

4. Sistema Terra e Lua

- Fases da Lua
- Eclipses
- Marés
- Limite de Roche
- Precessão

Lua, 3475 km



Terra, 12742 km



© Gregory H. Revera,
NASA/JPL



Lua ~QC
23/8/2023
45% cheia
(c) Gustavo
Pires Bertaco,
IAG-USP



Jorge Melendez @DrJorgeMelendez · 22 de jul

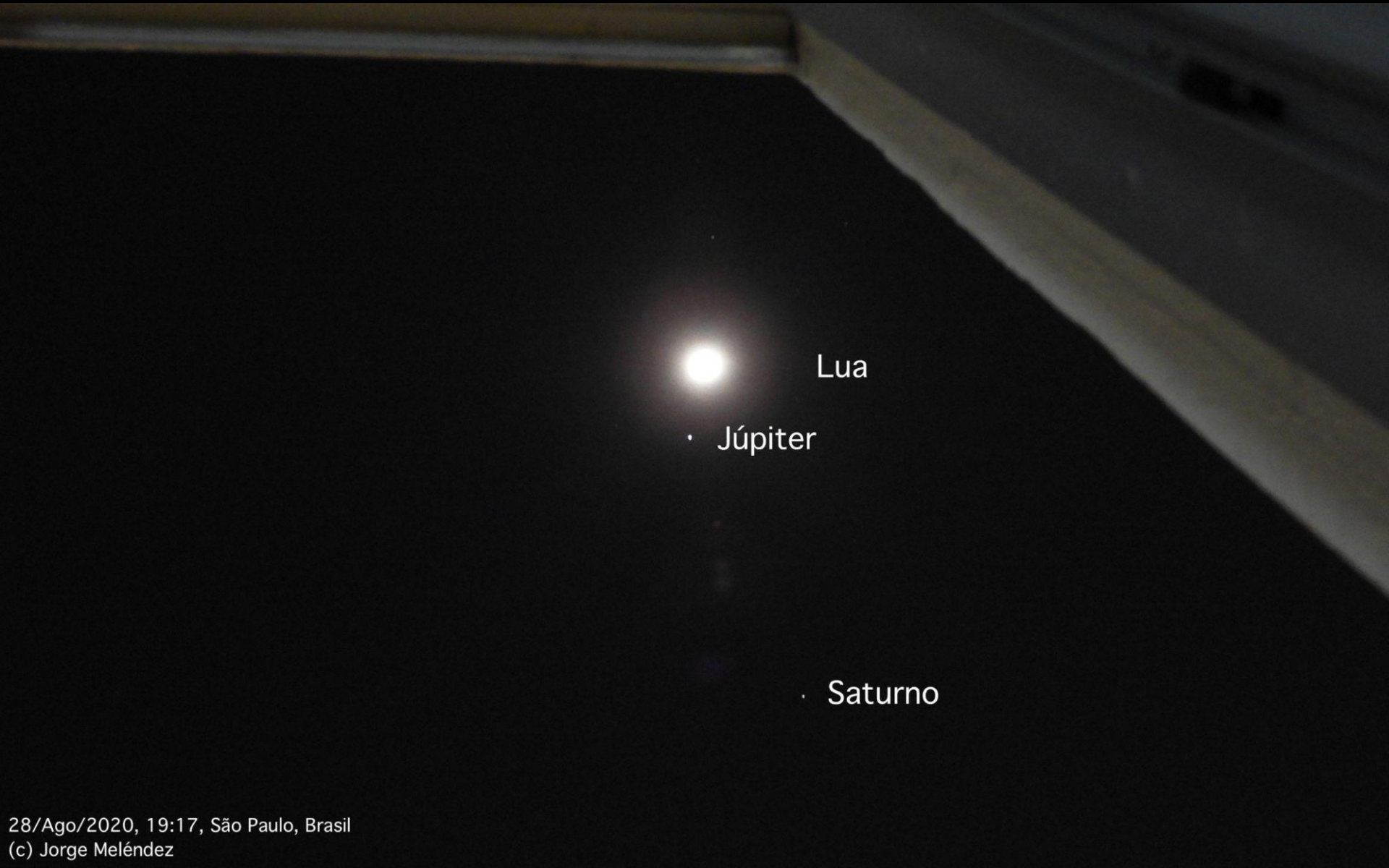
22/7/2021

A **Lua** está linda hoje ao entardecer em São Paulo. Amanhã é **Lua** cheia (hoje está 98% cheia). #Butantã #Butantan #Sampa #SaoPaulo #SP #Brasil #OlheALua #OlhemALua

The Moon (98% full) tonight in Sao Paulo, Brazil @StormHour



28/8/2020, 19:17 Conjunção de Júpiter, Lua e Saturno
Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



5/7/2020, 20:34 Conjunção de nossa Lua, Júpiter e suas luas!

Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP

Ganimedes
Io
Júpiter
Europa
Calisto

Lua



15/7/2018, 00:47
Mercúrio, Lua e Vênus



11/8/2020, 05:51 Urano e a Lua!
Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



19/6/2020, 05:42 Nascer da Lua minguante e Vênus antes do amanhecer
Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



19/6/2020, 06:00 Lua minguante e Vênus crescente!
Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



(c) Jorge Meléndez, 19/jun/2020, 06h, São Paulo, Brasil

Lua

12/6/2021, 18:00 Pôr da Lua Crescente e Vênus ao entardecer
Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



3/10/2020, 00:47

Conjunção de Marte e a Lua (99% cheia)

Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP



6/9/2020

Ocultação de Marte pela Lua

Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP

6/9/2020, 00:39



Ocultação de Marte pela Lua, 6/Set/2020, 00:01, São Paulo, Brasil
(c) Jorge Meléndez

6/9/2020, 00:01



Ocultação de Marte pela Lua, 6/Set/2020, 00:39, São Paulo, Brasil
(c) Jorge Meléndez



Jorge Melendez @DrJorgeMelendez · 18 de ago de 2019

Hoje não tem eclipse lunar. Essa lua alaranjada em São Paulo [#Sampa](#) 🇧🇷 pode ser pelo espalhamento das partículas no ar devido às **queimadas** na Amazônia.





Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

19 de ago de 2019

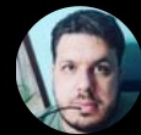
Literalmente, a idade das trevas chegou ao Brasil

 **Leila Germano** ✓ @LeilaGermano · 19 de ago de 2019

São Paulo. 15h



Sampa, 16h



Rafael C
@rcalsaverini



No dia da aula de Astrofísica Estelar (AGA0293)

2/10/2020, nascer da Lua (99% cheia)

Jorge Meléndez, Butantã, São Paulo, SP

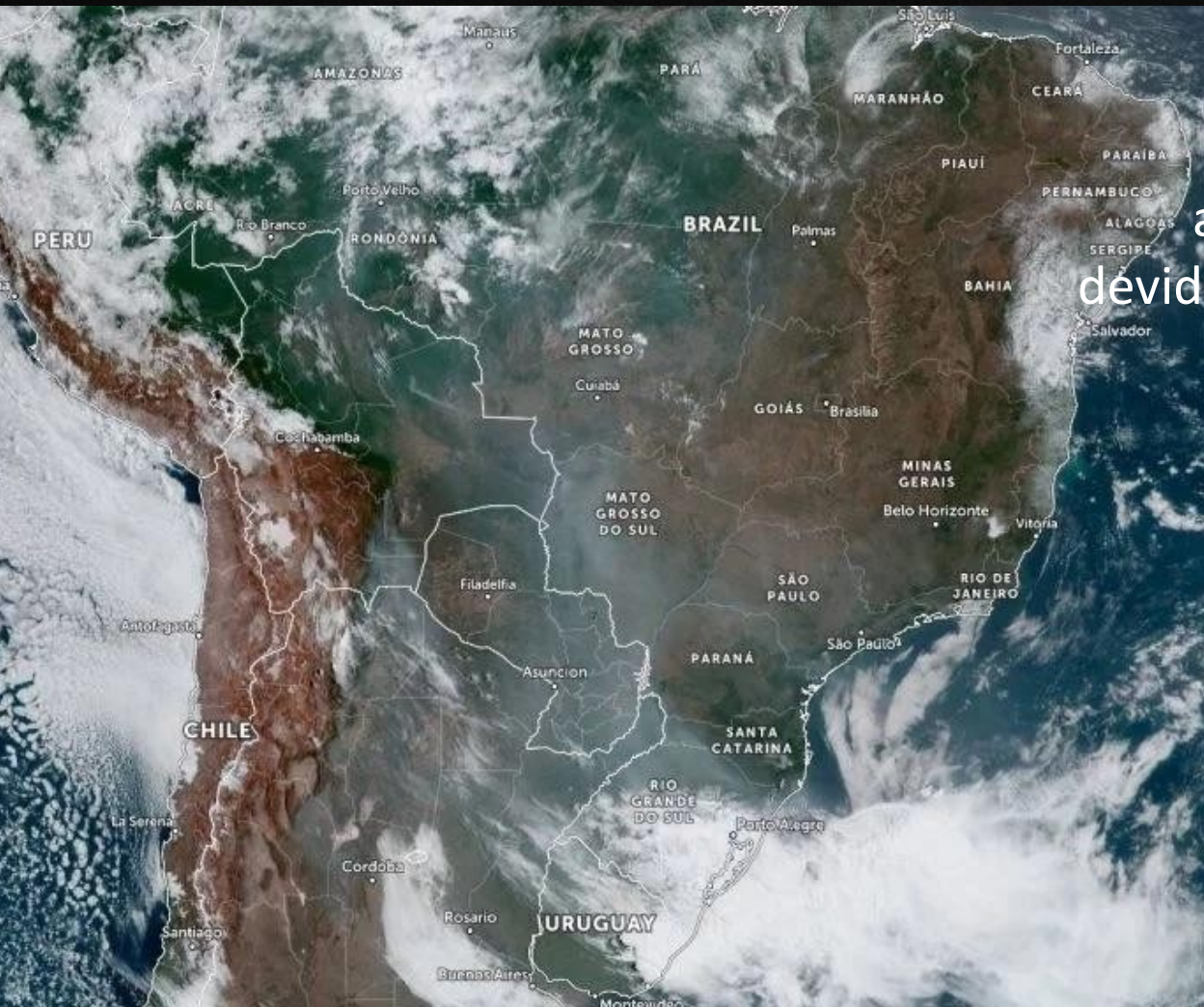
19:22



19:17



Moon 99% full, 2/October/2020, 19:22 São Paulo, Brazil
(c) Jorge Meléndez



2/10/2020, 19:17.
Lua nascendo muito mais
avermelhada que o normal
devido à fumaça das queimadas

19:17



Moon 99% full, 2/October/2020, 19:22 São Paulo, Brazil
(c) Jorge Meléndez



Jorge Melendez

@DrJorgeMelendez

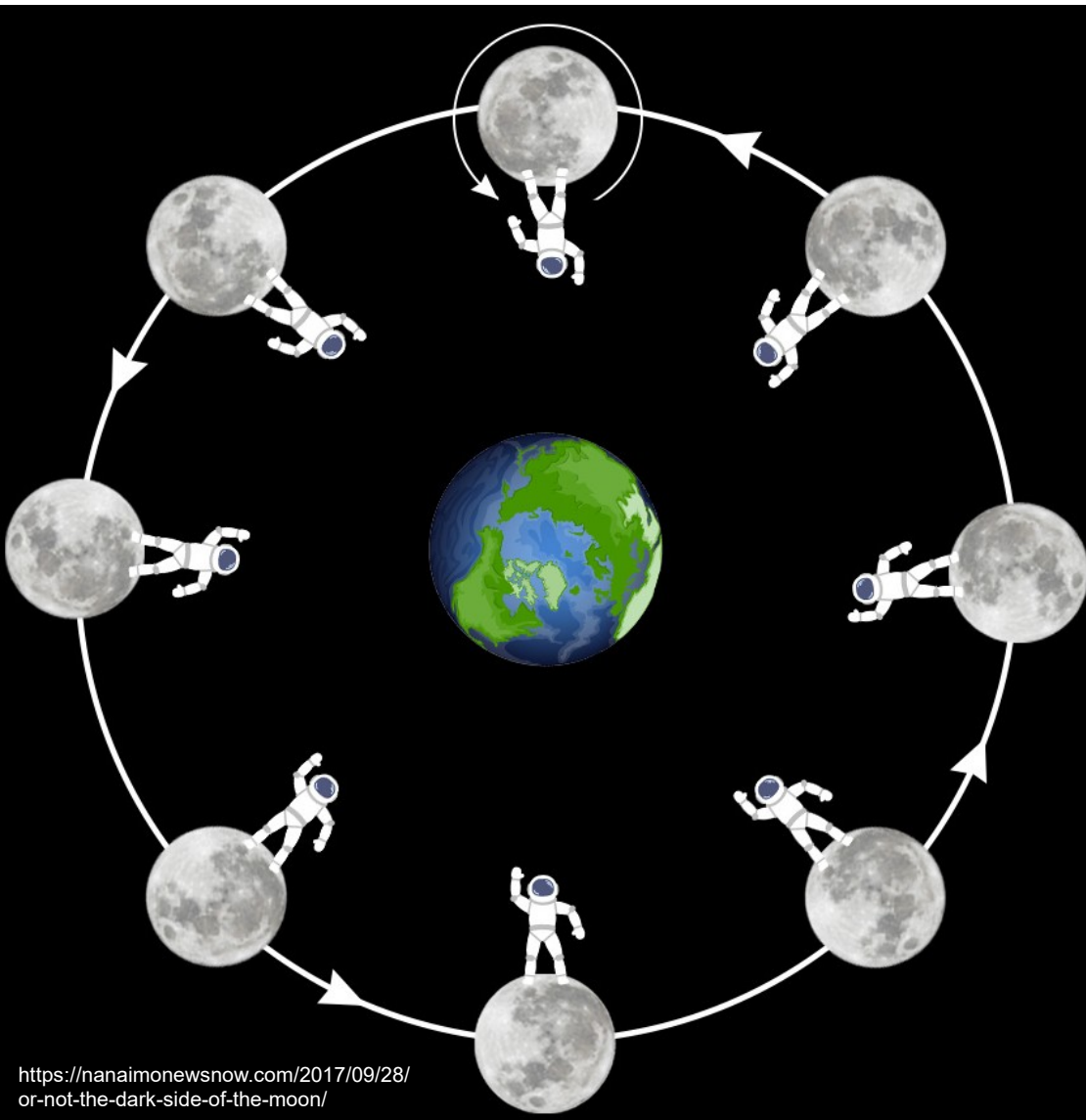
14 de out de 2020

Parece Marte, o planeta vermelho, mas é o nascer do Sol absurdamente avermelhado pela estupidez humana. A fumaça das queimadas voltou ao estado de São Paulo

- Nascer do Sol: 05:34
- Foto: 05:54
(nessa hora já era para o Sol estar 'amarelo')

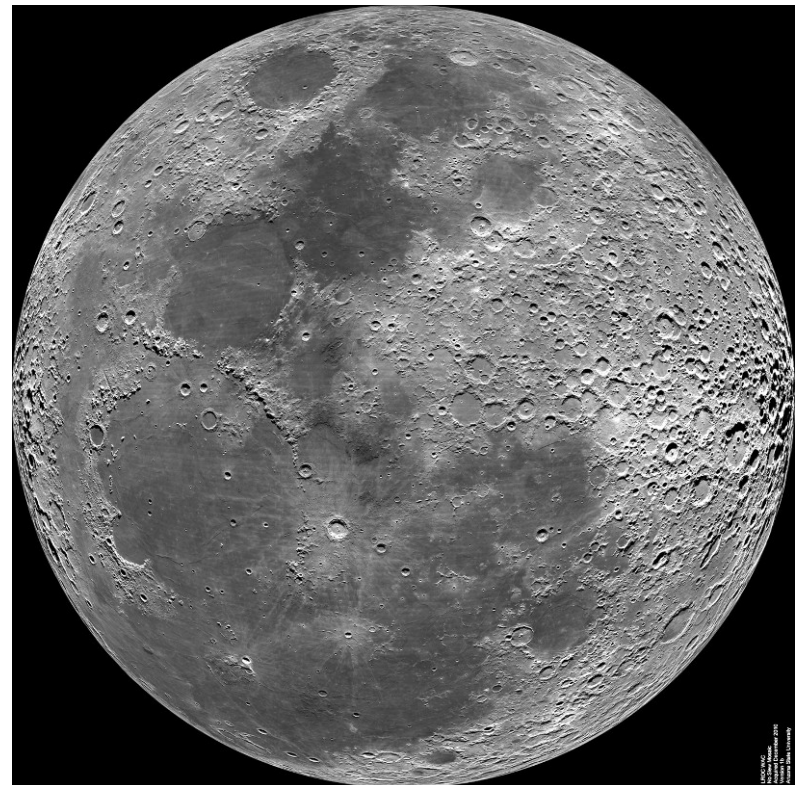


Observamos quase a mesma face da Lua, pois seu período de rotação (27,3 dias) é igual ao período orbital (27,3 d).



Face da Lua voltada
para a Terra

(c) NASA / Lunar Reconnaissance Orbiter

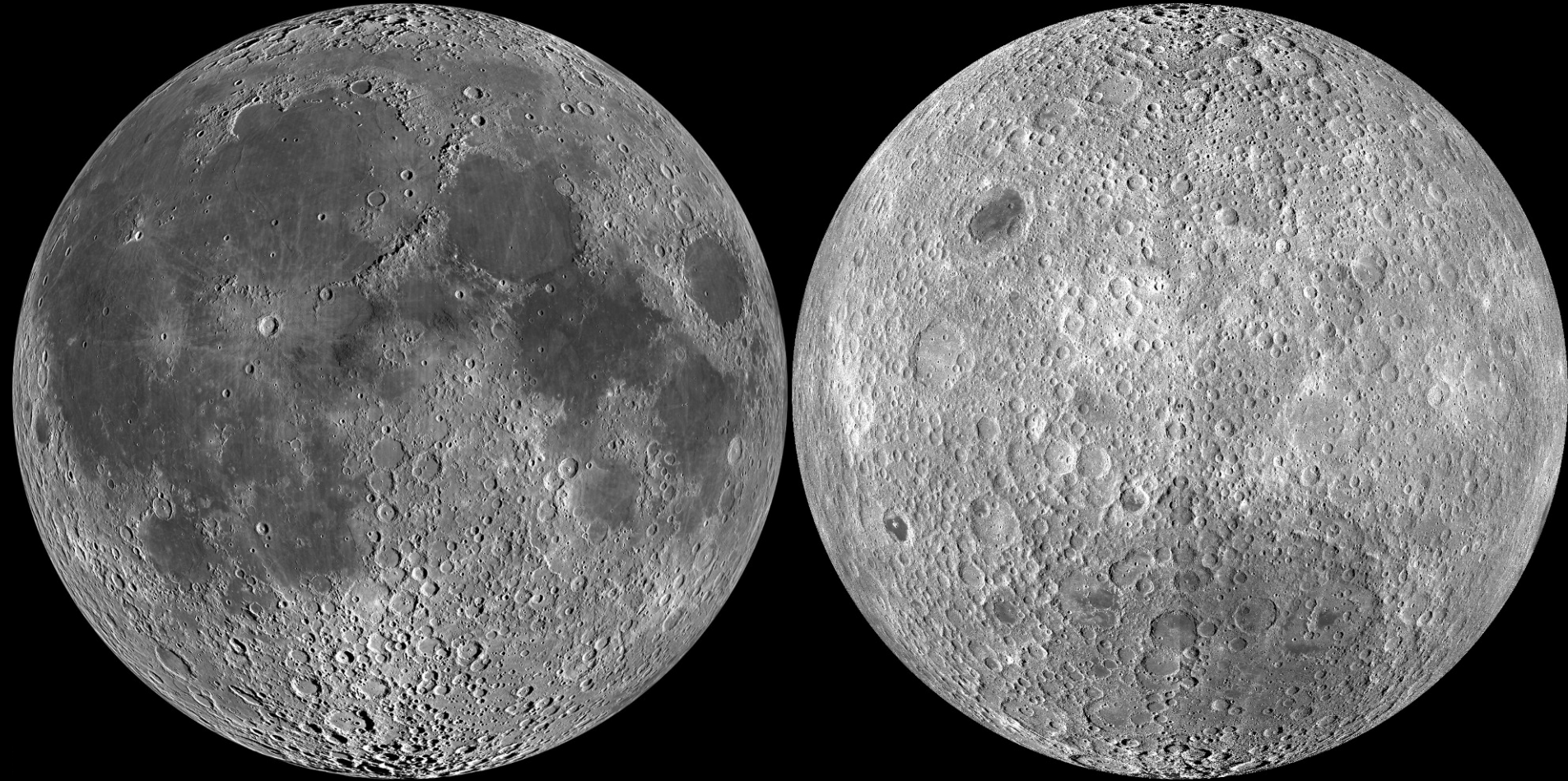


LRO
NASA
Lunar Reconnaissance Orbiter
2010
Image ID: AS15-107-1407-10

Lua

Face voltada para a Terra

Face oposta



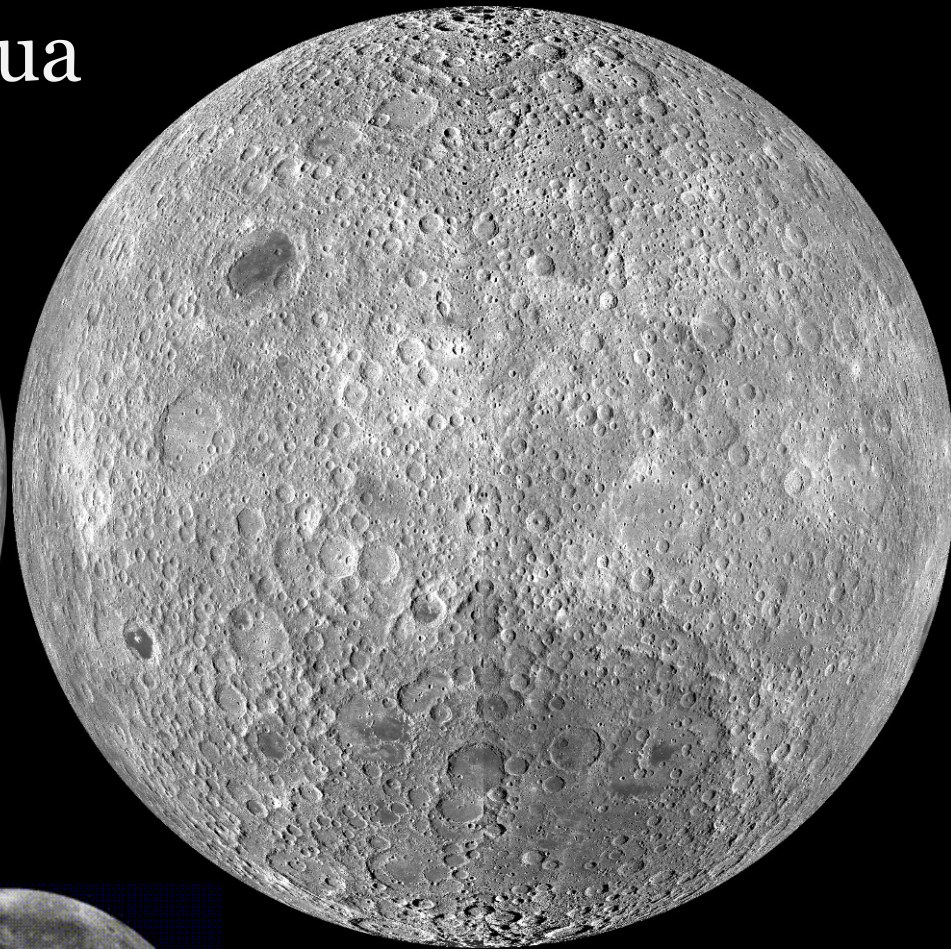
(c) NASA / GSFC / Arizona State Univ. / Lunar Reconnaissance Orbiter, 2009 - 2011

Além de crateras, a face voltada para a Terra é coberta por planícies escuras chamadas de mares. A crosta do lado oposto é mais espessa, tornando mais difícil para a lava do interior fluir para a superfície e formar mares.

Lua



Face voltada p/a Terra



Face oposta



Rotação da Lua em
alta resolução:

http://www.lroc.asu.edu/data/support/videos/lroc_wac643nm_Moon_rotation.mov

(c) Catalin Paduraru

<https://apod.nasa.gov/apod/ap161113.html>

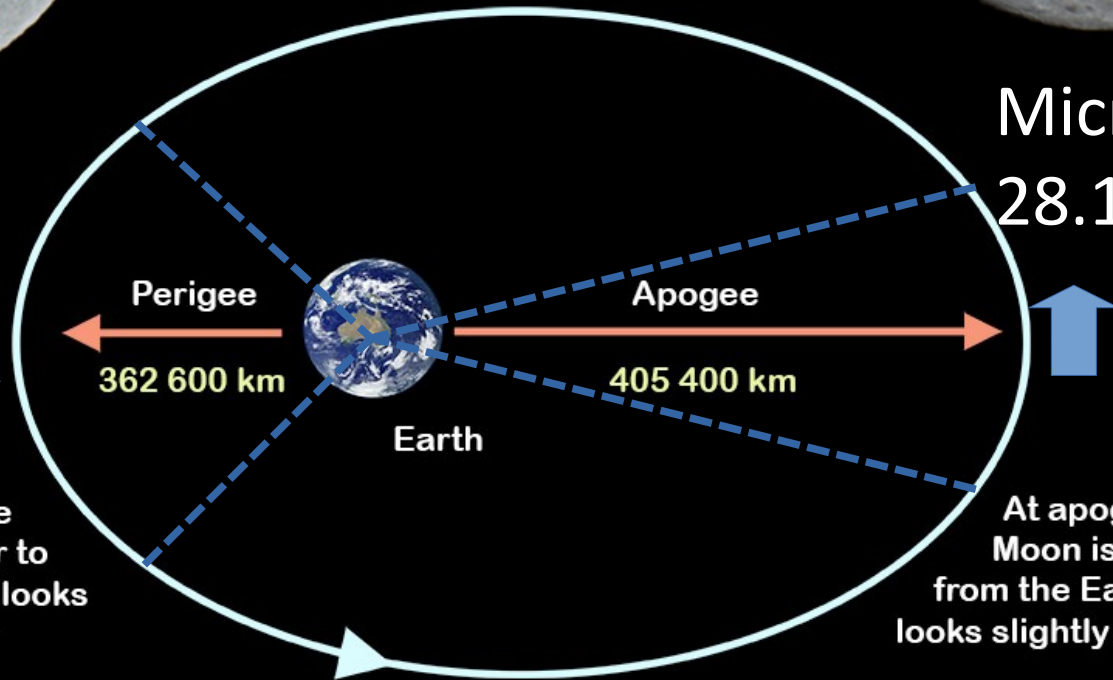
Super Moon
05.05.2012

Micro Moon
28.11.2012

At perigee, the
Moon is closer to
the Earth and looks
slightly larger

At apogee, the
Moon is farther
from the Earth and
looks slightly smaller

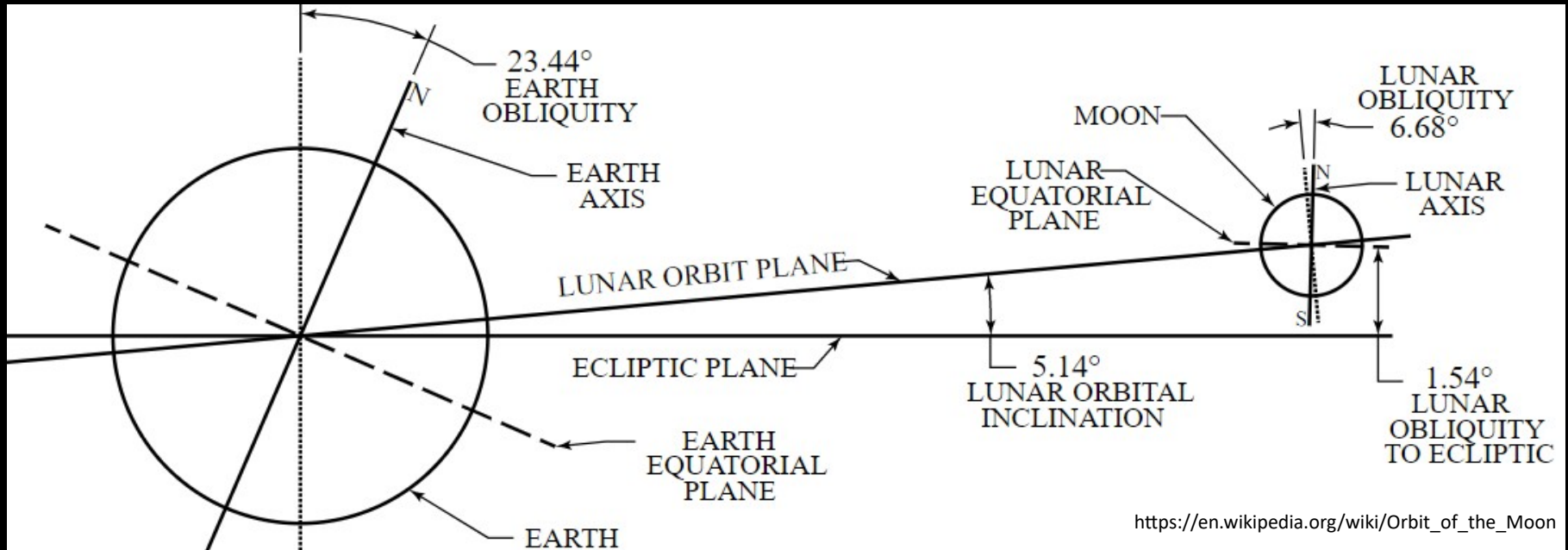
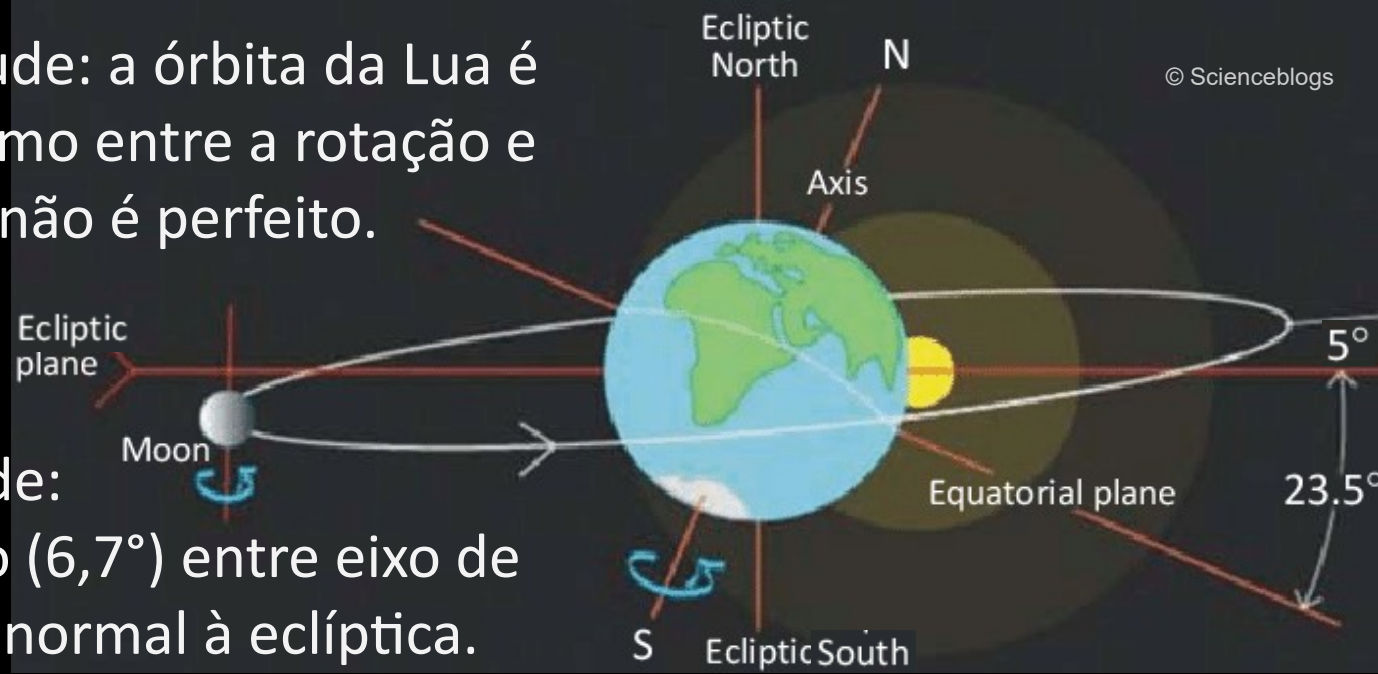
Moon's orbit is elliptical
(greatly exaggerated here)



Libração: permite observar até 59% da superfície lunar.

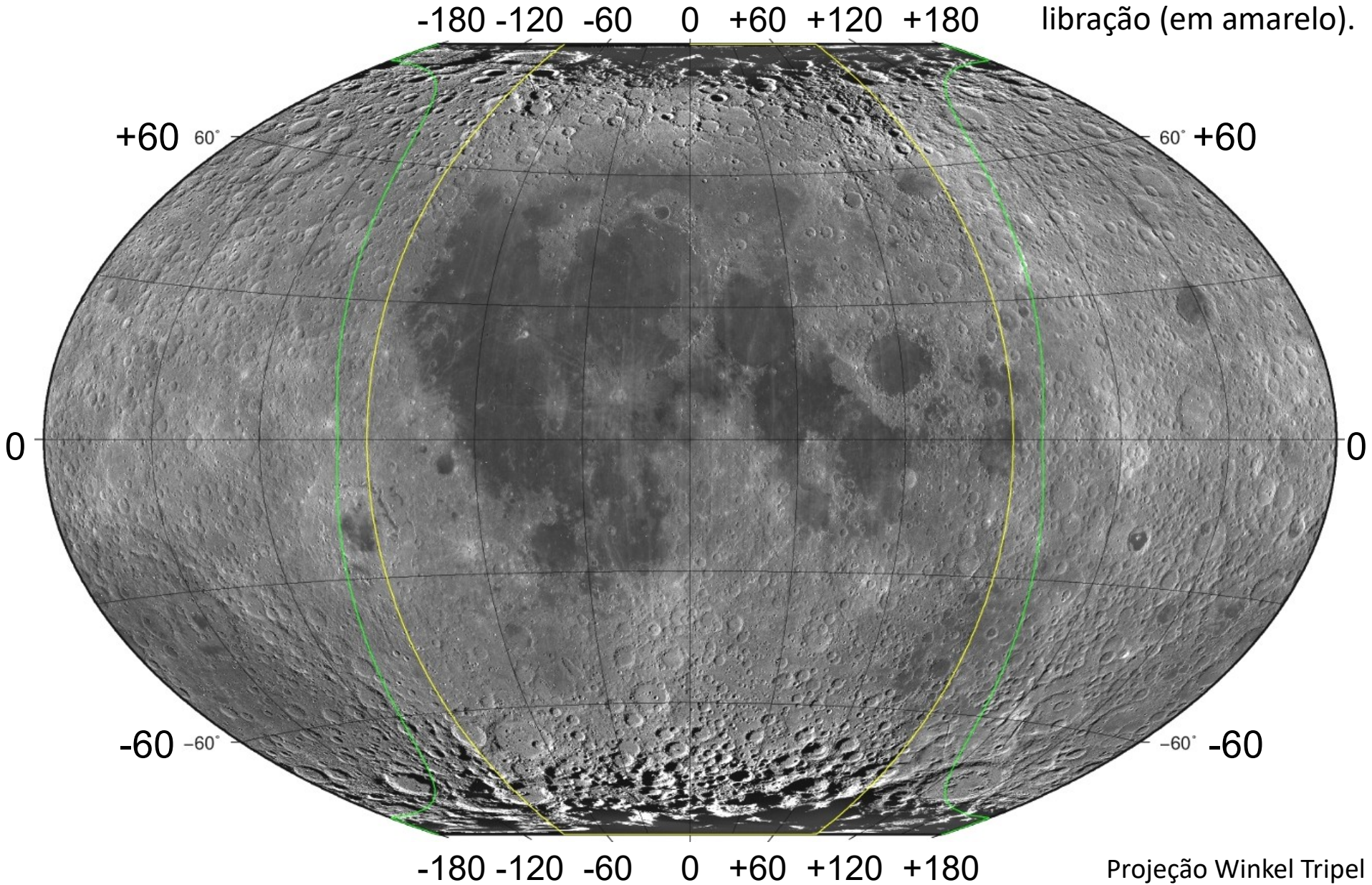
Libração em longitude: a órbita da Lua é elíptica $\Rightarrow$ sincronismo entre a rotação e a revolução da Lua não é perfeito.

Libração em latitude: devido à inclinação ($6,7^\circ$) entre eixo de rotação da Lua e a normal à eclíptica.



Libração da Lua

Extensão da superfície lunar visível (em verde) devido à libração, em comparação com a extensão da superfície lunar visível sem libração (em amarelo).



Libração da Lua



Em latitude



© John Chumack (left)/ Frank Barrett (right)

Em longitude

6-16-2013

1-9-2014



Mare Crisium



Mare Humboldtianum

Mare Marginis

Mare Smythii

Mare Australe

Mês sideral (período orbital) vs mês sinódico (fases da Lua)

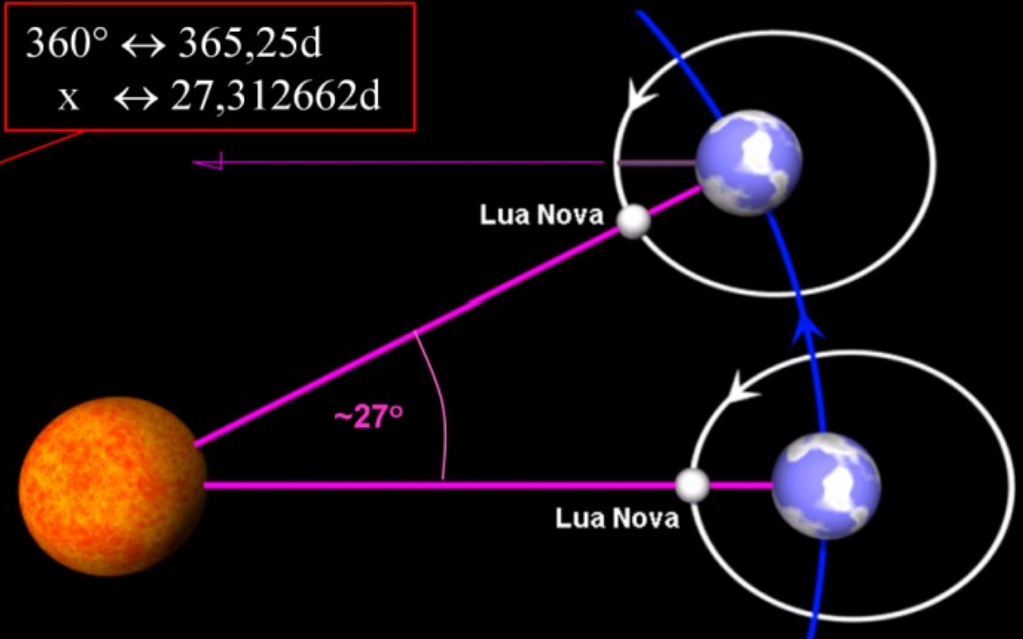
© Slide do Prof. Enos Picazzio (IAG - USP)

Mês sideral (27,321662d = 27d 7h 43m 12s): período orbital da Lua.

Mês sinódico (29,530589d = 29d 12h 44m 3s): período das lunações ou das fases da Lua (Nova-Nova, Cheia-Cheia etc.)

Essa diferença ocorre porque durante um mês sideral a Terra avançou cerca de 27° em relação à posição anterior e a repetição da fase lunar esperada só ocorrerá 2,208927 dias mais tarde

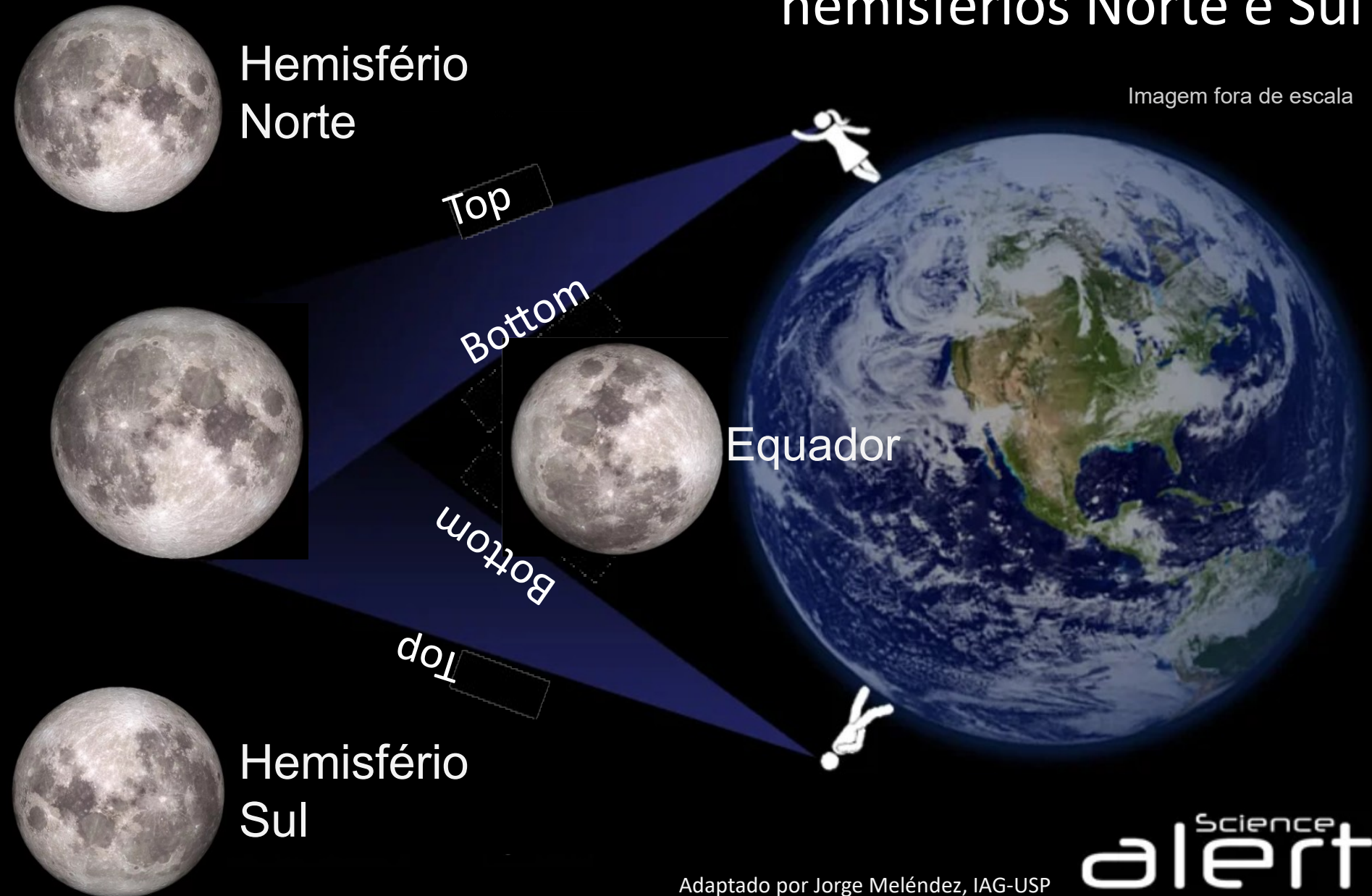
$$\begin{array}{l} 360^\circ \leftrightarrow 365,25\text{d} \\ x \leftrightarrow 27,312662\text{d} \end{array}$$



Visão do hemisfério Norte



A imagem da Lua é invertida entre observadores nos hemisférios Norte e Sul



2007 Oct 12 00:00:00 UT

2007 Oct 12 00:00:00 UT

Hemisfério Sul

Hemisfério Norte



Southern Hemisphere

Crescente Quarto Crescente Crescente Gibosa Cheia Minguante Gibosa Quarto Minguante Minguante

Hemisfério Sul



C

D

Hemisfério Norte





Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

**Galata Tower & first quarter
Moon** #Istanbul #Turkey

5:58 PM · 8 de dez de 2016 ·

...



Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

11:27 PM · 27 de jul de 2020

A beleza da lua craterada em quarto crescente hoje à noite em Butantã #SaoPaulo #Sampa #SP #Brasil #DaJanela #OlhemOCéu #OlhemALua #OlheALua

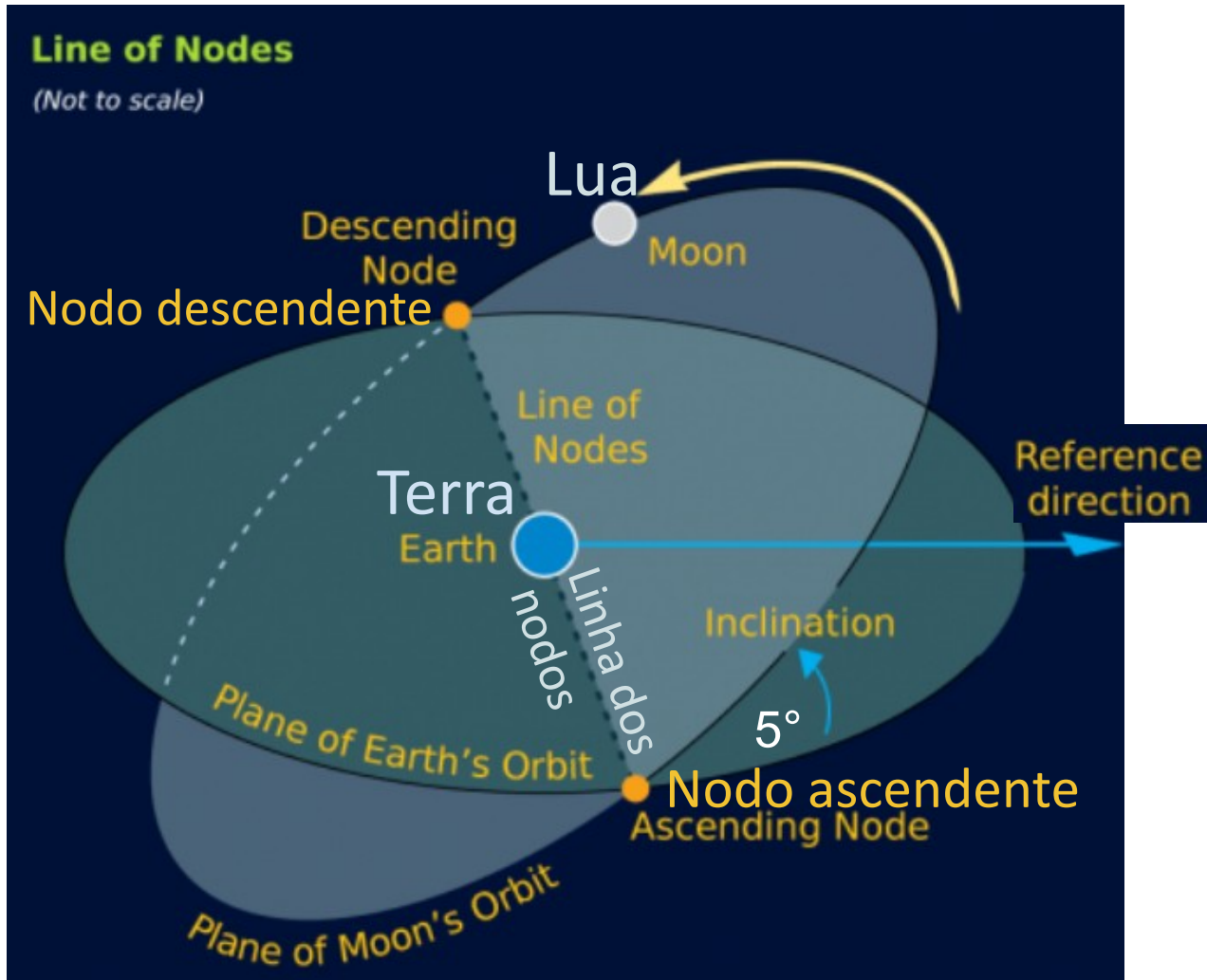
First Quarter Moon tonight in São Paulo #Brazil 27/jul/2020 #StormHour @StormHour #Astronomy



Jorge Meléndez, 27/Jul/2020, Butantã, São Paulo, SP, Brasil



Linha dos nodos (ou linha nodal): interseção entre os planos das órbitas da Lua e da Terra (eclíptica).



Para que aconteça um eclipse a Lua deve estar próxima a um dos nodos e na fase de lua nova (eclipse solar) ou lua cheia (eclipse lunar)

A sombra projetada por um objeto iluminado pelo Sol.
Na umbra a luz é totalmente bloqueada e na penumbra é parcialmente bloqueada.

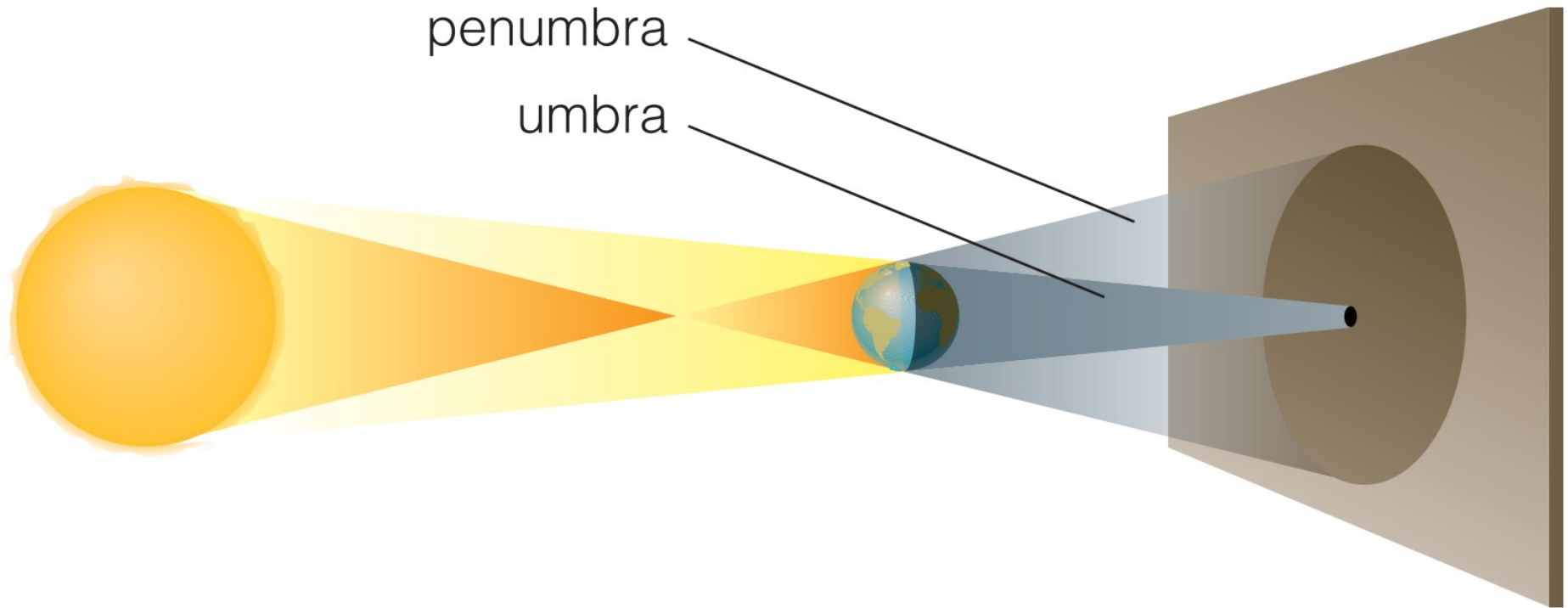
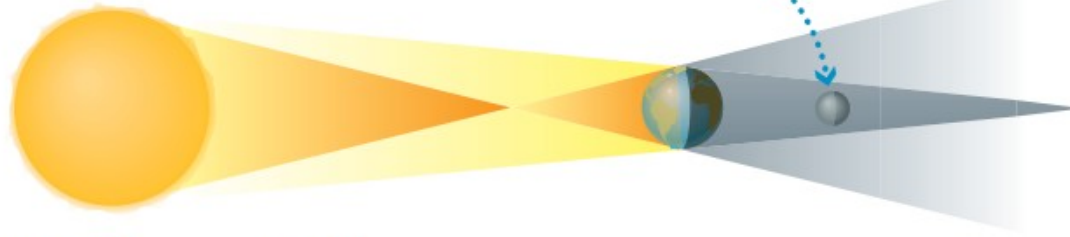


Figure 2.21

The shadow cast by an object in sunlight. Sunlight is fully blocked in the umbra and partially blocked in the penumbra.

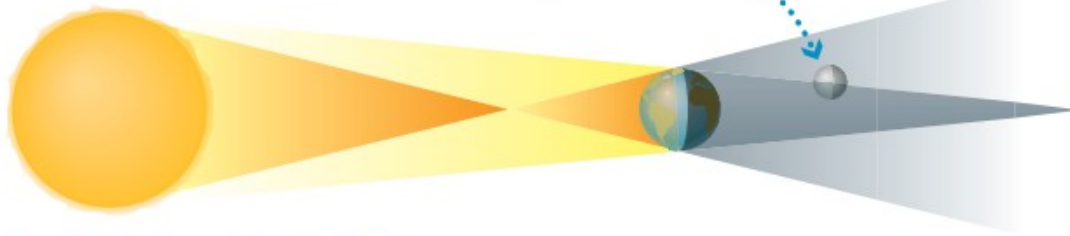
Eclipses lunares

Moon passes entirely through umbra.



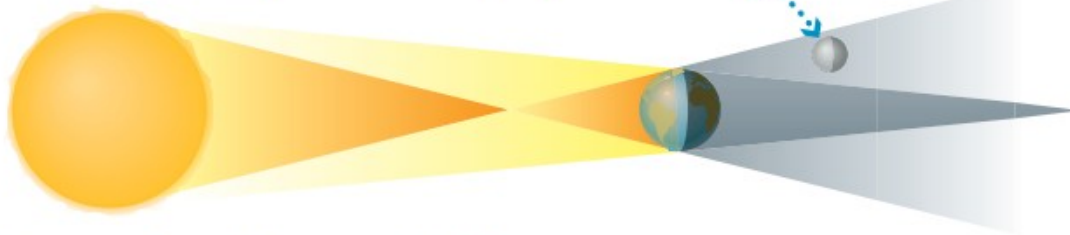
Total Lunar Eclipse

Part of the Moon passes through umbra.

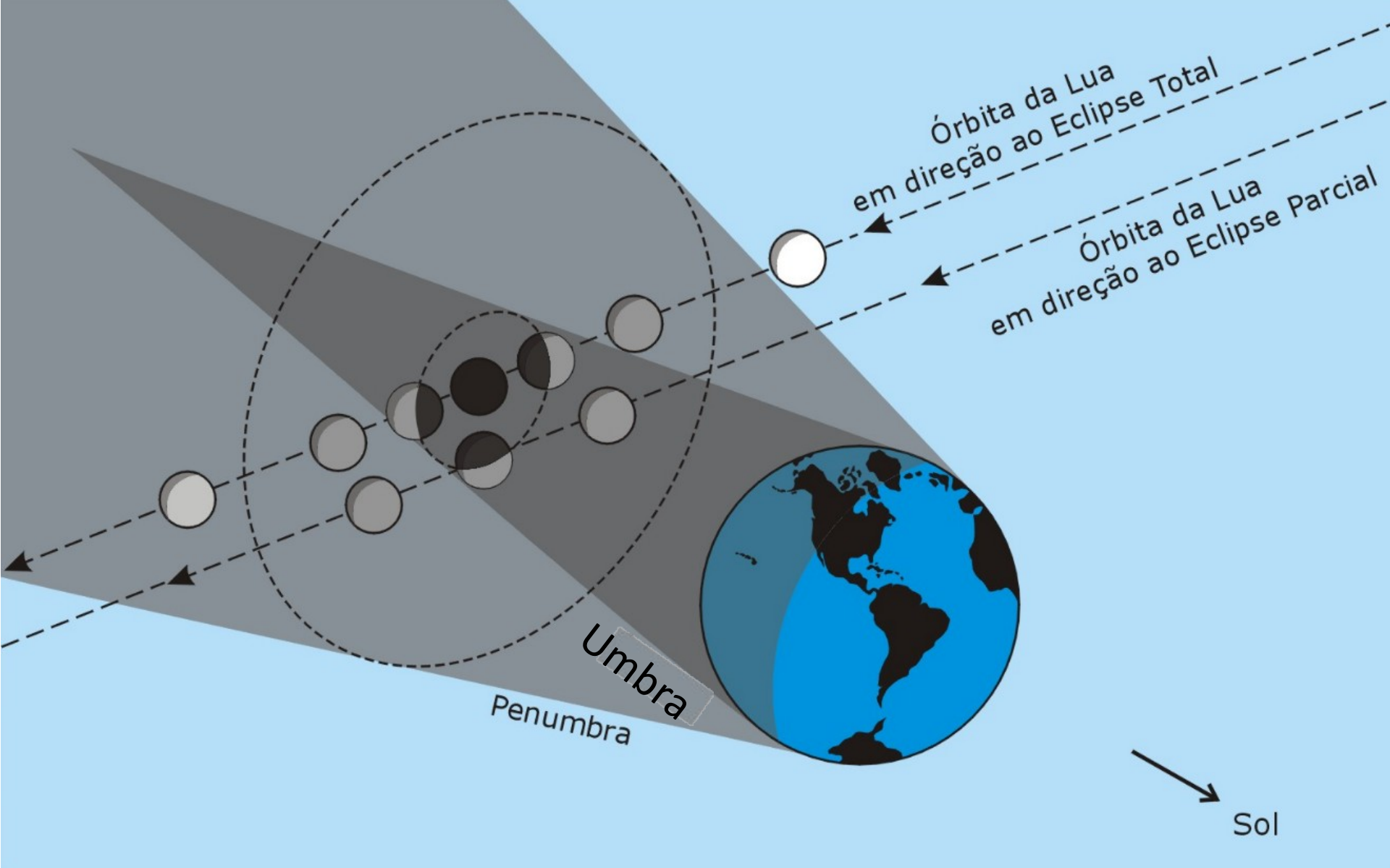


Partial Lunar Eclipse

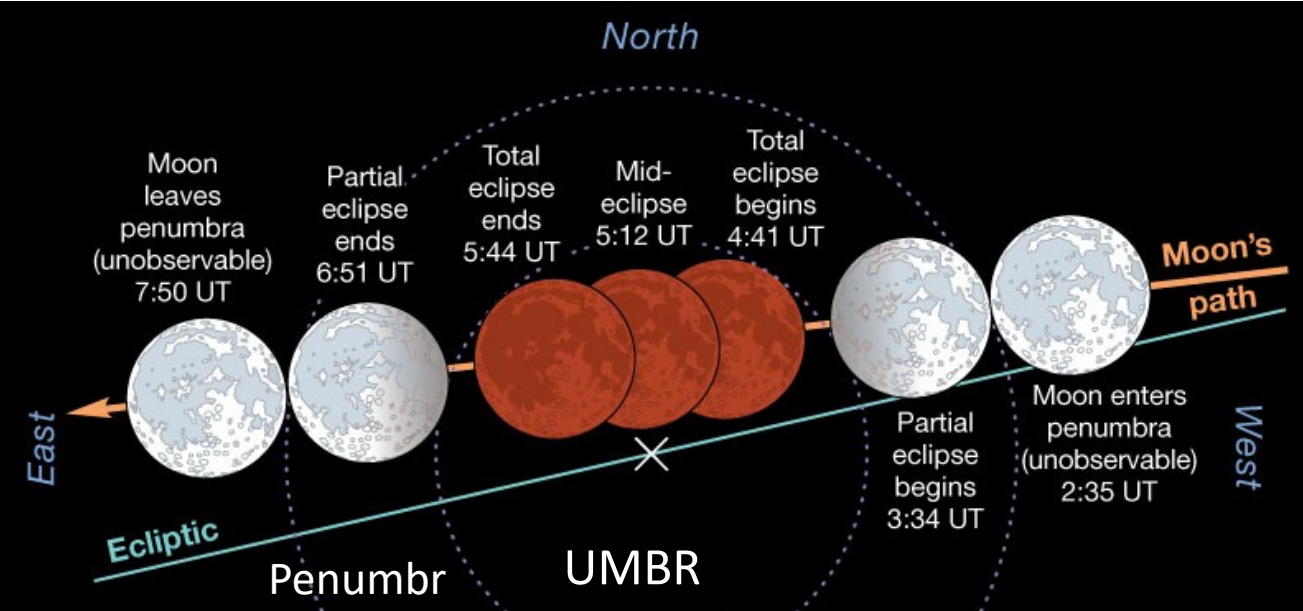
Moon passes through penumbra.



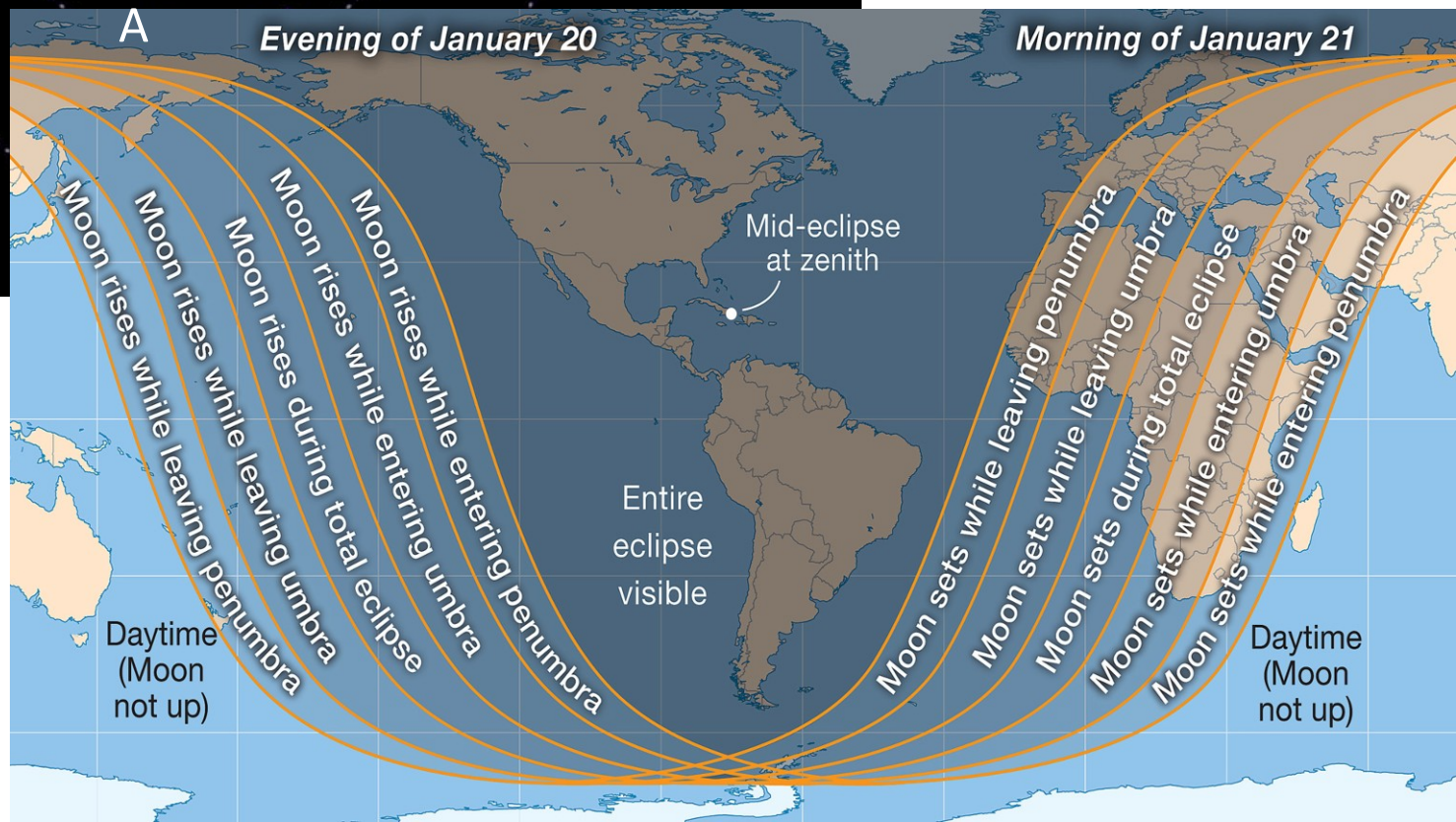
Penumbral Lunar Eclipse



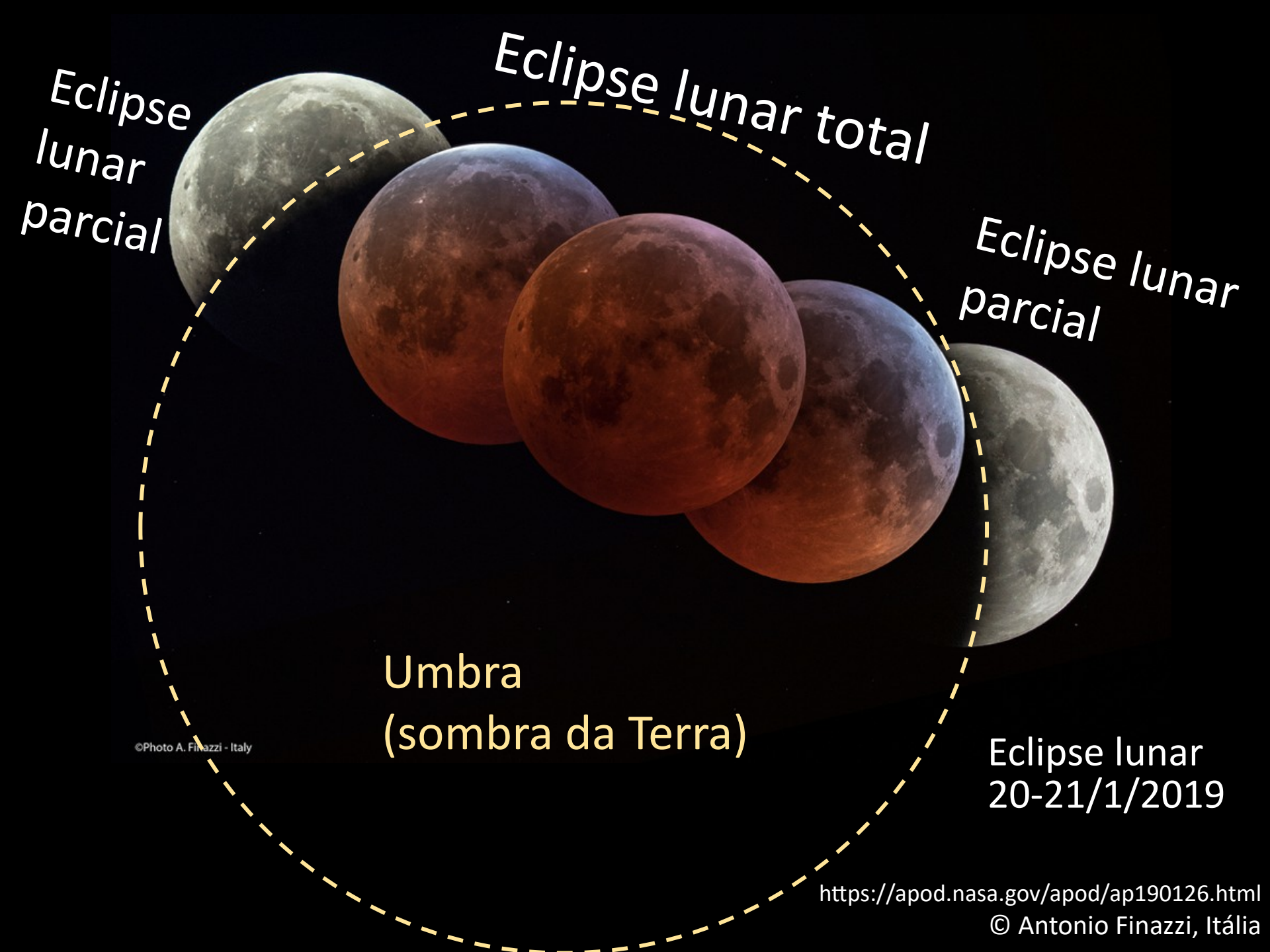
Infelizmente céu nublado em Sampa. Foto na madrugada de 21/1/2019



a



<https://skyandtelescope.org/press-releases/all-you-need-to-know-for-sundays-total-lunar-eclipse/>



Eclipse
lunar
parcial

Eclipse lunar total

Eclipse lunar
parcial

Umbral
(sombra da Terra)

Eclipse lunar
20-21/1/2019

©Photo A. Finazzi - Italy

<https://apod.nasa.gov/apod/ap190126.html>

© Antonio Finazzi, Itália

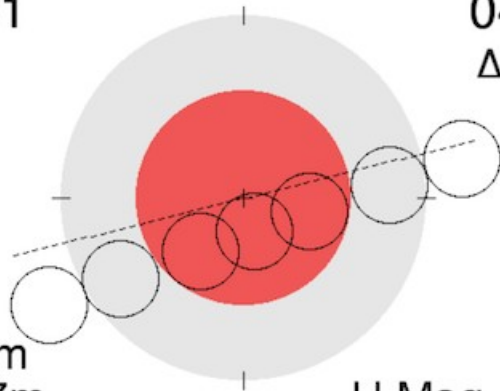
Total - 2022 May 16

Saros 131

D.Node

04:13 TD

$\Delta T = 70s$



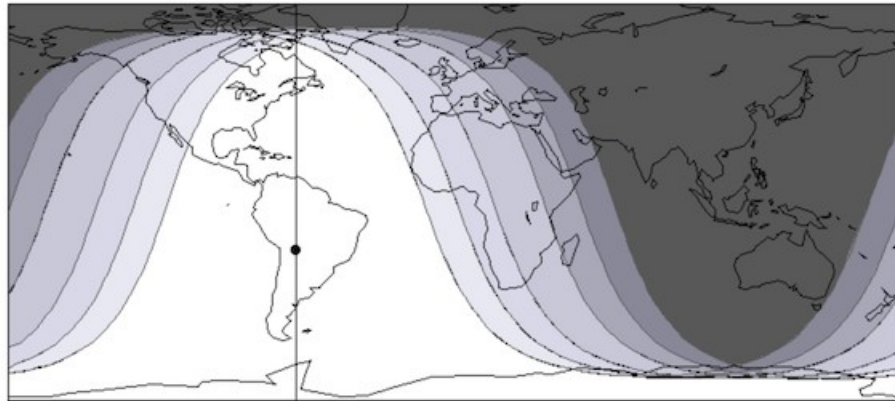
Tot. = 85m

Par. = 207m

Gam. = -0.2532

U.Mag. = 1.4137

P.Mag. = 2.3726



Thousand Year Canon of Lunar Eclipses

©2014 by Fred Espenak



Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

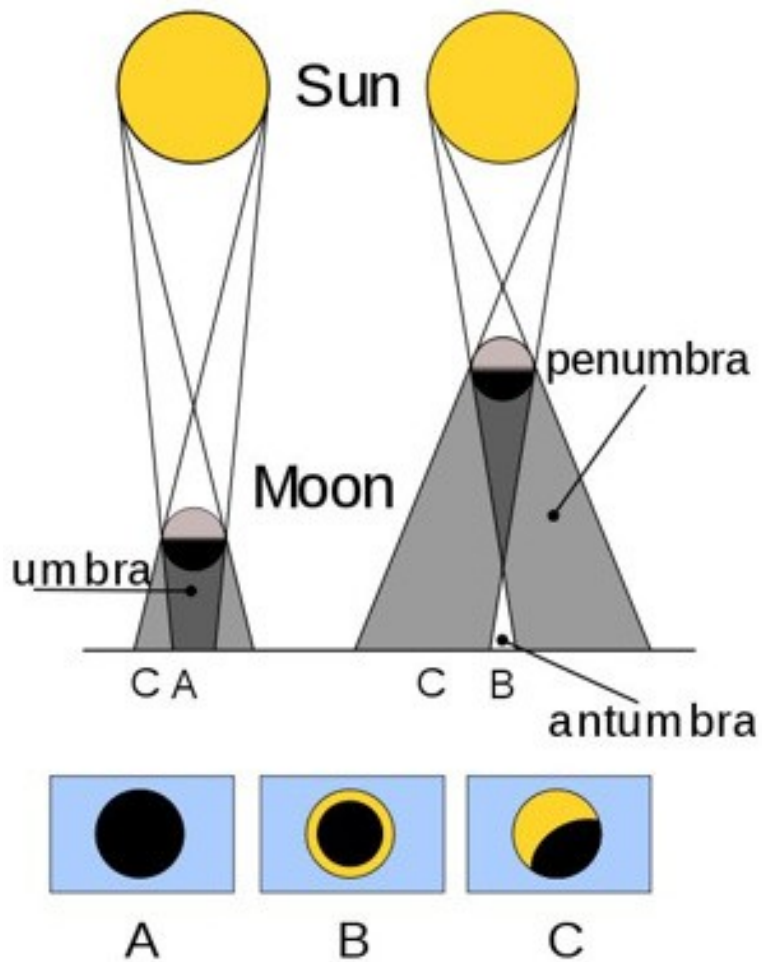
As fases do eclipse lunar hoje à noite em São Paulo. A totalidade (lua vermelha) será até ~01:53

[#EclipseLunar](#) [#EclipseLunarTotal](#)

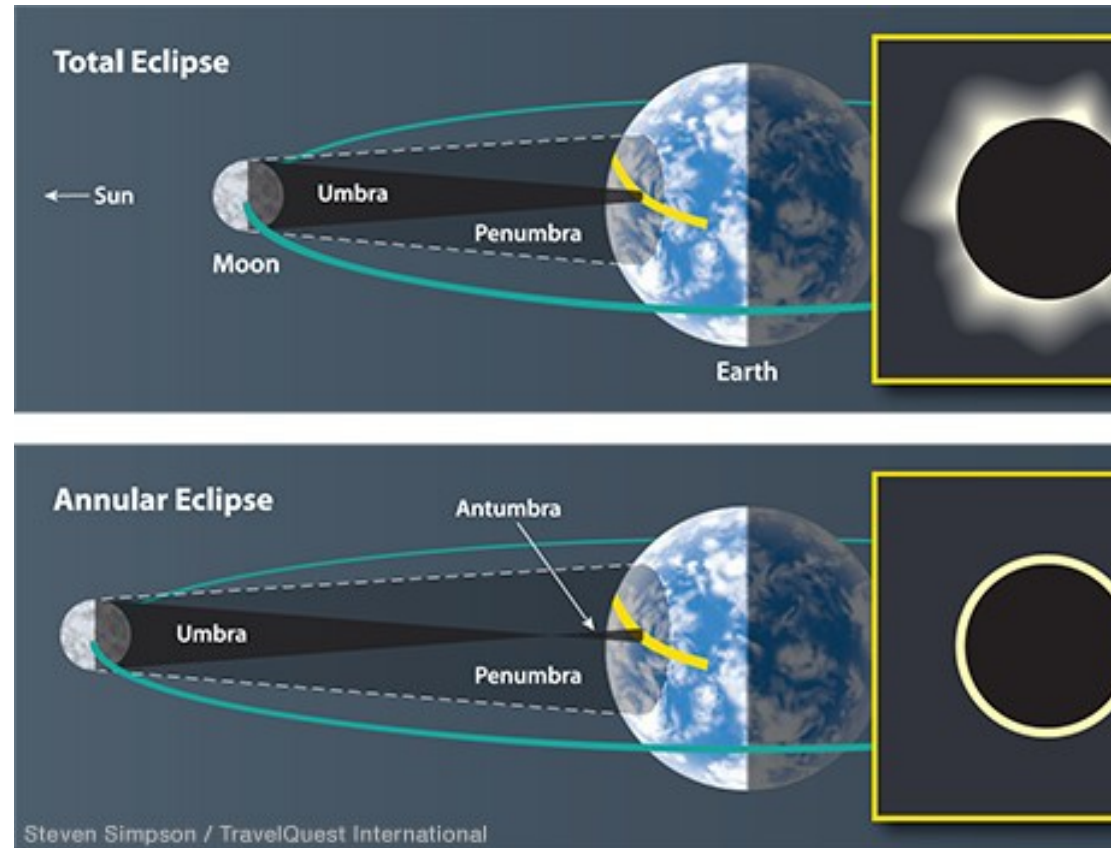
Total Lunar Eclipse in Sao Paulo [#BR](#) [@StormHour](#)



12:47 AM · 16 de mai de 2022



Eclipses

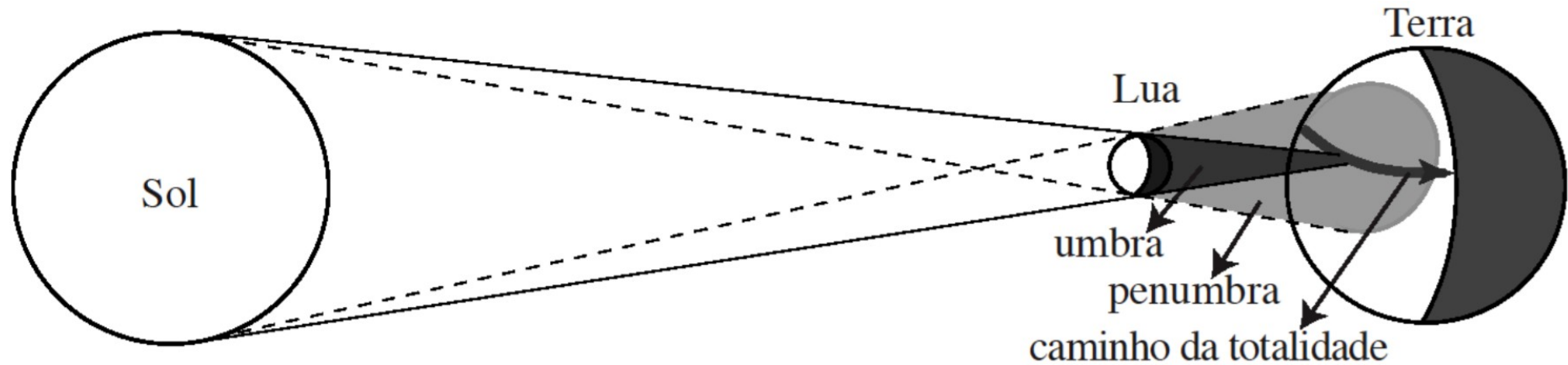


Total Anular Parcial

Anular: Lua mais afastada da superfície da Terra (Lua em apogeu ou latitudes altas/baixas da Terra)

Eclipse solar total e parcial

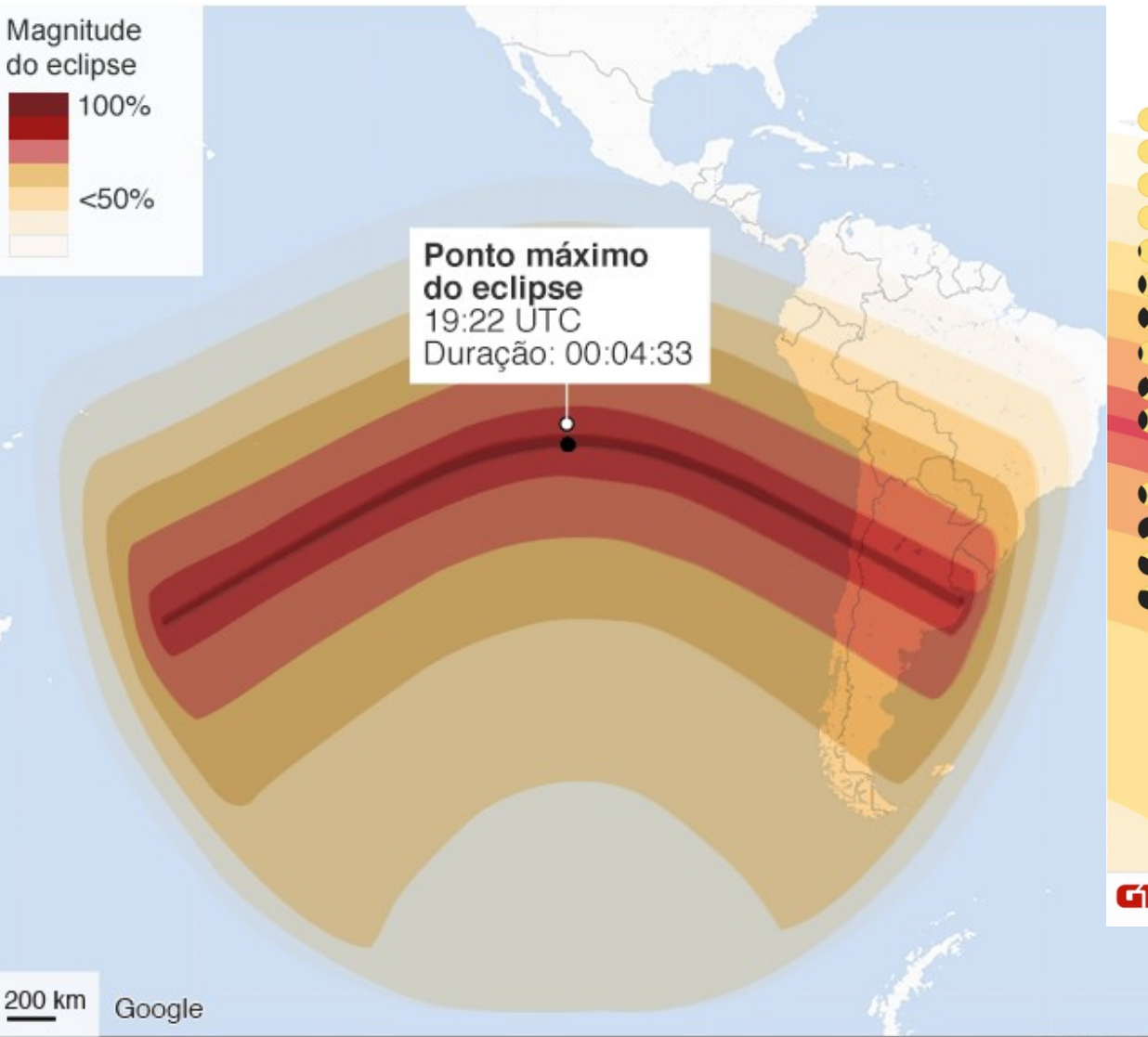
Observador na
umbra: eclipse
solar total



Observador na penumbra:
eclipse solar parcial



Mapa do eclipse solar de 2 de julho de 2019

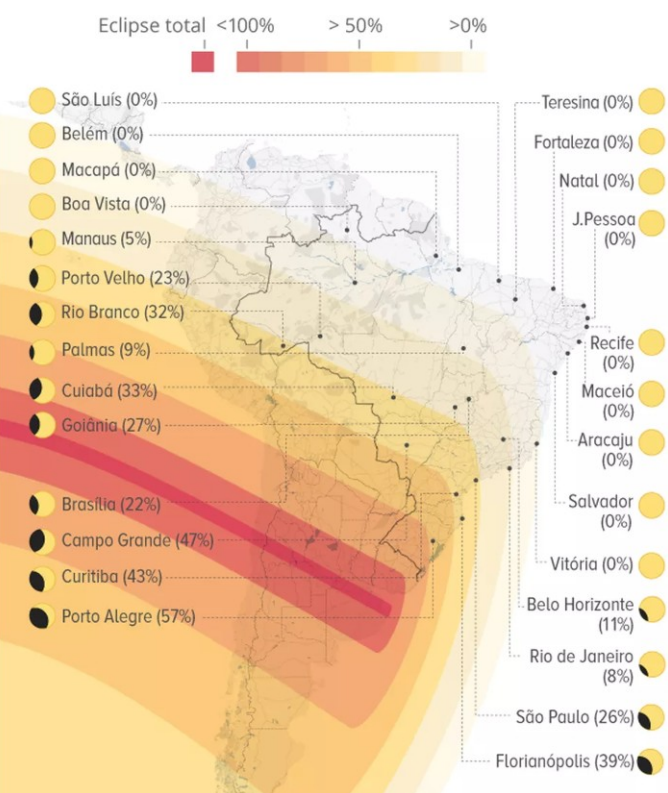


Fonte: Timeanddate.com

BBC

Eclipse do sol no Brasil

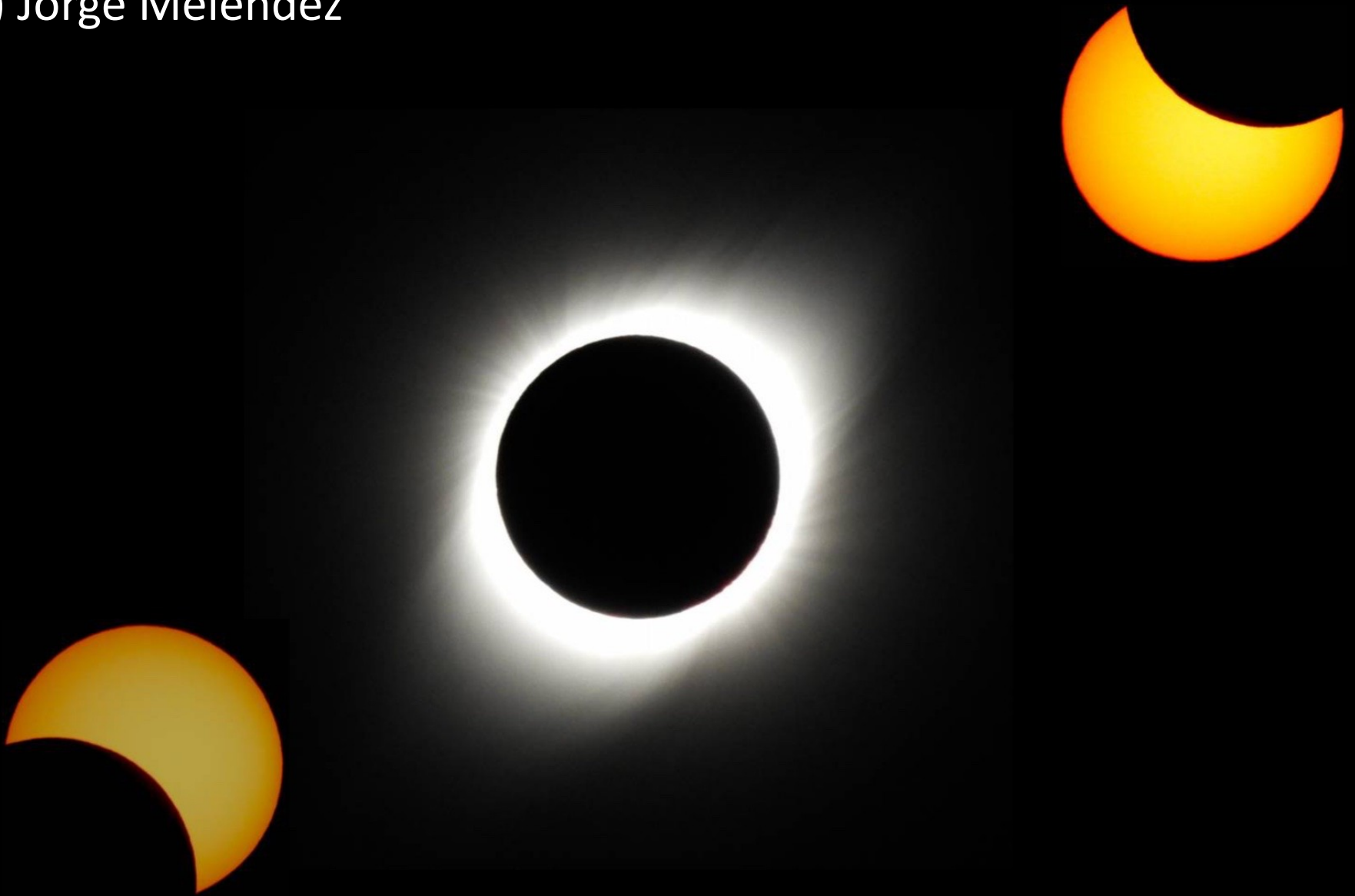
Cidades verão fenômeno de forma parcial



Eclipse solar parcial em Curitiba. (c) Giuliano Gomes/PR Press

Eclipse solar, 2/jul/2019, Chile

(c) Jorge Meléndez





Jorge Melendez

@DrJorgeMelendez

O Sol eclipsado parcialmente pela Lua refletido na minha camiseta da USP, no eclipse solar de 2 de julho de 2019 no deserto de Atacama





Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

NUNCA OLHE O SOL DIRETAMENTE.

Pode ver o eclipse solar usando filtros ópticos específicos (como na imagem) para bloquear 99,999% da luz do Sol. Caso não possua um filtro adequado, pode usar um vidro de máscara de solda número 13 ou 14 (procure em lojas de material de construção)



Vidro de máscara de solda
(no mínimo #13; idealmente #14)



Jorge Melendez
@DrJorgeMelendez

O Sol no máximo de ocultação hoje em São Paulo, 14.05 [#Sampa](#) [#EclipseSolar2020](#) [#Eclipse2020](#)

The Sun today at the maximum of the partial solar eclipse in Sao Paulo [#Brazil](#) [#StormHour](#) [#EclipseSolar](#)

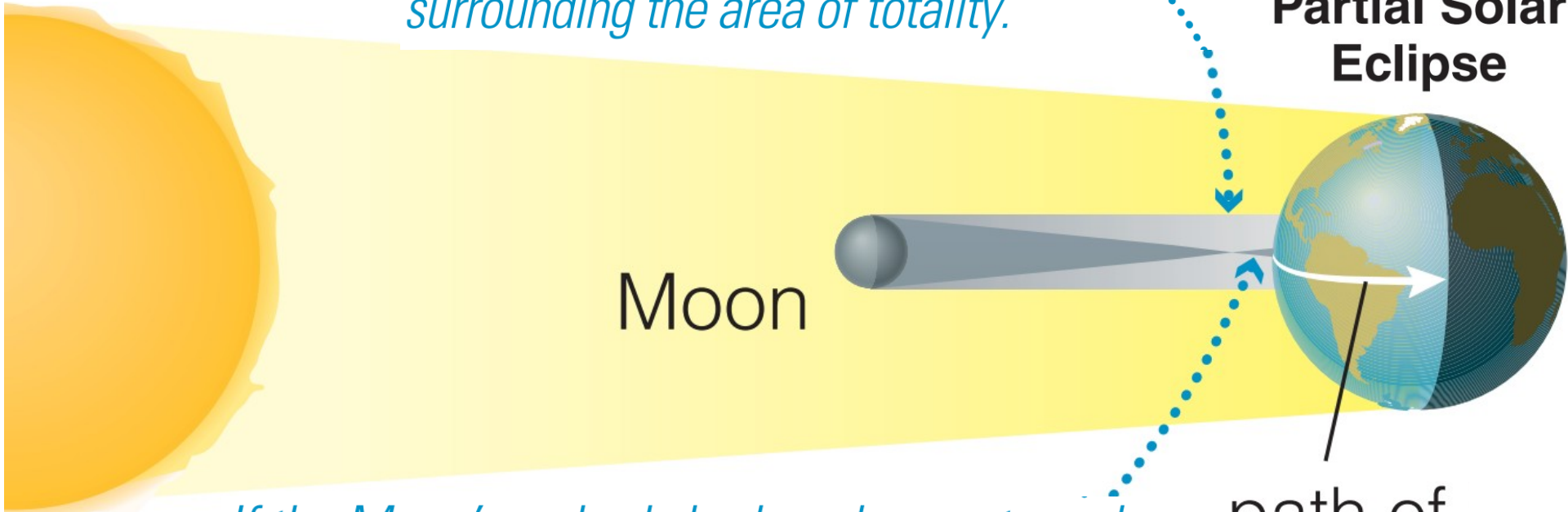


Eclipse solar anular. Quando o vértice do cone de sombra da Lua não atinge a superfície da Terra

A partial solar eclipse occurs in the lighter area surrounding the area of totality.



Partial Solar Eclipse



Moon

If the Moon's umbral shadow does not reach Earth, an annular eclipse occurs in the small central region.

Annular Solar Eclipse



path of annular eclipse



Astronomia USP Brasil

@AstroUSP

O eclipse anular solar ontem na Arábia.

Yesterday's annular solar eclipse in Arabia.

(c) Khalid al-hamnadi, Liwa desert, 26/12/2019



Astronomia USP Brasil @AstroUSP · 1 de fev de 2020

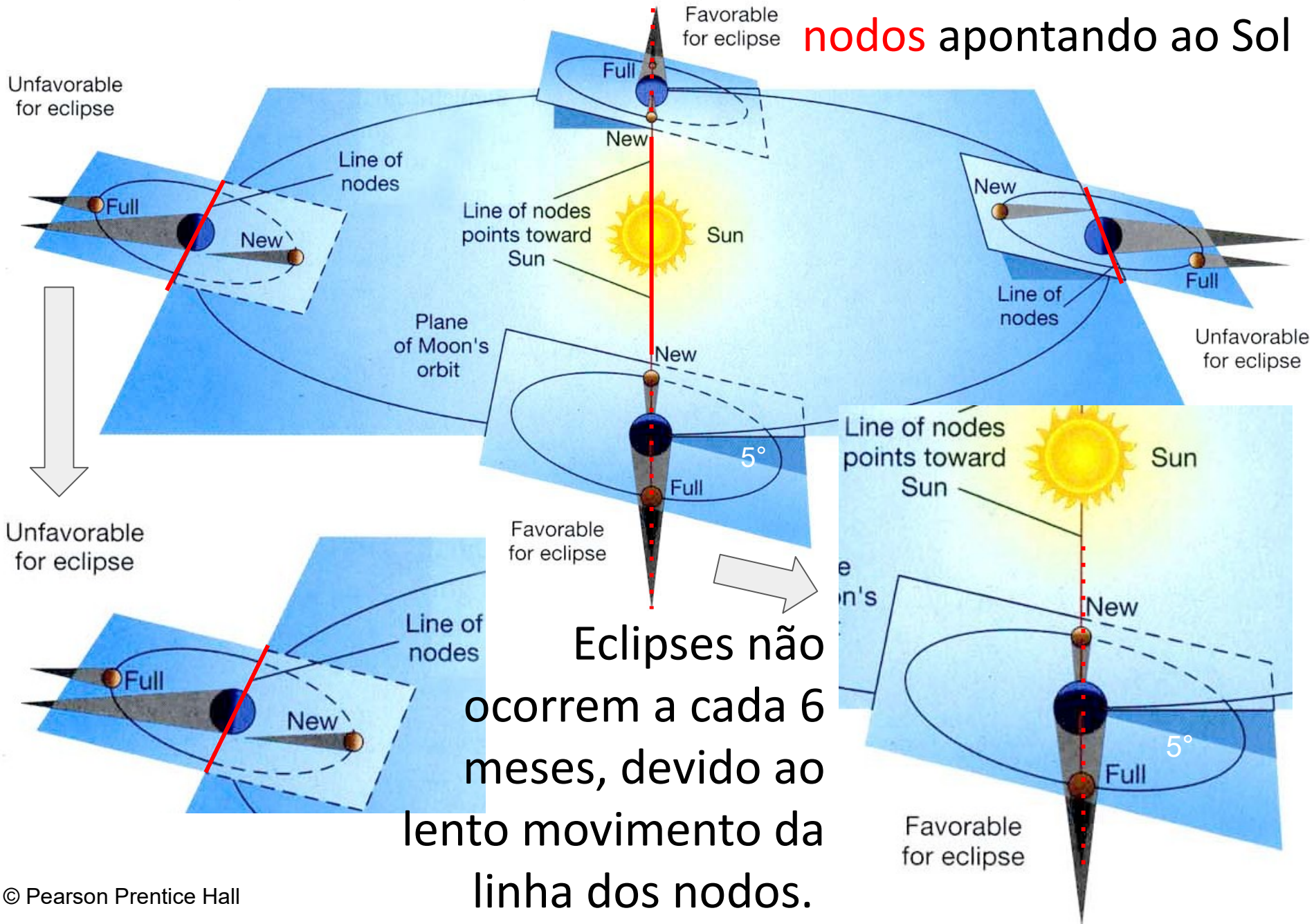
Observando o **eclipse solar anular** ao pôr do Sol em Novo México **#EUA**

Annular Solar **Eclipse** at sunset over New Mexico **#USA** 🇺🇸

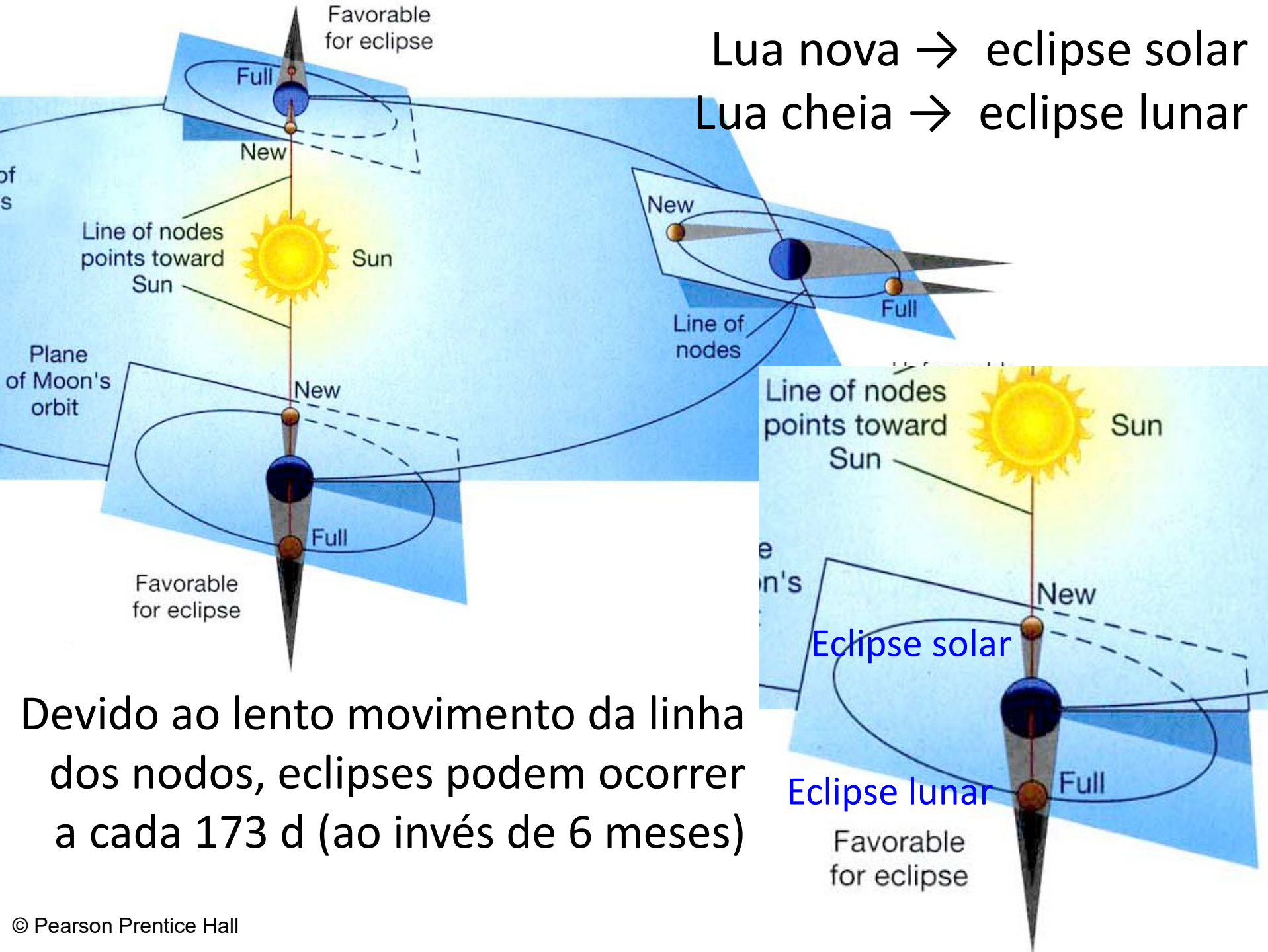
(c) Colleen Pinski 20/5/2012 apod.nasa.gov/apod/ap160831...



Para que ocorra eclipse: Lua perto de um nodo e **linha dos**
nodos apontando ao Sol



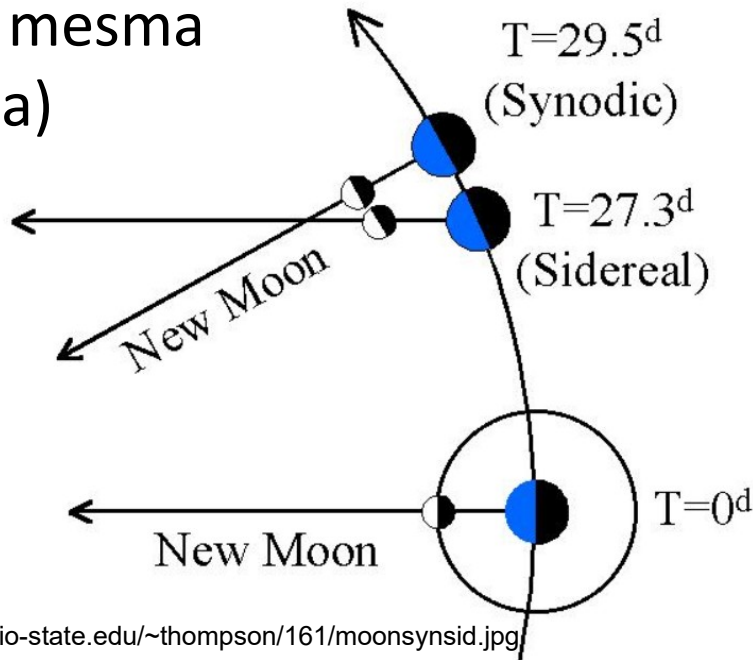
Lua nova → eclipse solar
Lua cheia → eclipse lunar



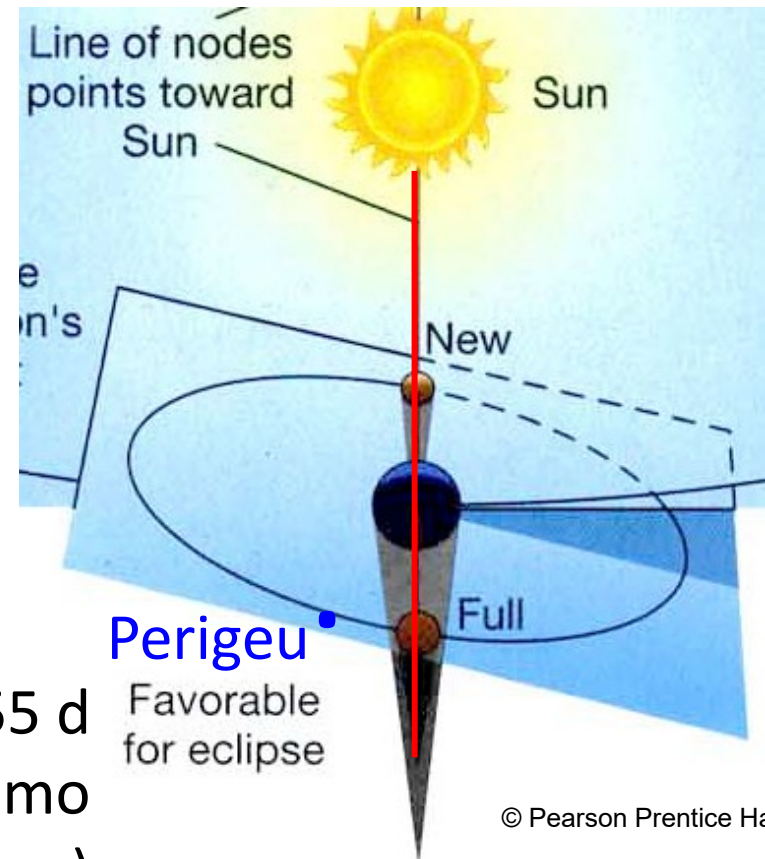
Devido ao lento movimento da linha dos nodos, eclipses podem ocorrer a cada 173 d (ao invés de 6 meses)

Saros: periodicidade de eclipses de 18 anos 11 dias 8 horas, devido à harmonia entre mês sinódico, draconiano e anomalístico. 223 meses sinódicos ~ 242 meses draconianos ~ 239 meses anomalísticos. Descoberto talvez pelo astrônomo caldeo Beroso (350-270 a. C.)

Mês sinódico = 29.53059 d
(2 vezes a mesma fase da Lua)



Mês draconiano = 27.21222 d
(2 passagens pelo mesmo nodo)



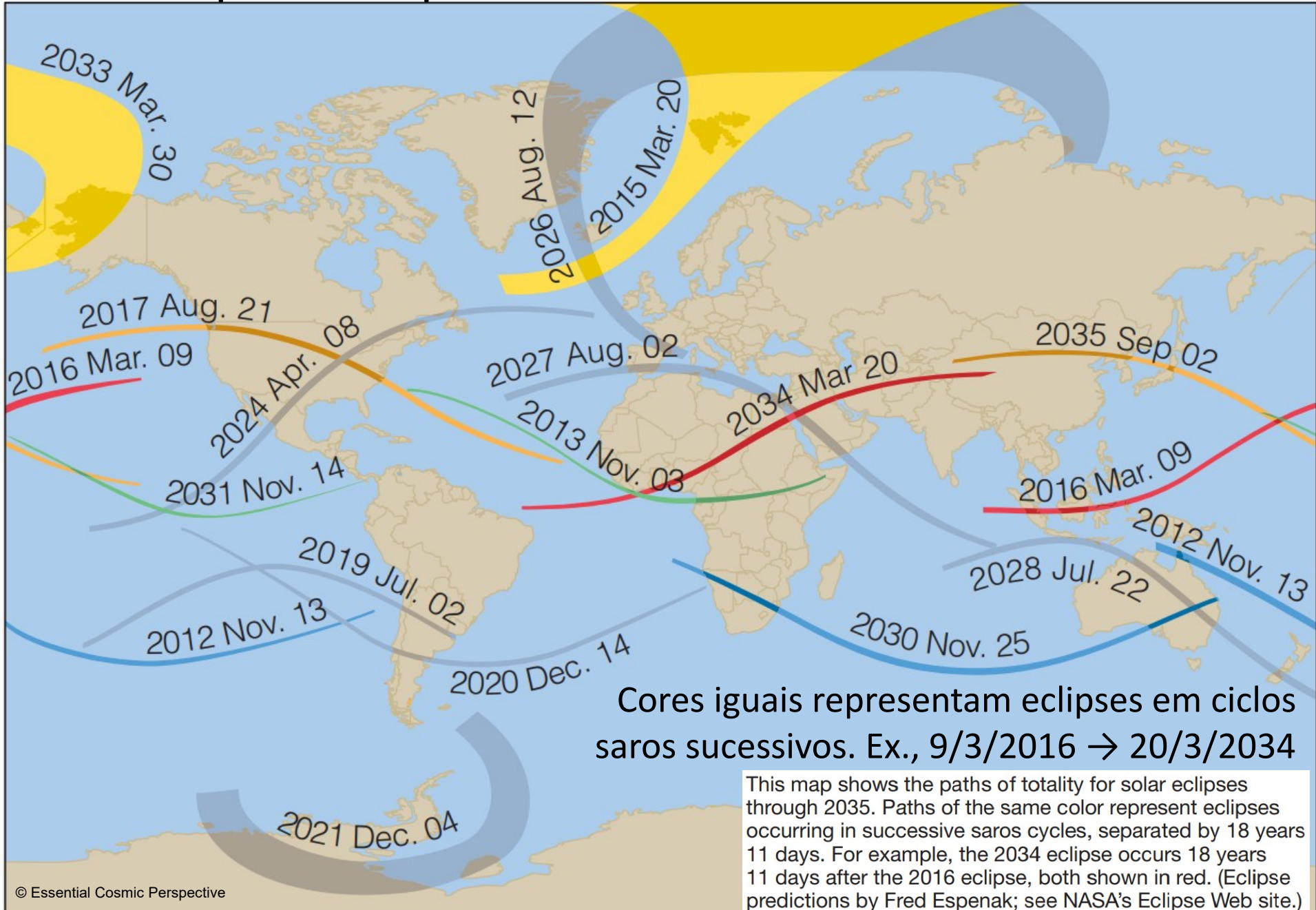
Mês anomalístico = 27.55455 d
(duas passagens consecutivas pelo mesmo ponto de sua órbita (p.ex. **perigeu**))

Perigeu
Favorable for eclipse

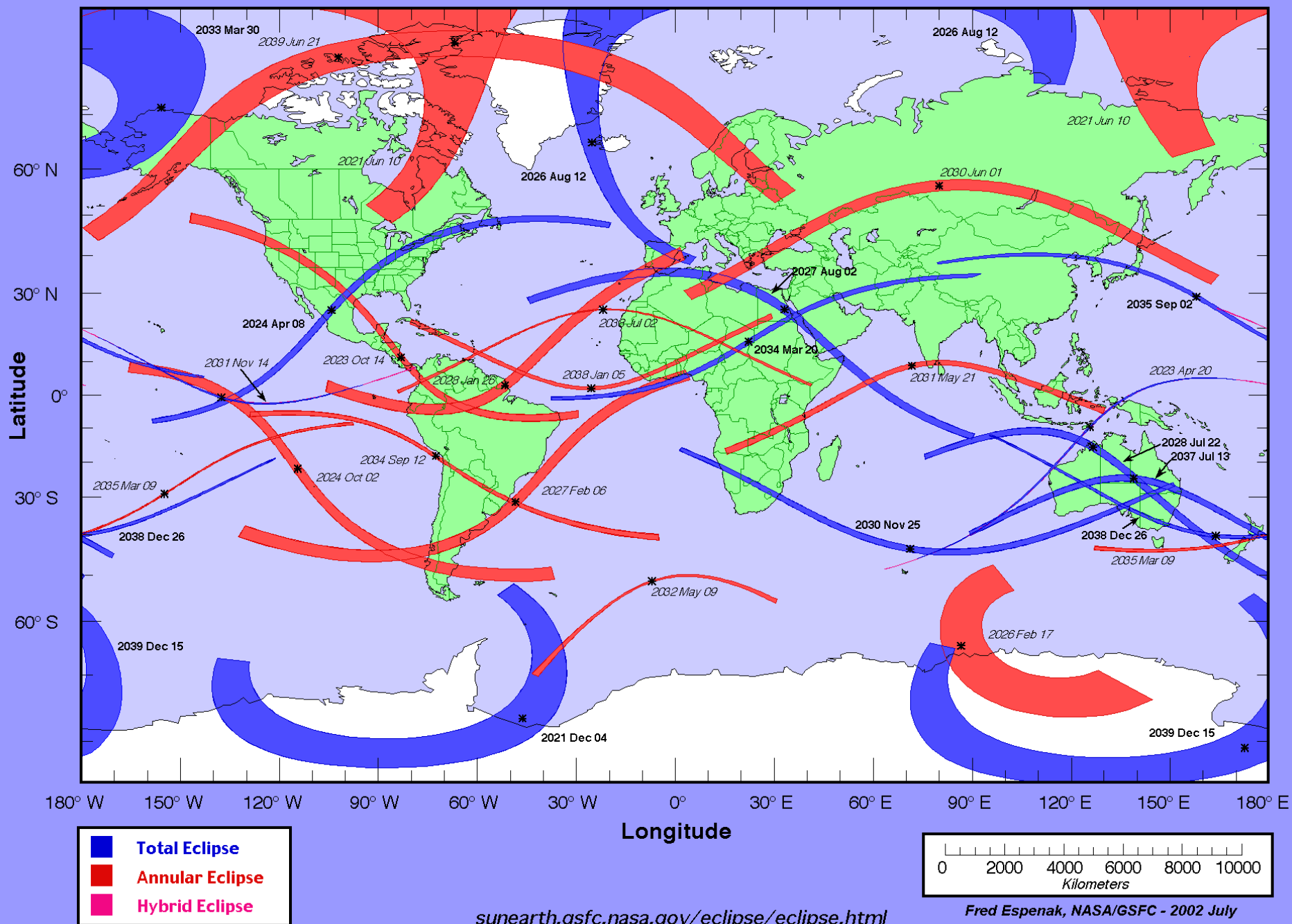
© Pearson Prentice Hall

Saros means repetition

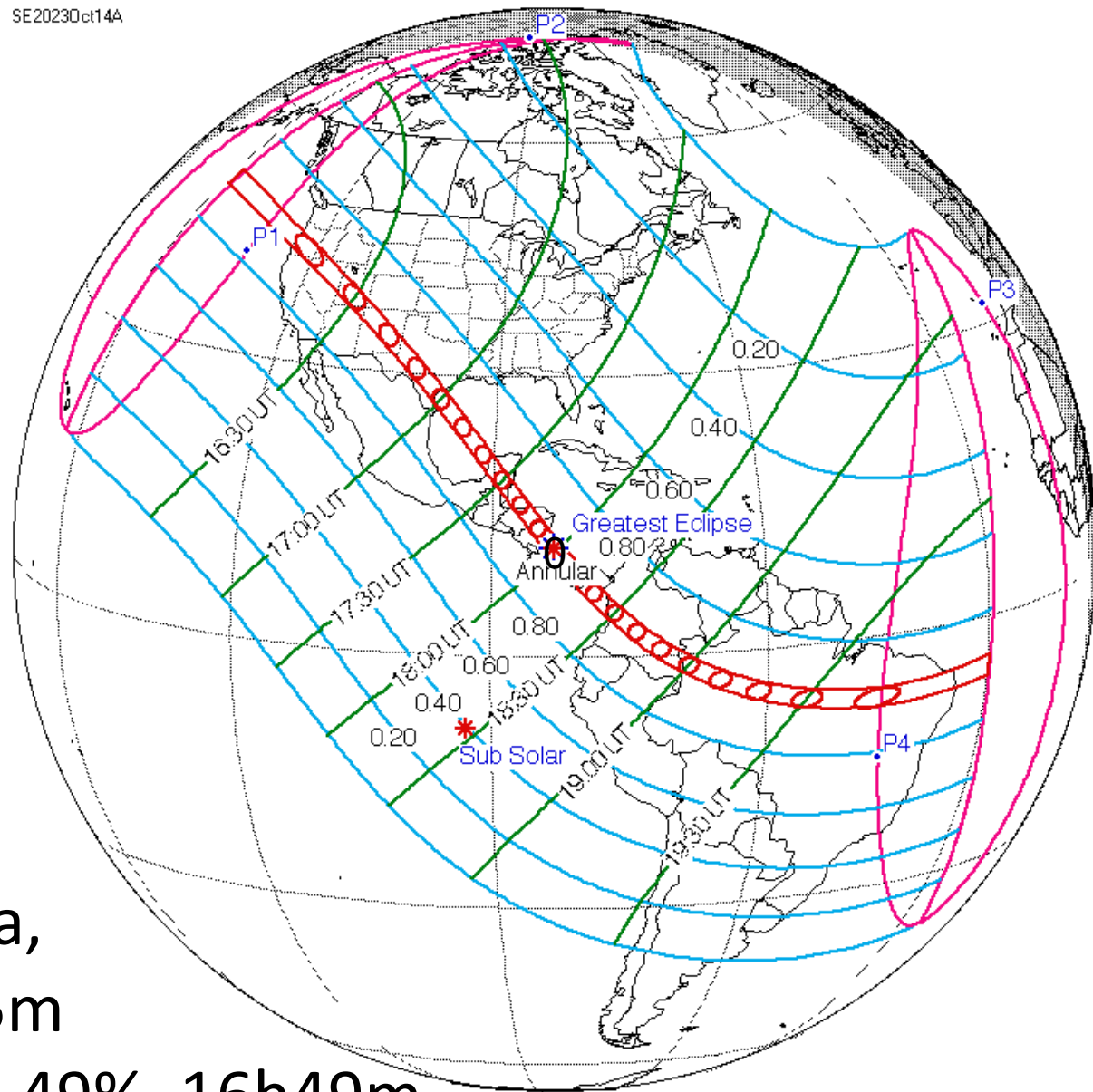
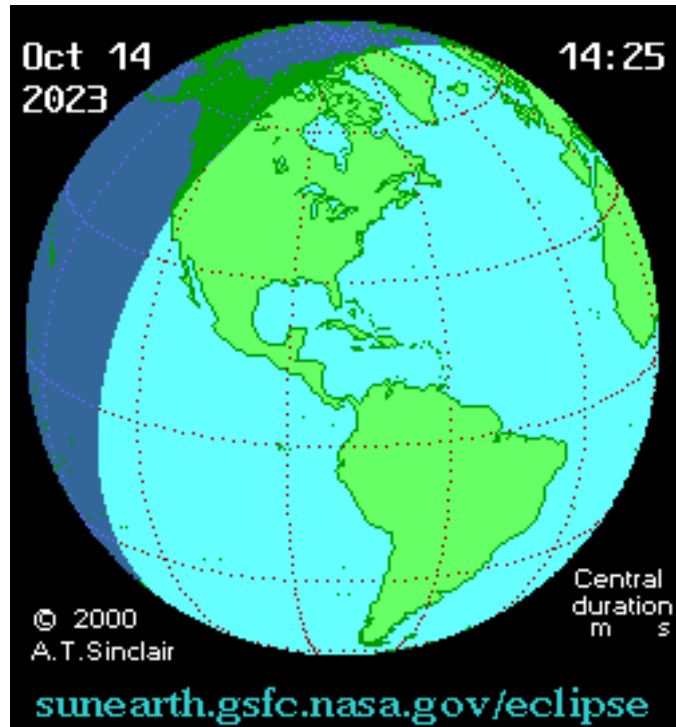
Mapa de eclipses solares totais de 2012 a 2035



Total and Annular Solar Eclipse Paths: 2021 –2040

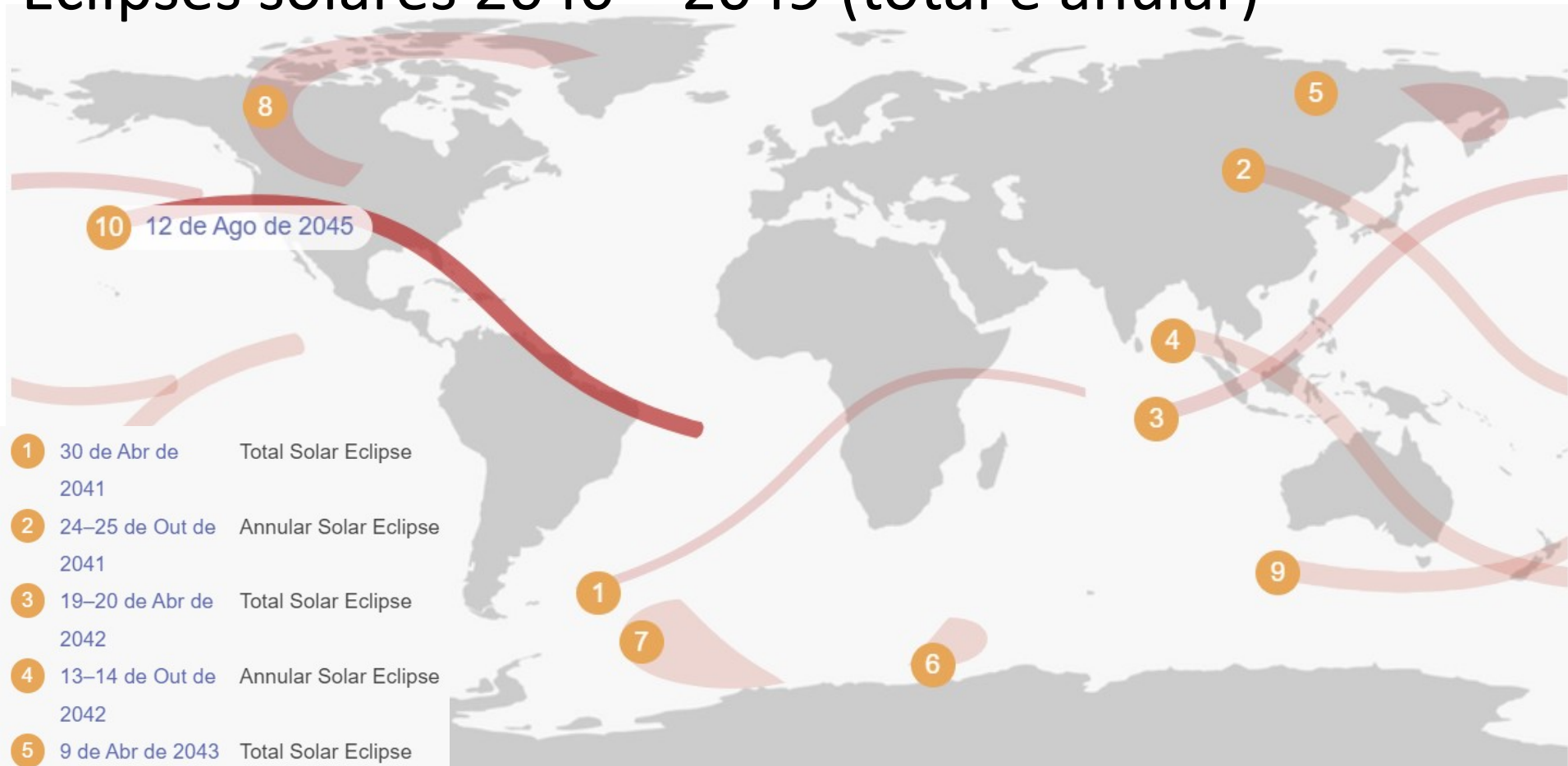


Eclipse solar anular de 14/10/2023



- Natal e João Pessoa, máximo 95%, 16h45m
- São Paulo, máximo 49%, 16h49m
(parcial começa 15h41m, fim 17h50m)

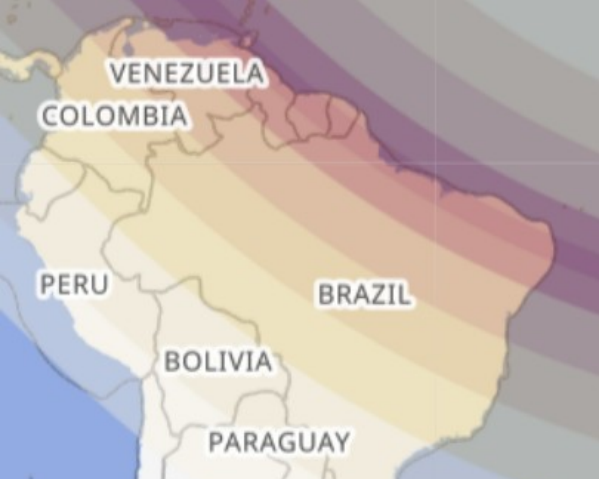
Eclipses solares 2040 – 2049 (total e anular)



- | | | |
|----|----------------------|-----------------------|
| 1 | 30 de Abr de 2041 | Total Solar Eclipse |
| 2 | 24–25 de Out de 2041 | Annular Solar Eclipse |
| 3 | 19–20 de Abr de 2042 | Total Solar Eclipse |
| 4 | 13–14 de Out de 2042 | Annular Solar Eclipse |
| 5 | 9 de Abr de 2043 | Total Solar Eclipse |
| 6 | 3 de Out de 2043 | Annular Solar Eclipse |
| 7 | 28 de Fev de 2044 | Annular Solar Eclipse |
| 8 | 22–23 de Ago de 2044 | Total Solar Eclipse |
| 9 | 16–17 de Fev de 2045 | Annular Solar Eclipse |
| 10 | 12 de Ago de 2045 | Total Solar Eclipse |

Brasil:
Eclipse solar total 12/8/2045

<https://www.timeanddate.com/eclipse/list.html?starty=2040>



João Pessoa, Paraíba, Brazil

Total solar eclipse visible (100.00% coverage of Sun)

Magnitude: 1.0247

Duration: 1 hour, 56 minutes, 8 seconds

Duration of totality: 3 minutes, 27 seconds

Partial begins: 12 Aug 2045, 15:17:40

Full begins: 12 Aug 2045, 16:16:48

Maximum: 12 Aug 2045, 16:18:31

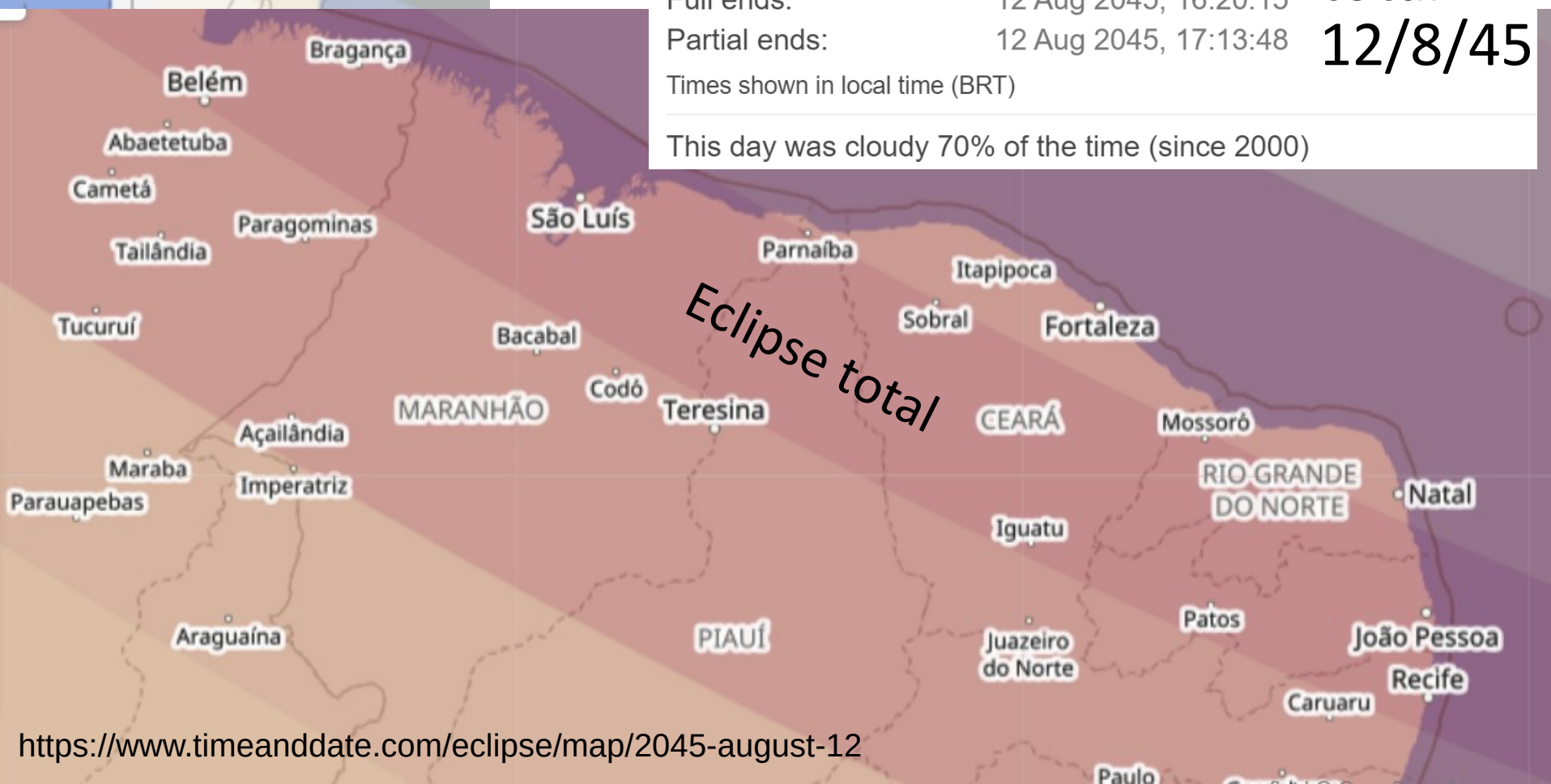
Full ends: 12 Aug 2045, 16:20:15

Partial ends: 12 Aug 2045, 17:13:48

Times shown in local time (BRT)

**Eclipse
solar
total
12/8/45**

This day was cloudy 70% of the time (since 2000)



Movimento lunar e duração de eclipse solar total

Movimento da Lua:

A Para leste, em relação ao Sol: $360^\circ / 29,5 \text{ dias} \sim 12^\circ / \text{dia}$ (valor aproximado)

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

C Velocidade de rotação
da Terra (superfície): $\frac{2\pi R_\oplus}{1 \text{ dia}} = \frac{2\pi \times 6\,370 \text{ km}}{24 \text{ h}} = 1667 \text{ km}/\text{h} \simeq 28 \text{ km}/\text{min}$

D Velocidade relativa aproximada: $56 \text{ km}/\text{min} - 28 \text{ km}/\text{min} = 28 \text{ km}/\text{min}$
Valor preciso (leva em conta a geometria): $34 \text{ km} / \text{min}$

E Duração máxima: $\frac{270 \text{ km}}{34 \text{ km}/\text{min}} = 7,9 \text{ min}$ *Diâmetro máximo da sombra lunar sobre a superfície terrestre*

Marés e a variação do nível das águas

Variação da maré na Abadia do Monte Saint-Michel, França

Maré alta



Maré baixa





São Luís – Praia
da ponta D'Areia
na maré alta

São Luís – Praia
da ponta D'Areia
na maré baixa



Variação da
maré em
São Luís,
Maranhão

Devido à rotação, os corpos geralmente não são perfeitamente esféricos. Corpos vizinhos podem exercer forças diferenciais → marés

D. equatorial = 12756,28 km
raio eq. = 6378,14 km

Diâm. equat. - polar = 43 km

Achatamento ~1/300

Diâm. polar = 12713,50 km

raio polar = 6356,75 km



Causa física das marés: forças diferenciais

Forças exercidas pela massa M nas partículas m_1 e m_2

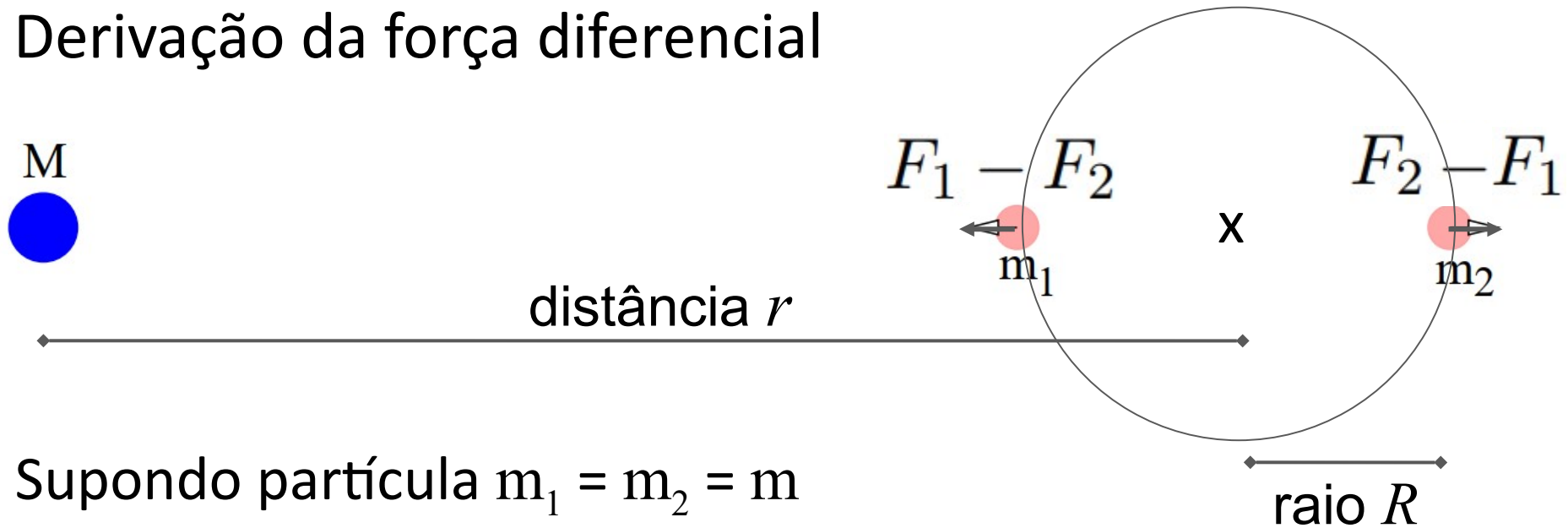


Força diferencial entre as partículas m_1 e m_2 pela massa M



A força diferencial $\Delta \vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$ tende a separar as partículas m_1 e m_2 em relação ao centro de massa x .

Derivação da força diferencial



Supondo partícula $m_1 = m_2 = m$

$$F = -\frac{GMm}{r^2} \rightarrow \frac{dF}{dr} = \frac{2GMm}{r^3}$$

Raio $R \ll r$

$$dr = R \rightarrow dF = \frac{2GMm}{r^3} R$$

Comparação entre as forças diferenciais do Sol e da Lua

$$dF = \frac{2GMm}{r^3} R$$

$$dF_{\odot} = \frac{2GM_{\odot} m_{partícula}}{d_{\odot}^3} R_T \quad \text{Força de maré do Sol na Terra}$$

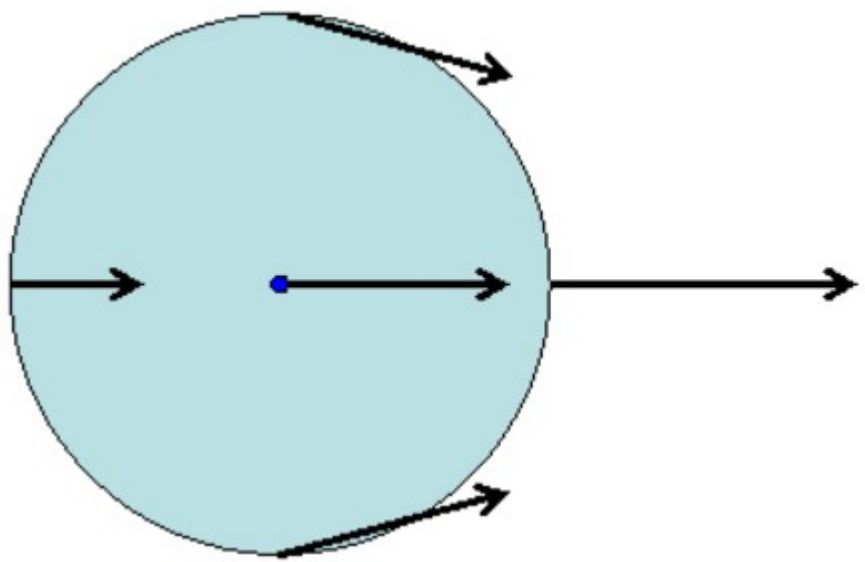
$$dF_L = \frac{2GM_L m_{partícula}}{d_{\text{Lua-Terra}}^3} R_T \quad \text{Força de maré da Lua na Terra}$$

$$\frac{dF_{\odot}}{dF_L} = \frac{M_{\odot}}{M_L} \left(\frac{d_L}{d_{\odot}} \right)^3 = \frac{2 \times 10^{30} \text{ kg}}{7,35 \times 10^{22} \text{ kg}} \left(\frac{384\,000 \text{ km}}{149\,600\,000 \text{ km}} \right)^3 = 0,46$$

A influência da maré solar é apenas a metade da maré lunar!

Forças em relação à Lua

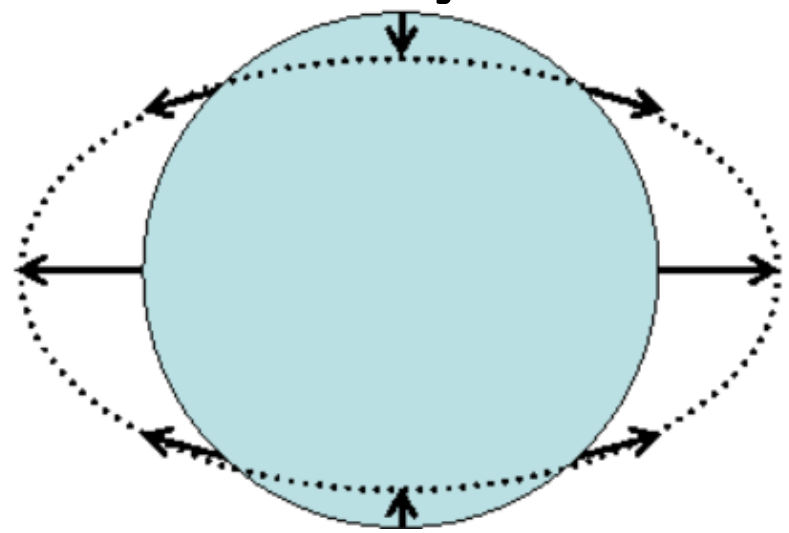
Terra



Lua

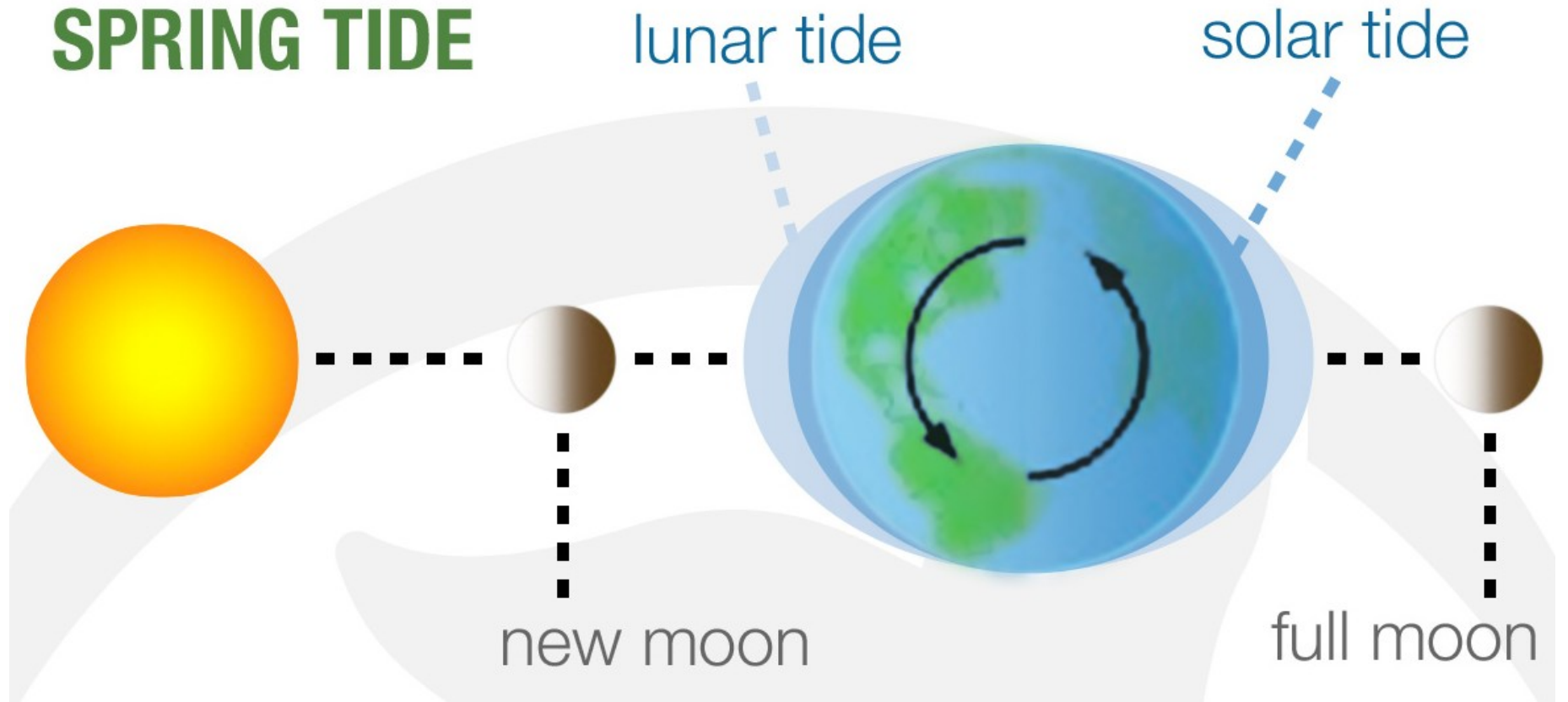


Forças em relação ao centro da Terra



Maré de Sizígia

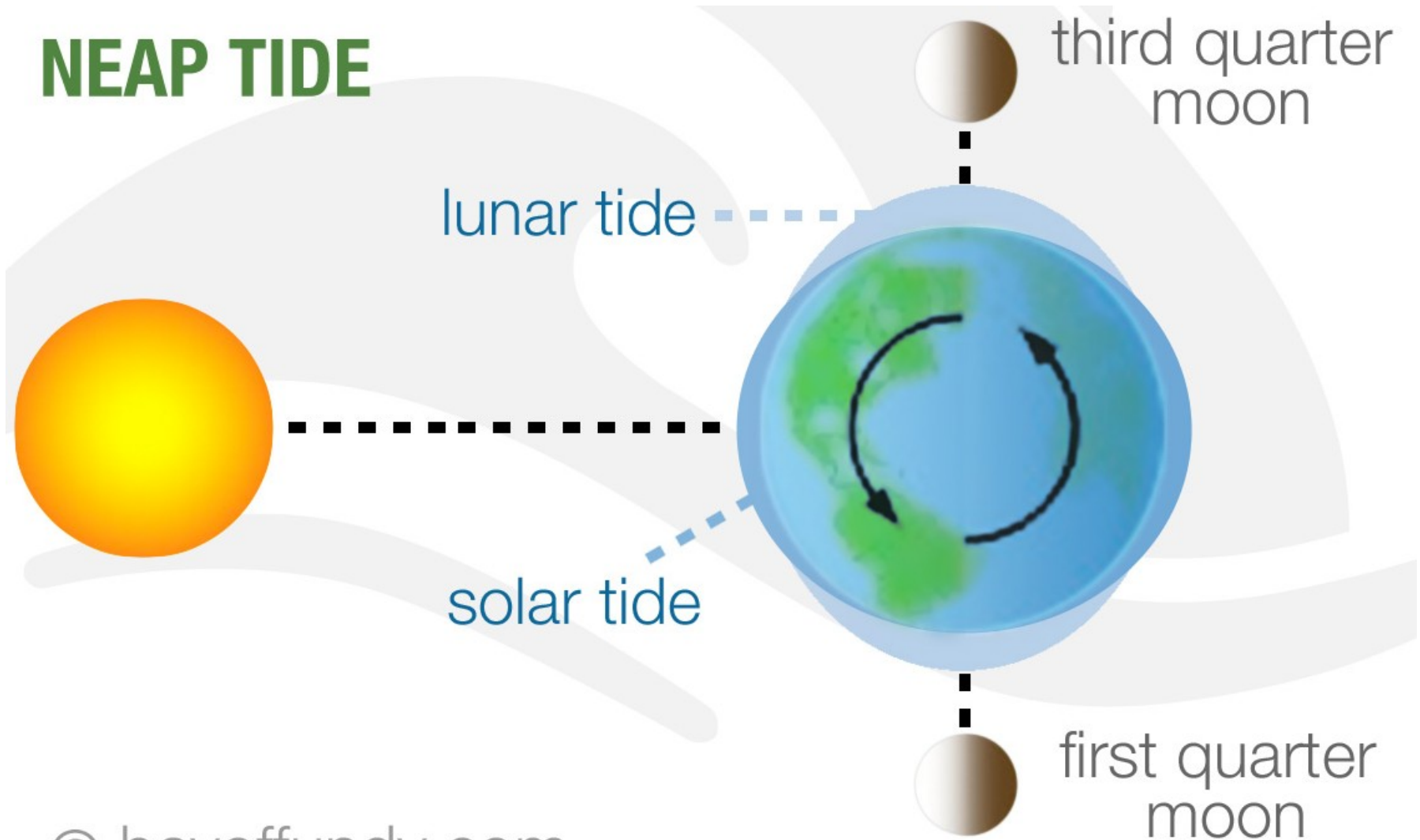
SPRING TIDE



Not to scale

Maré de Quadratura

NEAP TIDE

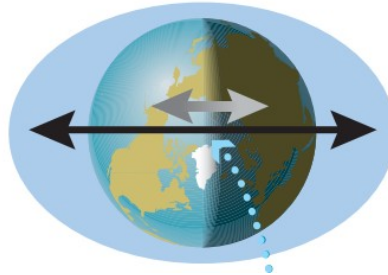


© bayoffundy.com

Not to scale

Maré de Sizígia

new
moon



full
moon



third-
quarter
moon

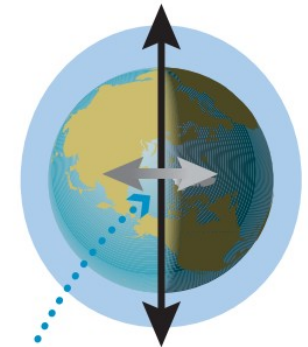


Maré de Quadratura

Efeito do Sol: →

Efeito da Lua: →

to Sun



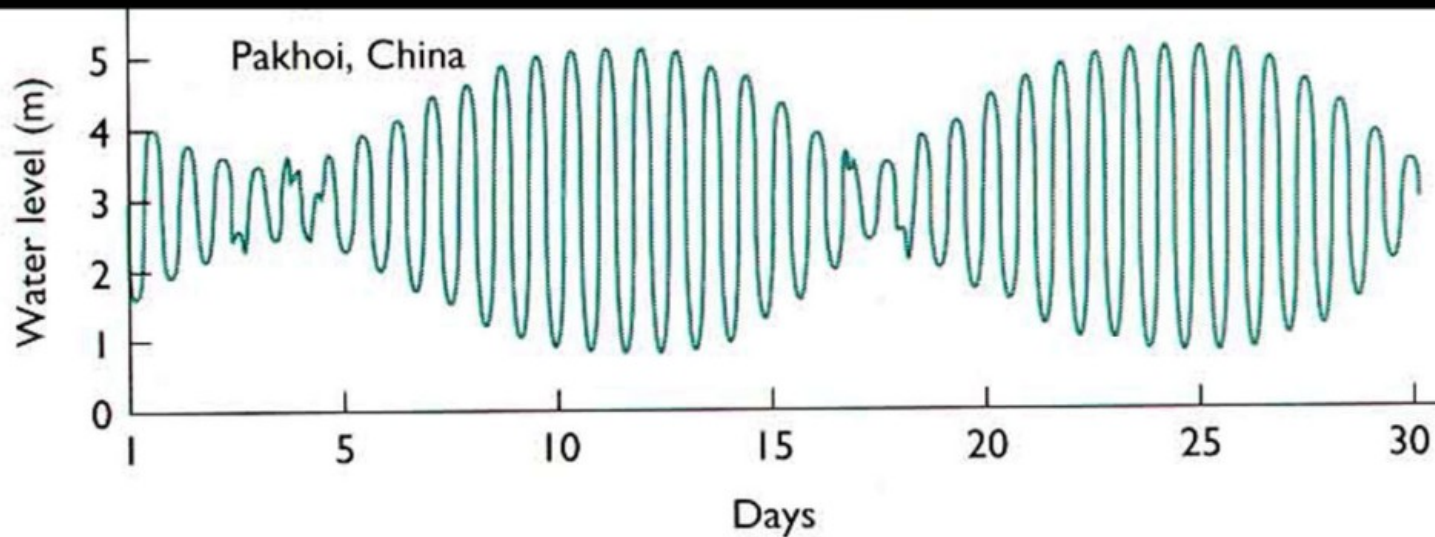
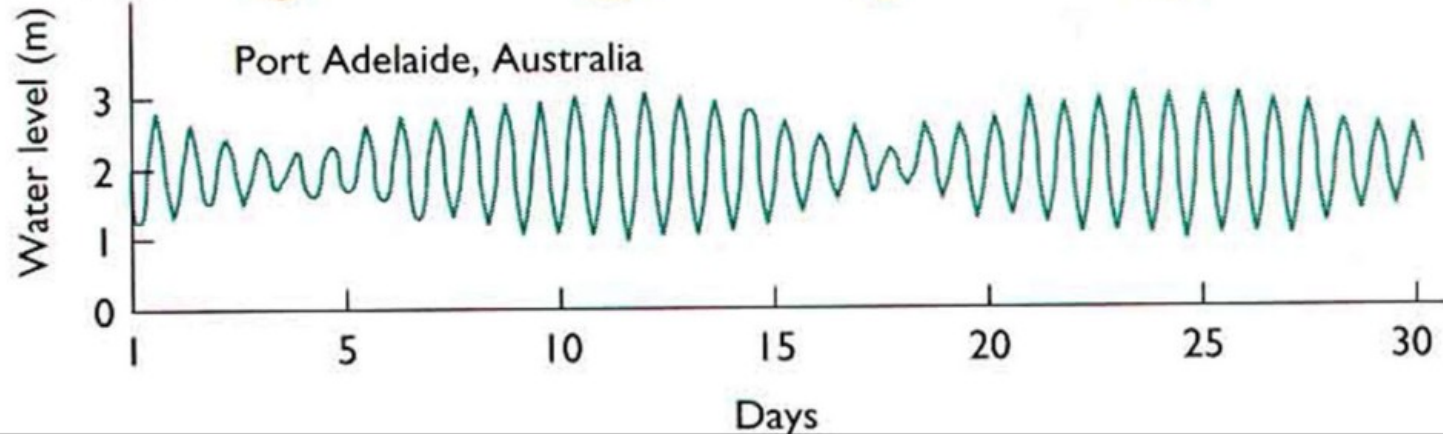
first-
quarter
moon



Registros de marés

Marés: cuadratura sizígia cuadratura sizígia

Moon phases:



Força de maré da Terra na Lua, e da Lua na Terra

$$dF_{(T \rightarrow L)} = \frac{2GM_T m_{partícula}}{d_{Lua-Terra}^3} R_{Lua}$$

Força de maré
da Terra na Lua

$$dF_{(L \rightarrow T)} = \frac{2GM_L m_{partícula}}{d_{Lua-Terra}^3} R_{Terra}$$

Força de maré
da Lua na Terra

Força de maré da Terra na Lua, e da Lua na Terra

$$dF_{(T \rightarrow L)} = \frac{2GM_T m_{partícula}}{d_{Lua-Terra}^3} R_{Lua}$$

Força de maré da Terra na Lua

$$dF_{(L \rightarrow T)} = \frac{2GM_L m_{partícula}}{d_{Lua-Terra}^3} R_{Terra}$$

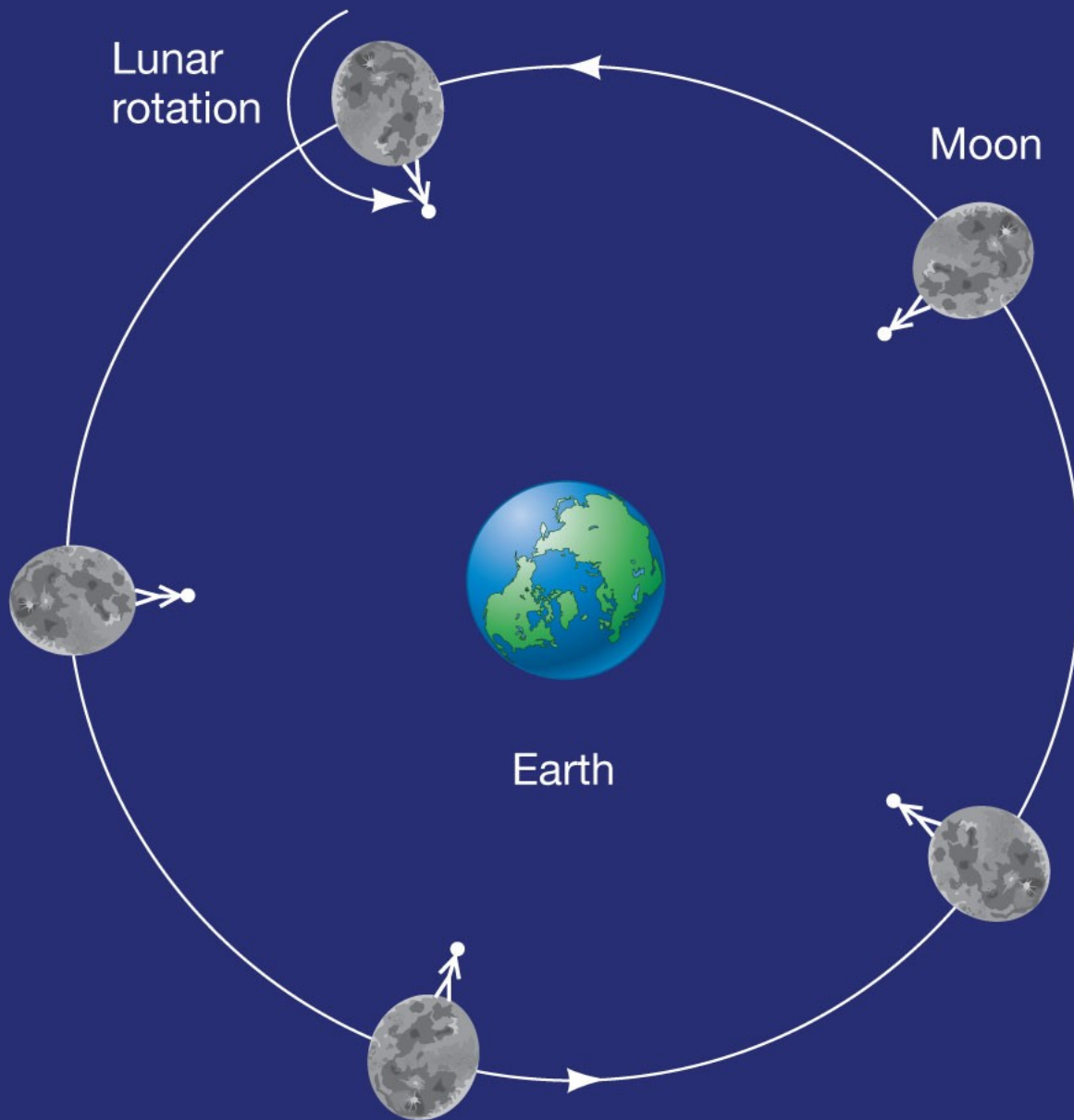
Força de maré da Lua na Terra

$$\frac{dF_{(T \rightarrow L)}}{dF_{(L \rightarrow T)}} = \frac{M_{Terra}}{M_{Lua}} \frac{R_{Lua}}{R_{Terra}} = 22$$

$$R_{Lua} = 1738 \text{ km}, R_{Terra} = 6370 \text{ km}$$

$$M_{Lua} = 7,35 \times 10^{22} \text{ Kg}, M_{Terra} = 5,97 \times 10^{24} \text{ Kg}$$

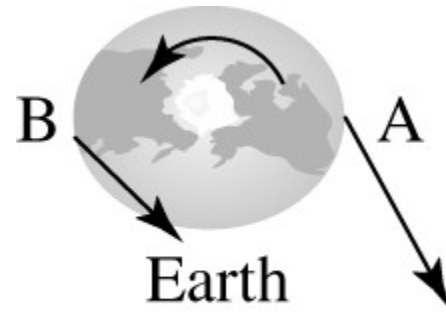
A maré da Terra é ~20 vezes maior que a maré da Lua!



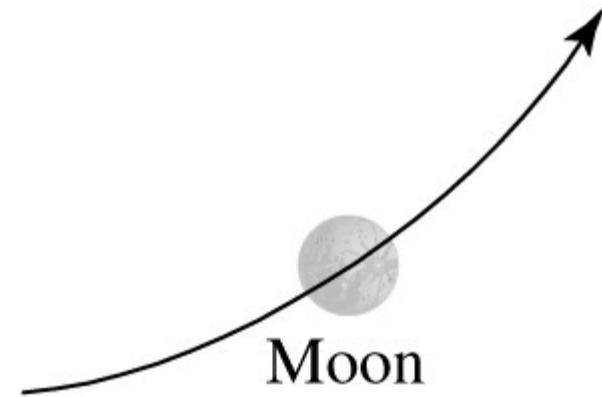
No passado o período de rotação da Lua era menor que seu período orbital, mas pela importante força de maré da Terra, a Lua sincronizou.

Também, a Lua ficava muito mais perto da Terra.

Devido ao torque, a duração do dia terrestre aumenta em 0,0017 segundos por século.



O momento angular de rotação que a Terra perde por atrito, causa o aumento do momento angular orbital da Lua. Por isso a Lua está se afastando da Terra 3,8 cm por ano



Limite de Roche: devido às forças de maré, um satélite que chega muito perto do seu planeta pode se romper

Distância mínima para um satélite fluido:
(Edouard **Roche** 1850)

$$d = 2,44 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R.$$

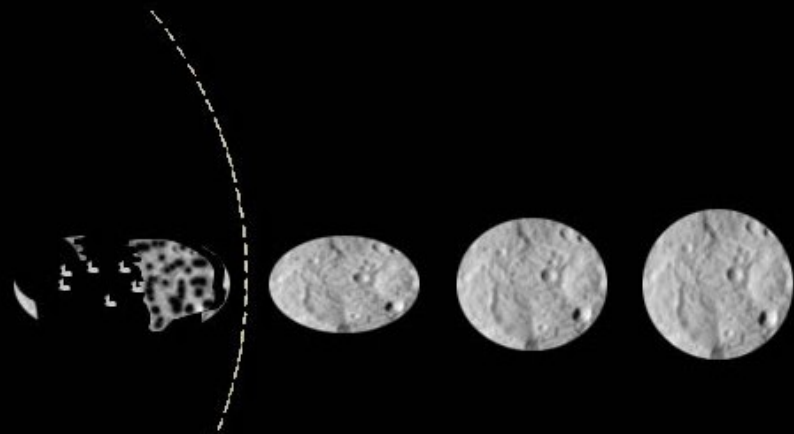
R : raio do planeta
 ρ_M : dens. planeta
 ρ_m : dens. satélite

Corpos esferoidais sólidos (>40 km):
(Aggarwald e Oberbeck 1974)

$$d = 1,38 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

Roche limit

moon



Exemplo: até que distância a Lua pode se aproximar da Terra sem se romper?

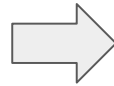
$$d = 1,38 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

- $M_{\text{Terra}} = 5,97 \times 10^{24} \text{ Kg}$

- $R_{\text{Terra}} = 6\,370 \text{ Km}$

- $M_{\text{Lua}} = 7,35 \times 10^{22} \text{ Kg}$

- $R_{\text{Lua}} = 1\,738 \text{ Km}$



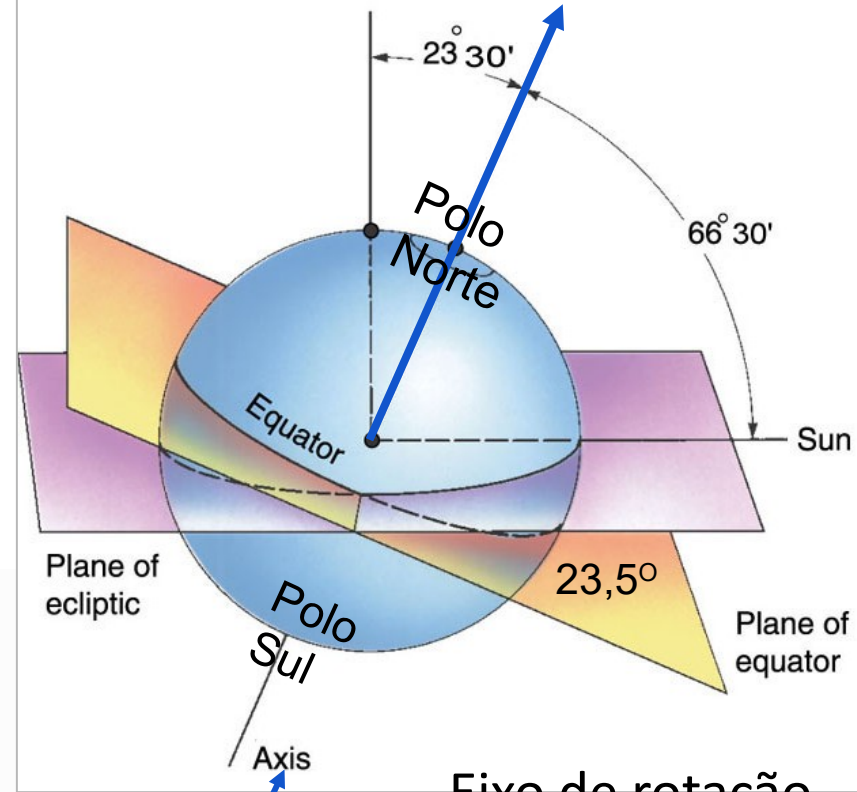
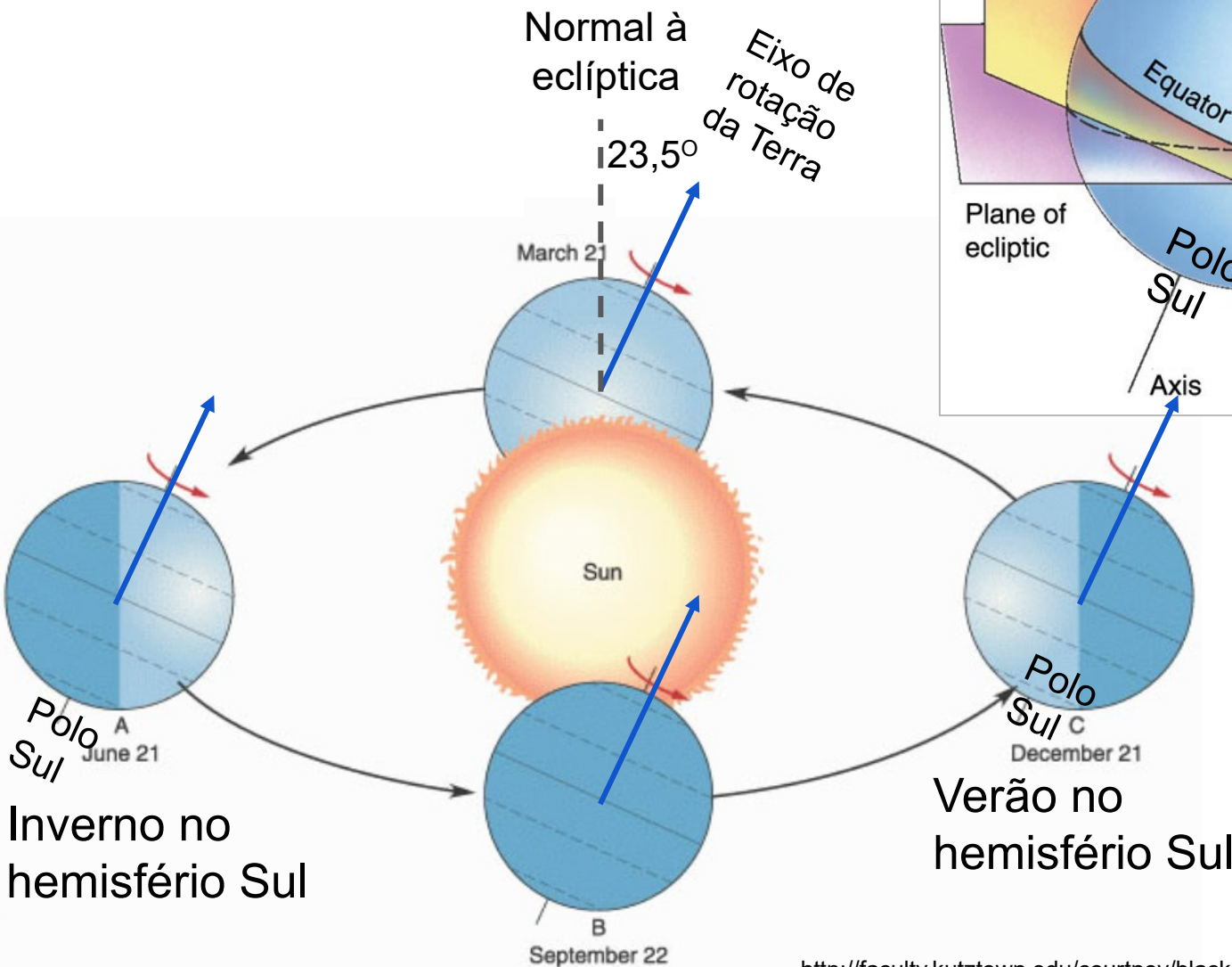
$$\rho_{\text{Terra}} = \frac{M_{\text{Terra}}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{Terra}}^3} = 5514 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Lua}} = \frac{M_{\text{Lua}}}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{Lua}}^3} = 3342 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 1,38 \left(\frac{5514 \text{ kg/m}^3}{3342 \text{ kg/m}^3} \right)^{\frac{1}{3}} 6370 \text{ km} = 7527 \text{ km}$$

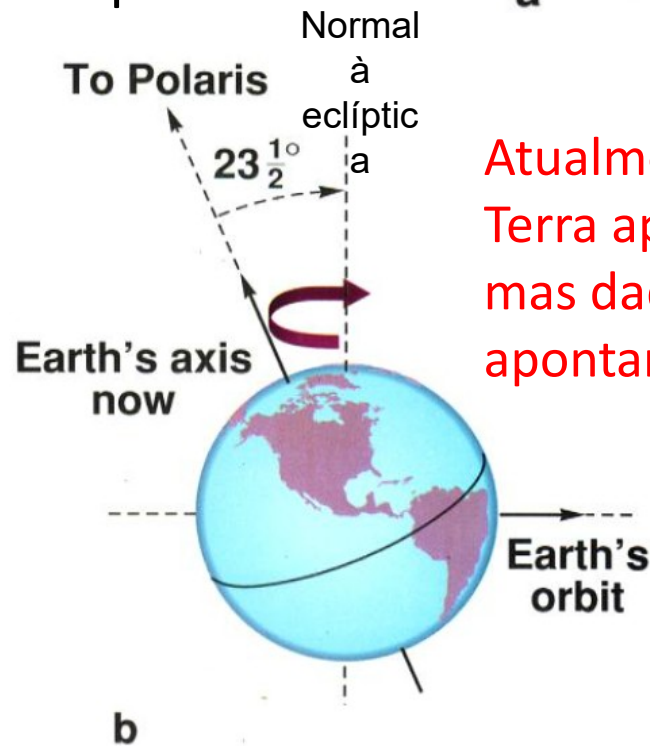
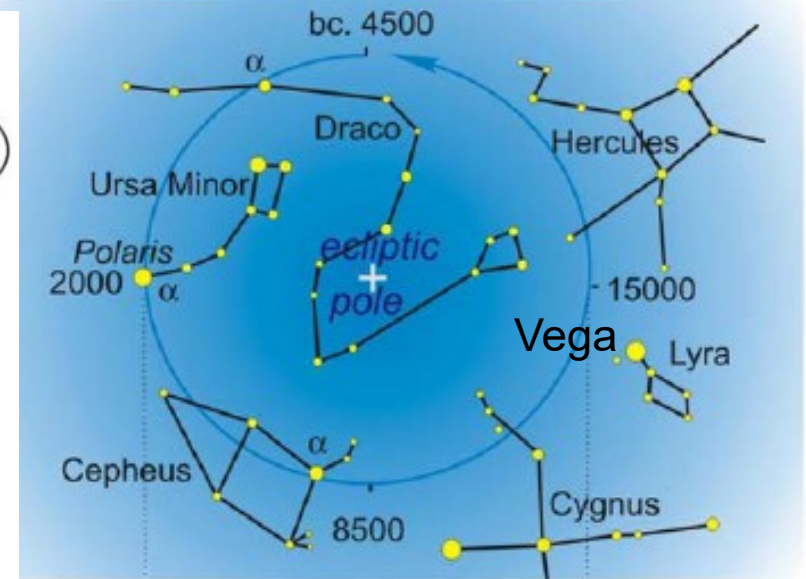
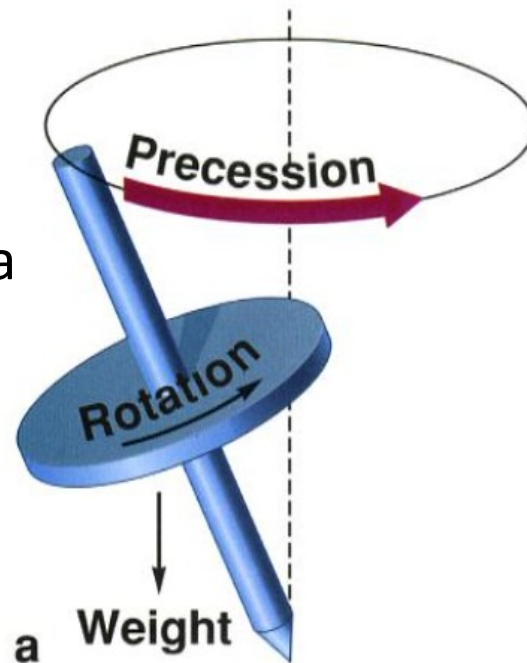
d = 7527 km << distância Terra-Lua (384 400 km)

O equador da Terra está inclinado $23,5^\circ$ em relação à eclíptica (plano orbital da Terra) → **estações**



Eixo de rotação da Terra faz um ângulo de $23,5^\circ$ com a normal à eclíptica

Forças diferenciais no bojo equatorial tentam “endireitar” o eixo de rotação da Terra com o da eclíptica → **precessão**, similar ao movimento de um pião



Atualmente o eixo da Terra aponta para Polaris, mas daqui a ~13 000 anos apontará perto de Vega

