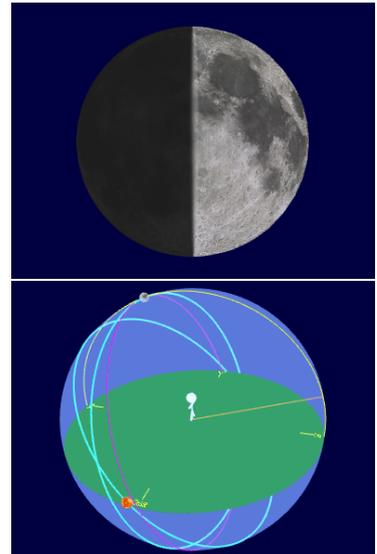


Figura 4.3: A Lua Crescente estará no ponto mais alto da sua trajetória às 18h.

Figura 4.4: Lua Crescente – nesta configuração temos a Lua Crescente. Ela está no ponto mais alto da sua trajetória no início da tarde.

Lua Cheia

A *Lua Cheia* é caracterizada por ter 100% da sua superfície visível para a Terra iluminada, conforme vemos na Figura 4.6. Neste instante, a Lua e o Sol estão em direções opostas, ou seja, a Lua estará no ponto mais alto da sua trajetória à meia-noite.

Podemos ver na Figura 4.5, na imagem de baixo, a Lua Cheia cruzando o meridiano à meia-noite, enquanto o Sol está no ponto oposto.

Nesta fase os raios solares incidem perpendicularmente à superfície lunar, não havendo tanta projeção de sombras como no caso da Lua Crescente, como havíamos comentado. Assim, a observação da Lua Cheia não permite a visualização de tantos detalhes de profundidade e relevo. No entanto, a diferente composição dos materiais na superfície lunar fica evidenciada, e a Lua Cheia ressalta as crateras formadas mais recentemente.

Um efeito comum de ser observado na Lua Cheia é uma ilusão de que a Lua parece maior quando está no horizonte. Como a Lua Cheia nasce às 18h, conseguimos acompanhar bem este instante e, quando comparamos a Lua com outros cenários no horizonte, temos a impressão de que a Lua é bem maior do que quando ela está alta no céu.

Isso é somente uma ilusão óptica, o tamanho da Lua é o mesmo e, na verdade, ela está até mais próxima da Terra quando está no meridiano do que quando está nascendo, então efetivamente ela é vista maior quando está no ponto mais alto do céu do que quando está nascendo.

Na Lua Cheia, conforme veremos na próxima seção, existe a possibilidade de ocorrência de um eclipse lunar.

Lua Cheia

- ▶ nascimento: 18h;
- ▶ passagem meridiana: 0h;
- ▶ poente: 06h.

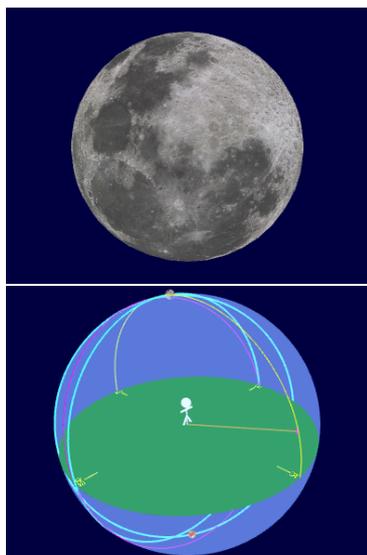
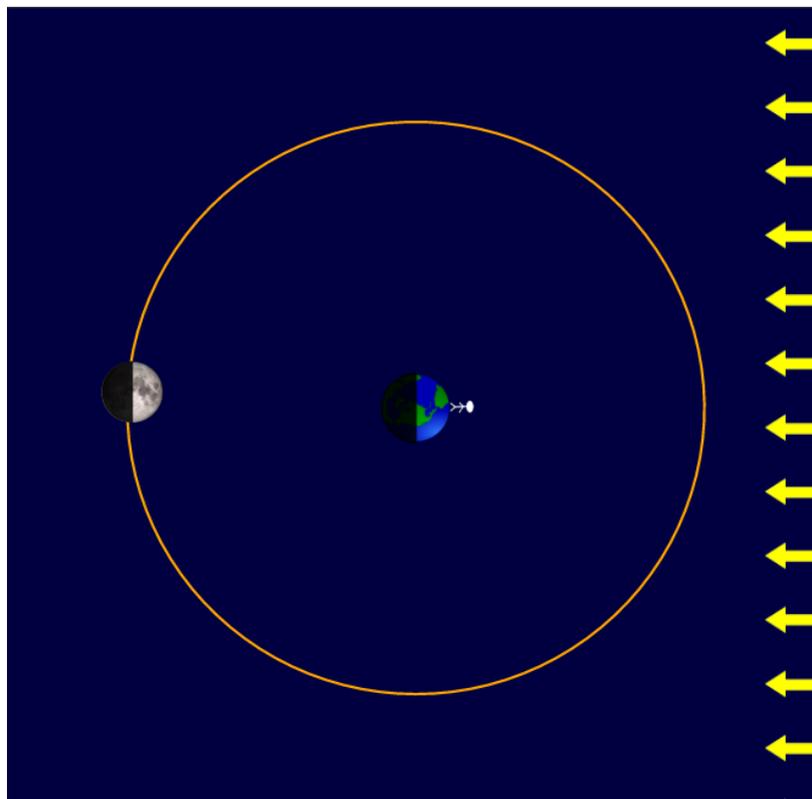


Figura 4.5: Lua Cheia, com 100% da superfície visível pela Terra iluminada. A Lua Cheia estará no ponto mais alto da sua trajetória às 0h.

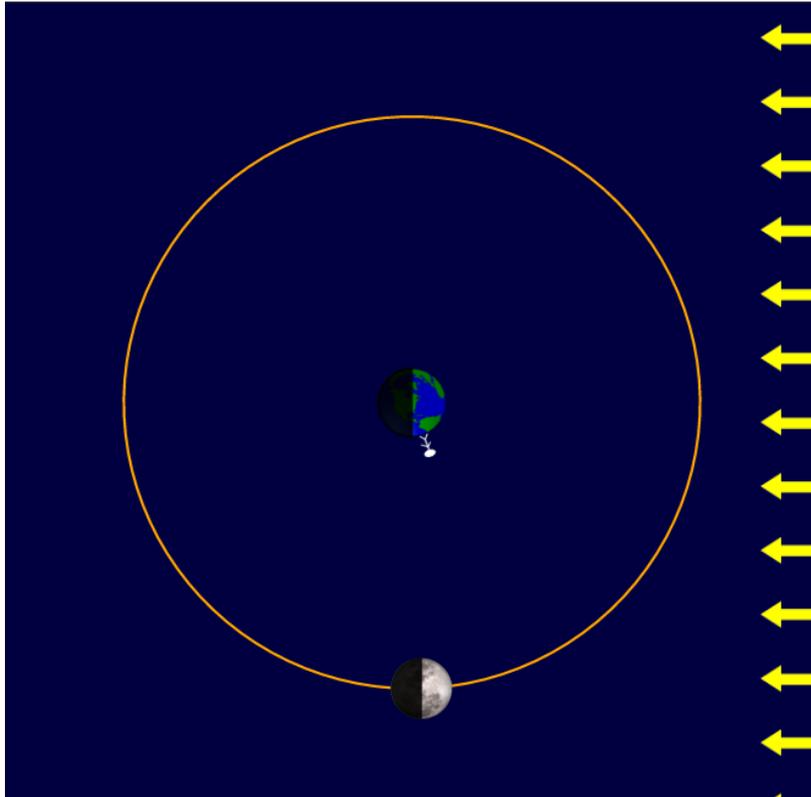
Figura 4.6: Lua Cheia – nesta fase podemos ver metade da Lua iluminada pelo Sol. Ela estará no ponto mais alto da sua trajetória à meia-noite.



Lua Minguante

A *Lua Minguante* é caracterizada por ter 50% da sua superfície visível para a Terra iluminada (sua porção leste, em contraste com a porção oeste iluminada na Lua Crescente). Ela nasce às 0h, cruzando o meridiano às 06h e se põe às 12h.

Essa é a fase da Lua que costumamos ver durante o dia, uma vez que ela está alta no céu quando o Sol está nascendo, conforme podemos verificar na Figura 4.7.



Lua Minguante

- ▶ nascimento: 0h;
- ▶ passagem meridiana: 6h;
- ▶ poente: 12h.

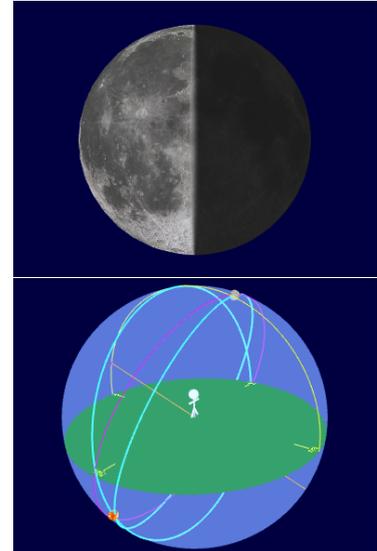


Figura 4.7: A Lua Minguante nascerá às 0h e cruzará o meridiano local às 06h.

Figura 4.8: Lua Minguante, com 50% da superfície visível pela Terra iluminada.

4.1.2 Mês Sideral

Vimos na seção anterior que as fases da Lua possuem relação direta com a posição da Lua em relação ao Sol e à Terra. Com isso, fomos capazes de definir a *lunação*, ou *mês sinódico* da Lua.

No entanto, como a Terra está girando em torno do Sol, o tempo que a Lua demora para completar uma volta em torno da Terra (em relação às estrelas fixas) é menor do que o tempo que ela leva para voltar a uma mesma fase, conforme mostra a Figura 4.9.

O tempo que a Lua demora para completar uma volta em torno da Terra com relação às estrelas fixas é de **27 dias, 7 horas, 43 minutos e 11,6 segundos**, chamado de *mês sideral*, ou seja, cerca de 27,3 dias.

Esses períodos todos deram origem aos nossos meses e semanas atuais. O período de cerca de 29 dias é praticamente 1 mês, e o intervalo entre as fases da Lua é cerca de uma semana.

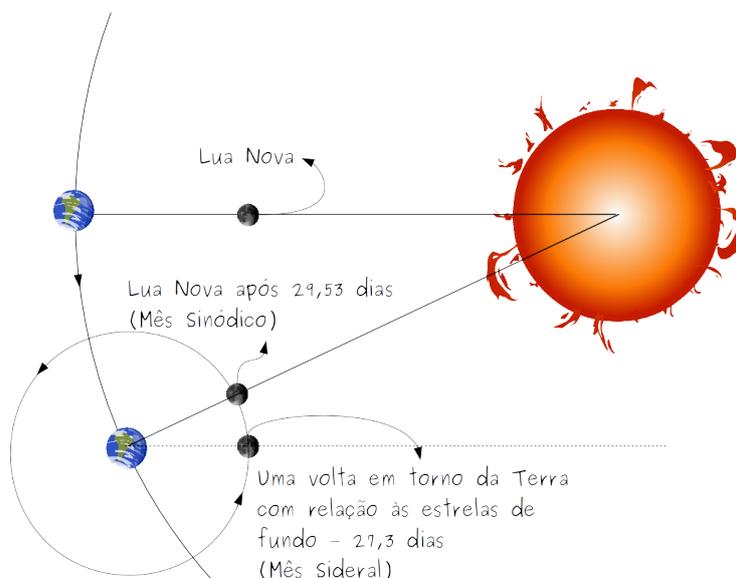


Figura 4.9: Diferença entre o mês sinódico e o mês sideral

Os dias da semana em algumas outras línguas fazem referência também aos sete astros que se destacam no céu: Sol (domingo), Lua (segunda-feira), Marte (terça-feira), Mercúrio (quarta-feira), Júpiter (quinta-feira), Vênus (sexta-feira) e Saturno (sábado).

4.1.3 Mês anomalístico

Embora a órbita da Lua seja quase circular, existem momentos no qual ela está de fato mais próxima da Terra (*perigeu*) e, conseqüentemente, momentos no qual está mais distante (*apogeu*). Conforme veremos no próximo capítulo, a distância média da Terra à Lua é cerca de 384.400 km, enquanto no perigeu ela encontra-se a 363.104 km e, no apogeu, 405.696 km.

O período entre um perigeu (ou apogeu) e o próximo é de **27 dias, 13 horas, 18 minutos e 33,2 segundos**, chamado de *mês anomalístico*, cerca de 27,5 dias.

Como conseqüência das diferentes distâncias ao longo da órbita da Lua em torno da Terra, observamos tamanhos diferentes da Lua no céu ao longo do tempo. No perigeu a Lua nos parece maior, e no apogeu, por estar mais distante, nos parece menor, tendo em média o tamanho angular de $0,5^\circ$.



Figura 4.10: Diferença relativa de tamanho angular visto a partir da Terra para a Lua no perigeu (acima) e apogeu (abaixo).

4.1.4 Mês draconiano

Os dois pontos onde a órbita da Lua cruza o plano da órbita da Terra são chamados de *nodos*: ascendente, quando a Lua passa do sul da órbita da Terra para o norte, e descendente quando vai do norte para o sul. Estes pontos não são fixos, eles também realizam um movimento (ou seja, a órbita da Lua gira em torno da Terra) com um período muito bem definido, de **27 dias, 5 horas, 5 minutos 35,8 segundos**, chamado de *mês draconiano*, cerca de 27,2 dias.

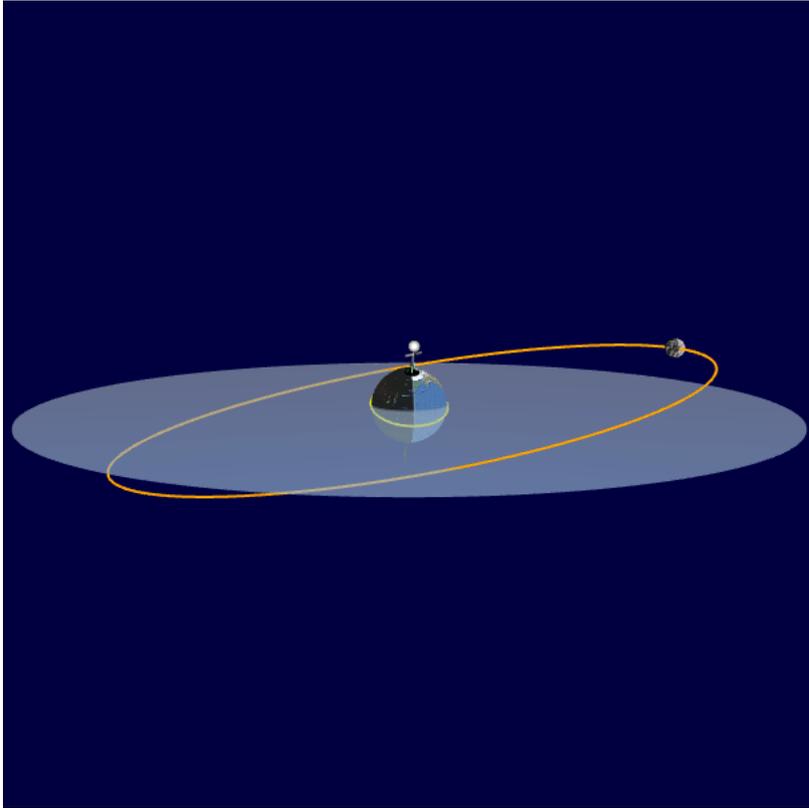


Figura 4.11: Órbita da Lua inclinada em relação ao plano da eclíptica.

A Figura 4.11 mostra a trajetória da órbita lunar em torno da Terra em laranja, e em cinza claro está demarcado o plano da eclíptica (da órbita da Terra em torno do Sol). É possível ver que o plano da eclíptica é cortado pela órbita da Lua em dois pontos, os chamados nodos.

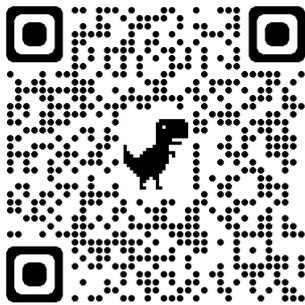


Figura 4.12: https://scatena.sites.ufsc.br/astronomia/simulador_lunar/index.xhtml

Atividade - As fases da Lua

Nesta atividade discutiremos as fases da Lua, como elas são formadas e porque as vemos desta forma aqui da Terra. Um elemento essencial para entendermos as fases da Lua diz respeito à compreensão do efeito que a posição relativa da Lua e do Sol tem sobre a forma que observamos a porção iluminada da Lua.

Parte 1 - A posição do Sol

Acesse a simulação computacional por meio do QR Code na Figura 4.12 (ou pelo link na legenda). Na simulação podemos ver um modelo bi-dimensional da órbita da Lua em torno da Terra. As setas amarelas representam a luz do Sol que, devido a sua distância, emite raios de luz que chegam praticamente paralelos entre si. **A simulação não está em escala[†]**, mas é possível ver uma representação na parte de baixo dela, exibindo a distância da Terra até a Lua e seus respectivos diâmetros.

A simulação exibe um observador numa longitude fixa e permite que possamos alterar as horas e os dias ao longo de um mês. Na janela superior à direita é exibida uma imagem da Lua da forma que ela seria vista por um observador da Terra naquele dia e horário. Na janela inferior à direita podemos ver uma representação da posição relativa do Sol e da Lua na esfera celeste para um observador naquela latitude.

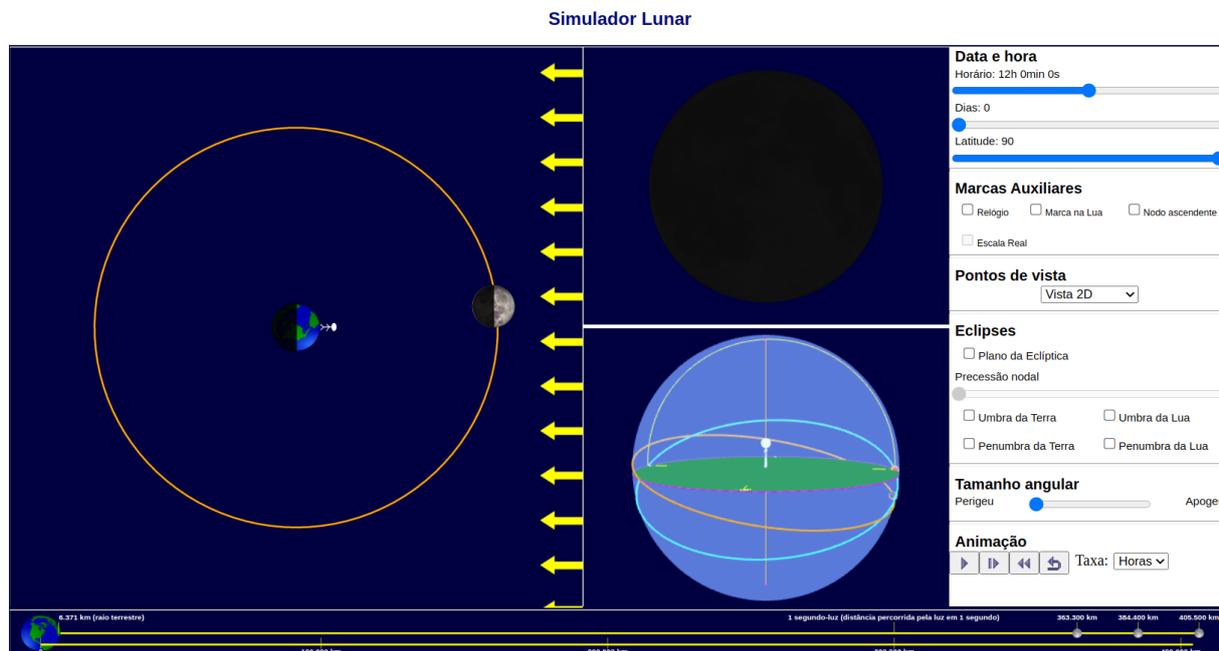


Figura 4.13: Simulador Lunar

[†] É possível ver a simulação em escala real, em 3D, mas note que isso dificulta a visualização de certos efeitos que vamos explorar. No entanto, vale a pena verificar para notar como são grandes as distâncias no Sistema Solar e no Universo como um todo. Para tanto, no menu **Pontos de vista** selecione a opção *Vista Geral* e, no menu **Marcas Auxiliares** selecione a caixa *Escala Real*.

1. No menu **Data e hora**, altere a *latitude* para 0° . Imagine que o nosso observador na Terra esteja na posição demarcada. Para ele é noite ou dia?
2. Para onde ele deveria olhar para ver o Sol?
3. Qual o horário indicado na simulação?
4. Clique em *Relógio* e ajuste o horário para as 18h. Para onde o nosso observador deveria olhar para ver o Sol?
5. Ajuste as horas para 0h. Onde está o Sol neste instante?
6. Ajuste as horas para 06h. Onde está o Sol neste instante?

Nosso objetivo nesta parte é determinar qual parte do céu um observador na Terra tem como ver, e onde o Sol se localiza ao longo de um dia em relação ao nosso observador. Vamos agora incluir a Lua em nosso modelo.

Parte 2 - As fases da Lua

Clique em  para reiniciar a simulação. Alterne entre as diferentes visões no menu **Pontos de vista** para lhe auxiliar a responder as perguntas abaixo. Na *Vista geral* você pode clicar com o botão esquerdo do mouse e arrastá-lo para mudar o ângulo. O botão de rolagem do mouse permite que você aproxime ou afaste a imagem.

1. Lua Nova

- A. Para onde o observador deve olhar para ver a Lua?
- B. Quanto da parte iluminada da Lua, aproximadamente, é possível ver a partir da Terra neste instante?
- C. Levando em conta o horário e a porção iluminada da Lua, o observador na Terra consegue enxergar a Lua nesse instante? (Esta é a chamada *Lua Nova*).
- D. Ajuste o horário para 18h. Onde a Lua encontra-se agora?
- E. O observador consegue enxergar a Lua em algum instante deste dia? Se sim, entre quais horários?
- F. Em que horas a Lua nasce e se põe neste dia?
- G. Em qual horário (para esse observador) ocorre a Lua Nova, aproximadamente?

2. Lua Crescente

Ajuste a simulação para o dia 7, às 12h.

- A. Para onde o observador deve olhar para ver a Lua?
- B. Quanto da parte iluminada da Lua, aproximadamente, é possível ver a partir da Terra neste instante?
- C. Levando em conta o horário e a porção iluminada da Lua, o observador na Terra consegue enxergar a Lua nesse instante?
- D. Ajuste o horário para 18h. Onde a Lua encontra-se agora?

- E. O observador consegue enxergar a Lua em algum instante deste dia? Se sim, entre quais horários?
 - F. Em que horas a Lua nasce e se põe neste dia?
 - G. Em qual horário (para esse observador) ocorre a Lua Crescente, aproximadamente?
- 3. Lua Cheia**
Ajuste a simulação para o dia 15, às 18h.
- A. Para onde o observador deve olhar para ver a Lua?
 - B. Quanto da parte iluminada da Lua, aproximadamente, é possível ver a partir da Terra neste instante?
 - C. Levando em conta o horário e a porção iluminada da Lua, o observador na Terra consegue enxergar a Lua nesse instante?
 - D. Ajuste o horário para 0h. Onde a Lua encontra-se agora?
 - E. O observador consegue enxergar a Lua em algum instante deste dia? Se sim, entre quais horários?
 - F. Em que horas a Lua nasce e se põe neste dia?
 - G. Em qual horário (para esse observador) ocorre a Lua Cheia, aproximadamente?
- 4. Lua Minguante**
Ajuste a simulação para o dia 22, às 06h.
- A. Para onde o observador deve olhar para ver a Lua?
 - B. Quanto da parte iluminada da Lua, aproximadamente, é possível ver a partir da Terra neste instante?
 - C. Levando em conta o horário e a porção iluminada da Lua, o observador na Terra consegue enxergar a Lua nesse instante?
 - D. Ajuste o horário para 0h. Onde a Lua encontra-se agora?
 - E. O observador consegue enxergar a Lua em algum instante deste dia? Se sim, entre quais horários?
 - F. Em que horas a Lua nasce e se põe neste dia?
 - G. Em qual horário (para esse observador) ocorre a Lua Minguante, aproximadamente?

Parte 3 - O lado oculto da Lua

Vimos que a órbita da Lua em torno da Terra nos propicia ângulos de vista diferentes, dando origem às fases que vemos. No entanto, você reparou que vemos sempre a mesma face da Lua virada para nós? Vamos ver como se dá o movimento de rotação da Lua em torno do próprio eixo. Clique em ↺ para reiniciar a simulação. Clique na opção *Marca na Lua*, no menu **Marcas Auxiliares**. Esta marca está fixa na Lua.

1. O ponto amarelo está sendo iluminado pelo Sol?
2. Altere o dia para o dia 15. O ponto amarelo está sendo iluminado pelo Sol?

3. Note que o ponto amarelo iniciou sua trajetória do lado oposto ao Sol, e agora está do lado iluminado. Isso significa que a Lua deve ter rotacionado em torno do seu próprio eixo de modo a virar o ponto amarelo em direção ao Sol. O ponto amarelo chegou a completar uma volta em torno do eixo de rotação da Lua até o dia 15?
4. Ajuste a data até o ponto amarelo voltar a posição inicial, completando assim uma volta em torno do eixo da Lua. Quantos dias levou para o ponto amarelo retornar à posição inicial?
5. Em algum momento o ponto amarelo deixou de ser visto por um observador na Terra?

Vemos, portanto, que a Terra vê sempre o mesmo lado da Lua porque ela rotaciona em torno do seu próprio eixo com o mesmo período em que ela completa uma lunação. Assim como o ponto amarelo passou por regiões com e sem luz do Sol, todos os outros pontos da superfície lunar sofrerão o mesmo efeito[§], de modo que **toda a superfície da Lua será iluminada em algum momento de sua órbita**. Assim, não temos o chamado *lado escuro da Lua*, como ouvimos por aí às vezes, mas sim um **lado oculto**, que nunca está virado para a Terra, mas certamente recebe luz solar.

Para ver o lado oculto da Lua, clique na janela superior à direita com o botão esquerdo do mouse e arraste o cursor para rotacionar a Lua.

[§] Existem vários outros fatores que poderiam ser levados em conta também, como a inclinação do eixo de rotação da Lua, por exemplo, mas não entraremos nestes detalhes.

4.2 Eclipses

A palavra eclipse deriva do grego *ἐκλείπειν*, que significa abandonar ou sumir[¶] e é justamente isso que nos parece quando um eclipse ocorre.

Os eclipses acontecem quando um corpo é obscurecido pela sombra de outro. No caso da Lua, em certas ocasiões ela passa exatamente pela sombra projetada pela Terra ao ser iluminada pelo Sol. No caso do eclipse solar, é a Terra quem fica na sombra projetada pela Lua, de modo que a Lua esconde o Sol.

Durante uma Lua Nova, temos um alinhamento do Sol, Lua e Terra, o que pode dar origem a um eclipse solar. Já o eclipse lunar pode ocorrer durante uma Lua Cheia, num alinhamento Sol, Terra e Lua. Se é esse o caso, por que não temos eclipses solares toda Lua Nova e eclipses lunares toda Lua Cheia?

Contudo, os eclipses não ocorrem toda Lua Nova ou toda Lua Cheia porque o plano da órbita da Lua em torno da Terra não é o mesmo do plano da órbita da Terra em torno do Sol. Na verdade, o ângulo entre os planos das órbitas é de cerca de $5,14^\circ$, conforme ilustrado na Figura 4.14.

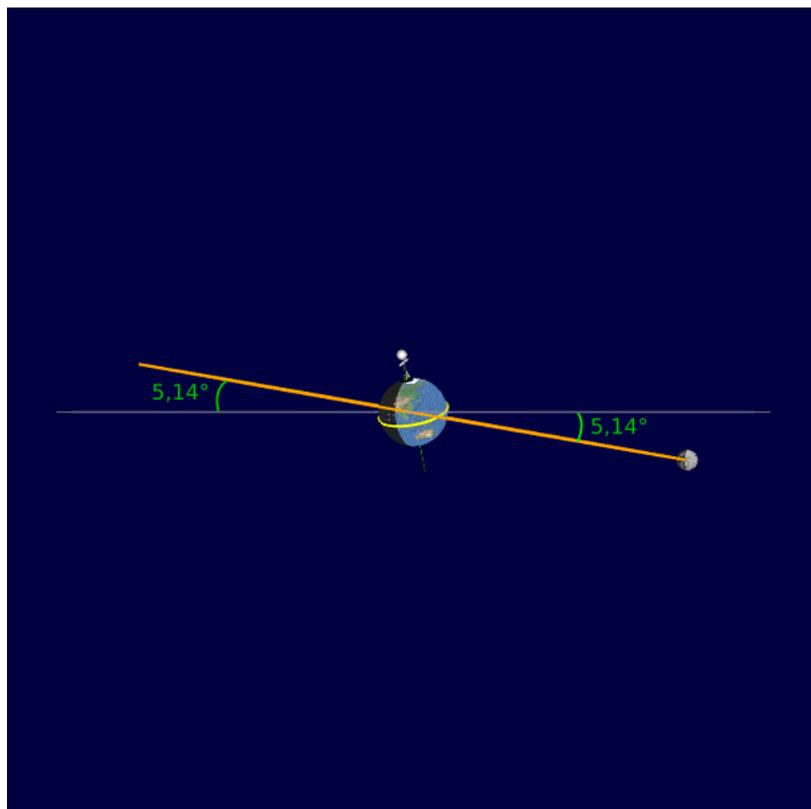


Figura 4.14: Podemos ver em cinza o plano da eclíptica (plano da órbita da Terra em torno do Sol) e em laranja o plano da órbita da Lua em torno da Terra. O ângulo entre esses dois planos é de $5,14^\circ$, o que faz com que os eclipses não ocorram toda Lua Cheia ou Lua Nova. Os ângulos estão exagerados e fora de escala.

Vamos analisar como ocorrem cada um desses eclipses e quais suas características.

[¶] Por outro lado, a palavra *apocalipse* significa revelar ou aparecer.

4.2.1 Eclipses Lunares

Conforme vimos, o eclipse lunar ocorrerá quando a Lua, em sua fase cheia, cruza o plano da órbita da Terra, entrando em sua sombra. A Figura 4.15, abaixo, ilustra esta situação.

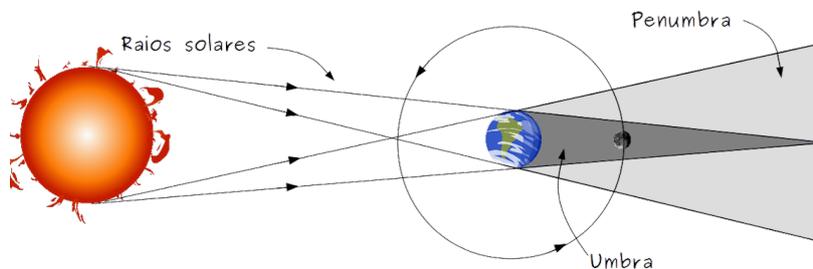


Figura 4.15: Podemos notar duas regiões de sombra distintas durante um eclipse: a *umbra* e a *penumbra*.

Podemos notar duas regiões de sombra distintas na geometria de um eclipse lunar: a *umbra* e a *penumbra*. A *umbra* seria a região de sombra total, dentro da qual a Lua não receberia nenhuma luz solar, que seria obstruída pela Terra. Já na *penumbra*, ela ainda seria iluminada por parte da luz solar. Do ponto de vista da Terra, a trajetória da Lua pelas regiões de sombra pode ser esquematizada da seguinte forma:

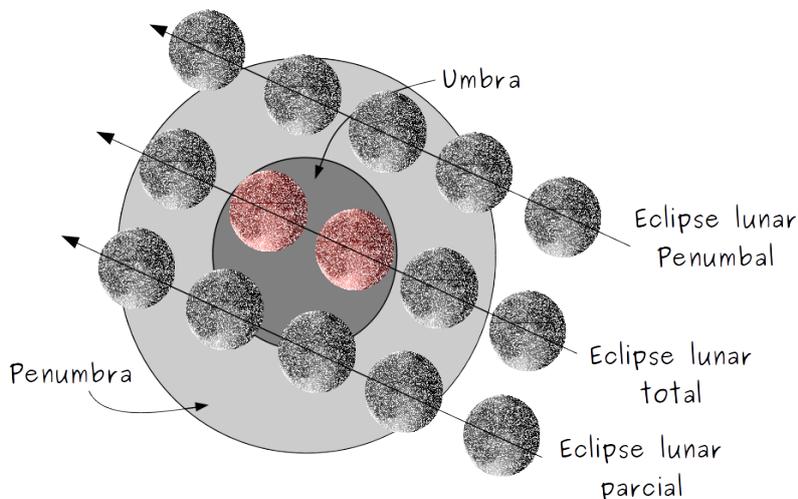


Figura 4.16: Passagens da Lua por diferentes regiões de sombra dão origem a eclipses diferentes.

Com base nessas duas regiões, podemos classificar dois tipos diferentes de eclipse lunar:

- ▶ **Eclipse Lunar Penumbal** – nesta situação, a Lua passa somente pela penumbra da Terra, de modo que a variação na luminosidade da mesma é quase imperceptível;
- ▶ **Eclipse Lunar Parcial** – nesta situação, parte da Lua passa pela penumbra e parte passa pela umbra, de modo que somente parte da Lua fica completamente escura;
- ▶ **Eclipse Lunar Total** – nesta situação a Lua passa por inteiro pela umbra. Note que a Lua não chega a ficar inteiramente escura, adquirindo uma coloração avermelhada. Isso se deve pelo fato de

alguns raios solares serem desviados pela atmosfera terrestre. Da mesma forma que o pôr do Sol faz com que o céu fique avermelhado, a Lua num eclipse total “enxerga” algo parecido: somente raios de luz vermelhos chegam até ela.

Durante épocas de grande atividade vulcânica, muitas partículas ficam suspensas na atmosfera. O mesmo acontece em locais com muita poluição, dando origem a um pôr do Sol avermelhado. Quando um eclipse lunar total ocorre, a coloração avermelhada que observamos na Lua pode servir como indicativo do quão poluída está a nossa atmosfera.

Um eclipse lunar tem duração de 2 a 3 horas e pode ser visto por qualquer observador na parte noturna da Terra.

4.2.2 Eclipses Solares

Os eclipses solares acontecem quando uma Lua Nova ocorre ao mesmo tempo em que a mesma cruza o plano da órbita da Terra em torno do Sol. Devido ao fato dos tamanhos angulares do Sol e da Lua serem muito próximos, esta incrível coincidência permite que eventualmente haja um *eclipse total* do Sol, de modo que a Lua se interpõe entre o Sol e a Terra, obstruindo a luz solar por completo.

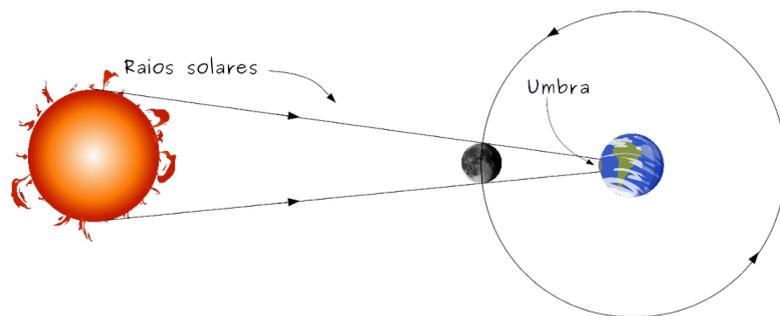


Figura 4.17: O eclipse total ocorre para observadores na umbra, enquanto os observadores da penumbra veem um eclipse parcial.

Em outras vezes, quando a Lua nova ocorre próxima a um apogeu lunar, seu tamanho angular aparente é ligeiramente menor que àquele do Sol, dando origem a um *eclipse anular*.

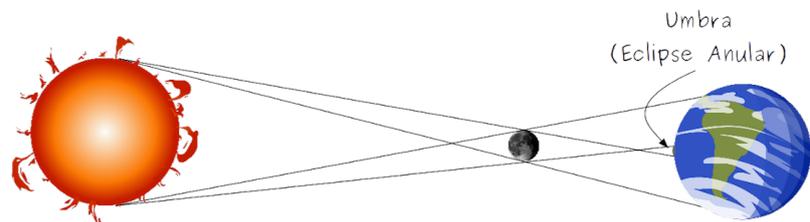


Figura 4.18: O eclipse solar anular ocorre quando a Lua está no seu apogeu.

4.2.3 O ciclo de Saros

Para que a mesma configuração de Sol–Terra–Lua se repita, precisamos ter múltiplos inteiros dos meses sinódicos, draconianos e anomalísticos.

Isso acontece num período denominado *ciclo de Saros*, de 6.585,3211 dias, intervalo no qual terão ocorrido 223 meses sinódicos, 242 meses draconianos e 239 meses anomalísticos. Assim, ao ocorrer um eclipse, podemos ter certeza que outro idêntico ocorrerá dentro de um ciclo de Saros.

Atividade - Eclipses

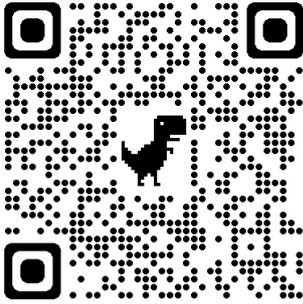


Figura 4.19: https://scatena.sites.ufsc.br/astrofomia/simulador_lunar/index.xhtml

Nesta atividade discutiremos como ocorrem os eclipses lunar e solar. Para tanto, acesse a simulação computacional por meio do QR Code na Figura 4.19 (ou pelo link na legenda).

No menu **Data e hora**, altere a *Latitude* para um valor de 0° . No menu **Pontos de Vista**, selecione a opção *Vista Geral* para ter uma visão em três dimensões da órbita lunar. Você pode clicar com o botão esquerdo do mouse e arrastar o cursor para diferentes ângulos de vista. O botão de rolagem do mouse aproxima ou afasta a imagem.

Parte 1 - O mês draconiano

O plano definido pela órbita da Terra em torno do Sol é chamado de *eclíptica*, e não é por acaso. Os eclipses acontecem justamente quando a Lua cruza o plano da eclíptica em épocas de Lua Cheia ou Lua nova. Vejamos como isso acontece:

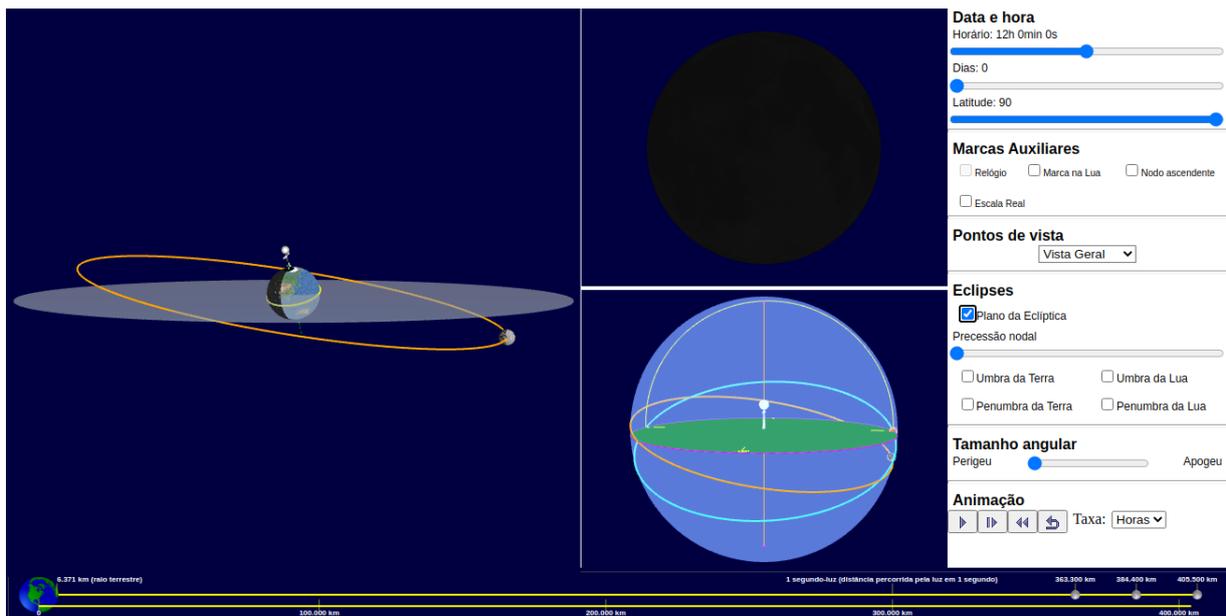


Figura 4.20: Simulador Lunar

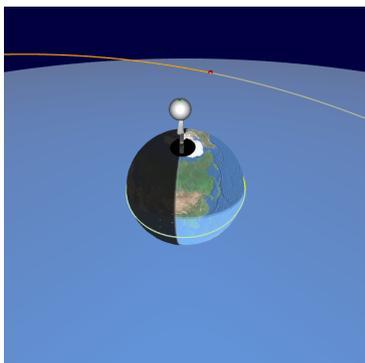


Figura 4.21: O nodo ascendente está marcado em vermelho.

1. No menu **Eclipses**, clique na opção *Plano da Eclíptica*. Neste instante, a Lua está ao sul ou ao norte do plano da eclíptica?
2. Clique em *Nodo ascendente*, no menu **Marcas Auxiliares**. O ponto vermelho marca o *nodo ascendente*, o ponto no qual a órbita da Lua cruza o plano da eclíptica indo do sul para o norte, conforme a Figura 4.21. Ajuste a barra de *Precessão nodal* no menu **Eclipses** até que o nodo ascendente coincida com a Lua. Onde a Lua se encontra em relação à eclíptica?
3. Existe outro ponto onde a trajetória da órbita da Lua cruza o plano da eclíptica? Se sim, onde ele está localizado em relação ao *nodo ascendente*?

O tempo necessário para que o nodo complete uma volta é chamado de *mês draconiano*, e é de **27 dias, 5 horas, 5 minutos 35,8 segundos** (cerca de 27,2 dias).

Parte 2 - Eclipse Lunar

Os eclipses lunares acontecem durante a Lua Cheia, quando a Lua está passando por um dos nodos. Clique em ☾ para reiniciar a simulação. Ajuste o data para o dia 14, próximo da Lua Cheia e o ponto de vista para *Vista Geral* (Figura 4.22).

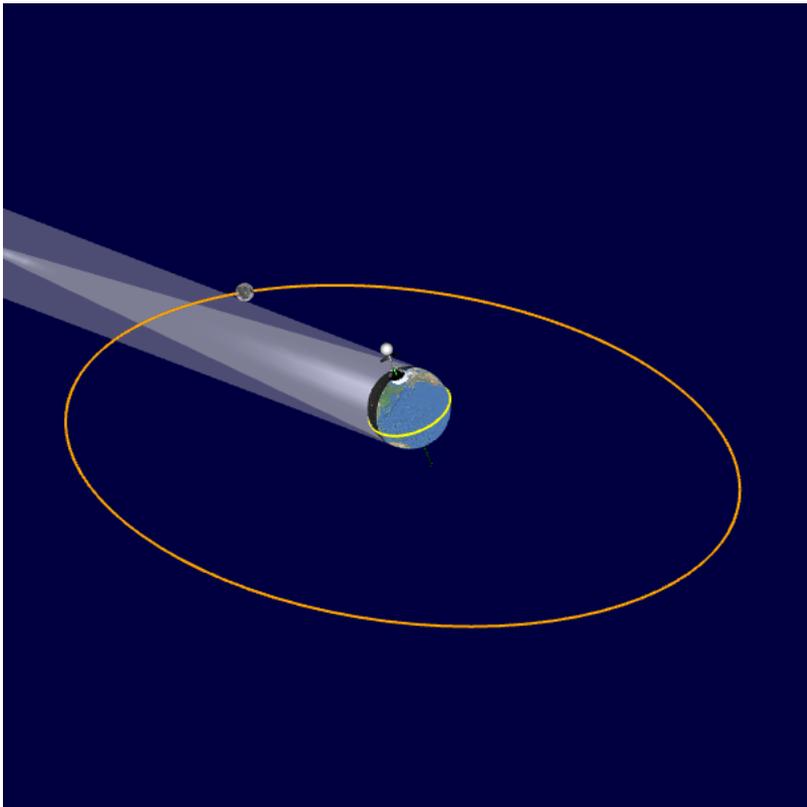


Figura 4.22: Sombra projetada pela Terra devido a luz do Sol.

No menu **Eclipses**, selecione as opções de *Umbra da Terra* e *Penumbra da Terra* para exibir a sombra projetada pela Terra devido à luz solar.

1. A Lua está acima, abaixo ou sobre a sombra da Terra?
2. Selecione a opção *Nodo ascendente* e deslize a barra de *Precessão nodal* até que o ponto vermelho do nodo coincida com a Lua. A Lua está acima, abaixo ou sobre a sombra da Terra?
3. Selecione o ponto de vista *Vista da Terra* (Figura 4.23). O eclipse lunar ocorre quando a Lua atravessa a região da sombra terrestre. Um observador no lado claro da Terra conseguiria ver um eclipse lunar?
4. Algum observador no lado noturno da Terra não conseguiria ver o eclipse?

Durante o eclipse lunar a Lua pode atravessar a região da penumbra parcialmente (eclipse penumbral parcial) ou totalmente (eclipse penumbral),

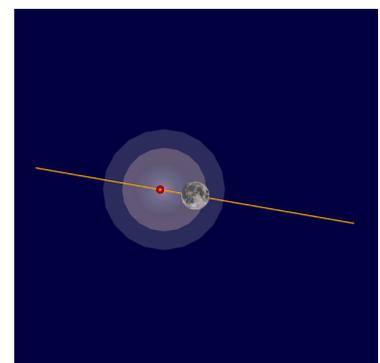


Figura 4.23: Eclipse lunar visto a partir da Terra. A imagem não está em escala, mas dá uma dimensão aproximada do tamanho do disco lunar comparado à sombra terrestre.

e pode atravessar a região da umbra parcialmente (eclipse parcial) ou totalmente (eclipse total). Um eclipse lunar dura tipicamente cerca de 3h, mas como a simulação não está em escala, este tempo é diferente. Para ver o eclipse em escala, selecione o ponto de vista *Vista Geral* e a opção *Escala Real*.

Parte 3 - Eclipse Solar

Os eclipses solares acontecem durante a Lua Nova, quando a Lua está passando por um dos nodos. Clique em ☾ para reiniciar a simulação. Ajuste o data para o dia 29, próximo da Lua Nova e o ponto de vista para *Vista Geral*. No menu **Eclipses**, selecione as opções de *Umbra da Lua* e *Penumbra da Lua* para exibir a sombra projetada pela Lua devido à luz solar (Figura 4.24).

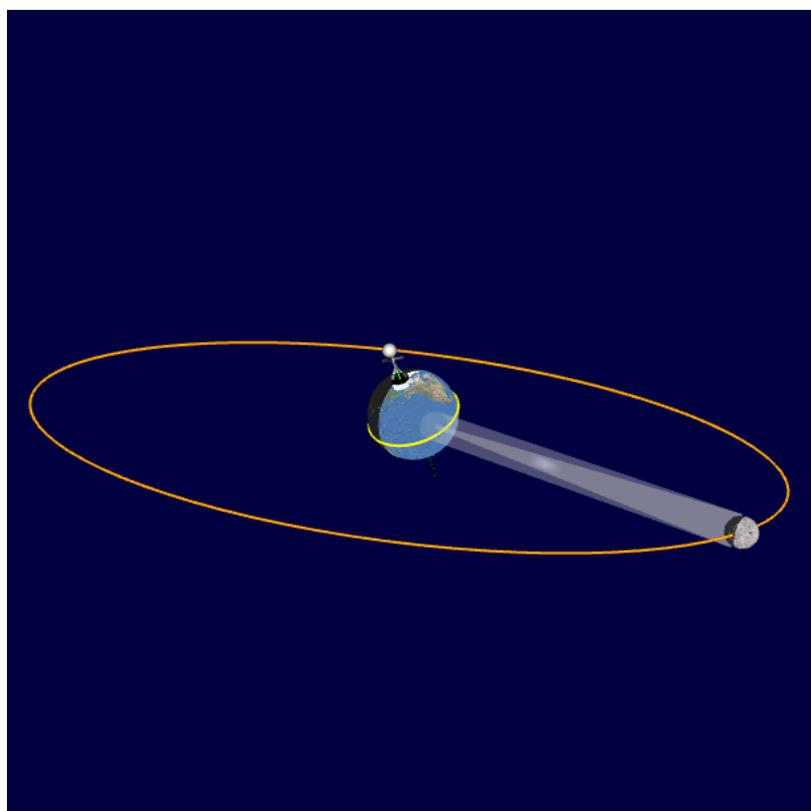


Figura 4.24: Eclipse solar. A imagem não está em escala, mas dá uma dimensão aproximada do tamanho da sombra projetada pela Lua sobre a Terra.

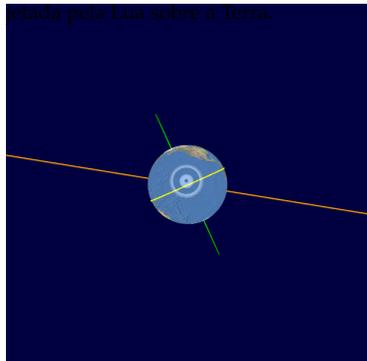


Figura 4.25: Eclipse solar visto da Lua.

1. A sombra da Lua está abaixo, acima ou sobre a Terra?
2. Selecione a opção *Nodo ascendente* e deslize a barra de *Precessão nodal* até que o ponto vermelho do nodo coincida com a Lua. A sombra da Lua está abaixo, acima ou sobre a Terra?
3. Selecione o ponto de vista *Vista da Lua* (Figura 4.25). O eclipse solar ocorre quando a Lua projeta sua sombra sobre a Terra. Um observador no lado noturno da Terra conseguiria ver um eclipse solar?
4. Todos os observadores no lado diurno da Terra conseguiriam ver o eclipse solar?

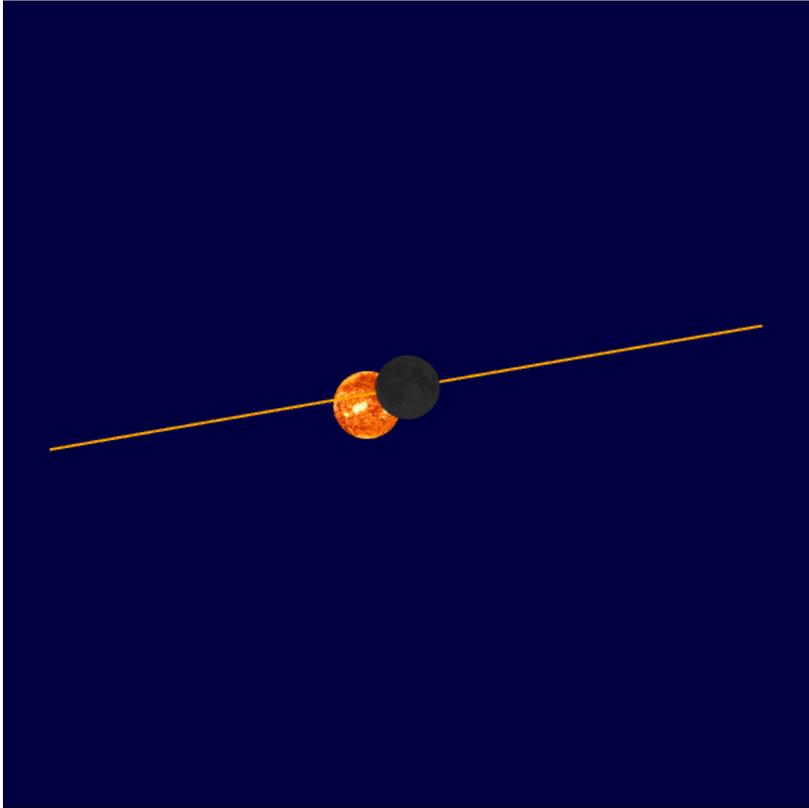


Figura 4.26: Eclipse solar visto da Terra.

Durante o eclipse solar, a Lua se interpõe entre o Sol e a Terra (Figura 4.26), projetando sua sombra sobre a superfície terrestre. No entanto, a sombra projetada pela Lua é bem menor do que aquela projetada pela Terra (que dá origem ao eclipse lunar). Assim, somente algumas regiões na Terra estarão debaixo da sombra lunar durante o eclipse e, por isso, o eclipse solar não pode ser visto por todos os observadores na Terra.

O eclipse solar pode ser parcial (quando a lua cobre somente parte do disco solar), total (quando a Lua cobre todo o disco solar) ou anular (quando a Lua cobre todo o disco solar, mas seu diâmetro angular aparente é menor que o Sol naquele instante).

É uma incrível coincidência que os diâmetros angulares do Sol e da Lua, vistos da Terra, sejam tão próximos, fazendo com que tenhamos eclipses solares totais e anulares.

As leis de Kepler e da Gravitação Universal

5

Desde a astronomia grega clássica, com nomes como Ptolomeu e Aristóteles, a ideia de um sistema geocêntrico* parecia muito condizente com a realidade. Afinal de contas, notamos diariamente o Sol completar uma volta em torno da Terra, assim como as estrelas, a Lua e os outros planetas. No entanto um modelo geocêntrico precisa de diversos arranjos geométricos para explicar de modo eficiente o movimento dos astros mais próximos da Terra. Ainda assim, existiam alguns efeitos que não se encaixavam num modelo deste tipo.

5.1	Leis de Kepler	65
5.1.1	1ª Lei de Kepler	65
5.1.2	2ª Lei de Kepler	66
5.1.3	3ª Lei de Kepler	67
5.2	Lei da Gravitação Universal	68

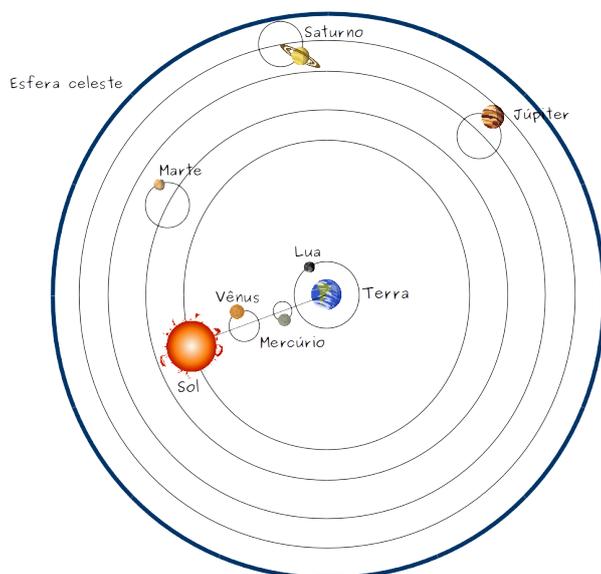


Figura 5.1: Modelo geocêntrico do Sistema Solar.

A ideia de um sistema heliocêntrico[†] já vinha ganhando força com as propostas de Nicolau Copérnico[‡] no século XVI.

É importante notar que não há problema algum em descrever o movimento dos astros tomando a Terra como referência. No entanto, qualquer outro ponto de referência deve ser igualmente válido, e deve apresentar os mesmos resultados. Coincidentemente, a descrição do movimento dos corpos celestes, ao menos no Sistema Solar, tendo o Sol próximo da origem é geometricamente mais simples.

Segundo Copérnico, sua teoria heliocêntrica poderia ser sintetizada de acordo com os seguintes princípios:

1. Os movimentos dos astros são uniformes, eternos, circulares ou uma composição de vários círculos (epiciclos).
2. O centro do universo é perto do Sol.
3. Perto do Sol, em ordem, estão Mercúrio, Vênus, Terra, Lua, Marte, Júpiter, Saturno, e as estrelas fixas.

* com a Terra no centro do Universo.

† com o Sol no centro do Universo.

‡ O livro *Da revolução das esferas celestes* foi publicado em 1543, ano de sua morte.

4. A Terra tem três movimentos: rotação diária, volta anual, e inclinação anual de seu eixo.
5. O movimento retrógrado dos planetas é explicado pelo movimento da Terra.
6. A distância da Terra ao Sol é pequena se comparada à distância às estrelas.

Embora Copérnico tenha formulado uma hipótese heliocêntrica para descrever o movimento aparente dos astros, em seu livro ele não aponta nenhuma evidência científica ou medidas que suportem a sua tese. Contudo, ele propunha um argumento de simplicidade, considerando que órbitas circulares em torno do Sol seriam mais simples de se entender do que toda a complexidade geométrica necessária para adequar o modelo geocêntrico aos movimentos celestes observados.

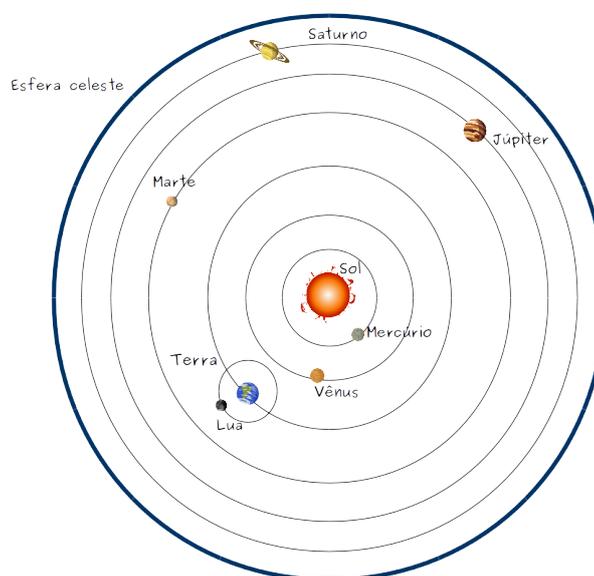


Figura 5.2: Modelo heliocêntrico do Sistema Solar.

Com as primeiras observações astronômicas feitas por meio de um telescópio, realizadas por Galileu Galilei em 1609, ficou evidente que nem todo corpo celeste girava em torno da Terra, derrubando o argumento geocêntrico. Galileu notou que existia um grupo de astros que orbitava Júpiter, com um período bem definido. Hoje em dia conhecemos esses astros como *Luas Galileanas*, são os 4 maiores satélites de Júpiter. Ainda, ele foi capaz de observar fases em Vênus, sendo que a variação do tamanho angular de Vênus de acordo com a fase apresentada era melhor explicada num sistema heliocêntrico.

No mesmo ano das observações de Galileu, um astrônomo alemão chamado Johannes Kepler publicou um livro chamado *Astronomia Nova*. Nesta obra, Kepler analisou as medidas precisas do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe para a órbita de Marte. Com base nestes dados, Kepler propôs duas leis sobre o movimento dos planetas e, posteriormente[§], enunciou a terceira lei (sobre o período das órbitas). Vamos discutir cada uma delas a seguir.

[§] A terceira lei de Kepler só foi publicada em 1619, em *A Harmonia do Mundo*.

5.1 Leis de Kepler

Como os dados orbitais de Tycho Brahe eram extremamente precisos, ele propôs a Kepler que determinasse a órbita de Marte. Tycho Brahe possuía um modelo de sistema solar híbrido, incorporando ideias tanto do modelo geocêntrico quanto de um modelo heliocêntrico. O intuito de deixar Kepler ter acesso a estas medidas era justamente ver se ele conseguiria verificar a validade desse modelo.

Ao trabalhar nestes dados, Kepler tentou diversas abordagens. Uma órbita perfeitamente circular como a proposta por Copérnico não se adequava aos dados experimentais, e Kepler descartou de início uma órbita elíptica por achar demasiadamente simples, considerando que astrônomos mais antigos já haveriam verificado esta hipótese. No entanto, por possuir uma excentricidade muito alta[¶], a observação da órbita de Marte permitiu que Kepler notasse sua órbita elíptica.

Daqui pra frente vamos nos referir a uma unidade de medida muito utilizada na astronomia, a *unidade astronômica*, definida em 2012 como o valor médio da distância da Terra ao Sol.

Unidade Astronômica

1 AU = 149.597.870.700 m $\approx 1,5 \times 10^8$ km.

5.1.1 1ª Lei de Kepler

Todos os planetas movem-se em órbitas descritas por elipses, com o Sol em um dos focos.

Diferentemente do proposto por Copérnico, as órbitas dos planetas em torno do Sol, de acordo com Kepler, seriam elipses, e não circunferências. A circunferência pode ser vista como um caso especial da elipse, no qual os semi-eixos maior e menor são iguais.

Se chamarmos o semi-eixo menor de b e o semi-eixo maior de a , podemos encontrar o quão excêntrica é a elipse, o quão achatada ela é. Essa excentricidade, ϵ , será dada por:

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}.$$

A circunferência possui $a = b$, de modo que a excentricidade será 0.

A excentricidade da órbita dos planetas do Sistema Solar é muito baixa, se assemelhando a uma órbita circular, conforme podemos ver na Tabela 5.1.

Podemos notar que as órbitas dos planetas são praticamente circulares, com destaque para Mercúrio e Marte, que são um pouco mais excêntricas

[¶] Dentre os planetas conhecidos na época, Mercúrio é o que possui uma órbita mais excêntrica. Contudo, medidas da órbita de Mercúrio são difíceis de se fazer, dado a proximidade do Sol.

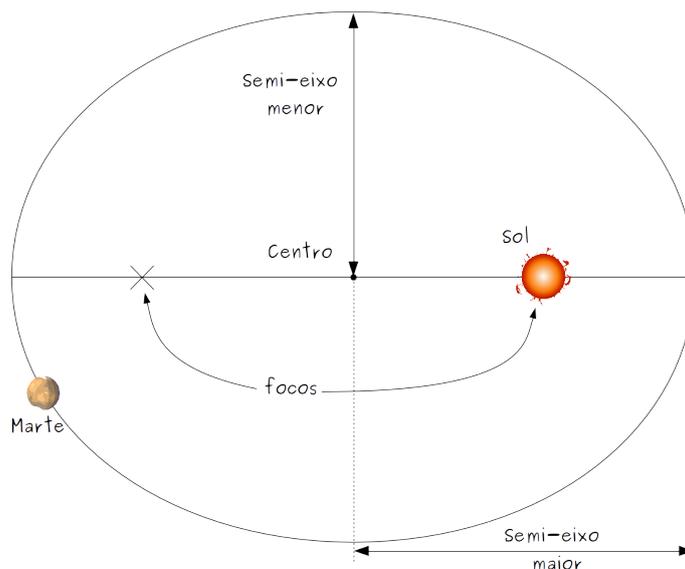


Figura 5.3: Órbita elíptica (exagerada) de Marte em torno do Sol.

Tabela 5.1: Excentricidade da órbita de alguns corpos do Sistema Solar.

Corpo do Sistema Solar	Excentricidade da órbita
Mercúrio	0,2056
Vênus	0,0068
Terra	0,0167
Marte	0,0934
Júpiter	0,0484
Saturno	0,0541
Urano	0,0472
Netuno	0,0086
Plutão	0,2488
Cometa Halley	0,9671

que as outras. Além disso, Plutão tem uma excentricidade bastante alta, e o cometa Halley tem uma órbita ainda mais excêntrica.

5.1.2 2ª Lei de Kepler

Os planetas varrem áreas iguais em tempos iguais.

O fato das órbitas serem elípticas faz com que os planetas estejam, em certas épocas, mais próximos (*periélio*) ou distantes (*afélio*) do Sol. Isso faz com que a sua velocidade varie, como foi demonstrado por Isaac Newton posteriormente.

Podemos notar este fato observando que o intervalo de dias entre os equinócios de Março e Setembro (cerca de 186 dias) é diferente do intervalo entre os equinócios de Setembro e Março (cerca de 179 dias). Isso, aliado ao fato de que a Terra encontra-se mais próxima ao Sol no início do ano, nos leva à conclusão de que os planetas devem se movimentar mais rápido quanto estão próximos do Sol. Foi este raciocínio, junto dos cálculos da órbita marciana, que permitiu que Kepler enunciasse a sua segunda lei.

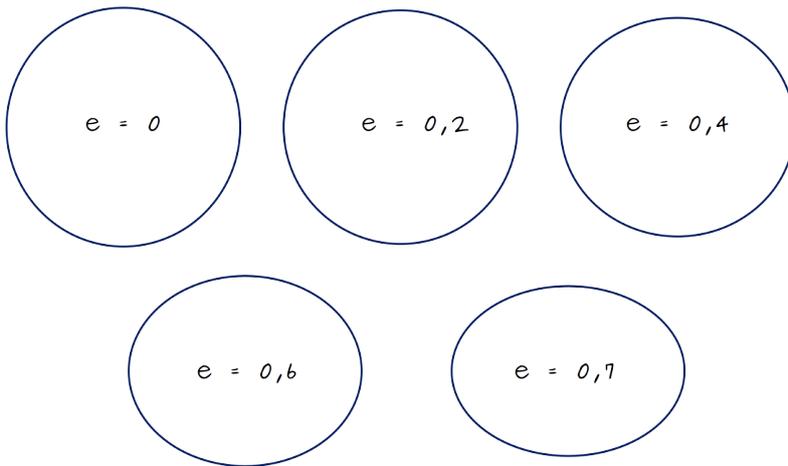


Figura 5.4: Elipses com diversas excentricidades.

De acordo com a Figura 5.5, vemos que a Área 1 “varrida” pelo planeta num intervalo T qualquer é igual a Área 2, varrida num mesmo intervalo de tempo T , independente do ponto da trajetória onde o planeta esteja.

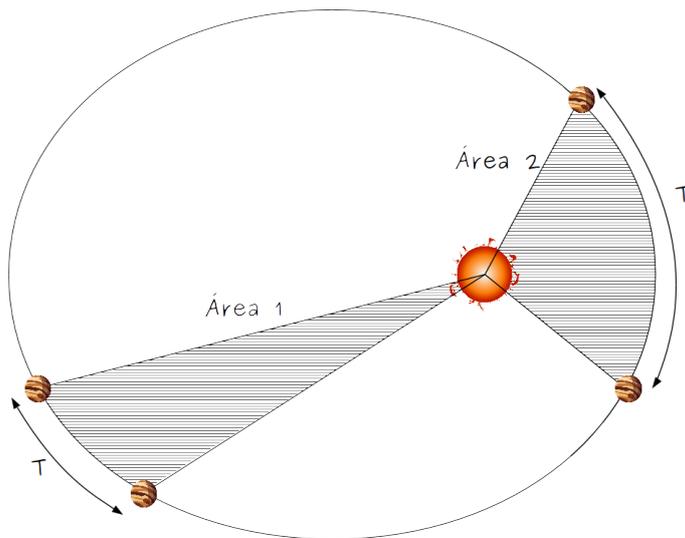


Figura 5.5: Ilustração da 2ª lei de Kepler.

5.1.3 3ª Lei de Kepler

O quadrado do período orbital de um planeta é diretamente proporcional ao cubo do semi-eixo maior da sua órbita.

Conforme comentamos, a 3ª lei de Kepler foi enunciada alguns anos após as duas primeiras. Chamada de “lei harmônica”, ela relaciona a distância que os planetas se encontram do centro do Sistema Solar com o período da sua órbita. Matematicamente, ela pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{T^2}{R^3} = k,$$

onde k é uma constante.

É importante frisar que o valor de k depende do centro gravitacional que estamos tratando. No caso de corpos que orbitam o Sol, temos um valor de k . Se considerarmos, por outro lado, os corpos que orbitam a Terra (como a Lua e outros satélites artificiais), k possui outro valor.

Vale também notar que os valores de R utilizados são dados em termos da distância da Terra ao Sol, a *unidade astronômica* (ou AU), conforme dito anteriormente, enquanto os valores de T são dados em termos de anos terrestres.

A tabela abaixo mostra o valor do período e da distância de alguns corpos do Sistema Solar, e o valor de $1/k$ calculado.

Tabela 5.2: Relação entre distância média ao Sol e período orbital dos planetas.

Planeta	Distância Média do Sol (AU)	Período(dias)	$R^3/T^2 \times 10^6$ (AU ³ /dias ²)
Mercúrio	0,389	87,77	7,64
Vênus	0,724	224,70	7,52
Terra	1	365,25	7,50
Marte	1,524	686,95	7,50
Júpiter	5,2	4332,62	7,49
Saturno	9,510	10759,2	7,43

5.2 Lei da Gravitação Universal

Embora as leis de Kepler descrevam muito bem as órbitas dos planetas do Sistema Solar, elas não se preocupam em explicar como esse comportamento se dá. Foi somente com a formulação da lei da gravitação universal no final do século XVII, por Isaac Newton, que um entendimento mais profundo das órbitas dos planetas se deu.

Newton propôs que todo corpo possui uma *massa gravitacional*, de forma que todo corpo com massa atrai outro corpo massivo, na razão inversa do quadrado da distância entre estes corpos.

A magnitude da força com a qual estes corpos se atraem é dada pela expressão

$$F_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

onde $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ é a chamada *constante da gravitação universal*, m_1 e m_2 são as massas de cada corpo e r é a distância entre eles. No caso dos planetas orbitando o Sol, uma das massas é a massa do Sol e a outra do planeta. Existem também forças entre um planeta e outro, mas elas são muito menores do que a força exercida pelo Sol.

Como acabamos de ver, as órbitas elípticas dos planetas implicam em distâncias diferentes do planeta ao Sol ao longo de uma órbita completa. Isso faz com que a distância entre o planeta e o Sol varie e, conseqüentemente, variando a força de atração entre os dois corpos.

De acordo com a teoria de Newton, a força que atua sobre um corpo faz com que a sua velocidade seja alterada, causando então os efeitos que observamos: ao se distanciar do Sol, a velocidade dos planetas diminui e, ao se aproximar, a sua velocidade aumenta.

Como a velocidade da Terra é maior no periélio e essa época é justamente durante o verão no hemisfério sul (em torno de 4 de Janeiro), estes são cerca de 2 ou 3 dias mais curtos do que os verões no hemisfério norte.

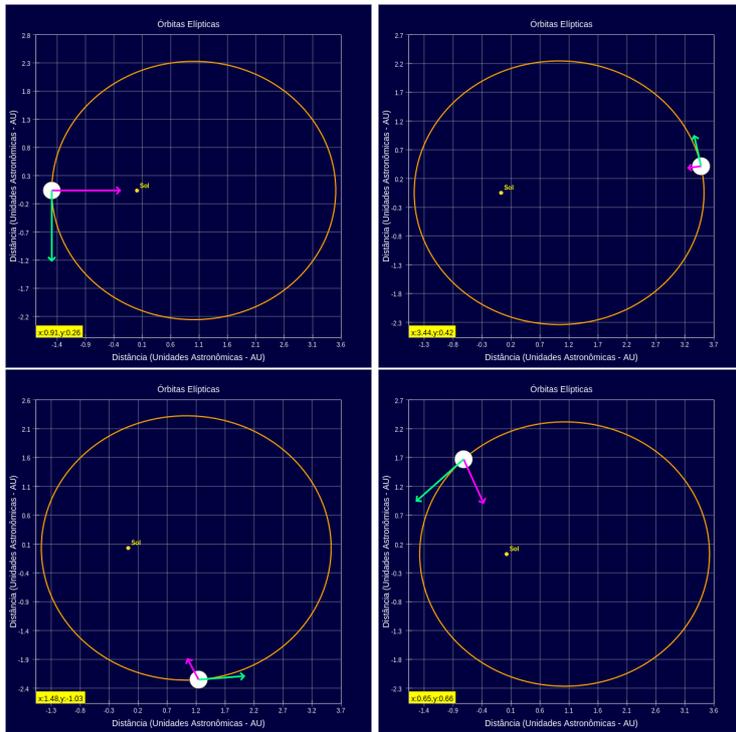


Figura 5.6: Os vetores verde e rosa representam, respectivamente, a velocidade e aceleração de um planeta ao longo de sua trajetória em torno do Sol.

Podemos ver na Figura 5.6 uma representação da velocidade e aceleração de um planeta ao longo da sua órbita.

A seta verde representa a *velocidade* do planeta e aponta sempre na direção em que o planeta está se movendo naquele instante. Quanto maior o seu tamanho, mais rápido o planeta está se movendo naquela direção.

A seta rosa representa a *aceleração* do planeta e aponta sempre na direção do Sol. A aceleração está intimamente relacionada com a força com a qual o planeta é atraído na direção do Sol. Quanto maior seu tamanho, maior a aceleração e força com a qual o planeta está sendo atraído naquela direção.

Quando as setas apontam exatamente no mesmo sentido (ambas para o mesmo lado), a velocidade aumenta o máximo possível. No entanto, quando apontam em sentidos opostos, a velocidade diminui o máximo possível. Desta forma, a aceleração é responsável por aumentar e diminuir a velocidade ao longo da órbita do planeta.

Em situações intermediárias, quando o ângulo entre as setas é menor que 90° , a velocidade aumenta e quando o ângulo é maior que 90° a velocidade diminui. Você saberia dizer o que acontece com a velocidade quando o ângulo entre as setas é de exatamente 90° ? **

São chamadas de *vetores* no estudo da Física.

** Quando o ângulo é de 90° , a aceleração é perpendicular à velocidade e não contribui nem aumentando ou diminuindo a velocidade.

Atividade - Órbitas planetárias



Figura 5.7: https://scatena.sites.ufsc.br/astrofisica/sistema_solar/index.xhtml

Nesta atividade vamos explorar as características das órbitas dos planetas do Sistema Solar e verificar a validade das leis de Kepler. Acesse a simulação computacional por meio do QR Code na Figura 5.7 (ou pelo link na legenda).

No simulador é possível selecionar os parâmetros orbitais para os planetas do Sistema Solar utilizando o menu **Planetas**, além de exibir as órbitas dos planetas rochosos e gasosos, em escala. Na janela do meio são exibidas imagens dos planetas comparados entre si, em escala também.

Ainda, em cada uma das abas é possível encontrar controles para explorar as leis de Kepler. É possível também medir distâncias clicando na caixa **Medir distância** e clicando com o botão esquerdo do mouse para marcar o início e clicando novamente para marcar o final da distância desejada.

Por fim, no menu **Animação**, você pode dar início à simulação e verificar como são as órbitas e como se comparam as rotações dos planetas. É possível alterar o número de dias transcorridos por passo da simulação.

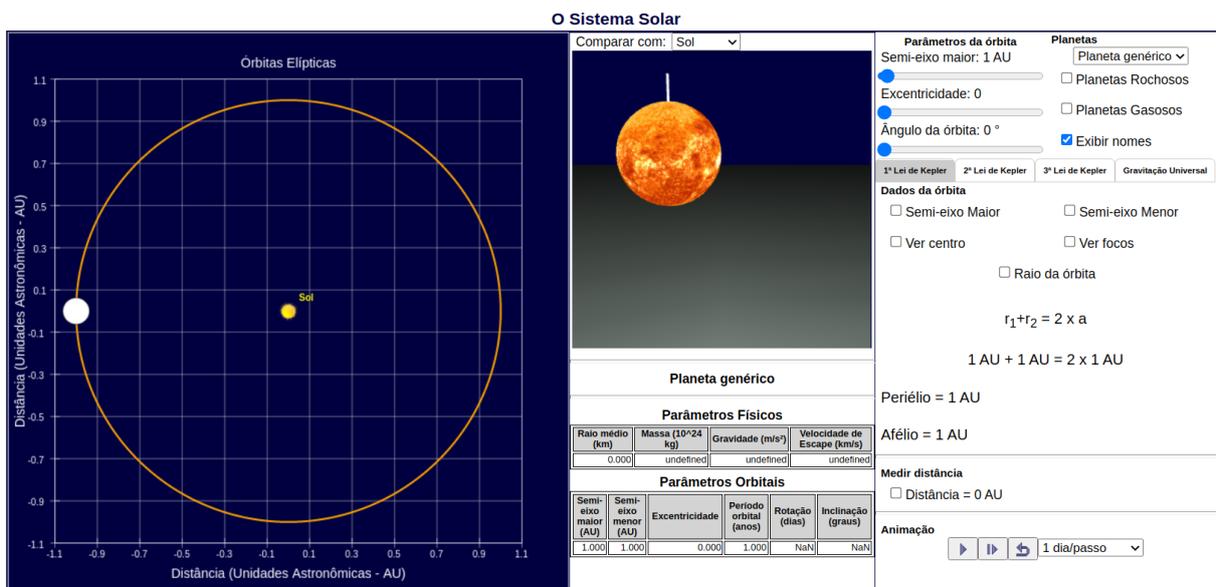


Figura 5.8: O simulador do Sistema Solar.

Parte 1 - 1ª Lei de Kepler

1ª Lei de Kepler

Todos os planetas movem-se em órbitas descritas por elipses, com o Sol em um dos focos.

Para entendermos a primeira lei de Kepler precisamos saber o que é uma elipse e seus focos.

No menu **Dados da órbita**, clique em *Ver centro* e *Ver focos*. Agora, ajuste os valores de *Excentricidade* e *Semi-eixo maior* para ver as diferentes formas

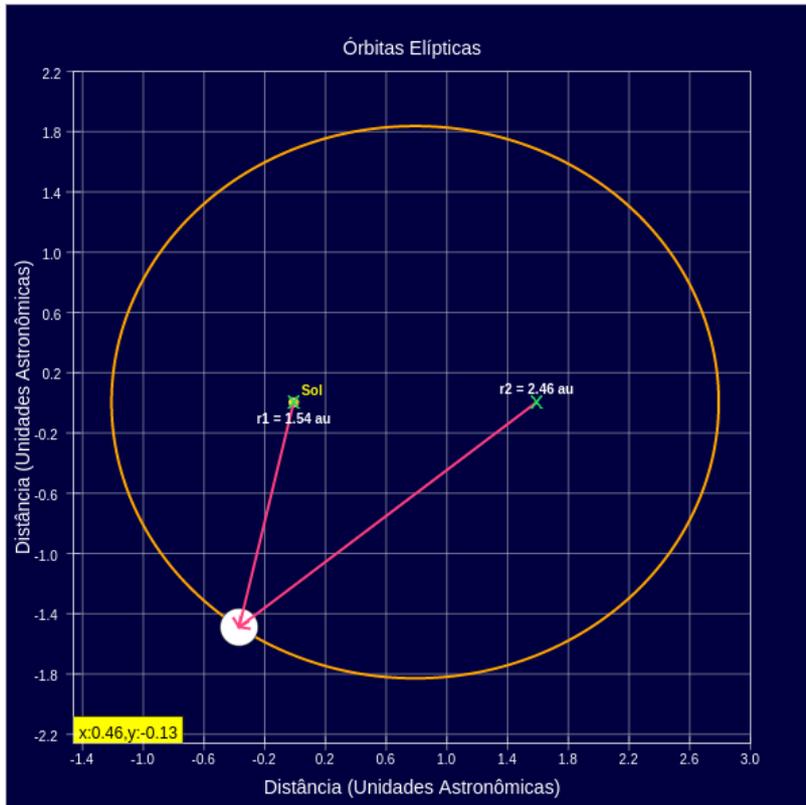


Figura 5.9: Órbita elíptica com os valores dos raios partindo de cada um dos focos até o planeta.

que as elipses podem tomar. Você pode utilizar o botão de rolagem do mouse para aproximar ou afastar a imagem.

Os pontos marcados com um X são os chamados *focos* da elipse. Chamaríamos de r_1 a distância do foco da esquerda (onde fica o Sol) ao planeta e r_2 a distância do foco da direita ao planeta.

1. No menu **Dados da órbita**, selecione as caixas *Semi-eixo maior* e *Semi-eixo menor* para exibí-los. Ajuste o valor de *Semi-eixo maior* para ver seu efeito na elipse. Agora, altere o valor da *Excentricidade*. O que acontecem com os semi-eixos maior e menor? E o que acontece com os focos?
2. Ajuste o semi-eixo maior para um valor de 2 AU e excentricidade 0. Selecione a opção *Raio da órbita*, como na Figura 5.9. Quais os valores de r_1 e r_2 encontrados?
3. Altere agora o valor da excentricidade para 0,4 e mantenha o mesmo valor do semi-eixo maior. Pressione o botão ► para iniciar a simulação. Qual a menor distância que o planeta fica do Sol? E a maior distância?
4. Mantendo os mesmos parâmetros para a órbita, encontre o ponto no qual os valores de r_1 e r_2 são iguais. Faça um esboço da elipse, marque o local deste ponto e os raios r_1 e r_2 .
5. Calcule $r_1 + r_2$ e compare com o semi-eixo maior. Existe alguma relação? Isso é válido para todos os pontos da elipse?
6. No menu **planetas**, busque pelo planeta que possui a menor excentricidade. Qual a diferença do afélio e do periélio para a órbita deste planeta?

O *periélio* é o ponto no qual o planeta está mais próximo do Sol, e o *afélio* é o ponto no qual está mais distante.

7. Qual planeta possui a maior excentricidade? Qual a diferença do afélio e periélio para este planeta?

Parte 2 - 2ª Lei de Kepler

2ª Lei de Kepler

Os planetas varrem áreas iguais em tempos iguais.

A segunda lei de Kepler indica que existe uma relação entre a distância que um planeta se encontra do Sol e a velocidade com a qual ele percorre sua órbita. A forma utilizada por Kepler para explicitar essa relação foi por meio das 'áreas varridas' durante um mesmo intervalo de tempo.

Para entendermos o que isso significa, clique na aba **2ª Lei de Kepler** (conforme Figura 5.10).

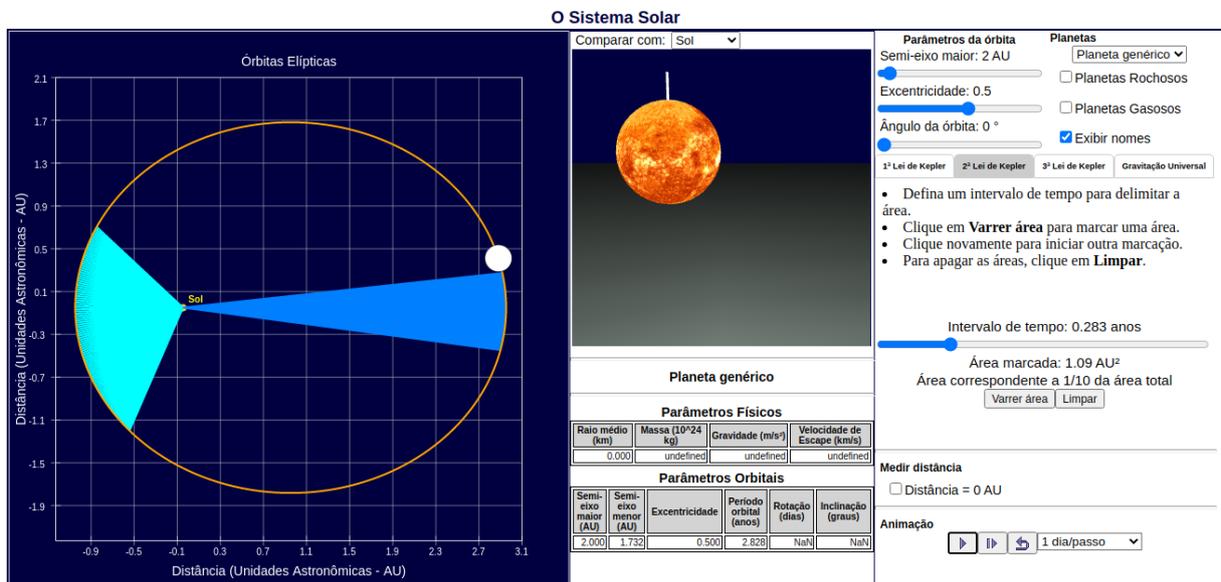


Figura 5.10: Análise da 2ª Lei de Kepler no Simulador do Sistema Solar.

Você pode selecionar um intervalo de tempo utilizando a barra deslizante para determinar qual a área varrida neste intervalo. Em seguida, basta clicar em *Varrer área* para visualizar a área demarcada. Você pode adicionar quantas áreas quiser e clicar em *Apagar* para apagá-las. Note que o valor da área demarcada é exibido, em AU².

1. Clique no botão ↺ para reiniciar a simulação. Em seguida, na aba **2ª Lei de Kepler** e ajuste o intervalo de tempo para 0.1 anos. Clique em ▶ para iniciar a simulação e em *Varrer área* para demarcar uma área varrida pelo planeta no intervalo definido. Qual o valor da área demarcada, em AU². Repita o processo para outros trechos da órbita do planeta e verifique o valor da área varrida.
2. Ajuste o semi-eixo maior para 2 AU e a excentricidade para 0.5 e, voltando à aba **1ª Lei de Kepler**, selecione *Raio da órbita* e clique em ▶ para iniciar a simulação. Identifique o afélio e o periélio. Em seguida, na aba **2ª Lei de Kepler**, ajuste o intervalo de tempo para

0.1 anos e clique em *Varrer área* quando o planeta estiver próximo do periélio. Qual o valor da área? Repita o processo para o afélio. Quais as diferenças entre as áreas marcadas?

3. Comparando os trechos percorridos, você diria que planeta percorreu uma distância maior durante o afélio ou periélio?
4. Se o intervalo de tempo foi o mesmo, você diria que a velocidade do planeta no afélio é maior, menor ou igual a do periélio?
5. A órbita do cometa Halley tem um semi-eixo maior de aproximadamente 18 AU, e uma excentricidade de aproximadamente 0.9, conforme a Figura 5.11. Coloque estes parâmetros no simulador e inicie a animação clicando em ►. O movimento do planeta é mais rápido quando ele está próximo do Sol ou distante do Sol?

Você pode mudar a velocidade da animação escolhendo outras taxas como 100 dias/ passo ou 10 dias/ passo.

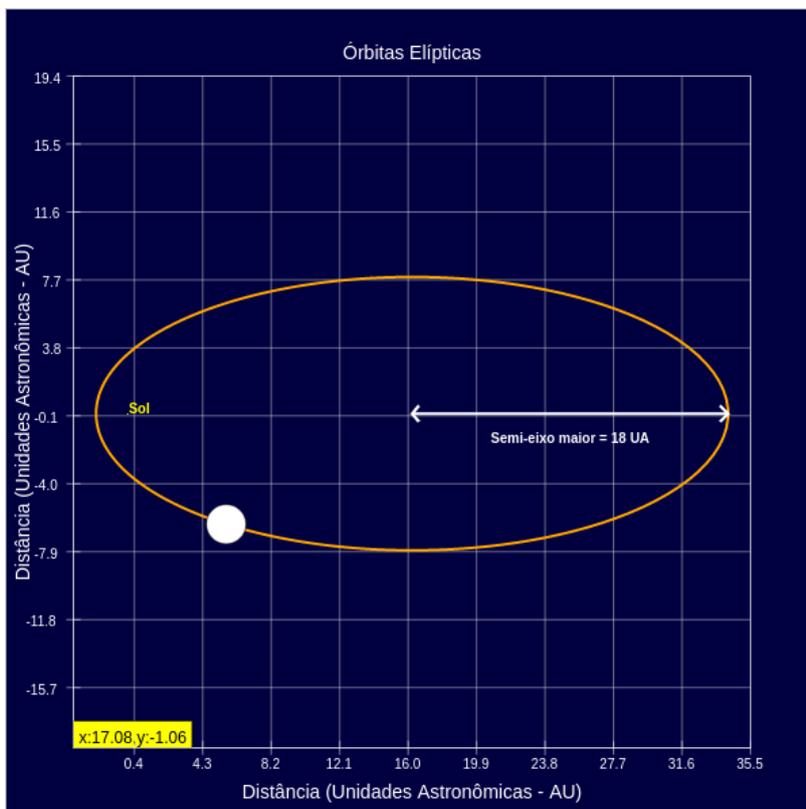


Figura 5.11: Órbita aproximada do Cometa Halley. Uma característica dos cometas é justamente a excentricidade alta de suas órbitas. O cometa Halley tem, na verdade, uma excentricidade de $e = 0,967$

Parte 3 - 3ª Lei de Kepler

3ª Lei de Kepler

O quadrado do período orbital de um planeta é diretamente proporcional ao cubo do semi-eixo maior da sua órbita.

A 3ª Lei de Kepler, de certa forma, une os elementos das outras duas. A primeira lei nos diz que as órbitas são elípticas, com o Sol num dos focos, o que quer dizer que exceto por uma órbita perfeitamente circular, os planetas eventualmente estarão a distâncias diferentes do Sol em trechos diferentes de sua órbita.

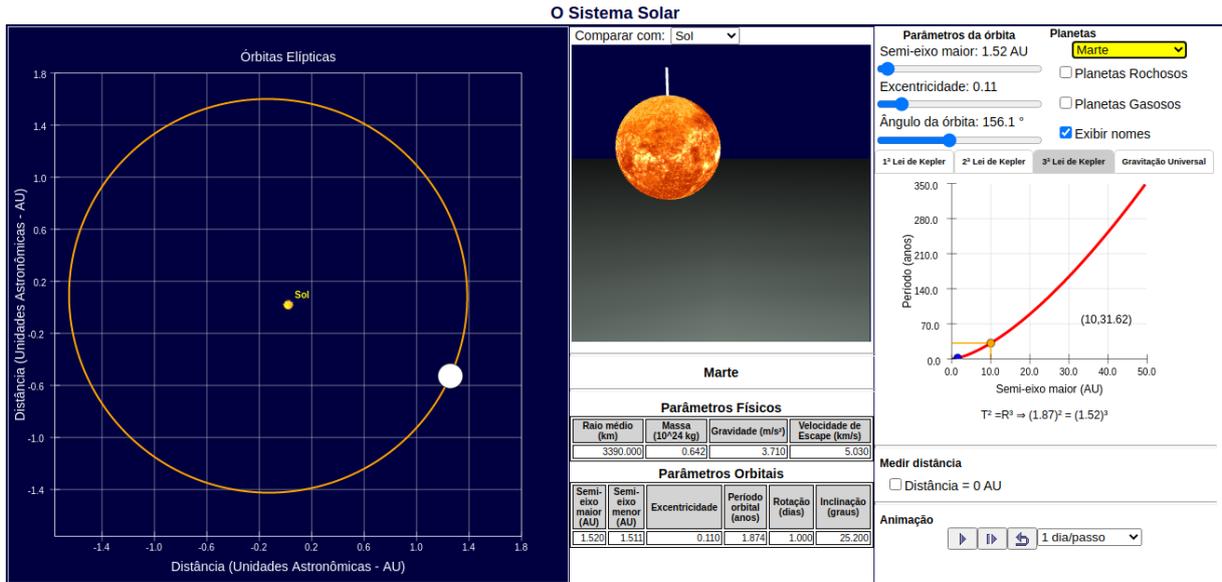


Figura 5.12: Simulador do Sistema Solar exibindo a 3ª lei de Kepler

Por outro lado, a segunda lei nos mostra que quanto mais longe do Sol o planeta está, mais vagorosamente ele se move, de modo que a área varrida por uma reta que une o Sol ao planeta num intervalo de tempo fixo é a mesma para qualquer trecho da órbita.

As duas leis, portanto, sugerem que exista uma relação entre essa distância que o planeta se encontra do Sol e o tempo que ele leva para completar a órbita. Com o auxílio da terceira lei de Kepler, se conhecermos o período de um planeta podemos calcular facilmente o semi-eixo maior de sua órbita.

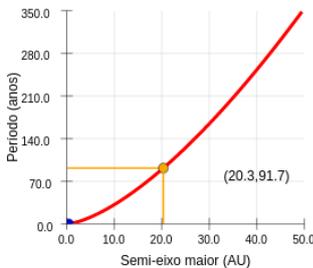


Figura 5.13: A relação da 3ª Lei de Kepler nos permite determinar que um planeta cuja órbita possui um semi-eixo maior de 20,3 AU possui um período de 91,7 anos terrestres.

1. Clique em ↺ para reiniciar a simulação. Selecione o planeta *Mercúrio* no menu **Planetas**. Clique na aba **3ª Lei de Kepler**. O gráfico exibido (Figura 5.13) mostra que para um determinado valor de semi-eixo maior existe um período de translação correspondente. Qual o período de translação de Mercúrio em anos terrestres?
2. Ajuste o valor da excentricidade da órbita para $e = 0.6$. O que acontece com o período do planeta?
3. Altere o valor do semi-eixo maior para 1 AU. O que acontece com o período?
4. Altere o planeta para *Marte*. Qual o valor do semi-eixo maior ao cubo? Qual o valor do período orbital ao quadrado?

Parte 4 - A Lei da Gravitação Universal

A teoria proposta por Isaac Newton é tão poderosa que consegue explicar de modo simples as todas as três Leis de Kepler. Esta teoria se baseia na existência de uma força de atração entre os corpos, neste caso entre o Sol e os planetas. Essas forças são capazes de mudar a velocidade dos planetas, tanto a sua magnitude quanto a sua direção. Nesta atividade vamos explorar como isso acontece.

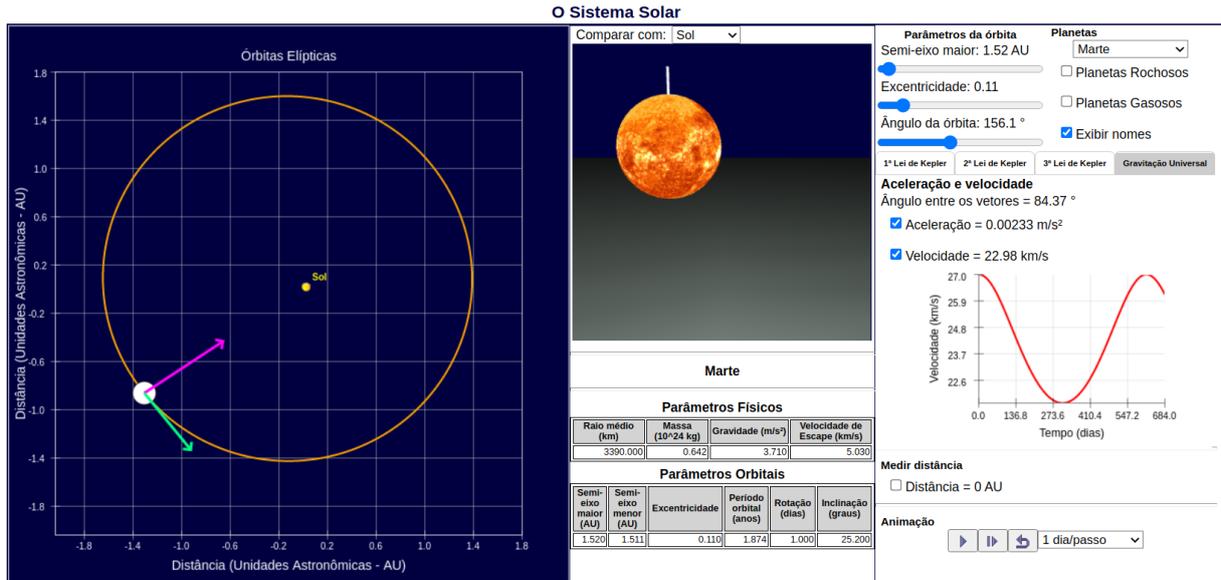


Figura 5.14: Simulador do Sistema Solar exibindo os vetores de velocidade e aceleração para o planeta Marte.

Clique em ↺ para reiniciar a simulação. Em seguida, selecione o planeta *Marte* no menu **Planetas** e clique na aba **Gravitação Universal**. Selecione a caixa *Velocidade* para exibir o valor da velocidade e o vetor que a representa (em verde, na Figura 5.14).

1. Em **Animação**, clique em ▶ para iniciar a simulação. Observe o valor da velocidade, o que acontece com ele ao longo de uma volta completa do planeta em torno do Sol? Em qual direção ela aponta?
2. Note que um gráfico começará a se formar na janela da direita, o que ele representa? A partir dele, encontre o valor da maior velocidade e da menor velocidade ao longo da órbita.
3. Quais os nomes dados para os pontos da órbita nos quais a velocidade é a maior e a menor, respectivamente?
4. Ainda com a animação rodando, clique na caixa de seleção da *Aceleração*. Em qual direção ela aponta?
5. Acima da caixa de seleção da aceleração está indicado qual o ângulo entre os vetores de aceleração e velocidade. Identifique em quais pontos da órbita o ângulo entre a aceleração e a velocidade é igual a 90°. (Selecione as caixas de *Semi-eixo maior*, *Semi-eixo menor* e *Ver focos* para auxiliar a determinação destes pontos.
6. O que acontece com a velocidade enquanto o ângulo entre ela e a aceleração é menor do que 90°?
7. O que acontece com a velocidade enquanto o ângulo entre ela e a aceleração é maior do que 90°?

Distâncias Astronômicas (Parte 1)

Neste capítulo vamos discutir quais são os métodos utilizados pelos astrônomos para determinar a distância que certos corpos celestes estão de nós. Por enquanto, trataremos de métodos geométricos e cinemáticos, sem nos preocupar com as propriedades físicas dos corpos celestes que estamos observando.

Na Parte II discutiremos outros métodos de determinação de distância, que levam em consideração parâmetros relacionados diretamente às propriedades físicas dos objetos celestes.

- 6.1 Distância relativa da Terra à Lua e da Terra ao Sol . . 77
- 6.2 Determinação de distâncias por radar 78
 - 6.2.1 Distância Terra-Lua por radar 79
- 6.3 Determinação de distâncias por paralaxe 81
 - 6.3.1 Paralaxe Geocêntrica . . . 82
 - 6.3.2 Paralaxe Heliocêntrica . . 83

6.1 Distância relativa da Terra à Lua e da Terra ao Sol

Uma forma possível de determinarmos a distância da Terra à Lua é considerar a posição relativa do Sol e da Lua durante uma lua crescente. Em tal situação, teremos a seguinte configuração:

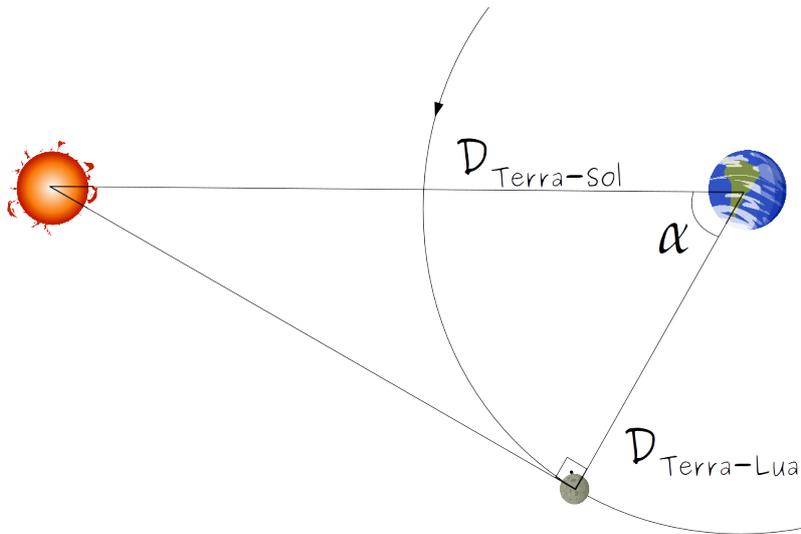


Figura 6.1: Configuração da posição relativa do Sol, Terra e Lua durante a lua crescente.

Do ponto de vista de um observador na Terra, o ângulo α é a distância angular entre a Lua e o Sol.

Aristarco fez essa medida cerca de 300 a.C., obtendo um valor de $\alpha = 87^\circ$. Analisando o triângulo acima, encontramos a seguinte relação:

$$\cos \alpha = \frac{D_{\text{Terra-Lua}}}{D_{\text{Terra-Sol}}}$$

Utilizando o valor encontrado por Aristarco, temos que $\frac{D_{\text{Terra-Lua}}}{D_{\text{Terra-Sol}}} = 0,0523$, o que nos dá $D_{\text{Terra-Sol}} = 19D_{\text{Terra-Lua}}$.

Uma simulação num software de astronomia nos permite calcular com um pouco mais de precisão (é uma medida complexa de se fazer na prática, embora o resultado obtido por Aristarco esteja bem próximo do valor atual medido).

Figura 6.2: Distância angular entre o Sol e a Lua durante uma lua crescente, com $\alpha = 89^\circ 53' 29,01''$. Crédito: imagem feita com o software *Stellarium*, <https://stellarium.org/>



Utilizando o valor encontrado acima, obtemos $D_{\text{Terra-Sol}} = 491D_{\text{Terra-Lua}}$.

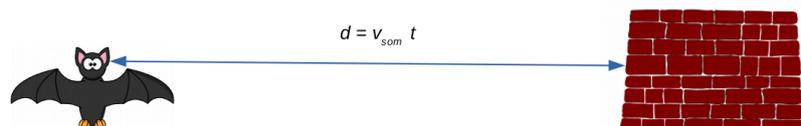
Independentemente da discrepância em relação ao resultado obtido por Aristarco, a medida encontrada por ele foi suficiente para mostrar que, de fato, embora o tamanho angular do Sol e da Lua sejam os mesmos, a Lua encontra-se muito mais próxima da Terra do que o Sol. Isso permitiu que ele concluísse que a Lua deve ser ao menos cerca de 20 vezes menor do que o Sol.

6.2 Determinação de distâncias por radar

Uma das formas de se determinar a distância que estamos de algum objeto consiste em medir o tempo que um sinal demora para ir até este objeto e voltar até nós, contanto que saibamos qual a velocidade do sinal. A área da astronomia que estuda a utilização de ondas de rádio para a determinação de grandezas astronômicas é a *radioastronomia*.

Consideremos o problema de um morcego que emite um sinal sonoro para determinar a distância que uma parede se encontra, conforme a Figura 6.3

Figura 6.3: Determinação da distância por um sinal sonoro emitido por um morcego.



Sabendo que o morcego emite um sinal sonoro que viaja a uma velocidade aproximada de $v_{\text{som}} = 330 \text{ m/s}$, e que o sinal demora cerca de $\Delta t = 0,2$ segundos para ser ouvido pelo morcego novamente, qual a distância d da parede?

Para resolver o problema, notamos que se a velocidade do sinal emitido pelo morcego é constante, podemos escrevê-la como:

$$v_{som} = \frac{\Delta S}{\Delta t},$$

onde a distância ΔS é igual a duas vezes a distância d pois o sinal precisa ir e voltar, ou seja, $\Delta S = 2d$. Assim, de acordo com a equação anterior, temos:

$$v_{som} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (6.1)$$

$$= \frac{2d}{\Delta t} \quad (6.2)$$

de modo que encontramos $d = \frac{1}{2}v_{som} \cdot \Delta t$.

Portanto, encontramos

$$d = \frac{1}{2}330 \text{ m/s} \cdot 0,2 \text{ s} = 33 \text{ metros.}$$

6.2.1 Distância Terra-Lua por radar

Vamos utilizar o mesmo método, agora, para determinarmos a distância da Terra à Lua. Durante as missões Apolo para a Lua no final da década de 1960 e início da década de 1970, os astronautas deixaram sobre a superfície lunar um conjunto de espelhos, conforme a Figura 6.4.

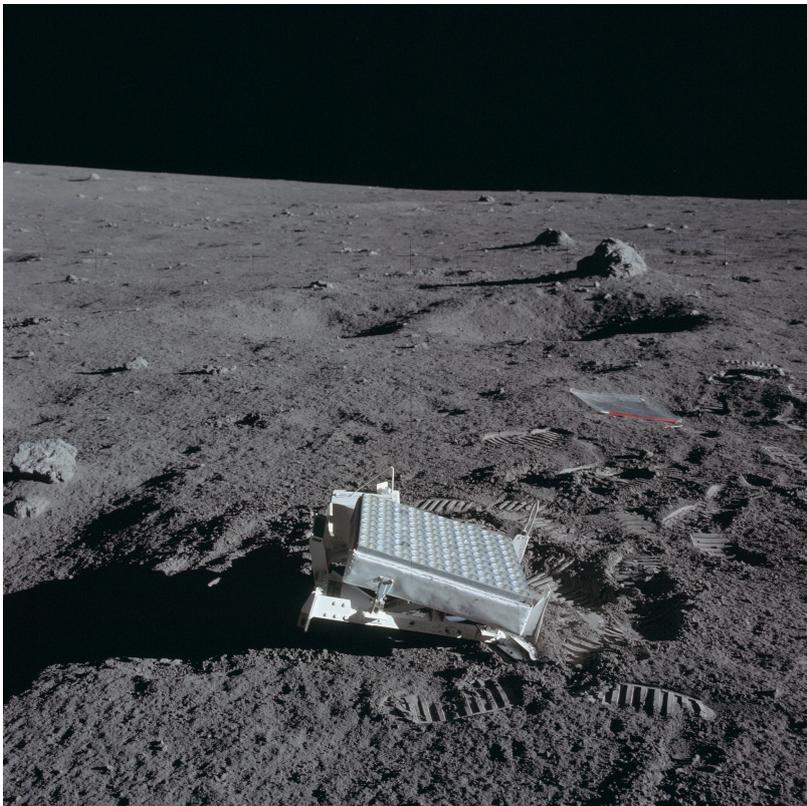
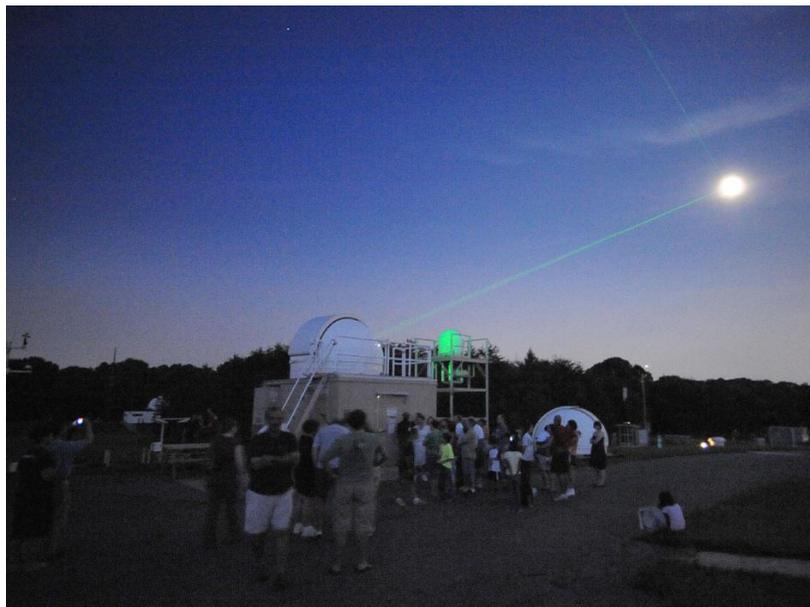


Figura 6.4: Espelhos deixados na Lua pela missão Apolo. Crédito: NASA

Desta forma, sabendo a velocidade do pulso de laser e o tempo que o mesmo demora para chegar até à Lua, refletir nos espelhos e voltar, podemos determinar a distância da Terra à Lua.

Figura 6.5: Laser emitido por um observatório para determinação da distância à Lua por radar. Crédito: NASA/Debbie McCallum



Atividade - Distância da Terra à Lua por Radar

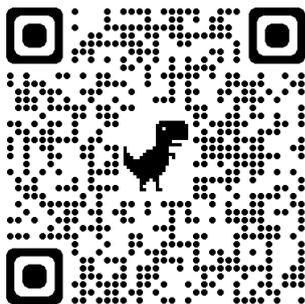


Figura 6.6: <https://scatena.sites.ufsc.br/astrologia/radar/index.xhtml>

Vamos utilizar o método de determinação de distâncias por radar para encontrar qual a distância da Terra à Lua. Para tanto, vamos utilizar a simulação computacional que pode ser acessada por meio do QR Code na Figura 6.6.

A simulação exibe a Terra e a Lua em escalas de tamanho proporcionais entre si. No entanto, a escala de distância é diferente, conforme mostra a Figura 6.7. Você pode variar a distância da Terra à Lua por meio da barra deslizante, alternando entre a menor distância (perigeu) e a máxima distância (apogeu).

1. Clique em *Disparar* para ver a representação de um 'feixe de luz' emitido a partir da superfície da Terra até a superfície lunar. Após chegar na superfície da Lua, o feixe é refletido por um conjunto de espelhos e volta para a Terra. O tempo de ida e volta é exibido na simulação. Qual o tempo encontrado?
2. Considerando a velocidade da luz igual a $299.792.458 \text{ m/s}$, qual a distância percorrida pelo feixe de luz durante a ida e volta à Terra?
3. Qual a distância da superfície da Terra à superfície da Lua? Clique em *Mostrar distância* para conferir sua resposta.
4. Considerando o raio da Terra igual a $R_T = 6370 \text{ km}$ e o raio da lua como $R_L = 1738 \text{ km}$, qual a distância do centro da Terra ao centro da Lua?



Figura 6.7: Simulação da determinação da distância da Terra à Lua por meio de radar.

6.3 Determinação de distâncias por paralaxe

Um dos grandes problemas na astronomia é que não temos uma régua do tamanho suficiente para medir as distâncias nas quais estamos interessados. Então, dependendo da proximidade do objeto celeste, utilizamos métodos de medidas diferentes. Um deles é o chamado **método da paralaxe**. O nome é estranho, mas é um fenômeno que você certamente já presenciou.

Imagine-se viajando de carro por uma estrada, em linha reta, no fim de tarde. Você observa a paisagem pela janela e vê uma fazenda. As árvores próximas parecem se mover rapidamente para trás conforme o carro avança. Mais distante de você, ao fundo, é possível ver uma casa a qual lentamente vai sendo deixada para trás também conforme o carro se desloca. Ainda mais distante, você nota um conjunto de montanhas que parece quase não se mover, mas ao longo de alguns minutos você percebe que também está ficando para trás. Por fim, você nota o Sol, que parece seguir o carro. Por mais que o carro avance, o Sol parece sempre seguir ao lado. O que está acontecendo aqui?

Podemos notar claramente que os objetos que estão mais próximos de nós parecem se movimentar mais rapidamente do que os objetos que estão mais distantes. Este fenômeno ocorre não só quando estamos em movimento, mas também quando observamos um dado objeto a partir de dois pontos de vista diferentes.

O método direto mais confiável que temos à nossa disposição na astronomia para calcular a distância até os astros do Sistema Solar é o método da paralaxe. Chamado também de triangulação, o método consiste em observar um mesmo objeto contra um plano de fundo (em geral, as estrelas mais distantes) por dois ângulos de vista diferente.

Conseguimos verificar facilmente este efeito ao esticarmos o braço e observarmos a posição do nosso polegar em uma certa posição em

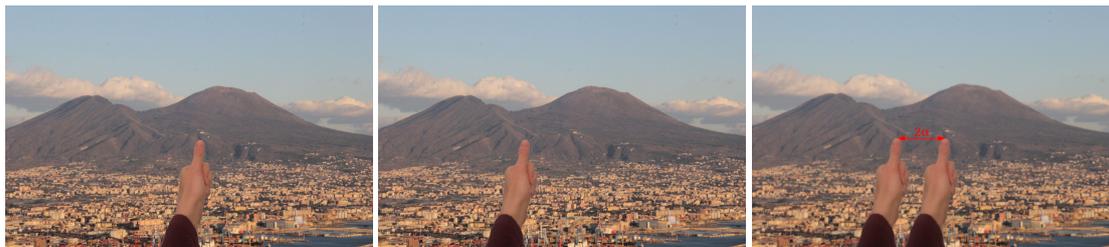


Figura 6.8: Movimento aparente devido à paralaxe.

relação ao fundo. Quando fechamos um olho, o polegar parece estar em uma posição relativa ao fundo; ao observarmos somente com o outro olho, temos a impressão de que a posição relativa do polegar mudou em relação ao mesmo fundo, conforme a Figura 6.8.

Se medirmos qual o deslocamento angular sofrido pelo polegar em relação à paisagem de fundo, podemos calcular a qual distância ele está de nós (tamanho do braço) sabendo a distância entre os diferentes ângulos de observação (distância entre os olhos). É exatamente este efeito que o cinema 3D utiliza: duas imagens são projetadas na tela, uma com o ponto de vista observado pelo olho esquerdo e outra pelo olho direito. O óculos 3D faz com que cada um dos olhos receba somente a imagem referente ao olho correspondente, nos dando a impressão de profundidade!

6.3.1 Paralaxe Geocêntrica

Podemos usar a paralaxe para determinar qual a distância da Terra à Lua, por exemplo. Observando a Lua por dois pontos de vista diferentes, contra um fundo de estrelas praticamente fixo (estas estrelas estão tão longe que parecem paradas) e, conhecendo a distância entre os pontos de observação, podemos calcular a distância da Terra à Lua, conforme a Figura 6.12.

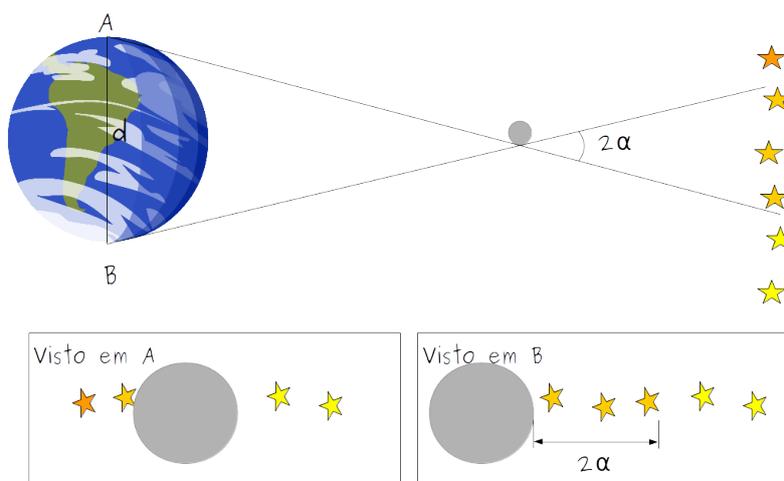


Figura 6.9: Esquema de paralaxe para a Lua.

Neste caso, os dois observadores estão em posições opostas da Terra, de modo que a distância d entre eles é o próprio diâmetro da Terra (≈ 12.800 km).

Observando o ângulo 2α pelo qual a Lua parece se deslocar em relação às estrelas de fundo, podemos encontrar a distância até a Lua utilizando relações trigonométricas simples. Note que a geometria do problema nos permite identificar o seguinte triângulo:

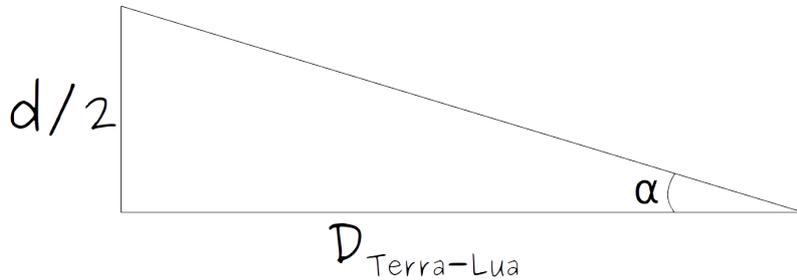


Figura 6.10: Determinação da distância por paralaxe.

Com base no triângulo retângulo da Figura 6.10, podemos encontrar uma relação entre o ângulo α , a distância $D_{\text{Terra-Lua}}$ e a distância $d/2$,

$$\tan \alpha = \frac{d/2}{D_{\text{Terra-Lua}}}, \quad (6.3)$$

ou seja,

$$D_{\text{Terra-Lua}} = \frac{d/2}{\tan \alpha}. \quad (6.4)$$

Ora, a distância $d/2$ nos conhecemos bem, foi determinada na seção anterior e é igual ao raio da Terra. O ângulo α pode ser encontrado já que medimos 2α e, portanto, podemos encontrar a distância à Lua.

Este método é prático para distâncias dentro do nosso Sistema Solar, mas quanto mais distante estiver o objeto, menor será o ângulo α . Uma maneira de medirmos um ângulo maior é aumentarmos a distância d dos pontos de vista. Entretanto, é complicado sair da Terra para realizar estas medidas, de modo que podemos utilizar outra forma para aumentarmos essa distância.

6.3.2 Paralaxe Heliocêntrica

Uma ideia é utilizar a distância da Terra ao Sol, tal que podemos fazer uma medida em um dia e outra 6 meses depois, quando a Terra estiver numa posição diametralmente oposta à anterior. Com isso aumentamos a distância entre os pontos observados (chamada de 'linha de base') e, conseqüentemente, conseguimos um valor de α um pouco maior. A nova linha de base será dada pela distância média da Terra ao Sol, a chamada *unidade astronômica*.

Este método é chamado de **paralaxe heliocêntrica**, em contraste ao método anterior, que possui a Terra como linha de base, chamado de **paralaxe geocêntrica**. Um exemplo da paralaxe heliocêntrica está descrito na Figura 6.11.

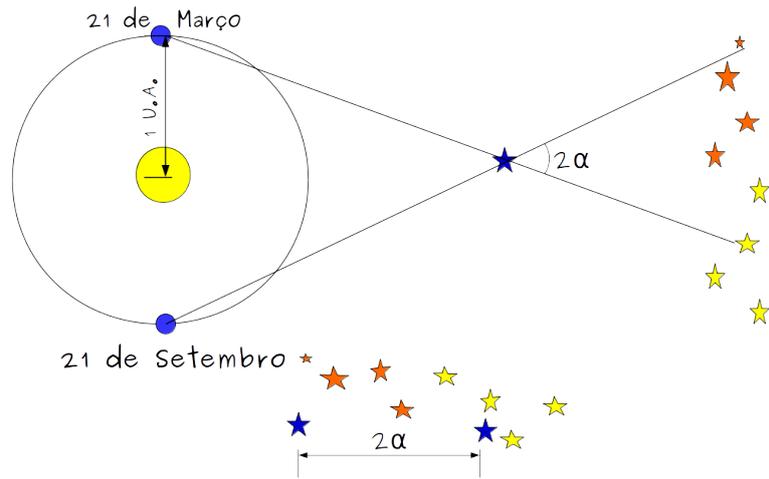


Figura 6.11: Paralaxe heliocêntrica.

A paralaxe heliocêntrica é utilizada para determinar a distância das estrelas mais próximas do Sol. Quando o ângulo de paralaxe, α , é de 1 segundo de arco*, e a distância da linha de base (distância entre os observadores) é de 1 unidade astronômica, dizemos que o objeto observado está à **1 parsec** de distância, abreviado como “pc”,

O nome *parsec* vem de “paralaxe de 1 segundo”.

$$1\text{pc} = \frac{1\text{AU}}{\tan 1''} = 3 \times 10^{13}\text{km}. \quad (6.5)$$

Se o ângulo for muito pequeno (e em geral ele é), podemos utilizar uma aproximação razoável na qual $\tan \alpha \approx \alpha$, contanto que o ângulo α seja dado em radianos†, de modo que a relação para a distância se simplifica:

$$D \text{ parsecs} = \frac{1\text{AU}}{\alpha \text{ radianos}}. \quad (6.6)$$

* Lembre-se, $1^\circ = 60' = 3600''$, ou seja, 1 segundo de arco é $\frac{1}{3600}$ graus.

† Lembrando que $360^\circ = 2\pi$ radianos

Atividade - Paralaxe

Nesta atividade, iremos determinar a distância de um objeto hipotético bem mais próximo da Terra (para que possamos medir o ângulo de paralaxe facilmente). Acesse a simulação presente no QR Code da Figura 6.12.

Como exibido na Figura 6.13, você pode interagir com a janela esquerda da simulação clicando com o botão esquerdo do mouse e arrastando para cima ou para baixo e com a roda do mouse para ampliar ou reduzir a imagem. A linha laranja mostra o ângulo de visão que alguém no planeta Terra tem ao observar um corpo celeste verde contra um fundo de estrelas. Deslize a barra nomeada *Posição do observador* para ver como a posição do corpo celeste parece se alterar em relação às estrelas de fundo conforme o observador se move ao longo do equador terrestre. Você pode notar esse movimento observando a janela da esquerda. Deslizando a barra *Distância*, podemos alterar a distância do corpo celeste.

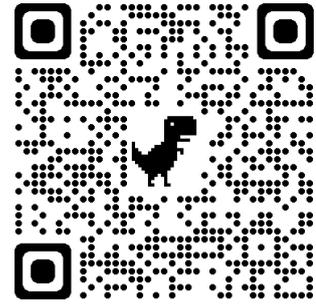


Figura 6.12: <https://scatena.sites.ufsc.br/astrologia/paralaxe/index.xhtml>

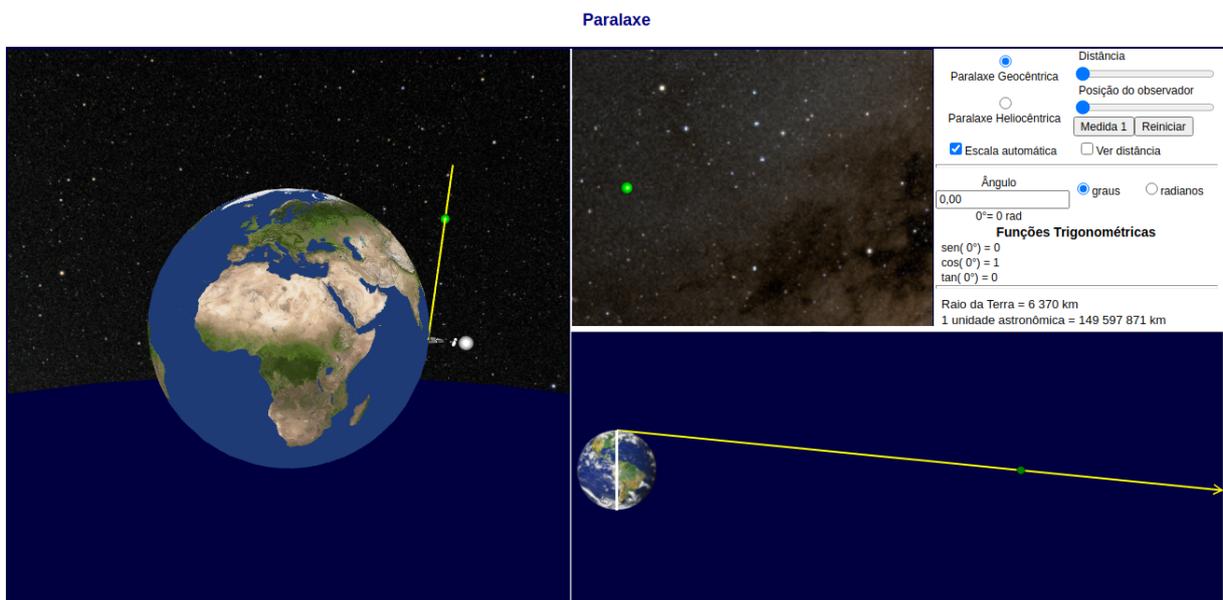


Figura 6.13: Simulador de paralaxe geocêntrica. Podemos variar a posição do observador na superfície do planeta, visível na janela à esquerda. A janela superior direita nos mostra a posição aparente de um corpo celeste verde, como visto pelo observador na Terra. A janela inferior direita nos mostra uma visão superior, evidenciando a geometria do problema.

Parte 1 - Paralaxe Geocêntrica

Vamos agora determinar a qual distância da Terra a este corpo celeste (que poderia ser algum planeta do sistema solar, um asteroide, cometa, etc.). Deslize a barra de *Posição do observador* totalmente para a esquerda, e identifique a posição do observador na janela da esquerda. Clique em *Medida 1* e note que um pequeno X laranja marcará a posição horizontal da estrela na janela superior à direita.

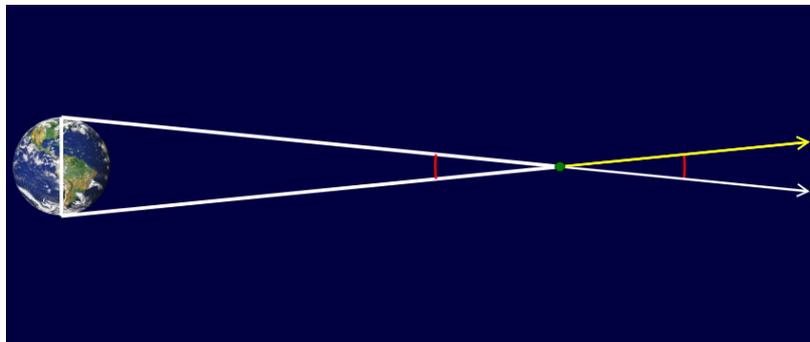
1. Mova a barra de *Posição do observador* totalmente para a direita, de modo que o observador esteja numa posição oposta à anterior. O corpo celeste verde se move na janela da esquerda? E na janela superior à direita (Figura 6.14)?



Figura 6.14: Posição aparente do corpo celeste verde, visto por um observador na Terra. O X marca a posição do corpo celeste como visto por um observador em posição diametralmente oposta ao atual.

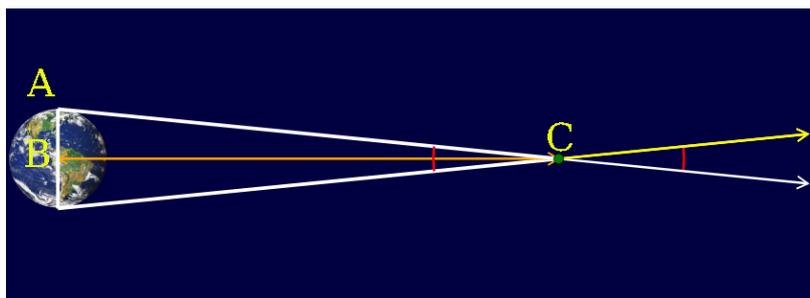
2. A janela superior direita nos mostra como o corpo é observado a partir de pontos diferentes do planeta em relação às estrelas de fundo. Clique em *Medida 2* e note que um pequeno 'x' laranja marcará a nova posição da estrela como vista da Terra por este observador. A variação angular da posição do corpo celeste será exibida, marcada em vermelho (Figura 6.15). Qual o valor encontrado?

Figura 6.15: Triângulo formado pelas linhas de visada (linha imaginária que liga o observador ao objeto) de dois observadores separados por uma distância igual ao diâmetro terrestre. O ângulo exibido em vermelho corresponde à separação angular entre as posições aparentes do corpo celeste verde, como visto pelos dois observadores em posições distintas.



3. Quanto vale o ângulo ABC , no triângulo exibido na Figura 6.16? Quanto vale o ângulo $A\hat{C}B$? Este é o ângulo de paralaxe, α .

Figura 6.16: Triângulo formado pela linha de visada de um dos observadores, sua distância ao centro da Terra, e a distância do corpo celeste ao centro terrestre. O ângulo $A\hat{C}B$ é o ângulo de paralaxe, α .



Você pode utilizar a calculadora presente na simulação, basta inserir o ângulo desejado (em graus ou radianos).

4. No triângulo ABC da Figura 6.16, quanto vale a distância \overline{AB} ?
5. Conhecendo a distância $R_T = \overline{AB}$ e o ângulo α oposto a este cateto, podemos determinar a distância $d = \overline{BC}$. Temos que a tangente de α é dada por

$$\tan \alpha = \frac{R_T}{d} \quad \text{e, portanto} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{R_T}{\tan \alpha}.$$

Quanto vale d , em quilômetros? Clique em *Ver distância* para conferir sua resposta.

Vemos, portanto, que basta conhecermos o raio terrestre e o ângulo de paralaxe para determinarmos a distância até um determinado objeto.

O problema é que quanto mais distante o objeto está, menor é o ângulo α . Do ponto de vista prático, é muito difícil fazer medidas de ângulos muito pequenos. Assim, para continuar utilizando a técnica, precisamos aumentar a distância entre os observadores. É isso que faremos na Parte 2, por meio da *paralaxe heliocêntrica*.

Parte 2 - Paralaxe Heliocêntrica

Na atividade anterior utilizamos dois observadores em pontos diferentes do planeta para determinar o ângulo de paralaxe de um determinado corpo celeste. Contudo, quanto maior for a distância que um objeto está, menor será o ângulo de paralaxe.

Uma forma de conseguir ângulos maiores consiste em utilizar uma distância maior entre os observadores. Assim, ao invés de utilizarmos observadores em pontos diferentes da Terra, a paralaxe heliocêntrica utiliza pontos diferentes da órbita da Terra como pontos de observação.

Se levarmos em consideração que a Terra leva cerca de 12 meses para completar uma volta em torno do Sol, isso significa que a cada 6 meses ela estará em posições opostas em sua órbita. Nestas situações, a distância entre esses dois pontos é igual a $2 \times 1 \text{ AU}$, ou seja, 2 unidades astronômicas. Essa distância é muito maior que o raio terrestre, nos permitindo calcular distâncias muito maiores à outros objetos por meio da paralaxe.

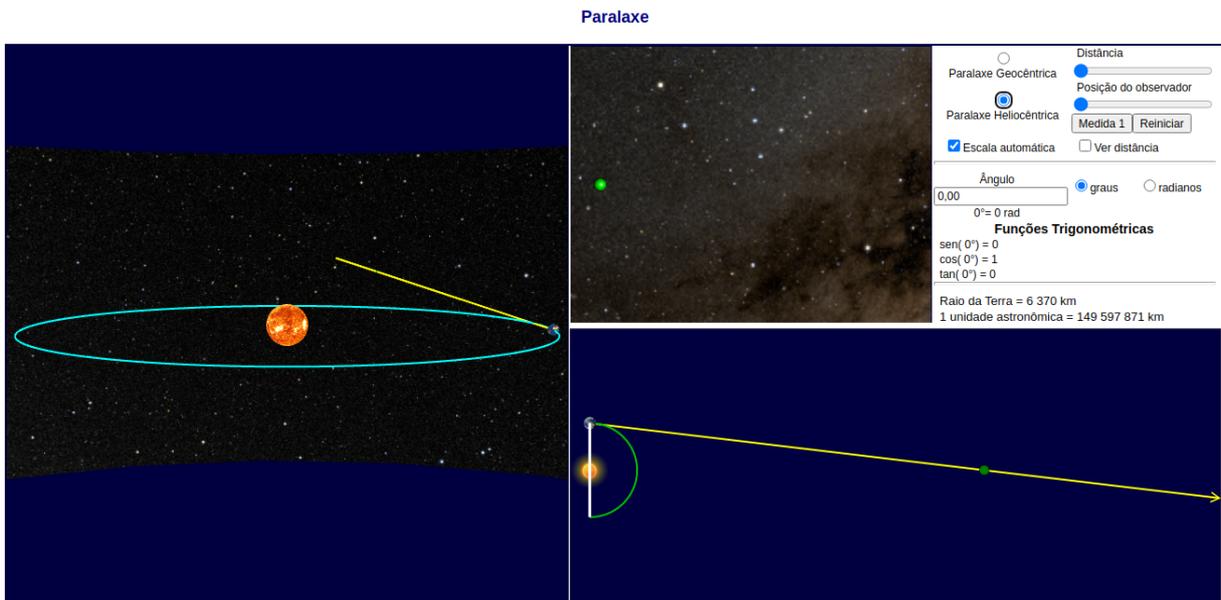


Figura 6.17: Simulador de paralaxe heliocêntrica. Podemos variar a posição da Terra ao redor do Sol. A janela superior direita nos mostra a posição aparente de um corpo celeste verde, como visto pelo observador naquele ponto da órbita terrestre. A janela inferior direita nos mostra uma visão superior, evidenciando a geometria do problema.

Vamos verificar como essa técnica funciona. Para tanto, clique em *Reiniciar* e, em seguida, selecione a opção *Paralaxe Heliocêntrica*, como na Figura 6.17. Ajuste a barra deslizante da *Posição do observador* e note como o planeta se desloca ao redor do Sol (janela da esquerda). Veja também na janela superior à direita a posição do corpo celeste verde se alterar em relação às estrelas de fundo.

1. Deixe a barra de *Posição do observador* na extremidade esquerda. Clique em *Medida 1* para marcar a posição do corpo celeste verde. Em seguida, mova a barra de *Posição do observador* para a extrema direita, deixando o observador em uma posição diametralmente oposta à anterior.

Clique em *Medida 2*. Qual o ângulo encontrado?

2. Quanto vale o ângulo $A\hat{C}B$, na Figura 6.19? Este é o *ângulo de paralaxe*, α .

Figura 6.18: Triângulo formado pelas linhas de visada (linha imaginária que liga o observador ao objeto) de dois observadores separados por uma distância igual ao diâmetro da órbita terrestre. O ângulo exibido em vermelho corresponde à separação angular entre as posições aparentes do corpo celeste verde, como visto pelos dois observadores em posições distintas.

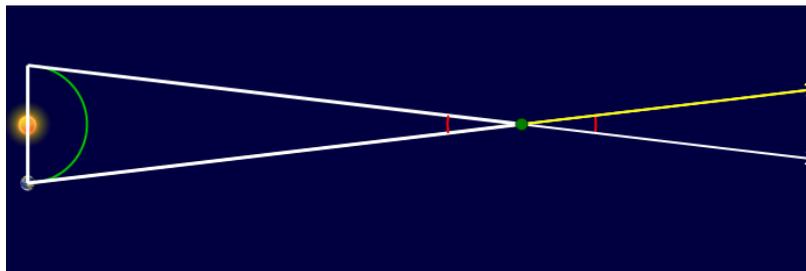
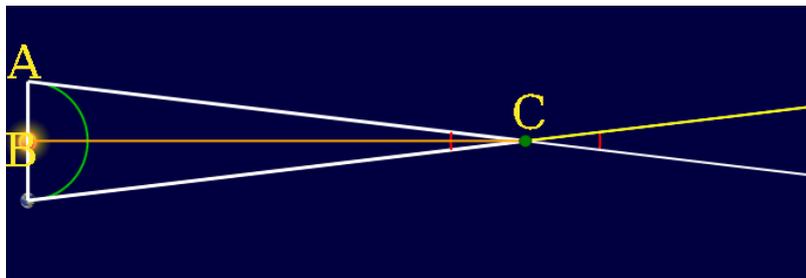


Figura 6.19: Triângulo formado pela linha de visada de um dos observadores, sua distância ao centro da Terra, e a distância do corpo celeste ao centro terrestre. O ângulo \widehat{ACB} é o ângulo de paralaxe, α .



- Qual o valor da distância \overline{AB} no triângulo exibido na Figura 6.19?
- Utilize o mesmo raciocínio da Parte 1 e calcule a distância até o objeto celeste. Qual o valor encontrado? Clique em *Ver distância* para conferir seu resultado.
- A distância encontrada no item anterior é maior ou menor do que aquela encontrada na Parte 1?

Vemos, portanto, que uma linha de base maior (distância entre os observadores) nos permite determinar distâncias maiores, se considerarmos que existe um tamanho mínimo de ângulo de paralaxe que conseguimos medir. Vamos analisar isso agora.

Parte 3 - Ângulos e distâncias

Vamos ver como se dá a interação entre a linha de base dos observadores e a distância do objeto celeste a ser determinada. Novamente, clique em *Reiniciar* e selecione a opção *Paralaxe Heliocêntrica*.

- Ajuste a barra deslizante de *Distância* para o seu valor máximo, à direita. Clique em *Medida 1*, altere a posição do observador para o outro extremo e clique em *Medida 2*. Qual o valor do ângulo exibido?
- Este ângulo é maior ou menor do que aquele encontrado no item 1 da Parte 2?
- Clique em *Ver distância* para verificar a distância do objeto. Ela é maior ou menor que aquela encontrada na Parte 2?
- Vamos supor que o menor ângulo de paralaxe que nosso equipamento consiga medir seja de $\beta = 0,01^\circ$. Sabendo que

$$\tan \alpha = \frac{1AU}{d},$$

qual a maior distância que pode ser determinada por este instrumento?

5. Qual o valor da tangente de β ?
6. Quando expressamos os ângulos em radianos, podemos fazer uma aproximação importante que facilita nossos cálculos. Converta o ângulo $\beta = 0,01^\circ$ para radianos. Qual o valor encontrado? Você pode conferir seu resultado utilizando o campo *Ângulo* na simulação.
7. O valor de β expresso em radianos é semelhante ou diferente do valor da tangente de β ?
8. Para ângulos de até 15° , podemos aproximar a tangente do ângulo pelo valor dele em radianos, com precisão de duas casas decimais. Quanto vale a tangente de 15° e o valor do ângulo em radianos?

Com isso, vemos que se conhecermos o ângulo α de paralaxe heliocêntrica **em radianos** (que geralmente é muito menor do que 15°), podemos calcular facilmente a distância até o corpo celeste utilizando a expressão

$$d = \frac{1}{\alpha} \text{ unidades astronômicas.}$$

Atividade Final - Determinação da Unidade Astronômica

Com o estabelecimento das Leis de Kepler no final do século XVI, foi possível determinar a distância que os planetas do Sistema Solar se encontram do Sol em termos da distância da Terra ao Sol. Tal distância recebe o nome de *Unidade Astronômica*, frequentemente abreviada como AU. De acordo com a 3ª lei de Kepler, temos que o quadrado do período de revolução de um planeta em torno do Sol é proporcional ao cubo da distância do planeta ao Sol. Matematicamente, temos:

$$\frac{T_{\text{Marte}}^2}{D_{\text{Marte}}^3} = \frac{T_{\text{Terra}}^2}{D_{\text{Terra}}^3}. \quad (6.7)$$

Assim, podemos encontrar a distância do Sol a Marte como sendo

$$D_{\text{Marte}} = \left(\frac{T_{\text{Marte}}^2}{T_{\text{Terra}}^2} \right)^{1/3} \cdot D_{\text{Terra}} = \left(\frac{T_{\text{Marte}}^2}{T_{\text{Terra}}^2} \right)^{1/3} 1 \text{ AU} \quad (6.8)$$

Portanto, uma vez que conhecemos os períodos de revolução dos planetas, podemos encontrar quais as distâncias relativas entre eles. No entanto, ainda não conseguimos determinar qual o valor de 1 unidade astronômica.

Várias propostas foram realizadas para a determinação da AU, mas somente no final do século XVII um experimento coordenado pelo astrônomo do observatório de Paris, Giovanni Cassini, trouxe um resultado. Ele planejou determinar a distância da Terra à Marte e, conseqüentemente, encontrar o valor da unidade astronômica. Para tanto ele enviou outro astrônomo, Jean Richer, para a cidade de Caiena, na Guiana Francesa. Fazendo observações simultâneas em locais distintos do planeta, ele foi capaz de determinar a distância à Marte utilizando a técnica de *paralaxe geocêntrica*, conforme visto anteriormente.

Parte 1 - Distância da Terra a Marte

Vamos simular o experimento proposto por Cassini. Temos dois observadores no equador, latitude igual a zero, mas diametralmente opostos, um em 90° de longitude e outro em -90° de longitude. Cada um dos observadores anota a separação angular entre Marte e uma estrela.

1. Observando as Figuras 6.20 e 6.21, determine qual a diferença angular na posição de Marte quando visto por estes dois observadores.
2. Com base no deslocamento angular determinado anteriormente, qual o ângulo de paralaxe geocêntrica para Marte nesta situação?
3. Conhecendo o ângulo de paralaxe, determine a distância da Terra até Marte.

Consequimos, por meio da paralaxe geocêntrica, determinar a distância da Terra à Marte no momento de sua oposição, isso é, quando temos

Figura 6.20: Marte observado em relação a uma estrela de fundo por um observador situado em uma longitude igual a -90° . A separação angular entre Marte e a estrela é de $0^\circ 5' 8,16''$. Crédito: imagem feita com o software *Stellarium*, <https://stellarium.org/>



Figura 6.21: Marte observado em relação a uma estrela de fundo por um observador situado em uma longitude igual a $+90^\circ$. A separação angular entre Marte e a mesma estrela anterior, visto deste local, é de $0^\circ 4' 33,46''$. Crédito: imagem feita com o software *Stellarium*, <https://stellarium.org/>



alinhados o Sol, Terra e Marte. Vamos fazer uso dessa geometria para encontrar o valor da unidade astronômica.

Parte 2 - A Unidade Astronômica

Observações sistemáticas da órbita marciana nos permitem concluir que seu período é de cerca de $T_{\text{Marte}} = 780$ dias terrestres, enquanto $T_{\text{Terra}} = 365$ dias.

1. Utilize a informação sobre período da órbita marciana e a equação 6.8 para encontrar qual a distância do Sol a Marte, D_{Marte} , em unidades astronômicas.
2. Se a distância da Terra ao Sol é de 1 AU e a distância de Marte ao Sol foi determinada no item anterior, qual a distância da Terra à Marte, D_{T-M} (conforme Figura 6.22), em unidades astronômicas?

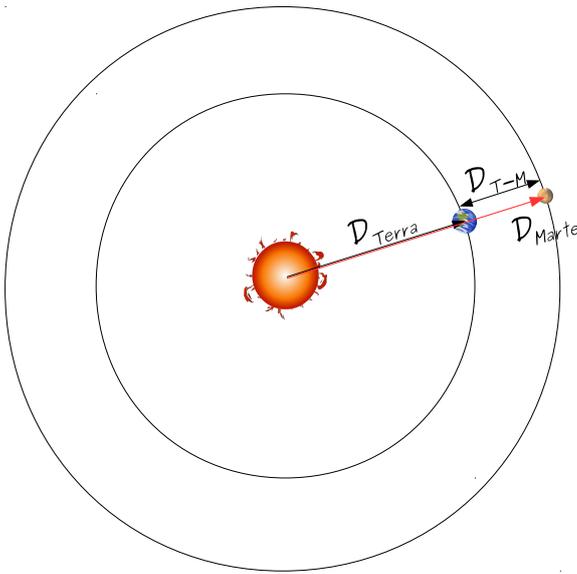


Figura 6.22: Quando a Terra e Marte estão alinhados dizemos que estão em *oposição*. Nesta situação, vemos que a distância de Marte ao Sol é igual a distância da Terra ao Sol somada à distância da Terra à Marte.

3. Combinando o resultado do item anterior com o resultado do item 3 da Parte 1, qual o valor de 1 AU em quilômetros?

O valor definido em 2012 para a Unidade Astronômica é de 149 597 870 700 metros, ou cerca de $1,5 \times 10^8$ km.

Posteriormente foram utilizadas outras medidas para se determinar de modo mais preciso a distância da Terra ao Sol. A questão só foi satisfatoriamente encerrada após observações do trânsito de Vênus, que permitiu um valor mais preciso para a Unidade Astronômica.

É importante notar que, de certa forma, para encontrarmos um valor para esta grande régua que é a unidade astronômica, partimos de algo muito menor como o tamanho de sombras em gnômons e a distância entre Alexandria e Assuã, há 2000 anos!

Epílogo

Espero que você tenha gostado desta viagem espacial! Ao longo das atividades que desenvolvemos aqui vimos grandes resultados da astronomia clássica, como os experimentos de Eratóstenes no século III a.C., além dos movimentos do Sol tão bem descritos por Hiparco em II a.C., nos mostrando também como acontecem os eclipses e as fases da Lua, tudo isso compilado no *Almagesto* de Ptolomeu, em I d.C..

A próxima revolução astronômica viria a acontecer somente cerca de 1500 anos depois, com a teoria heliocêntrica proposta por Copérnico e publicada em 1543. Com isso, estudamos o movimento dos planetas em torno do Sol, que foi descrito e analisado em detalhes por Kepler em 1609 e seria, 80 anos depois, explicado por Newton em termos da teoria da gravitação.

Neste meio tempo, Cassini e Richer, com todos esses dados e conhecimentos acumulados, foram capazes de mensurar nosso Sistema Solar, levando a régua astronômica desde a distância entre Alexandria e Assuã para a distância entre o Sol e a Terra.

Isso encerra nossos estudos da Astronomia Clássica. Na Parte II discutiremos a Astronomia Moderna, ou Astrofísica, a qual leva em consideração as propriedades físicas dos corpos e, principalmente, estuda a composição e evolução das estrelas com base em informações obtidas por meio do espectro luminoso destas. Veremos que isso nos permitirá determinar distâncias ainda maiores, além de dar mais pistas sobre a origem do nosso planeta, do Sol e, em última instância, do Universo.

Nos vemos lá!

Parte II

ASTRONOMIA MODERNA

Parte III

APÊNDICES

Ângulos e trigonometria

A

Aqui vamos relembrar o conceito de *ângulo*, que será essencial daqui em diante para praticamente todo o estudo da astronomia.

A.1 Ângulos

O estudo da geometria é essencial à astronomia e está por toda parte: ao definirmos longitude e latitude, ao calcularmos o tamanho angular de um astro, ao determinarmos a posição de uma estrela na esfera celeste ou mesmo ao calcularmos a distância até uma estrela por paralaxe. No início de cada capítulo faremos um resumo dos conceitos fundamentais necessários para o desenvolvimento das atividades.

O ângulo θ exibido na Figura A.1 pode ser expresso de várias formas, sendo as duas mais comuns o *grau* e o *radiano*.

- ▶ **graus** – o ângulo medido em graus é definido como o comprimento de arco s dividido pela circunferência C de um círculo de mesmo raio ($C = 2\pi r$), multiplicado por 360,

$$\theta = \frac{s}{2\pi r} \times 360,$$

e é expresso com o símbolo $^\circ$.

É importante lembrarmos que 1° é subdividido ainda em minutos e segundos, de forma que 60 minutos equivalem a 1 grau ($1^\circ = 60'$) e 60 segundos equivalem a 1 minuto ($1' = 60''$), de forma que $1^\circ = 60' = 3600''$.

Assim, é comum que os valores de minutos não ultrapassem $60'$ e os valores de segundos não ultrapassem $60''$.

- ▶ **radianos** – o ângulo medido em radianos é definido como o comprimento de arco s dividido pelo raio da circunferência r ,

$$\theta = \frac{s}{r},$$

expresso pelo símbolo “rad”.

Desta forma, notamos que $1 \text{ rad} = \frac{360}{2\pi} = 57,30^\circ$, de forma que um círculo completo apresenta um ângulo de 360° ou, equivalentemente, 2π radianos.

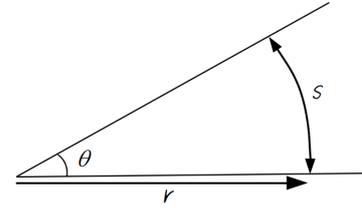


Figura A.1: Um ângulo θ subentendido por um arco s a uma distância r .

Exercício A.1.1 Converta os ângulos abaixo:

- 1) Transforme $10' 20''$ em segundos.
- 2) Transforme $20^\circ 40'$ em minutos.
- 3) Transforme $90'$ em graus.
- 4) Escreva $37^\circ 128'$ como uma medida em graus.

5) Escreva cada uma das medidas em graus, minutos e segundos, fazendo as simplificações necessárias.

- a) $17^\circ 70' 85''$
- b) $66^\circ 124' 190''$

Veremos também que é muito comum na astronomia utilizarmos a *congruência* de ângulos para determinarmos algumas distâncias. Dois ângulos são ditos *congruentes* quando estes possuírem a mesma medida. Em especial, se considerarmos o caso descrito na Figura A.2 no qual as retas A e B são paralelas entre si, temos a seguinte relação entre os ângulos a, b, c, d, e, f, g e h :

- ▶ $a = c = e = g$;
- ▶ $b = d = f = h$;

Ainda, alguns pares destes ângulos são *suplementares* (a sua soma é igual a 180°):

- ▶ $a + d = 180^\circ$;
- ▶ $a + b = 180^\circ$;
- ▶ $e + h = 180^\circ$;
- ▶ $e + f = 180^\circ$;
- ▶ $c + d = 180^\circ$;
- ▶ $c + b = 180^\circ$;
- ▶ $h + g = 180^\circ$;
- ▶ $g + f = 180^\circ$;

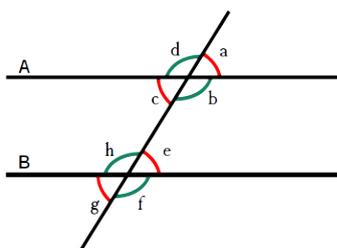


Figura A.2: Ângulos alternos.

A.2 Trigonometria

A.2.1 Teorema de Pitágoras

O teorema de Pitágoras afirma que, num triângulo retângulo (aquele cujo um dos ângulos é igual a 90°), a relação entre os catetos (os lados que formam o ângulo reto) e a hipotenusa (o lado oposto ao ângulo reto), conforme a Figura A.3, é

$$a^2 + b^2 = c^2.$$

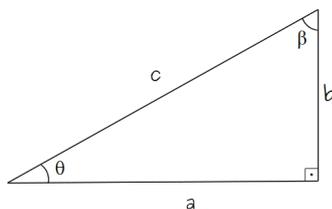


Figura A.3: Teorema de Pitágoras: Triângulo retângulo com catetos a e b e hipotenusa c .

A.2.2 Funções trigonométricas

Ainda, com base no triângulo retângulo, podemos definir as funções trigonométricas. Definimos as funções *seno*, *co seno* e *tangente* da seguinte forma:

- ▶ **seno** – o seno de um ângulo é definido como a razão entre o cateto oposto ao ângulo e a hipotenusa. Note que o cateto é sempre menor do que a hipotenusa, de forma que o seno é sempre um número entre -1 e 1. De acordo com o triângulo da Figura A.3, temos

$$\text{sen}(\theta) = \frac{b}{c} \quad \text{e} \quad \text{sen}(\beta) = \frac{a}{c};$$

- ▶ **coosseno** – o coosseno de um ângulo é definido como a razão entre o cateto adjacente ao ângulo e a hipotenusa,

$$\cos(\theta) = \frac{a}{c} \quad \text{e} \quad \cos(\beta) = \frac{b}{c};$$

- ▶ **tangente** – a tangente de um ângulo é definida como a razão entre o cateto oposto e o cateto adjacente ao ângulo, podendo então obter valores entre $-\infty$ e $+\infty$,

$$\tan(\theta) = \frac{b}{a} \quad \text{e} \quad \tan(\beta) = \frac{a}{b}.$$

A.2.3 Lei dos Cossenos e Lei dos Senos

Uma generalização do teorema de Pitágoras, para um triângulo qualquer, pode ser obtida por meio da *lei dos cossenos*. Consideremos o triângulo da figura abaixo.

Podemos encontrar uma relação entre cada um dos lados do triângulo e o ângulo entre eles da seguinte forma:

- ▶ $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$;
- ▶ $b^2 = c^2 + a^2 - 2ac \cos \beta$;
- ▶ $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$.

Ainda, podemos encontrar uma relação entre os lados do triângulo e o seno do ângulo oposto aos lados, dada pela *lei dos senos*:

$$\frac{a}{\text{sen}\alpha} = \frac{b}{\text{sen}\beta} = \frac{c}{\text{sen}\gamma}. \tag{A.1}$$

Faremos uso dessas medidas angulares para determinar a distância de objetos celestes até a Terra. Se conhecermos o tamanho real de um objeto e o seu tamanho angular, somos capazes de calcular a distância até o mesmo utilizando nosso conhecimento do triângulo retângulo por meio de senos, cossenos e tangentes.

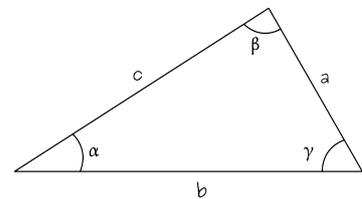


Figura A.4: Lei dos cossenos e lei dos senos: Triângulo de lados a , b e c .

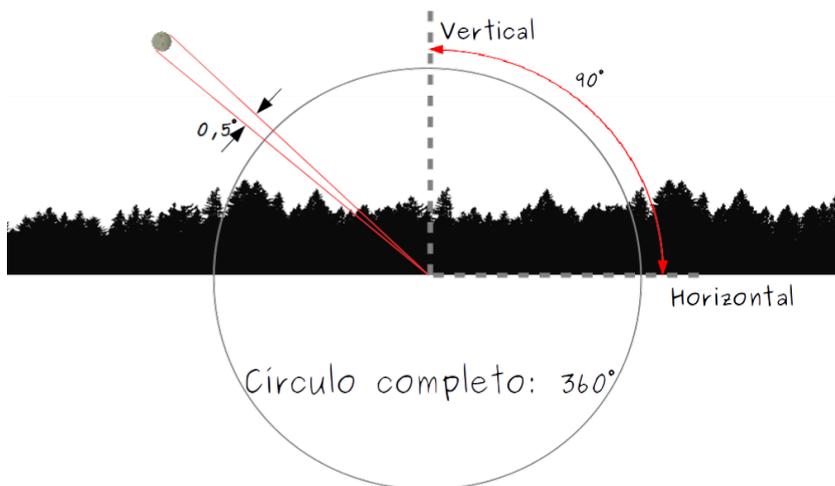


Figura A.5: Tamanho angular da lua no céu.

Exercício A.2.1 Podemos determinar qual o tamanho da Lua se conhecermos qual distância até ela e seu tamanho angular. Suponha que a distância até a Lua num dado momento seja $d = 372.700$ km e que o tamanho angular medido aqui da Terra seja $\beta = 32'4''$, conforme exibido na Fig. A.6. Determine qual é o raio R da Lua.

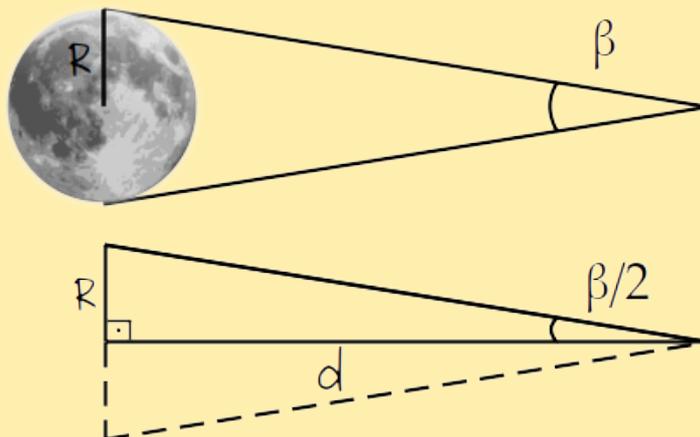


Figura A.6: Determinação do raio lunar.

Unidades de Medida

B

As medidas que utilizamos no dia-a-dia são proporcionais à escala humana, então lidamos com distâncias e comprimentos da ordem de centímetros, metros e quilômetros. Contudo, quando estudamos o Universo precisamos falar sobre distâncias e comprimentos extremamente grandes, muito maiores do que aquelas com as quais estamos acostumados. Imagine que a espessura de um fio de cabelo é de 0,0002 metros, enquanto a distância da Terra até o Sol é de 150.000.000.000 metros.

B.1 Notação Científica

Como é muito fácil nos confundirmos com essa quantidade de zeros, precisamos criar uma forma de expressar essas medidas de um modo claro. Para tanto, fazemos uso da **notação científica**, a qual utiliza potências de 10 para expressar tais números.

Para a distância da Terra ao Sol, podemos expressar 150.000.000.000 metros como $1,5 \times 100.000.000.000 = 1,5 \times 10^{11}$ metros. Da mesma forma, para o diâmetro de um fio de cabelo, 0,0002 metros pode ser escrito como $2 \times 0,0001 = 2 \times 10^{-4}$ metros.

Desta forma, além de conseguir uma maneira mais compacta de escrever os números, fica mais fácil contabilizar a quantidade de zeros que aparecem. A regra é a seguinte:

Definição B.1.1 *o número m que multiplica a potência de 10^n deve estar entre 1 e 10 (sem incluir o 10, ou seja $1 \leq m < 10$).*

Exercício B.1.1 Escreva os seguintes números em notação científica:

<u>Número</u>	<u>Notação Científica</u>
120	
3541	
19	
0,182	
7	
0,02	

B.2 O Sistema Internacional de Medidas

Para facilitar a comunicação entre os cientistas, existe um sistema padronizado de unidades de medida chamado de **Sistema Internacional de Medidas**, ou SI. As medidas de comprimento são dadas pelo *metro*, as de tempo pelo *segundo* e as medidas de massa pelo *quilograma*. Quando temos medidas muito maiores ou muito menores do que as medidas-padrão, podemos utilizar a notação científica. Damos alguns nomes e

Tabela B.1: Prefixos das unidades no Sistema Internacional de Medidas.

Fator	Nome	Símbolo	Escala	Fator	Nome	Símbolo	Escala
10^{24}	yotta	Y	septilhão	10^{-1}	deci	d	décimo
10^{21}	zetta	Z	sextilhão	10^{-2}	centi	c	centésimo
10^{18}	exa	E	quintilhão	10^{-3}	mili	m	milésimo
10^{15}	peta	P	quadrihã	10^{-6}	micro	μ	milionésimo
10^{12}	tera	T	trilhão	10^{-9}	nano	n	bilionésimo
10^9	giga	G	bilhão	10^{-12}	pico	p	trilionésimo
10^6	mega	M	milhão	10^{-15}	femto	f	quadrilionésimo
10^3	quilo	k	mil	10^{-18}	atto	a	quintilionésimo
10^2	hecto	h	cem	10^{-21}	zepto	z	sextilionésimo
10^1	deca	da	dez	10^{-24}	yocto	y	septilionésimo

símbolos especiais para os múltiplos de das potências de 10^3 , conforme a tabela abaixo.

Então quando escrevemos 1.490 metros, podemos reescrever como $1,490 \times 10^3$ metros. De acordo com a Tabela B.1, podemos escrever 10^3 como *k*, ou seja,

$$1.490 \text{ metros} = 1,490 \text{ km} = 1,490 \text{ quilômetros.}$$

Exercício B.2.1 Preencha a tabela a seguir de acordo com o S.I.

Medida	Símbolo	Nome
$127 \times 10^{-2} \text{ m}$	127 cm	127 centímetros
	19 mg	
		35 nanosegundos
$3,14 \times 10^{12} \text{ m}$		89 terametros

B.3 O ano-luz

Mesmo com a notação científica e o Sistema Internacional de Unidades, as grandezas envolvidas no estudo da Astronomia podem ser muito grandes para serem expressas de uma forma conveniente. Por exemplo, a massa da galáxia de Andrômeda é estimada em 2×10^{42} kg! Não temos nem um símbolo do SI para expressar um número tão grande. Por outro lado, para medidas de distância, existem outras unidades de medida que fazem um pouco mais de sentido para os astrônomos: o *ano-luz*.

O ano-luz pode parecer, à primeira vista, uma medida de tempo. No entanto, isso não é verdade. É muito comum ouvirmos expressões como “Curitiba fica a 6 horas de São Paulo”, ou numa estrada encontrarmos um *outdoor* dizendo “Restaurante a 15 minutos de distância”. Nestes dois casos, estamos expressando distâncias em termos de quantidades que medem tempo. Contudo, ainda nos dão uma noção das distâncias envolvidas. Por quê?

Note que existe uma quantidade escondida nessa história toda: a velocidade! Quando dizemos que a distância de Curitiba à São Paulo é de 6

horas, queremos dizer que se viajarmos de carro a uma certa velocidade, faremos a viagem em 6 horas. Da mesma forma, quando o cartaz diz que o restaurante está a 30 minutos, ele quer dizer que viajando numa dada velocidade média, chegaremos ao restaurante em 30 minutos. Assim, para que essas distâncias estejam corretas, é necessário estabelecer qual é essa velocidade média que um carro tem na estrada.

Se considerarmos que um carro viaje com uma velocidade de 80 km/h, fica fácil verificar que a distância entre São Paulo e Curitiba é de 6 horas viajando a 80 km/h, ou seja, $80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 6 \text{ h} = 480 \text{ km}$.

Exercício B.3.1 Qual a distância do restaurante que está a 30 minutos, considerando a velocidade do carro como 80 km/h? (Dica: lembre-se que 30 minutos é igual a 0,5 horas).

O ano-luz é, portanto, a distância percorrida pela luz no intervalo de tempo de 1 ano. Assim, se considerarmos que 1 ano possui cerca de $3,15 \times 10^7$ segundos e que a velocidade da luz é de aproximadamente 300.000 km/s (ou, em notação científica, 3×10^8 m/s), a distância percorrida por ela em 1 ano será

$$\begin{aligned} 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3,15 \times 10^7 \text{ s} &= 9,45 \times 10^{15} \text{ m} = 9,45 \text{ Pm} \\ &= 9,45 \text{ trilhões de quilômetros.} \end{aligned}$$

Com isso, podemos escrever as distâncias astronômicas em “tempo-luz”. Por exemplo, a luz demora cerca de 8 minutos (480 segundos) para sair do Sol e chegar à Terra, ou seja, ela percorre uma distância dada por

$$\begin{aligned} 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 480 \text{ s} &= 1,44 \times 10^{11} \text{ m} = 144 \times 10^9 \text{ m} \\ &= 144 \text{ bilhões de metros.} \end{aligned}$$

Exercício B.3.2 Escreva as distâncias a seguir em metros.

- ▶ A distância da Terra à Lua é de cerca de 1,2 segundos-luz:
- ▶ A distância do Sol até Netuno é de cerca de 4 horas-luz:
- ▶ A distância do Sol até Próxima Centauri (a estrela mais próxima do Sol) é de 4,2 anos-luz:
- ▶ A distância do Sol até a Galáxia de Andrômeda é de 2,5 milhões de anos-luz: