

Planeta, planeta-anão e pequenos corpos

De acordo com a resolução 5A da 26^a Assembleia Geral da “International Astronomical Union” de 24 de agosto de 2006,

(1) Um “planeta” clássico¹ é um corpo celeste que (a) está em órbita ao redor do Sol, (b) tem massa suficiente para sua gravidade superar as forças do corpo rígido de modo que assume forma (quase redonda) de equilíbrio hidrostático, e (c) limpou a vizinhança em torno de sua órbita.

(2) Um “planeta anão” é um corpo celeste que (a) está em órbita ao redor do Sol, (b) tem massa suficiente para sua gravidade superar as forças do corpo rígido de modo que assume forma (quase redonda) de equilíbrio hidrostático², (c) não limpou a vizinhança em torno de sua órbita e (d) não é um satélite.

(3) Todos os outros objetos³, exceto satélites, orbitando o Sol serão referidos coletivamente como “Pequenos Corpos do Sistema Solar”.

¹ Os oito planetas clássicos são: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

² Um processo na IAU será estabelecido para decidir a qual categoria pertence um objeto limítrofe.

³ Estes atualmente incluem a maioria dos asteroides do Sistema Solar, a maioria dos Objetos Trans-Neptunianos, cometas e outros pequenos corpos.

Razões históricas e críticas

Com o aumento da sensibilidade e desenvolvimento de técnicas, novos objetos foram descobertos e chamados de planetas (como Ceres, descoberto em 1801 no cinturão de asteroides). Quando esse número chegou a 23 (em 1851), decidiu-se chamá-los todos de asteroides.

Com a descoberta de Plutão em 1930 (por Clyde Tombaugh – havia um outro objeto perturbando a órbita de Urano além de Netuno), aceitou-se que o sistema solar teria 9 planetas porque as estimativas iniciais de sua massa, baseadas nas perturbações das órbitas de Urano e Netuno, eram maiores do que Mercúrio. Em 1978, sua maior “lua”, Caronte, é descoberta e pode-se estimar a massa de Plutão em 0.2% da massa terrestre, $\sim 1/20$ da massa de Mercúrio.

Com a descoberta de outros objetos no cinturão de Kuiper semelhante a Plutão (os plutinos), se tornou necessária uma definição precisa do termo planeta.

A definição da IAU de 2006 é criticada pelo item 1(c). O que realmente quer dizer “limpar a vizinhança”? A Terra co-orbita com ~ 10 mil asteroides (“Near-Earth Asteroids”), e Júpiter co-orbita com ~ 100 mil asteroides troianos. Netuno também co-orbita com Plutão (em determinados períodos, Plutão é mais próximo do Sol que Netuno).

Alguns astrônomos definiram critérios quantitativos como o “planetary discriminant”.

Planetas anões (maior consenso)

Nome	Região	Orbita (UA)	T (anos)	v (km/s)	Ângulo com a eclíptica	e
Ceres ♃	Cinturão de asteroides	2.768	4.604	17.90	10.59°	0.079
Orcus	Cinturão de Kuiper	39.40	247.3	4.75	20.58°	0.220
Plutão ♇	Cinturão de Kuiper	39.48	247.9	4.74	17.16°	0.249
Haumea	Cinturão de Kuiper	43.22	284.1	4.53	28.19°	0.191
Quaoar	Cinturão de Kuiper	43.69	288.8	4.51	7.99°	0.040
Makemake	Cinturão de Kuiper	45.56	307.5	4.41	28.98°	0.158
Gonggong	Disco disperso	67.38	553.1	3.63	30.74°	0.503
Eris	Disco disperso	67.78	558.0	3.62	44.04°	0.441
Sedna(?)	“detached object”	506.8	~ 11,400	~ 1.3	11.93°	0.855

Planetas anões

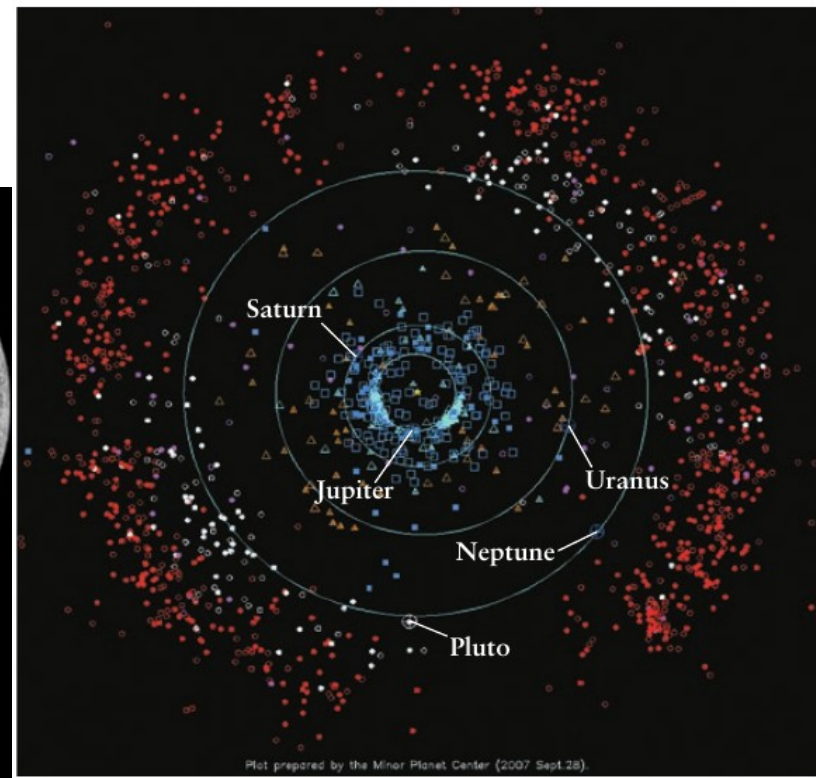
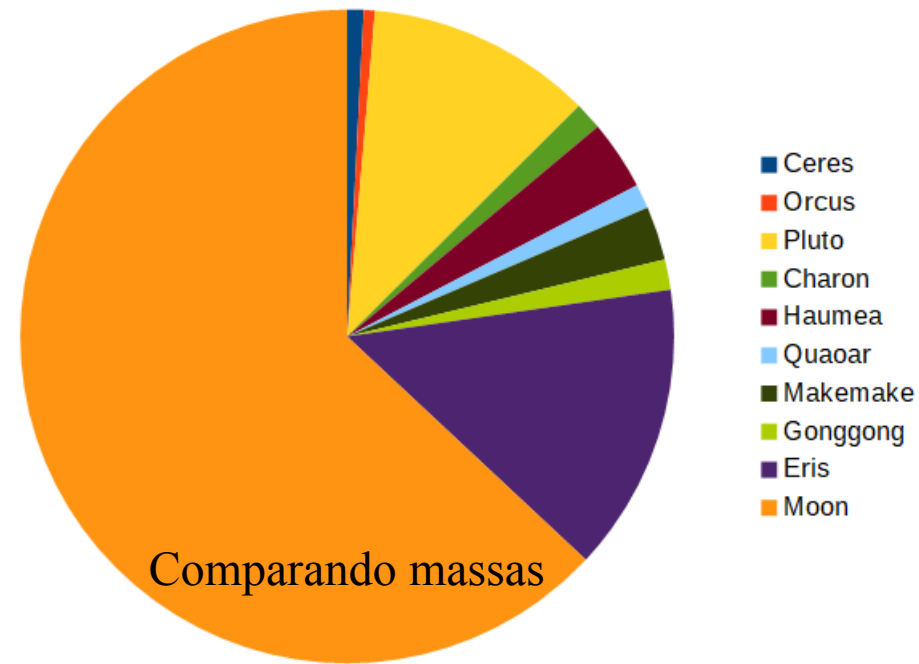
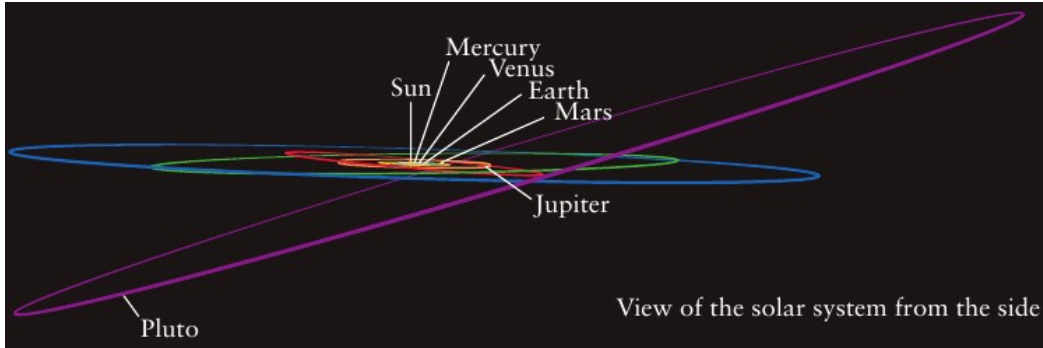


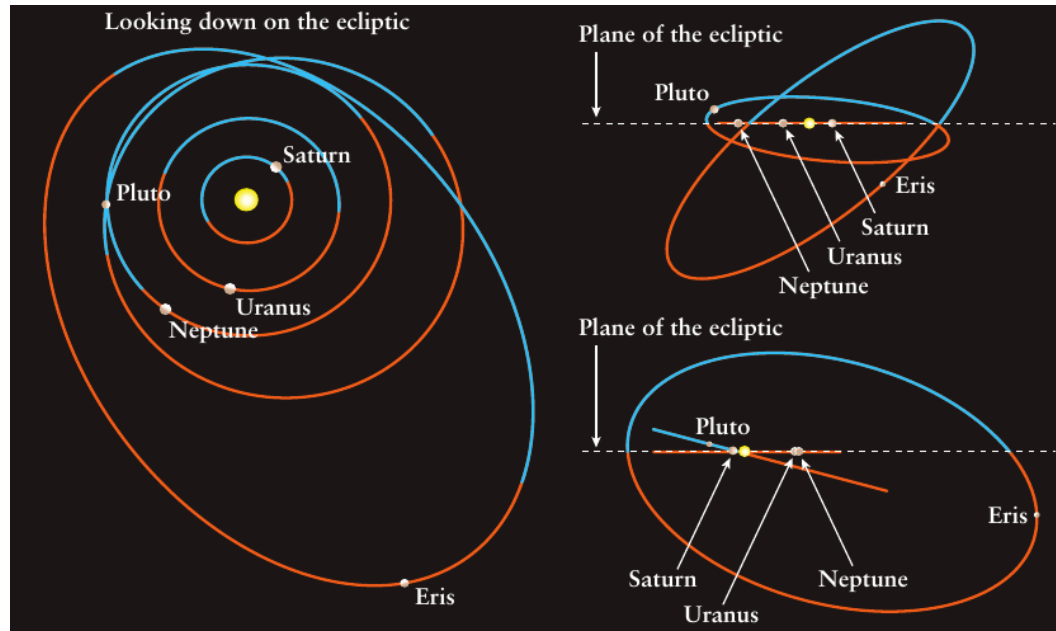
FIGURE 9-19 Current Positions of Known Dwarf Planets and SSBs in the Outer Solar System Objects with unusually high eccentricity orbits are shown as cyan triangles. Objects roaming among the outer planets, called Centaur objects, are orange triangles. Plutinos are white circles. Miscellaneous objects are magenta circles, and classical KBOs are red circles. Objects observed only once are denoted by open symbols; objects with two separate observations are denoted by filled symbols. Comets are filled and unfilled light-blue squares. (Courtesy of Gareth Williams, Minor Planet Center)

Planetas anões



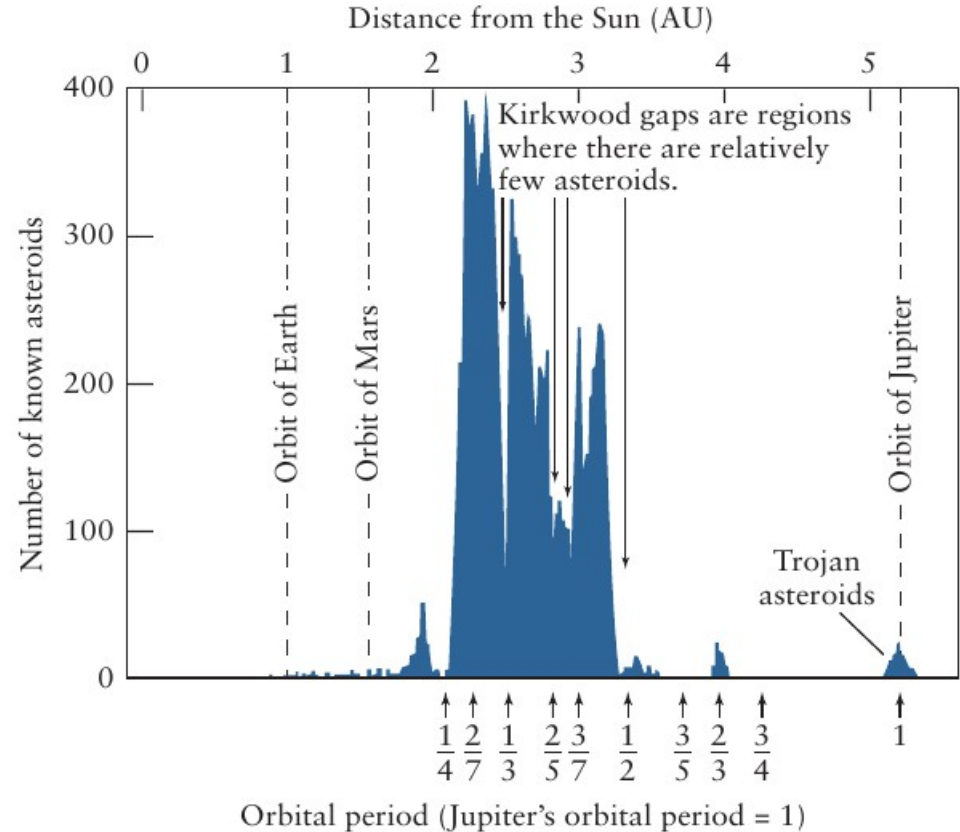
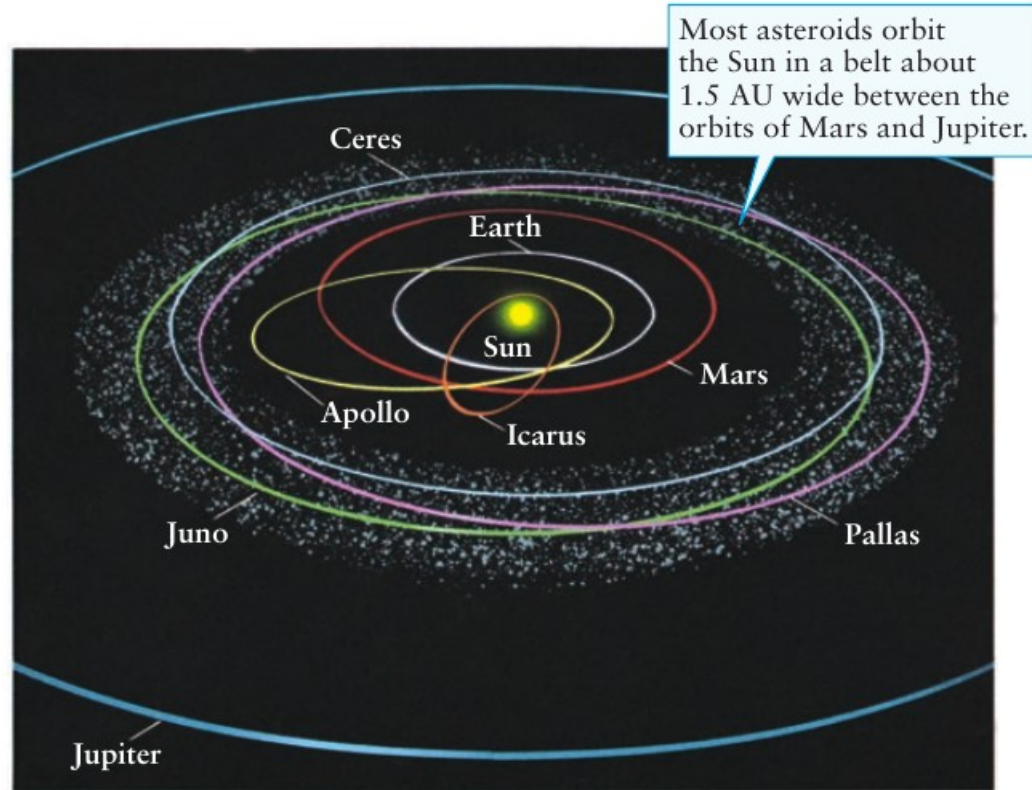
Está claro que os planetas-anões são uma categoria distinta de objetos do Sistema Solar no quesito de evolução, órbita e massa.

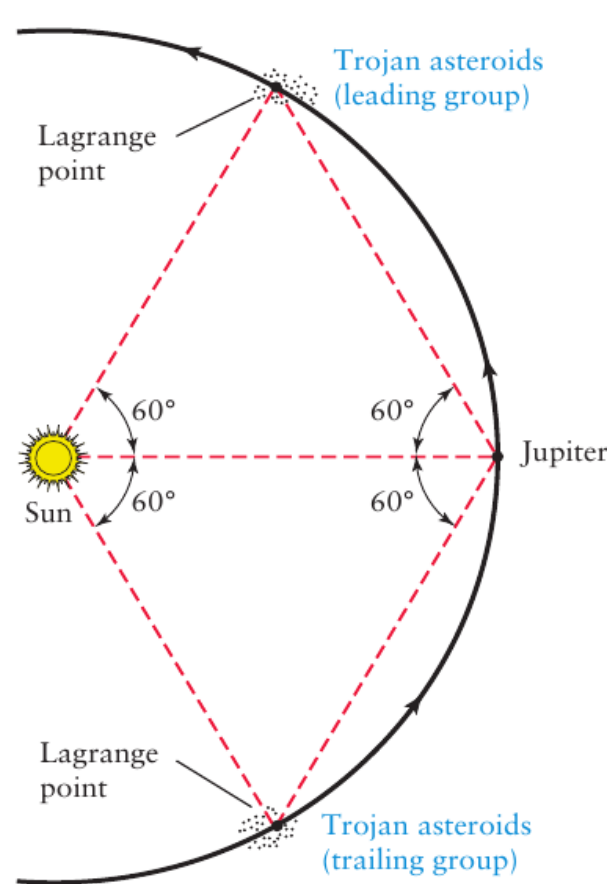
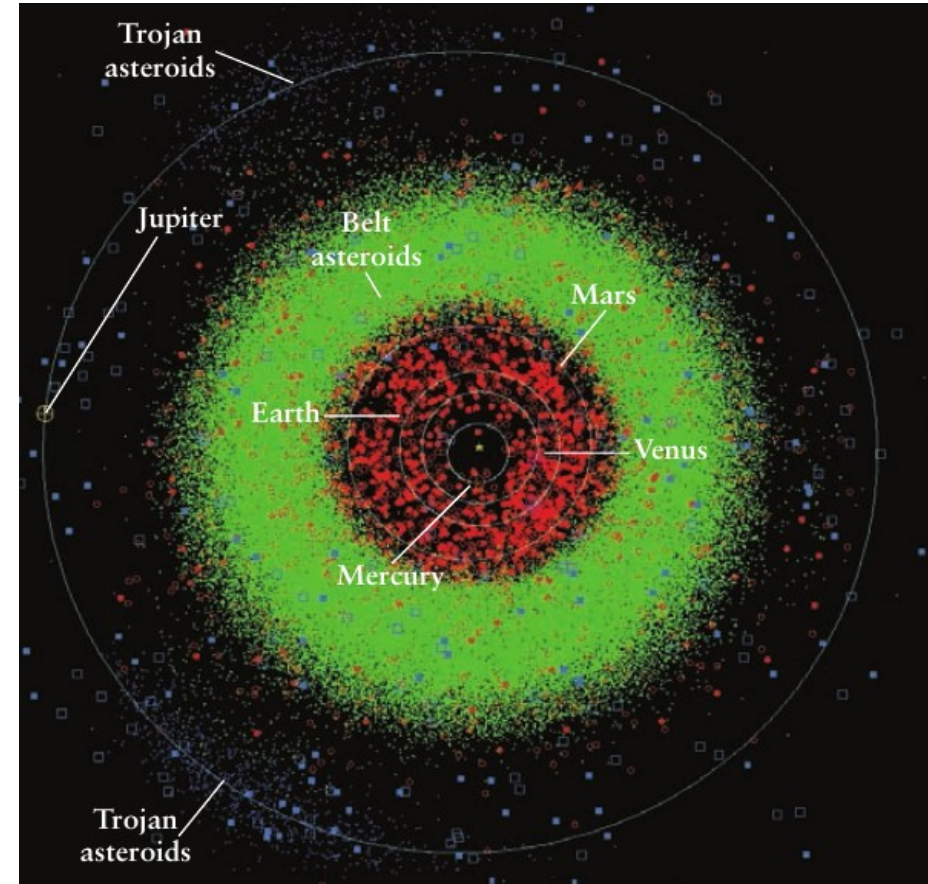
Não deve ser surpresa se no futuro próximo as atuais definições passem por reformulações e/ou atualizações. A massa de Caronte, por exemplo, é 57% da de Plutão. Isso os configura como planeta-duplo?



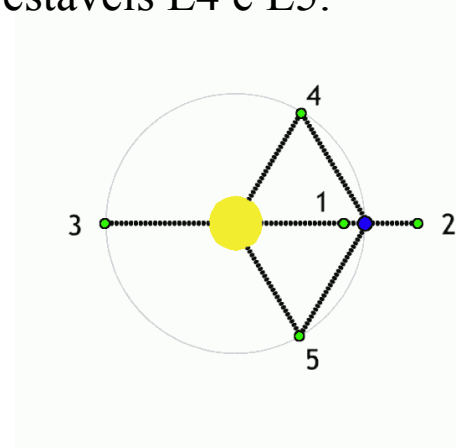
Cinturão de asteroides: conjunto de asteroides (planetesimais/planetas menores) que orbitam o Sol entre Marte e Júpiter a distâncias que variam de 2 a 3,5 UA. Ceres, o mais massivo objeto naquela região (1,28% massa Lunar), soma 30% da massa desse cinturão.

Ceres, Vesta e Pallas são maiores de 300 km. 41 asteroides são >200 km. 250 são >100 km. Estima-se que dezenas de milhões são <1 km. Lacunas existem no cinturão (como nos anéis de Saturno) por causa de Júpiter.





Asteroides Troianos: são aqueles que se encontram nos pontos de Lagrange estáveis L4 e L5.



Júpiter possui mais de 9 mil (até maio/2021) desses asteroides catalogados. Netuno tem 9, Marte 5, e Terra e Urano 1.

Asteroides Amor: cruzam a orbita de Marte mas não a da Terra

Asteroides Apollo: cruzam a orbita da Terra (potencialmente perigosos).

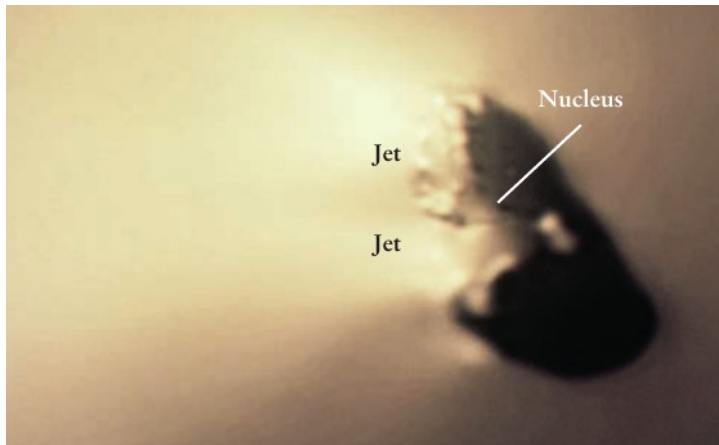
Cometas

Composição: enquanto asteroides são feitos principalmente de rocha e metal, cometas são principalmente de gelo.

Tipicamente, tem dimensões de 1 a 10 km, densidade $\sim 0.6 \text{ g/cm}^3$, e massa de $10^{13} - 10^{14} \text{ kg}$.

Origem: cinturão de Kuiper e nuvem de Oort.

Como a grande maioria daqueles que visitam a parte interna do Sistema Solar tem inclinações compatíveis com a do cinturão de Kuiper, acredita-se que a maioria está nessa região.



Cometa Halley

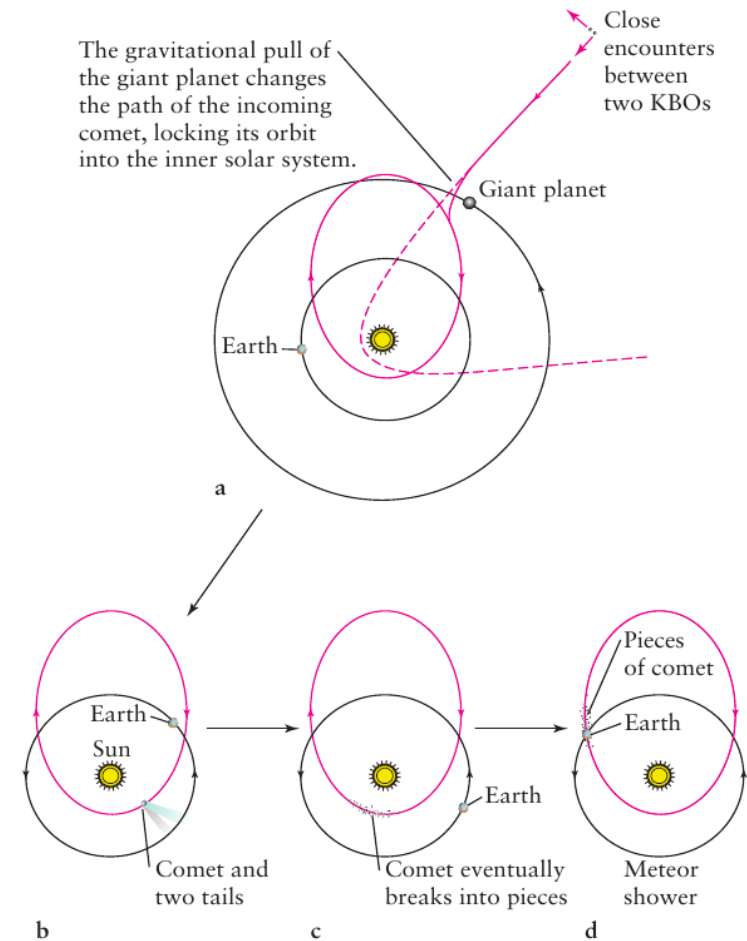
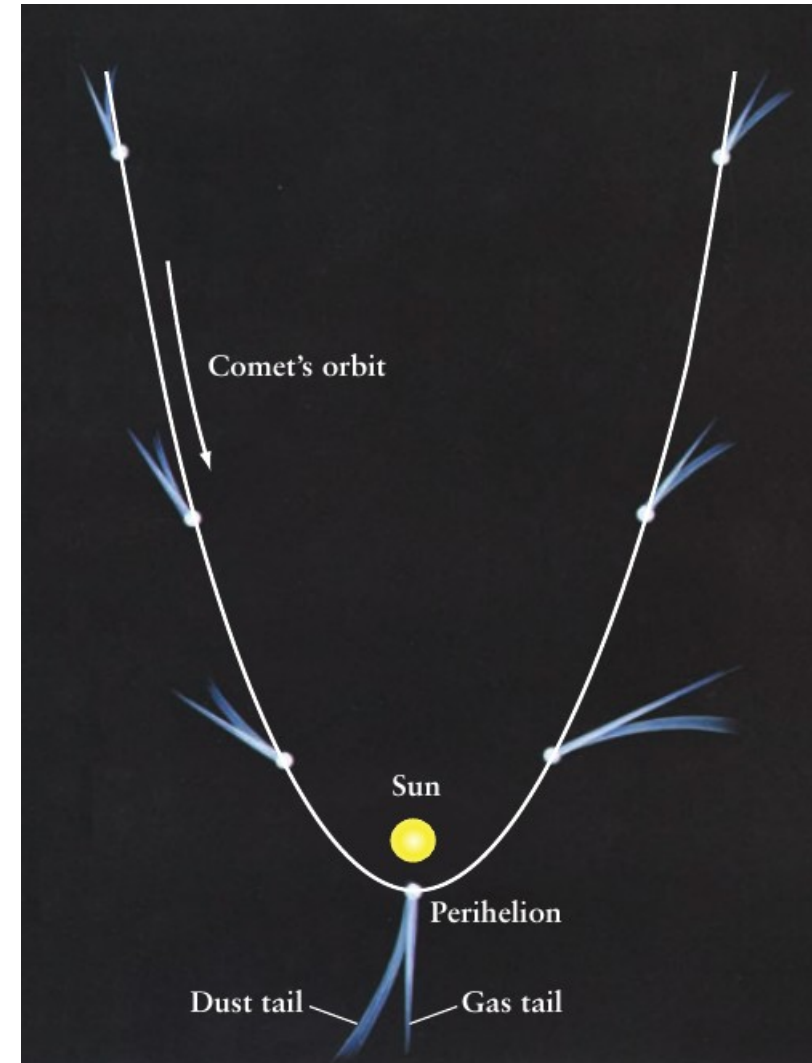
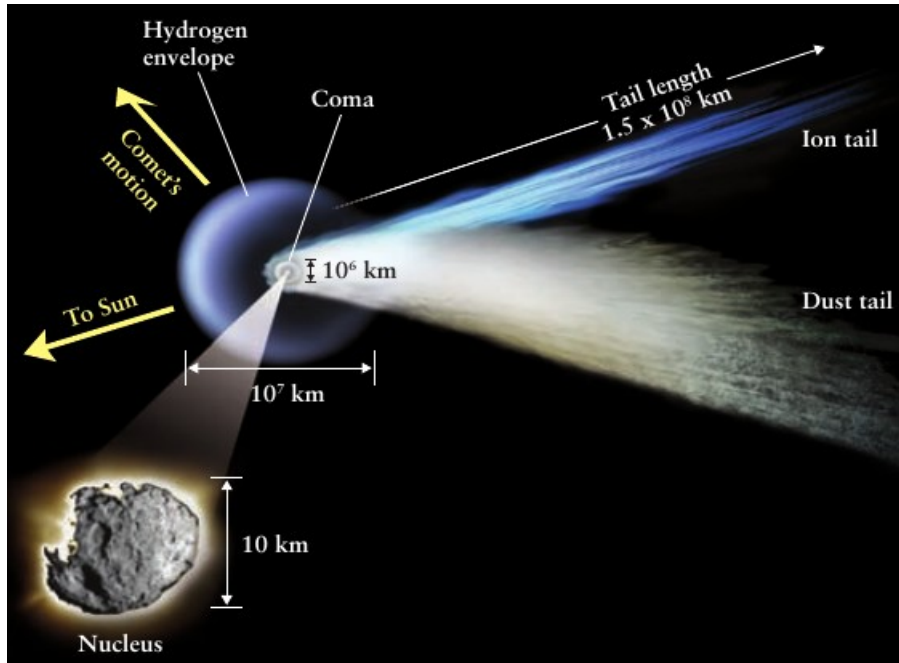


FIGURE 9-32 Transformation and Evolution of a Long-Period Comet (a) The gravitational force of a giant planet can change a comet's orbit. Comets initially on highly elliptical orbits are sometimes deflected into more circular paths that keep them in the inner solar system. (b–d) These figures show the evolution of a comet into gas, dust, and rubble, and why debris from some of these comets strikes Earth (see also Figure 9-39).

A cauda de gás (ou de íons) aponta diretamente para o Sol porque é empurrada pelo vento solar.

A cauda de poeira (feita de partículas neutras bem mais massivas) também aponta para o Sol, mas não tão diretamente. Ela é empurrada pela luz (pressão de radiação).



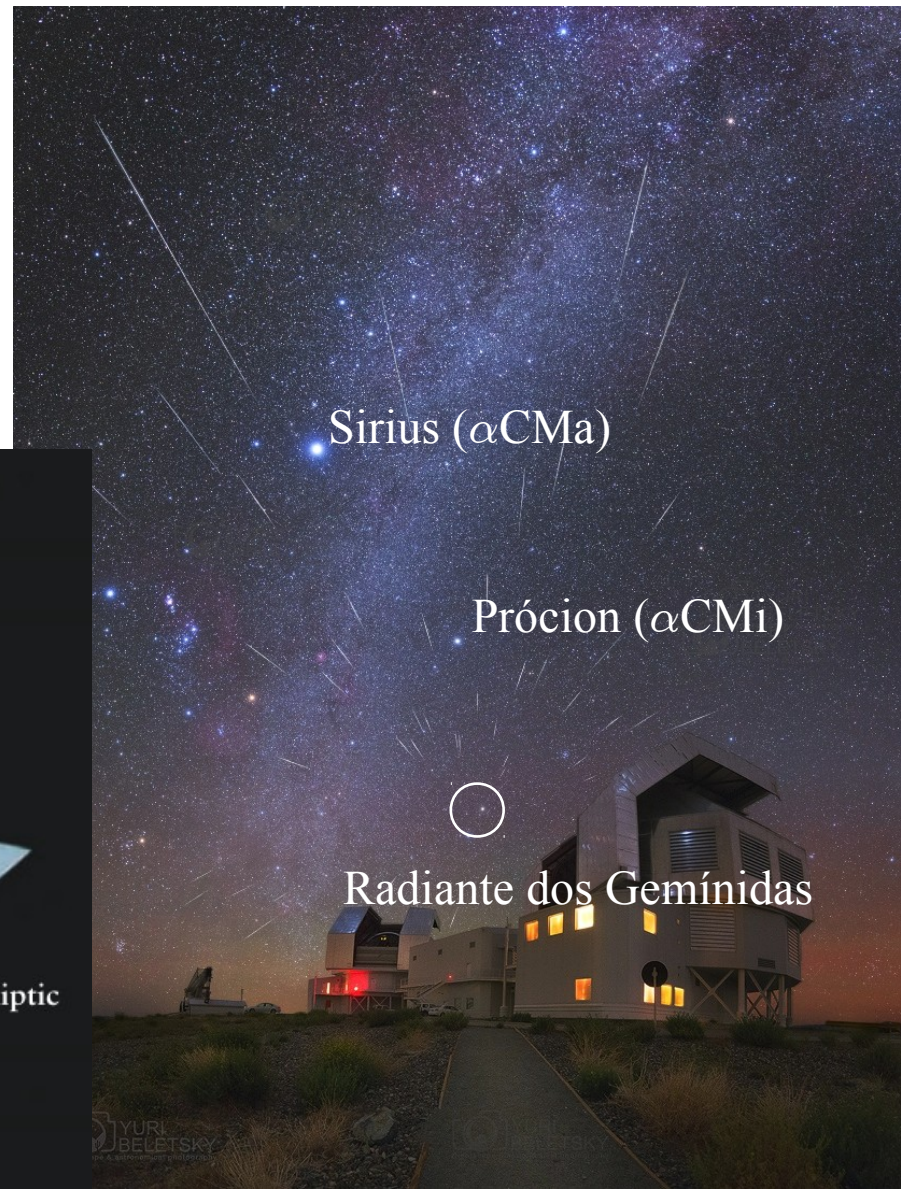
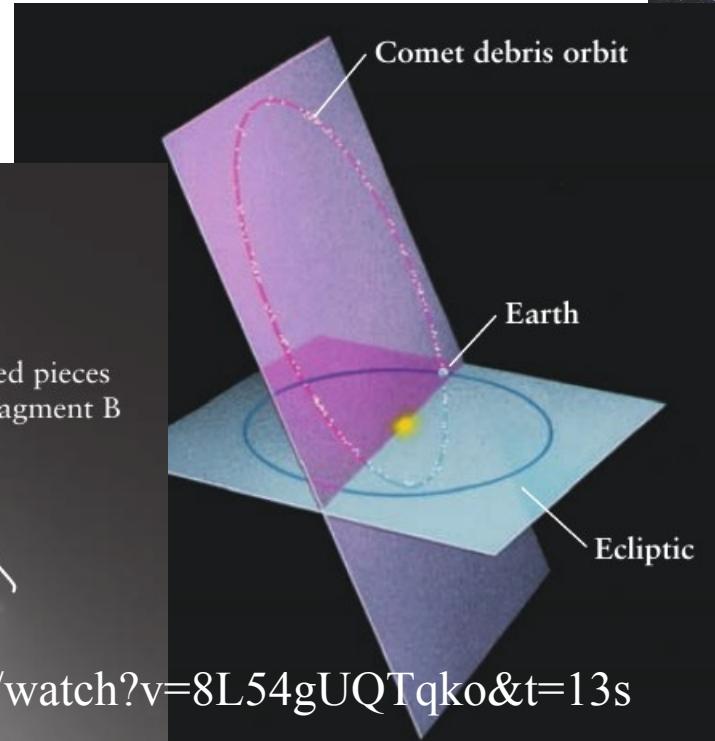
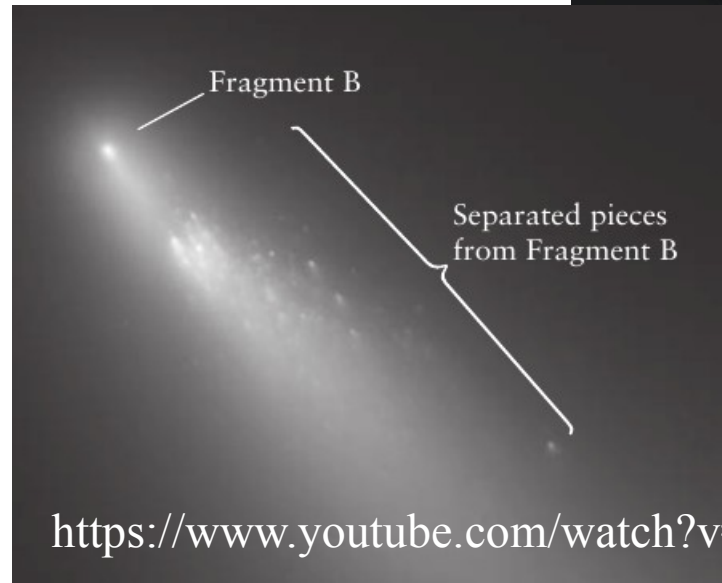
Comet C/2020 F3 (NEOWISE)

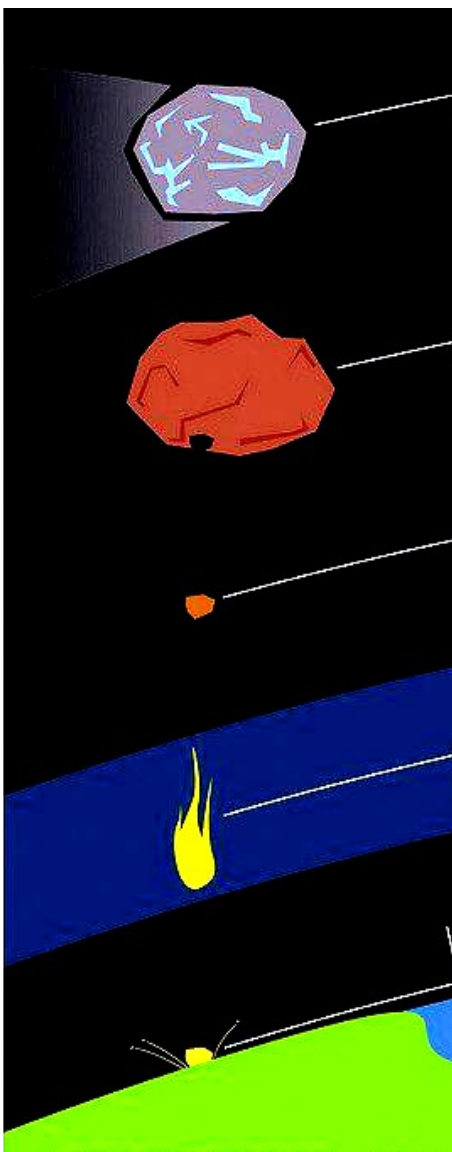


<https://www.youtube.com/watch?v=pUzCaN3nIVQ>

Chuva de meteoros

Destroços/detrítos dos cometas adentram na atmosfera quando da passagem da Terra pela órbita dos mesmos. A maioria é do tamanho de um grão de areia. Tipicamente se vê 1 meteoro/minuto.



**Cometa:**

bloco de gelo e rocha de dimensões de alguns quilômetros
caudas apontam na direção contrária à do Sol

Asteroide:

composto de rochas e metais de dimensões >100 metros

Meteoroides:

menor que um asteroide

Meteoro:

o rastro luminoso causado pela entrada de um meteoroides, asteroide ou cometa na atmosfera (“ram pressure”, não é fricção).

Milhões/dia do tamanho de um grão de areia. Maiores que 10 cm deixam rastros visíveis em altitudes de 120 até 50 km. Estrela cadente: menos brilhantes. Fireball: mais brilhantes que Vênus. Bólido: mais brilhantes que magnitude -14 e/ou explodem.

* Não há definição oficial dessas categorias.

Meteorito:

Porção de um meteoroides ou asteroide que atinge a superfície

Frequência: $N(>D) = 37/D^{2.7} = nr.$ De objetos de diâmetro $> D$ (em metros) atingindo a Terra/ano. (No dia, 40 cm. No ano, 4 m. No século, 20 m.)

Sol ☉

Distância até o centro da galáxia: 29 mil anos-luz = 8 mil pc

Período orbital ao redor do centro da galáxia: 230 milhões de anos

Velocidade: 220 km/s (relativo ao centro da galáxia), 370 km/s (relativo à radiação cósmica de fundo)

Período de rotação sideral: 25 dias terrestres (equatorial), 35 dias terrestres (polar)

Magnitude: -26.74 (aparente), 4.83 (absoluta)

Luminosidade: 3.828×10^{26} W

Inclinação do equador: 7.25° (em relação à eclíptica), $67,23^\circ$ (em relação ao plano galáctico)

Diâmetro angular visto da Terra: $31.6' - 32.7'$

Diâmetro (visual): 1.392×10^6 km = 109 diâmetros terrestres

Massa: 1.989×10^{30} kg = 333 mil massas terrestres = 99.85% massa do Sistema Solar

Densidade média: 1408 kg/m^3

Velocidade de escape: 617.5 km/s

Gravidade na superfície: 28 *g*

Temperatura média: 5800 K (superficial), 1.55×10^7 K (centro)

Composição (por massa): 71.5% H, 27% He, 1.5% outros

Composição (por nr. de átomos): 91.3% H, 8.6% He, 0.1% outros

Sol ☉

Como o Sol consegue emitir tanta energia, $L=3.828 \times 10^{26}$ W, por tanto tempo?

- Reações químicas? (queima de combustível fóssil, TNT, etc.)
 - Tempo de vida ~ 10 mil anos
- Mecanismo de Kelvin–Helmholtz? (energia potencial gravitacional \rightarrow energia cinética \rightarrow calor \rightarrow radiação)

$$E_{\text{pot}} \sim \frac{GM^2}{R} \approx 3.8 \times 10^{41} \text{ J} \quad \Rightarrow \quad \tau \sim \frac{E_{\text{pot}}}{L} \approx 9.9 \times 10^{14} \text{ s} \sim 31 \times 10^6 \text{ anos}$$

- Cálculos mais elaborados ($E_{\text{pot}} = 3GM^2/5R$, $\tau = E_{\text{pot}}/2L$ (teo. do Virial)): $\tau \sim 9$ milhões de anos (Estimativa não era compatível com a teoria da evolução das espécies de Darwin.)
- Reações nucleares (fusão)?
 - 1920 – Arthur Eddington sugere $\text{H}+\text{H} \rightarrow \text{He}$ de alguma forma, e/ou aniquilação de matéria e $+ p \rightarrow$ energia
 - final da década de 1930 – reações nucleares são descritas



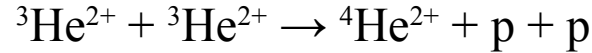
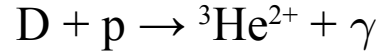
Hans Bethe. Prêmio Nobel de Física de 1967 “for his contributions to the theory of nuclear reactions, especially his discoveries concerning the energy production in stars”

Sol ☉

Cadeia próton-próton (ramo I)



(posteriormente, $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$)



Balço final: $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He}^{2+} + 2 \nu + 6 \gamma$

Faltando massa? $\Delta m = 4m_p + 2m_e - (m_\alpha + 2m_\nu) \approx 4.765 \times 10^{-29} \text{ kg}$

Massa e Energia (de ligação) $E = \Delta mc^2 \approx 4.28 \times 10^{-12} \text{ J} = 26.73 \text{ MeV}$

Quantos ciclos ppI acontecem no Sol? $L/E \approx 8.94 \times 10^{37} \text{ ciclos/s}$
 (ignorando a energia do neutrino) $\rightarrow 4.26 \times 10^9 \text{ kg/s}$

Modelos e simulações de computador indicam que o Sol continuará estável (realizando principalmente o ciclo ppI) pelos próximos **5 bilhões de anos**.

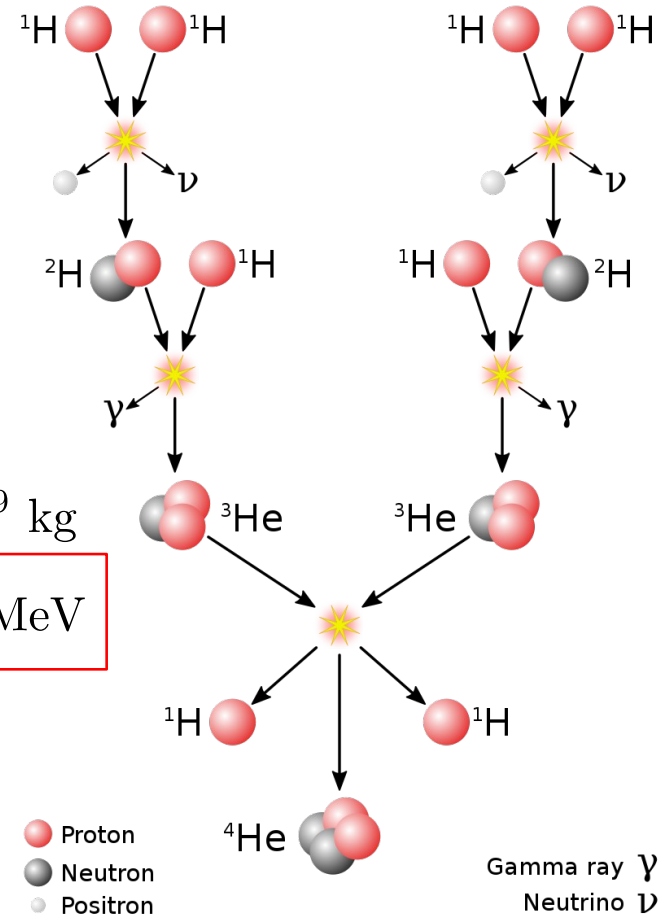
$$m_\alpha = 6.644\,657\,3357(20) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9.109\,383\,7015(28) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p = 1.672\,621\,92369(51) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_\nu < 2.14 \times 10^{-37} \text{ kg}$$

Mistério: faltava 2/3 dos ν 's (oscilação)



Exercício

Há evidências geológicas de que havia água líquida na Terra a 4,2 bilhões de anos. Entretanto o jovem Sol daquela época tinha um núcleo menos denso (e menos quente). O número de reações nucleares era menor e a luminosidade é estimada em ser ~30% menor. (A temperatura da superfície é a mesma de hoje, mas o tamanho era menor.). Essas afirmações são:

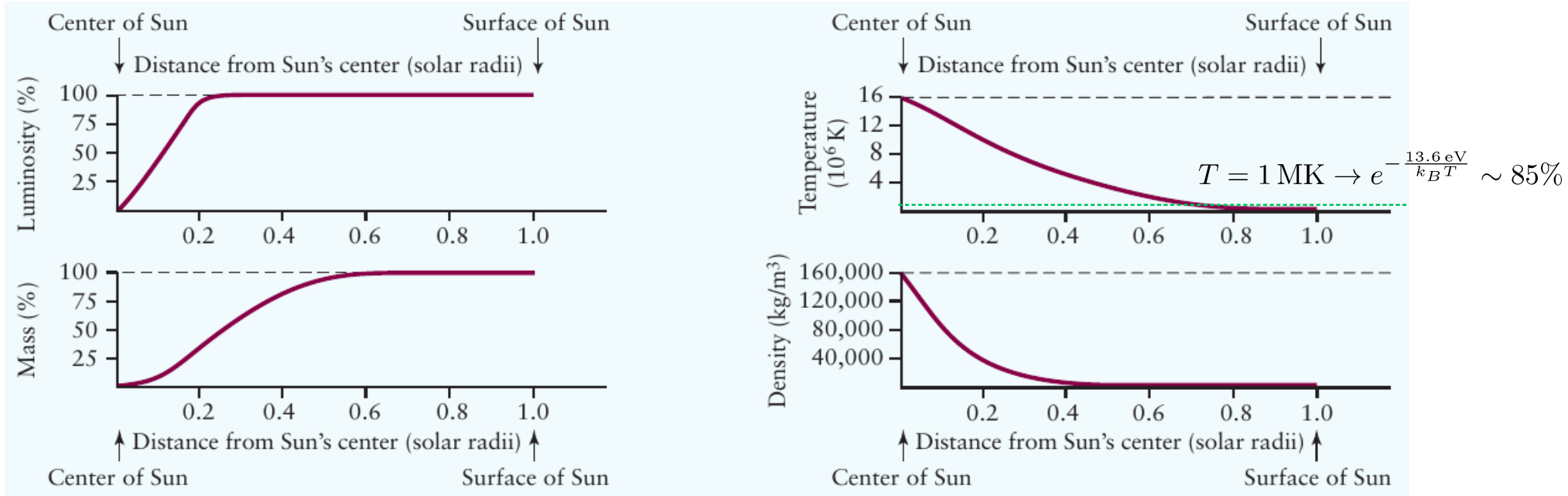
- 1) Verdadeiras. Esse é o “mistério do jovem Sol”. Acredita-se que a 2ª atmosfera terrestre era repleta de gases estufas e, por isso, água líquida pode ser encontrada.
- 2) Falsas. O tamanho do jovem Sol era o mesmo de hoje. Sua temperatura superficial, entretanto, era ~25% menor.

Sol ☉

Modelo Solar

As reações nucleares acontecem no **núcleo** denso (150 g/cm^3) e quente ($15,5 \text{ MK}$): 99% das reações acontecem em $< 0,24R_{\odot}$. Em $0,30R_{\odot}$, praticamente não há mais reações nucleares.

Note que quase toda a massa do Sol está concentrada $< 0,24R_{\odot}$.



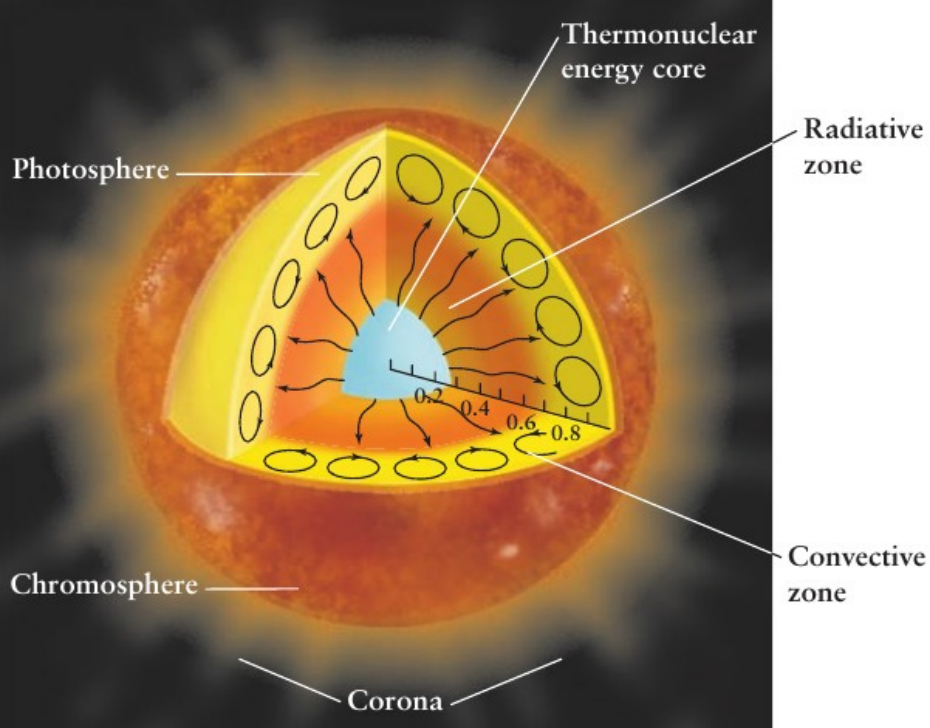
Sol ☉

Como a energia do núcleo é transportada até a “superfície”?

Modelo Solar

Zona Radiativa: A energia do núcleo “difunde” através do plasma.

(Os fótons são constantemente absorvidos e re-emitidos – menos energeticamente – pelo plasma. Estima-se que demoram de 10 a 170 mil anos para alcançarem a fotosfera. Em contraste, os neutrinos levam 2,3 s.)



Linha tacoclina: região de transição entre as zonas radiativa e convectiva. A fricção entre as camadas dessa estreita região dá origem ao campo magnético do Sol.

Zona Convectiva: A energia é transportada (mecanicamente) por **convecção** dos **gases** quentes.

Fotosfera: Região **visível** a partir da qual os fótons (irradiados pelos gases no topo da zona convectiva) se propagam livremente para além do Sol.

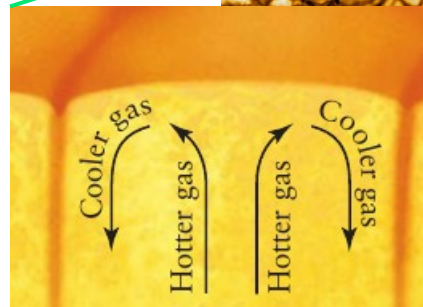
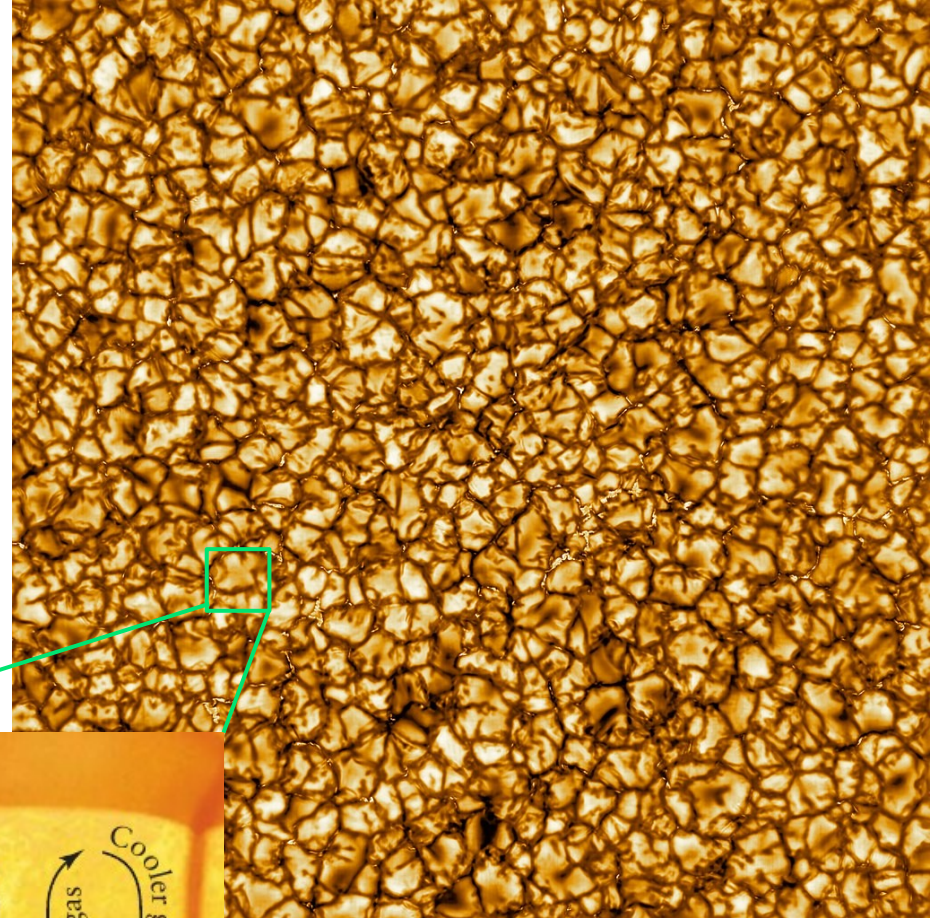
A fotosfera é transparente.

Apenas 3% das moléculas estão ionizadas nesta camada de ~ 500 km de espessura.

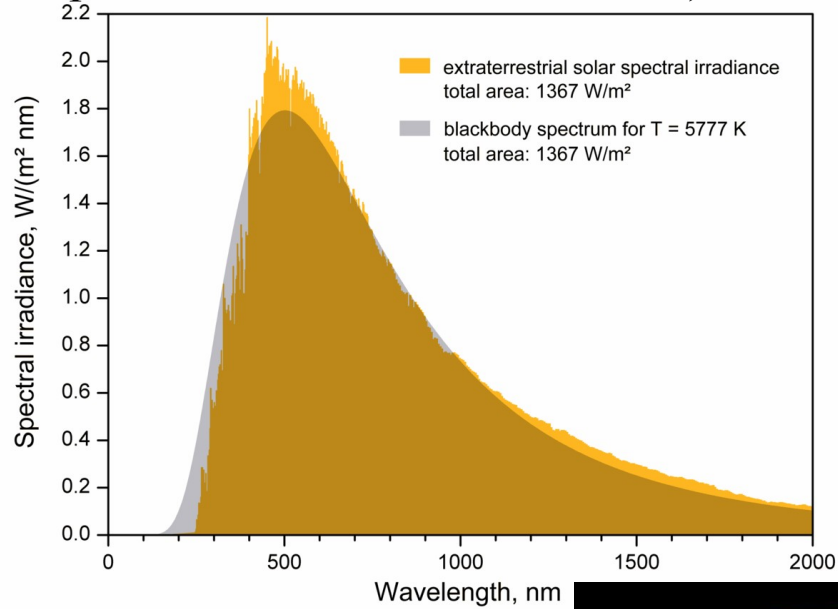
Densidade ~ 10^{23} moléculas/m³ ~ 37% da atmosfera terrestre no nível do mar.

Grânulos: estruturas/células de convecção tipicamente ~ 1000 km de extensão. Tempo de vida varia de 8 a 20 minutos. Gases quentes em ascensão constituem a parte brilhante dos grânulos. Os gases resfriados afundam gerando as zonas de fronteira mais escuras.

Abaixo da fotosfera, os (super-)grânulos são da ordem de 30 mil km e duram até 24 h.



Espectro da fotosfera: descoberta do Hélio (linhas espectrais desconhecidas em 1968).



Escurecimento de bordo:

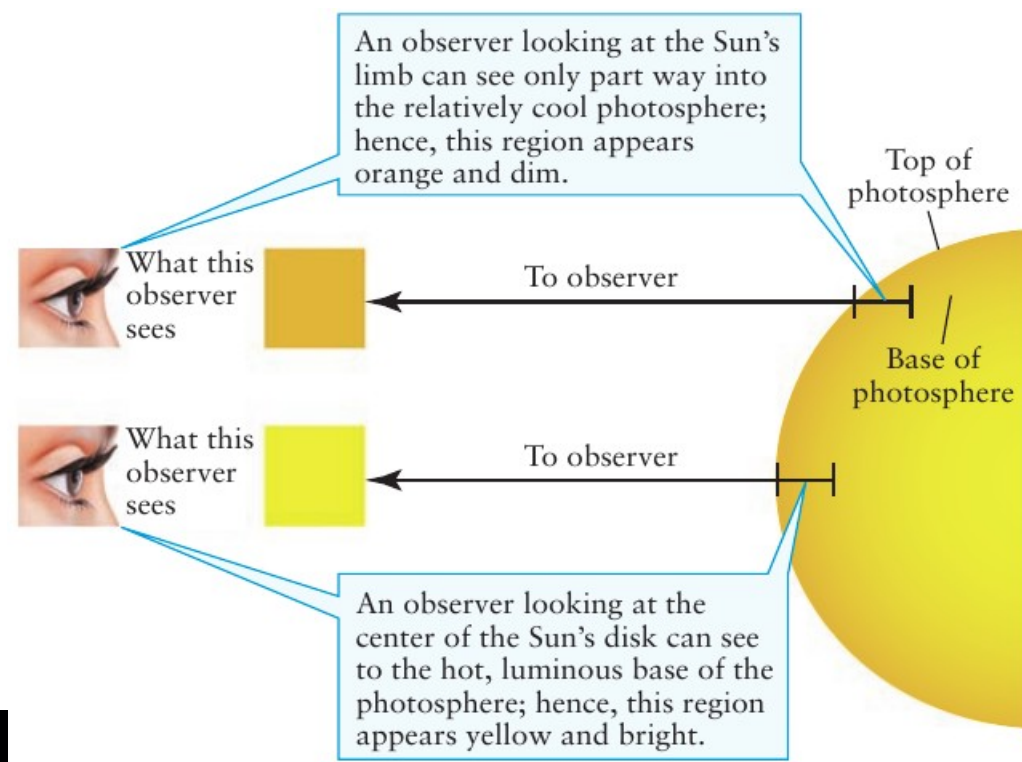
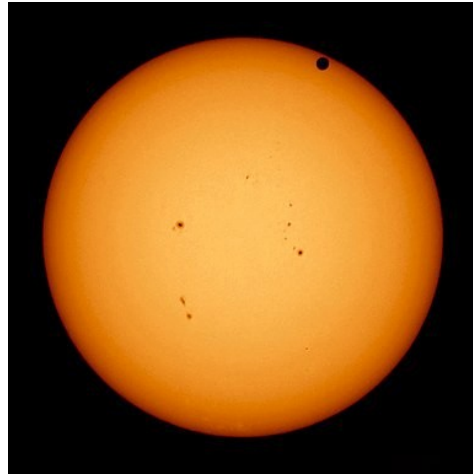
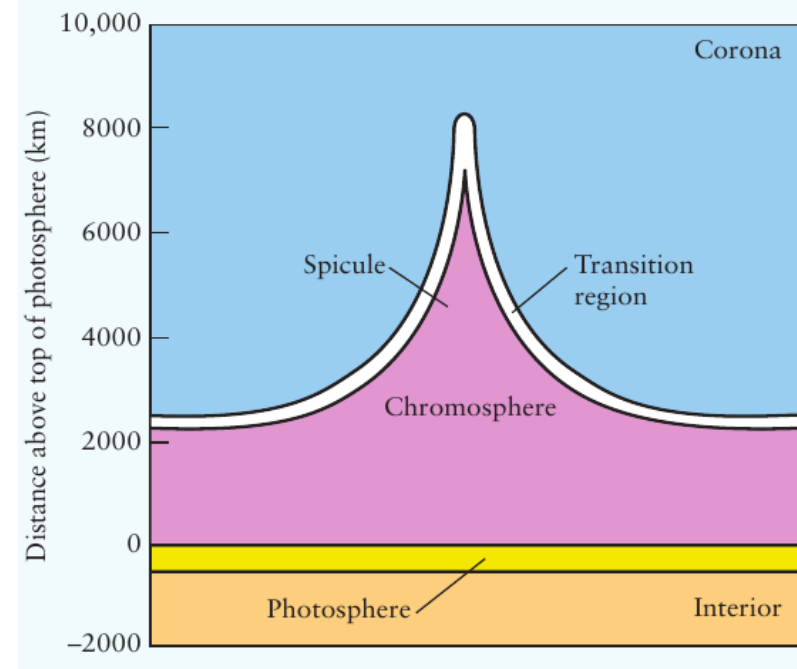


FIGURE 10-2 Limb Darkening The Sun's edge, or limb, appears distinctly darker and more orange than does its center, as seen from Earth (see Figure 10-1). This phenomenon occurs because we look through the same amount of solar atmosphere at all places. As a consequence, we see higher in the Sun's photosphere near its limb than when we look at its central regions. The higher photosphere is cooler and, because it is a blackbody, darker and more orange than the lower, hotter region of the photosphere.

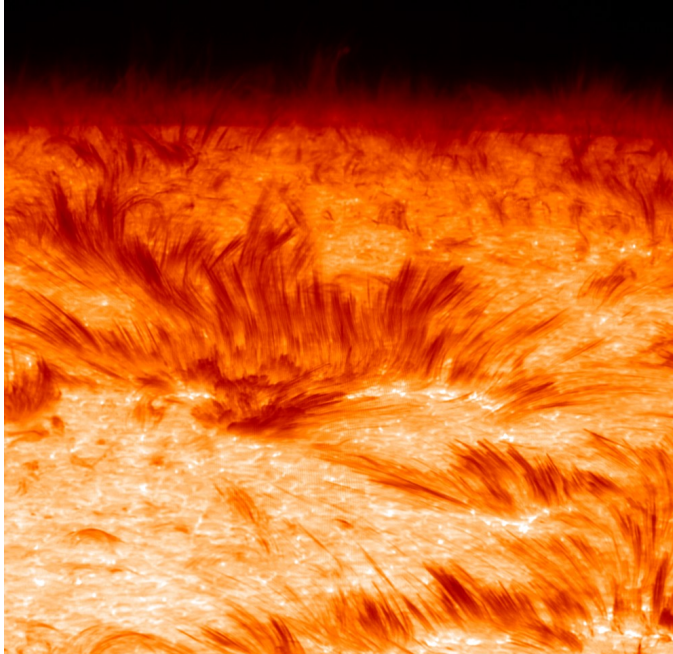
A atmosfera do Sol (cromosfera, região de transição, coroa e heliosfera)

Cromosfera: faixa de ~2 mil km acima da fotosfera mais fria (4100 K) onde a existência de moléculas como CO₂ e H₂O é possível (e observadas no espectro de absorção).

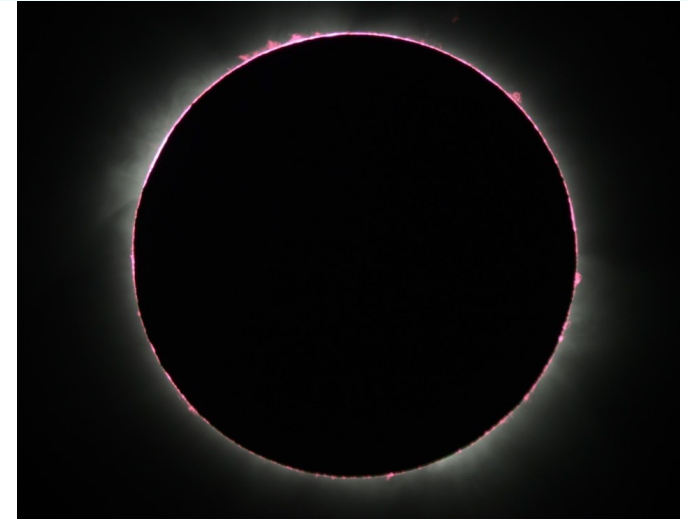
Nesta região há as espículas: jatos de gases que sobem a ~ 15 – 100 km/s até ~ 8 mil km acima da fotosfera e duram alguns minutos.



Espículas:



cromosfera:



Região de transição: estreita região (~ 200 km) acima da cromosfera em que a temperatura aumenta para 20 mil K.

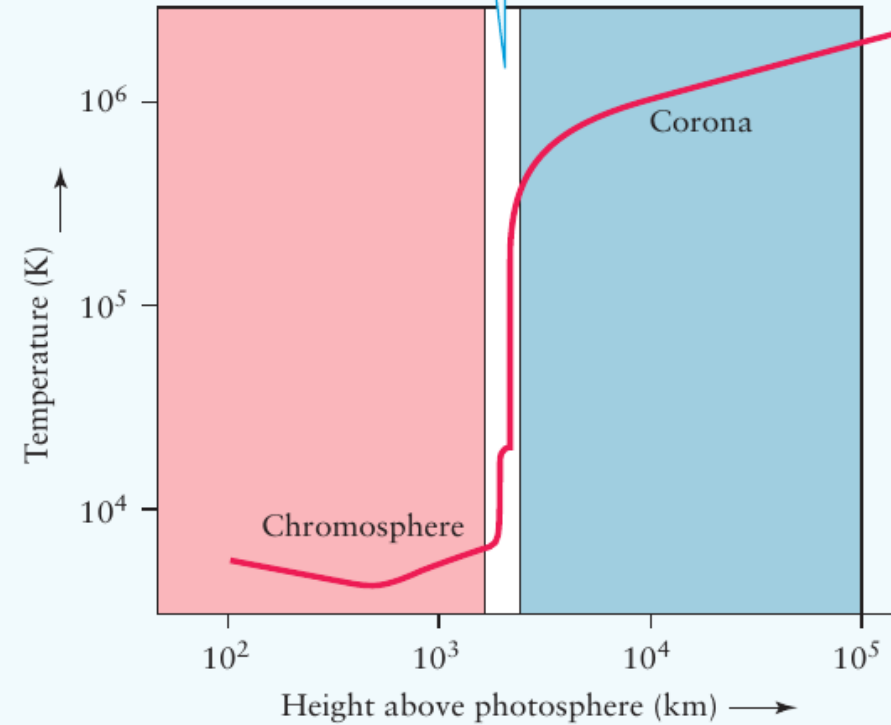
Coroa: camada de baixa densidade de partículas ($10^{15} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$; por isso brilho fraco) e alta temperatura (1 – 2 MK), chegando a emitir raios-X.

Heliosfera: região dominada pelo vento solar se estendendo desde $\sim 20R_{\odot}$ até a heliopausa (~ 115 UA). O vento solar é expelido a $\sim 10^9$ kg/s e a velocidades $\sim 3 \times 10^6$ km/h. Nas vizinhanças da Terra, o vento solar tem densidade de ~ 10 partículas/cm³ e velocidade de $\sim 1 \times 10^6$ km/h.

Coroa:

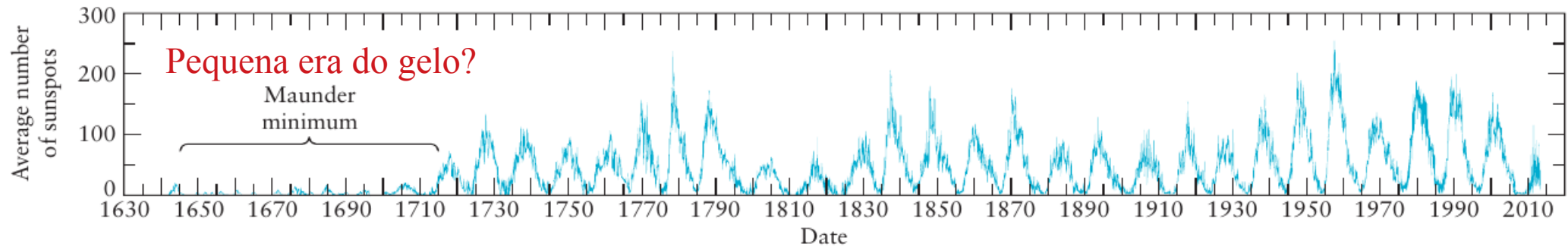
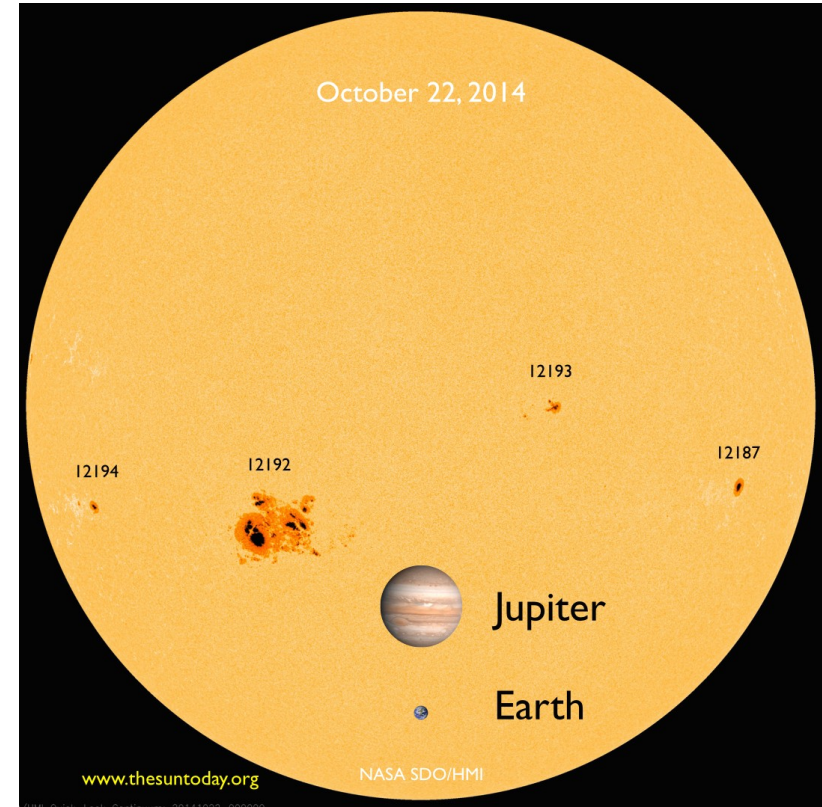
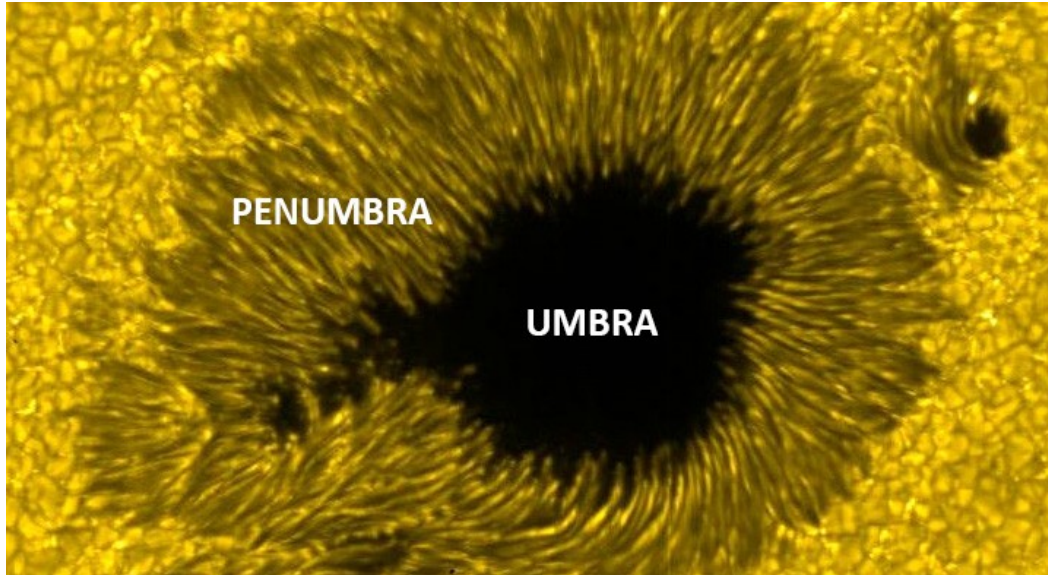


In this narrow transition region between the chromosphere and corona, the temperature rises abruptly by about a factor of 100.

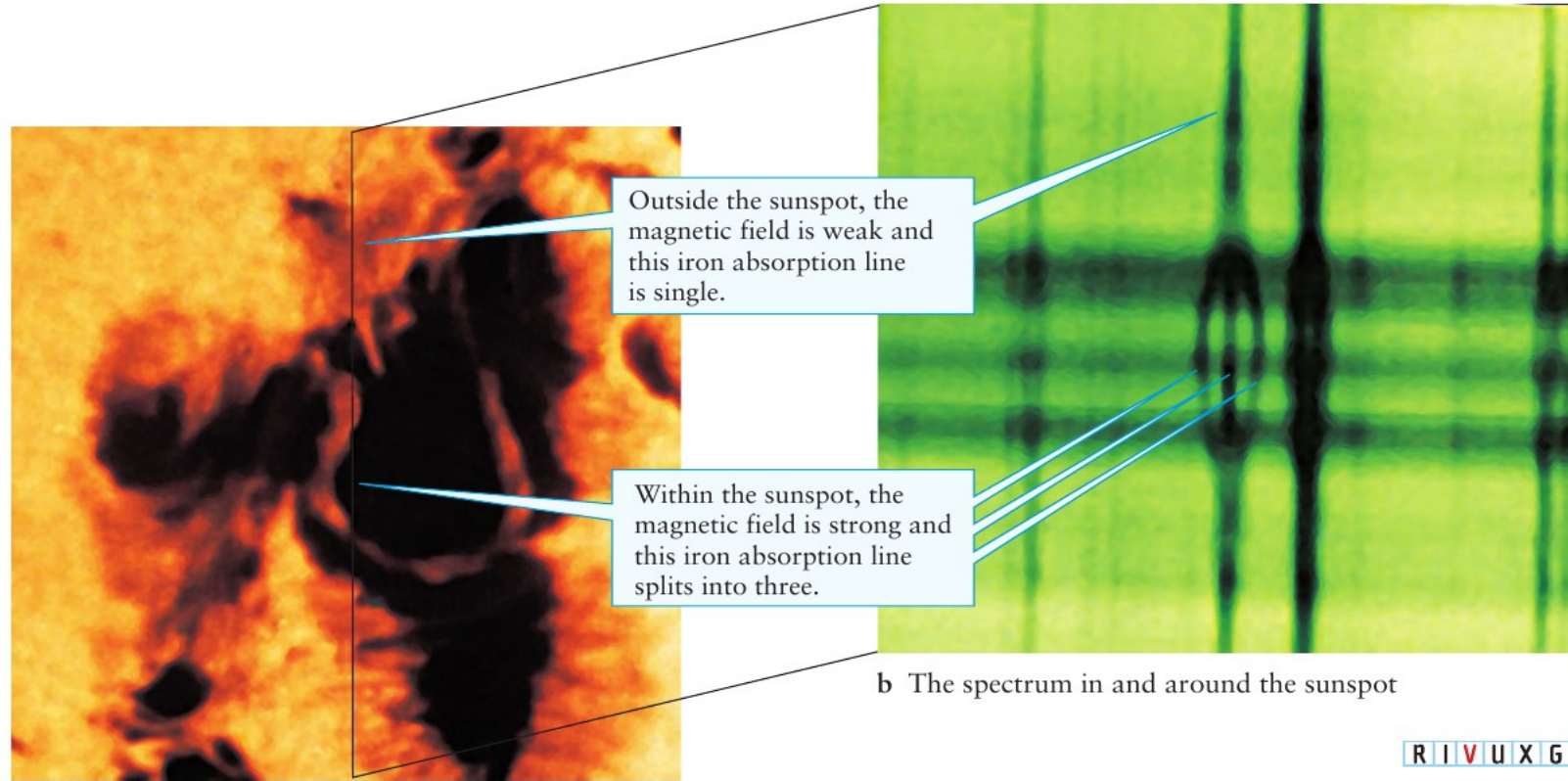


Não se conhece todos mecanismos que “**esquentam**” as camadas superiores da atmosfera solar. Certamente o complexo campo magnético do Sol deve ter papel importante na **aceleração** dos íons.

Manchas solares: regiões da fotosfera relativamente frias e escuras cuja densidade tem periodicidade de ~ 11 anos.



Nessas regiões, os campos magnéticos são altos (~ 5 mil Gauss). Expulsam as partículas mais quentes (aquelas ionizadas) advindas por convecção das camadas mais inferiores.



a A sunspot

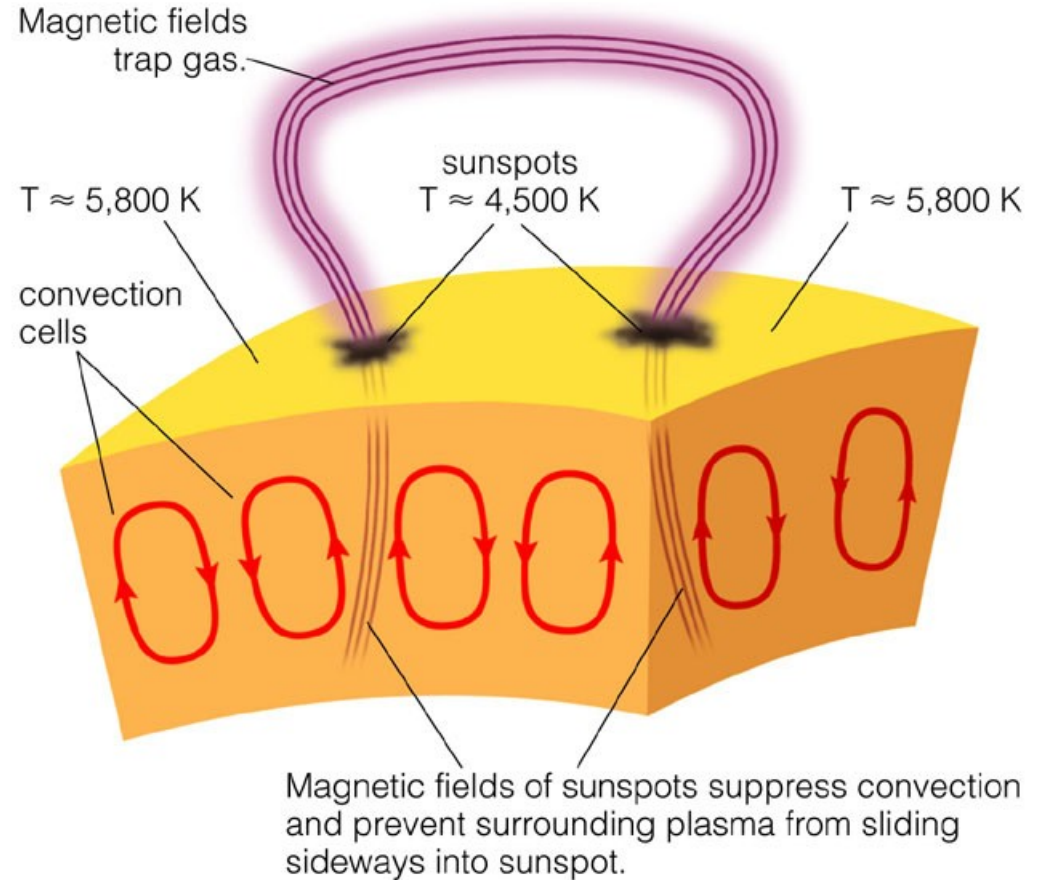
b The spectrum in and around the sunspot

FIGURE 10-11 Zeeman Splitting by a Sunspot's Magnetic Field (a) The black line drawn across the sunspot indicates the location toward which the slit of the spectroscope was aimed. (b) In the resulting spectrogram, one line in the middle of the normal solar spectrum is split into three components by the

Sun's magnetic field. The amount of splitting between the three lines is used to determine the magnetic field's strength. Typical sunspots have magnetic fields some 5000 times stronger than Earth's magnetic field. (a and b: NSO/AURA/NSF)

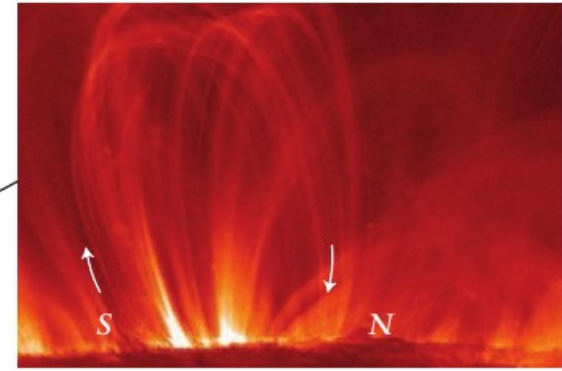
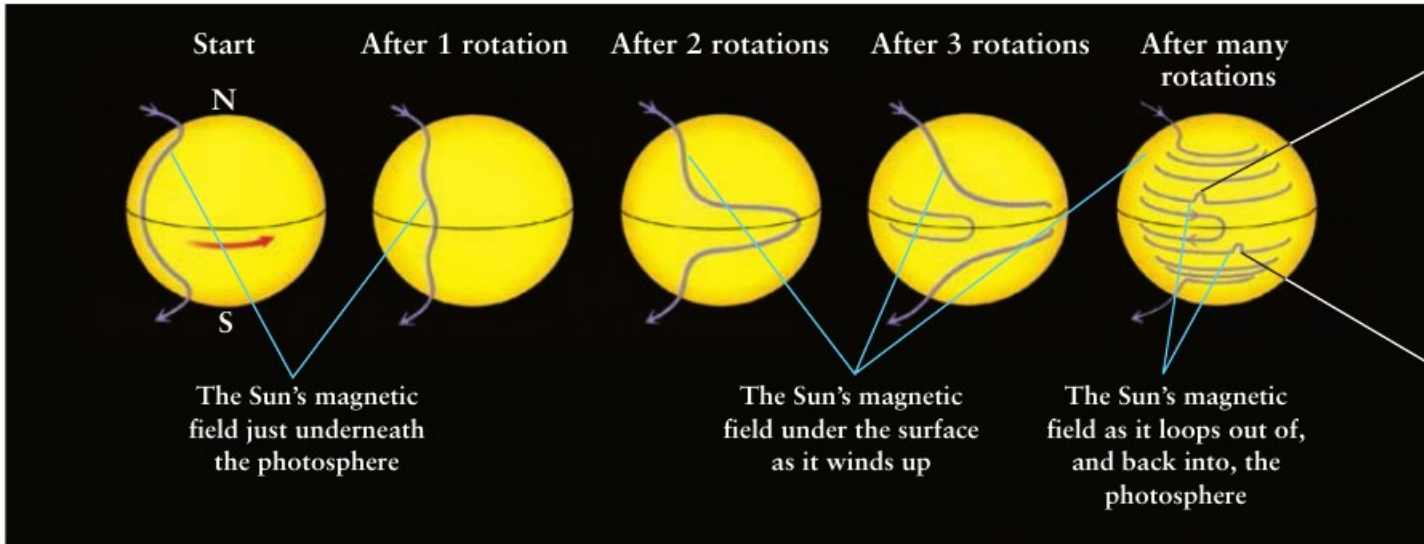
Como não há monopolos magnéticos, as manchas solares são sempre conectadas em **pares**.

As manchas solares são “frias”, mas os gases que elas armadilham/aprisionam e comprimem são “quentes” (~ 50 mil K) e são denominados **filamentos** (ou **prominências** quando vistos de lado).



Como entender o ciclo de 11 anos e o magnetismo das manchas solares?

Modelo do **dínamo magnético**: no começo do ciclo, o campo magnético é poloidal (que segue um meridiano). Por causa da **rotação diferencial**, as linhas de campo magnético são “esticadas” se tornando azimutais (toroidais). As linhas toroidais passam por instabilidades (não muito bem entendidas) que formam laços que perfurando a superfície formando as manchas solares.



R I V U X G

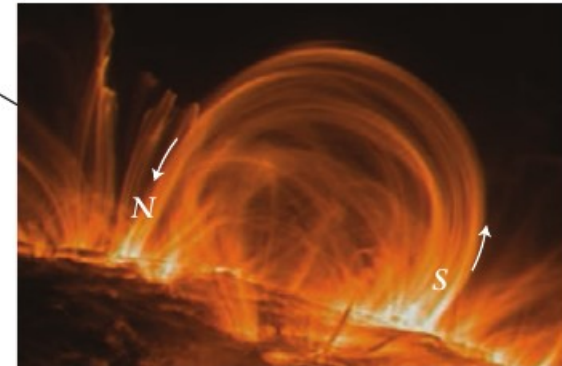
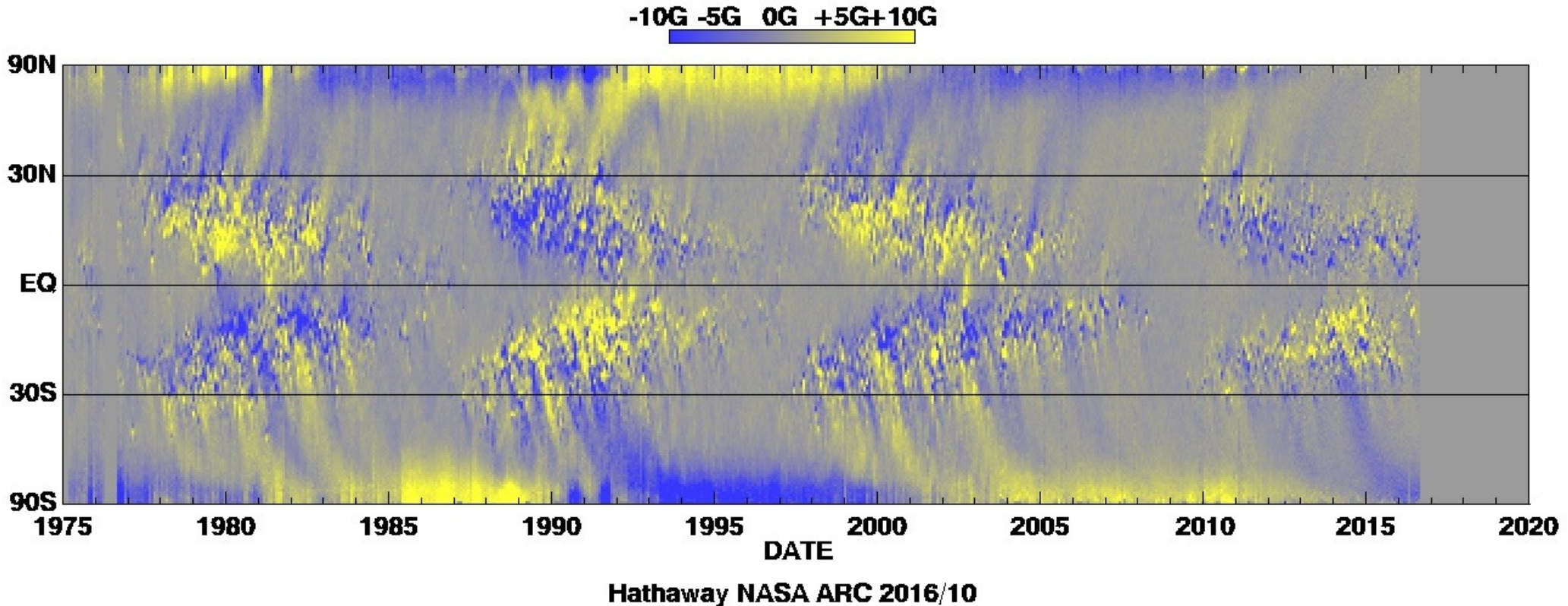


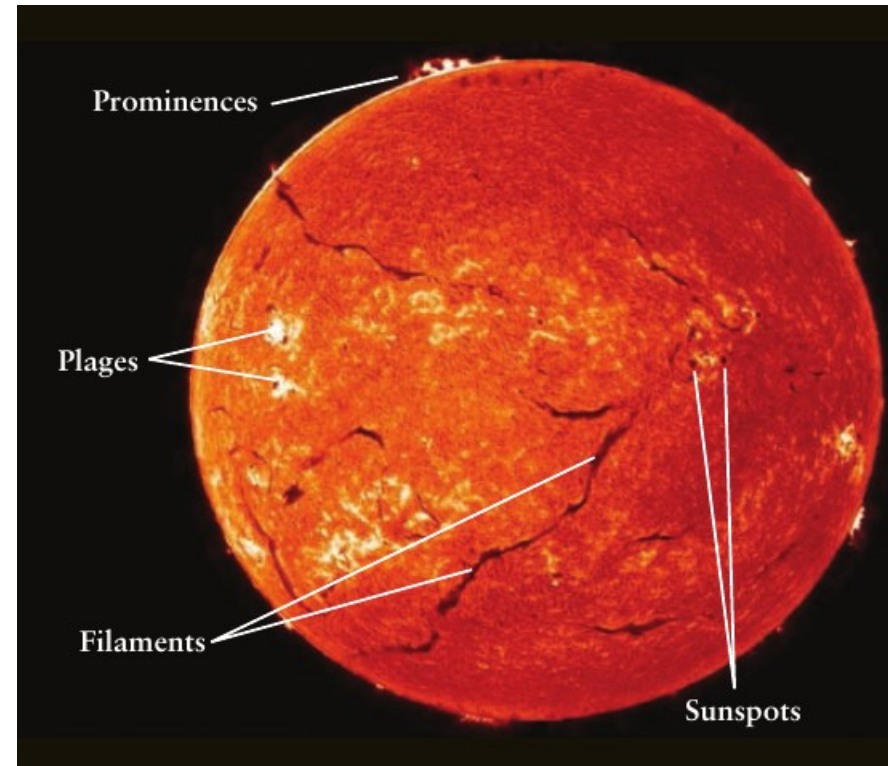
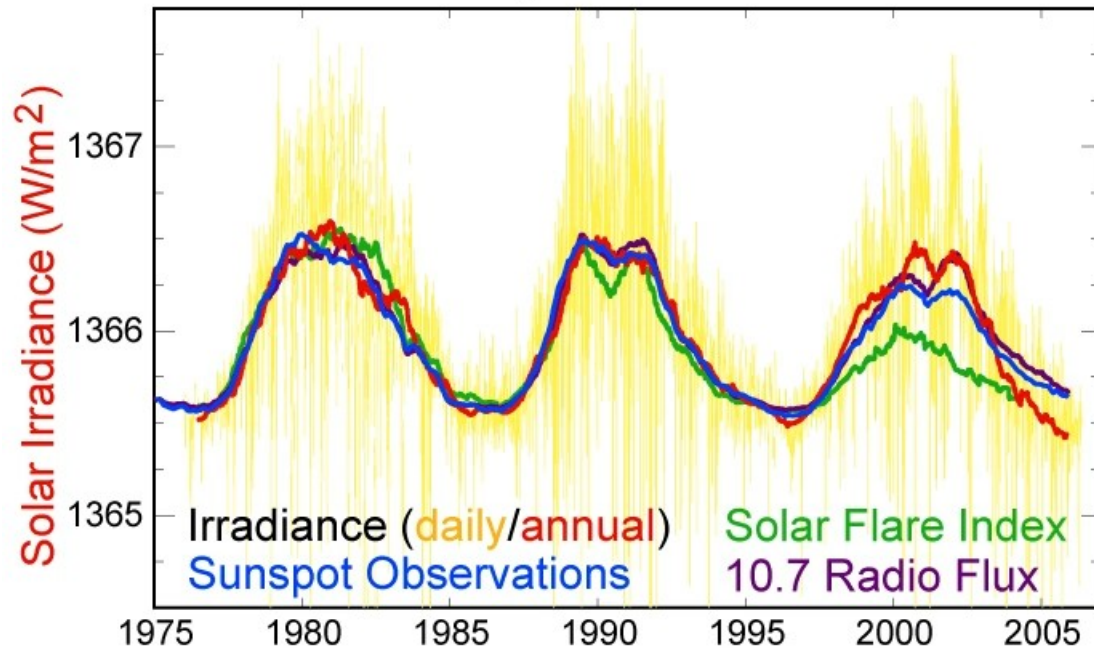
Diagrama borboleta: Inicialmente, as manchas se formam em latitudes mais altas. Ao longo do ciclo, elas aumentam em número e se concentram no equador.

Próximo do máximo de densidade de manchas, **os polos se revertem** (o **ciclo solar** é de 22 anos). As linhas de campo magnéticos (slide anterior) voltam a ficar poloidais mas com polarização revertida.



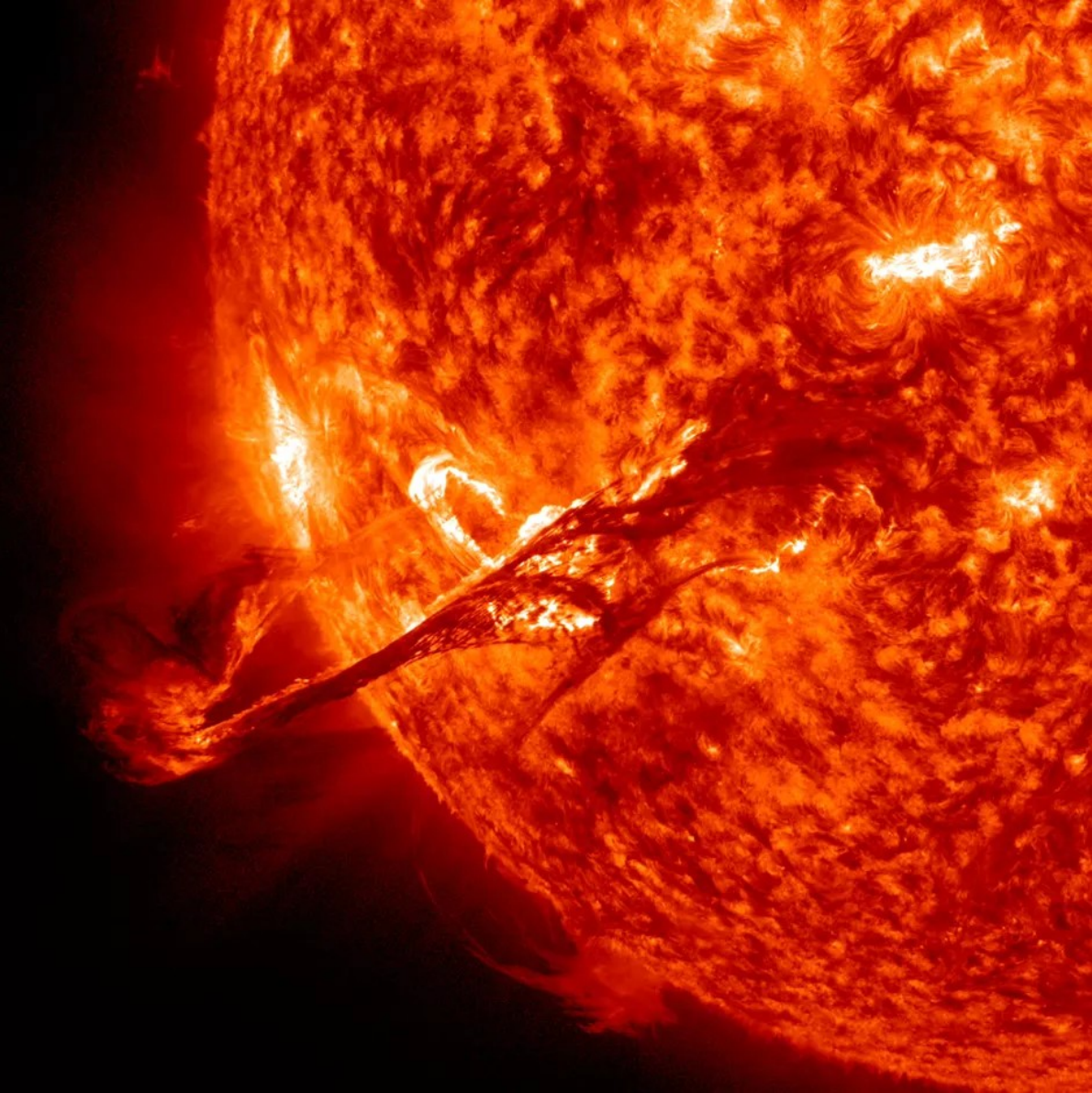
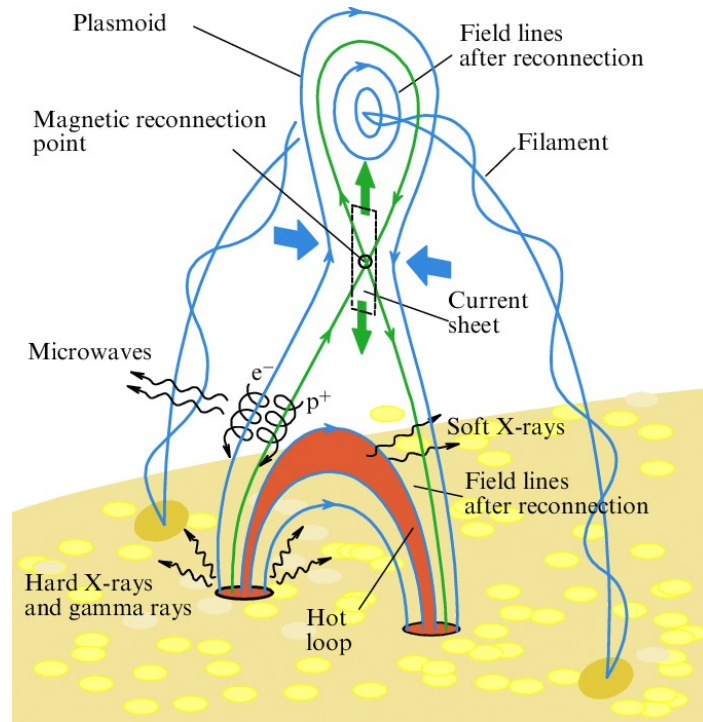
Durante o máximo solar, o Sol irradia $\sim 0.1\%$ mais energia. Esta energia foi armazenada/acumulada no campo magnético que sofreu “deformações” quando de poloidal \rightarrow azimutal. Após o máximo solar, o campo magnético volta a ser poloidal e, durante esse processo, a energia acumulada dá origem a outros fenômenos.

Solar Cycle Variations



Plages (“praias”): precursor das manchas solares. Regiões mais quentes sendo empurradas pelos campos magnéticos que estão começando a perfurar a superfície.

Erupção solar (“solar flare”): evento eruptivo que libera muitas partículas energéticas e radiação UV e raios-X. Os mais violentos dão energia suficiente para que haja uma **ejeção de massa coronal**. Podem ejetar $\sim 10^{12}$ kg de partículas ionizadas a velocidades de 1.4×10^6 km/h.



Distâncias no sistema Solar

Raio da Terra: estratégia simples

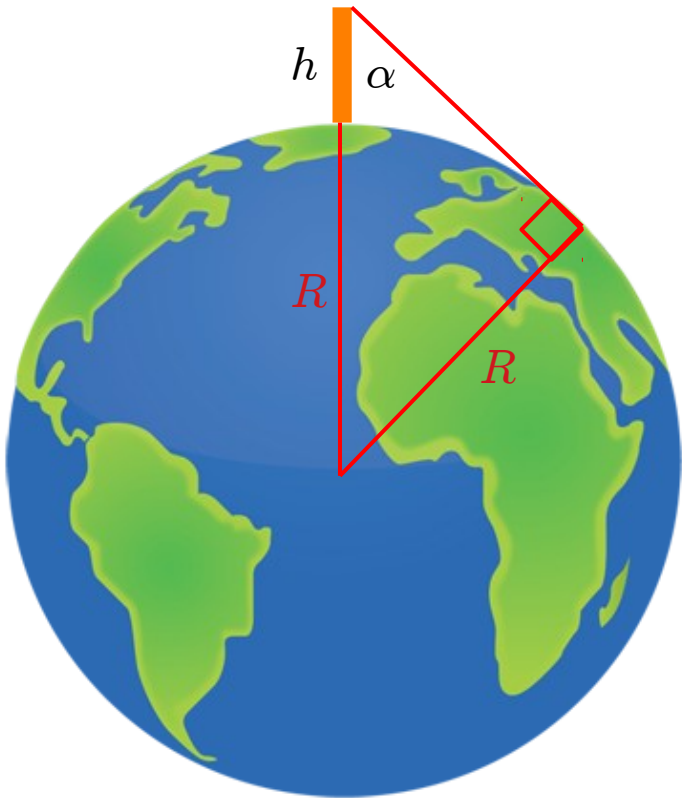
$$\sin \alpha = \frac{R}{R + h}, \quad \Rightarrow \quad R = \left(\frac{\sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \right) h$$

Obs.: Requer precisão no ângulo α

$$h = 100 \text{ m}$$

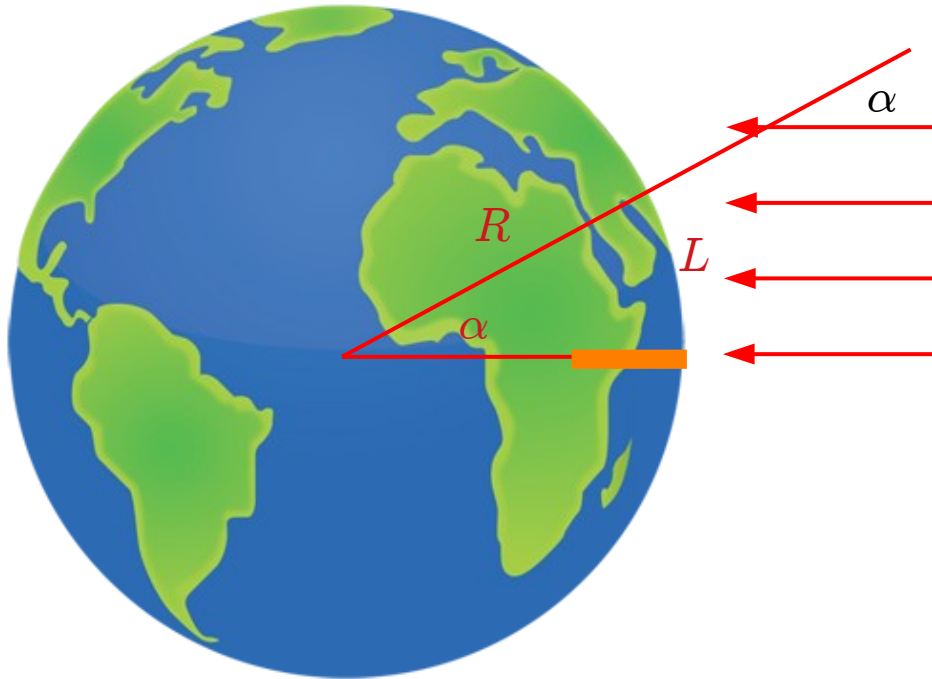
$$\alpha = 89.679^\circ, \quad \Rightarrow \quad R = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\alpha = 89.700^\circ, \quad \Rightarrow \quad R = 7.295 \times 10^6 \text{ m}$$



Distâncias no sistema Solar

Raio da Terra: estratégia de Eratóstones (séc. 4 AEC)



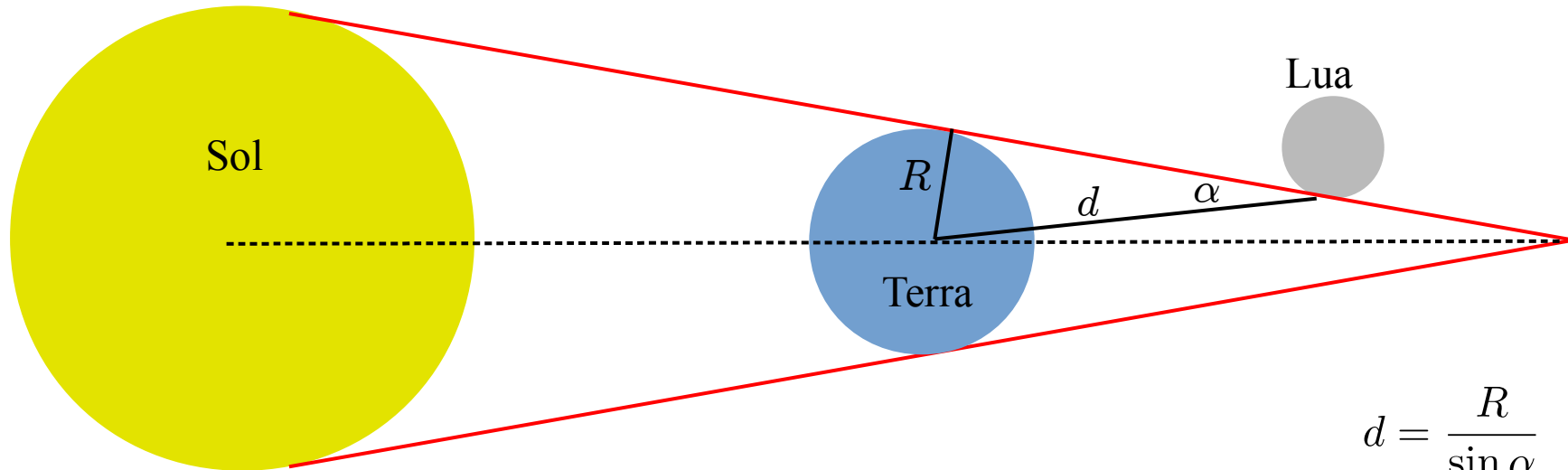
$$L = \alpha R \quad (\alpha \text{ precisa estar em radianos})$$

$$L \approx 800 \text{ km}$$

$$\alpha = 7.2^\circ, \quad \Rightarrow \quad R = 6366 \text{ km}$$

Distâncias no sistema Solar

Distância Terra-Lua e o tempo de eclipse
(Hiparcus, séc. 2 AEC)



$$d = \frac{R}{\sin \alpha}$$

Como determinar o ângulo α ?

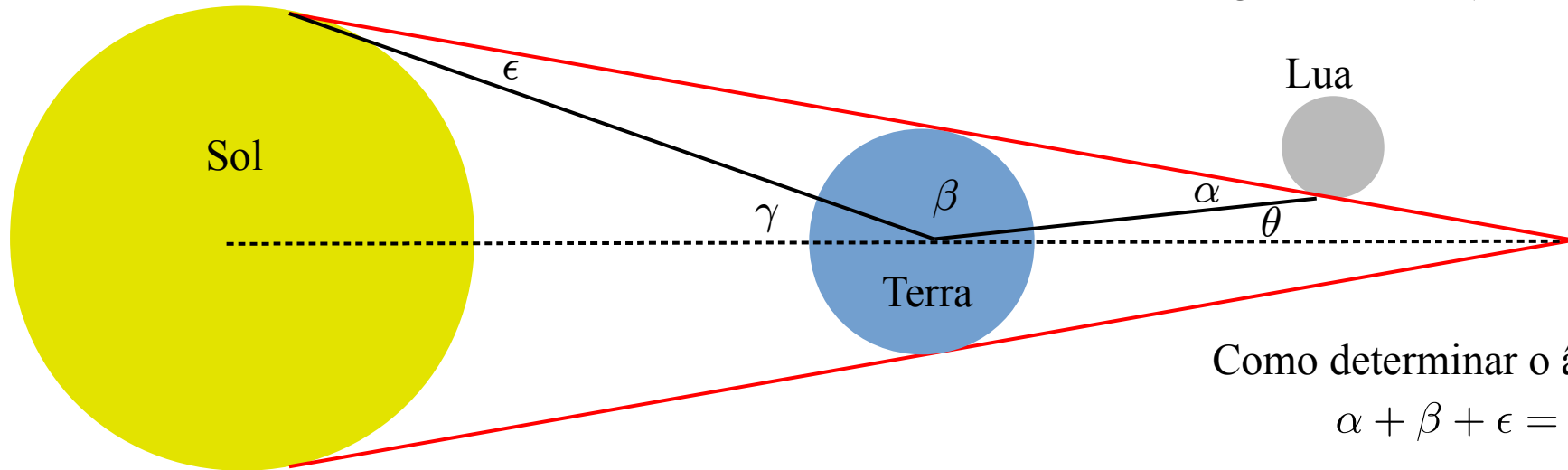
Distâncias no sistema Solar

Distância Terra-Lua e o tempo de eclipse
(Hiparcus, séc. 2 AEC)

$\epsilon \approx 0$ Raio angular da Terra vista do Sol

$\gamma \approx 16'$ Raio angular do Sol (medido)

$\delta \approx 16'$ Raio angular da Lua (medido)



Período sinódico da Lua

29,53 dias $\rightarrow \theta + \delta = 0.51^\circ / \text{h} \times (\text{meio tempo de eclipse})$

Como determinar o ângulo α ?

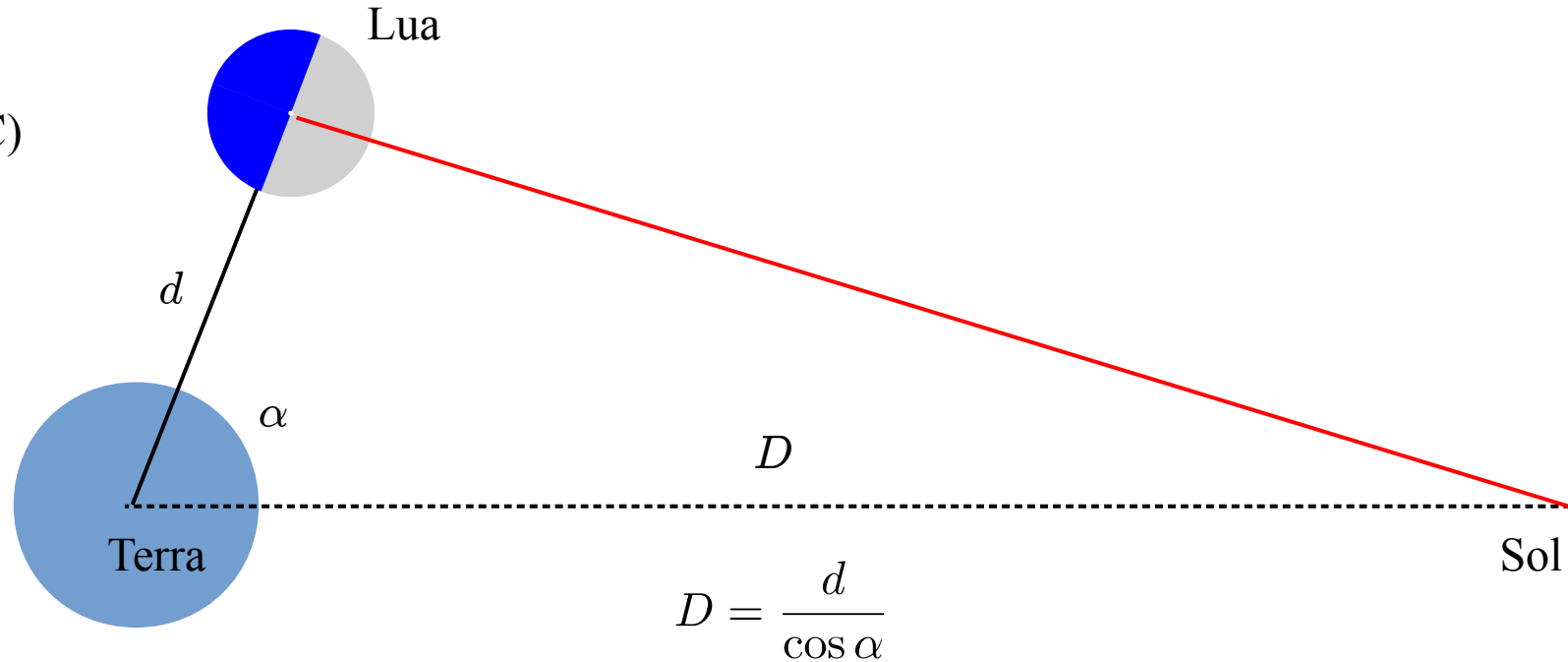
$$\alpha + \beta + \epsilon = 180^\circ$$

$$\gamma + \beta + \theta = 180^\circ$$

$$\Rightarrow \alpha = \gamma + \theta$$

Distâncias no sistema Solar

Distância Terra-Sol
(Aristarco, séc. 3 AEC)

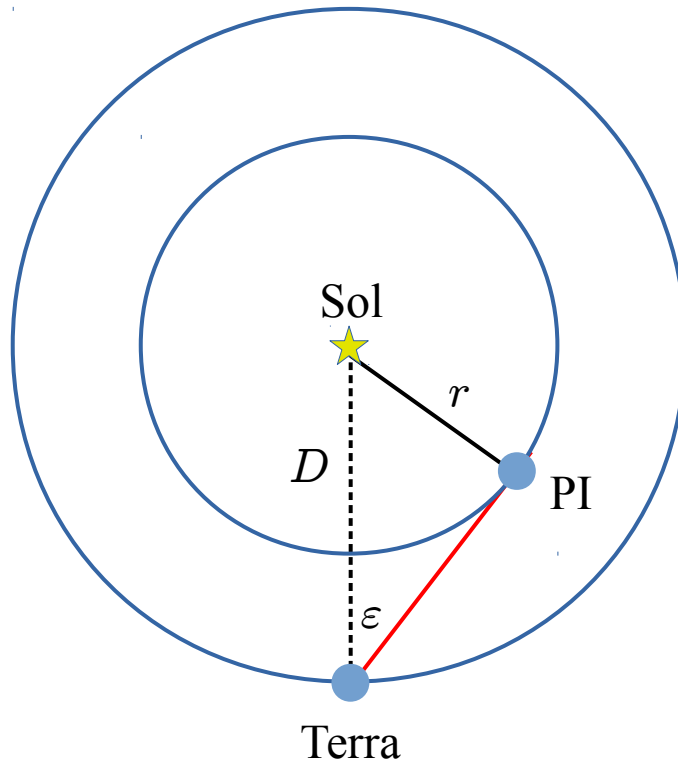


Como na estratégia simples para determinar o raio da Terra, necessita-se de alta precisão no ângulo α .

Aristarco estimou $D = 8$ milhões km.

Distâncias no sistema Solar

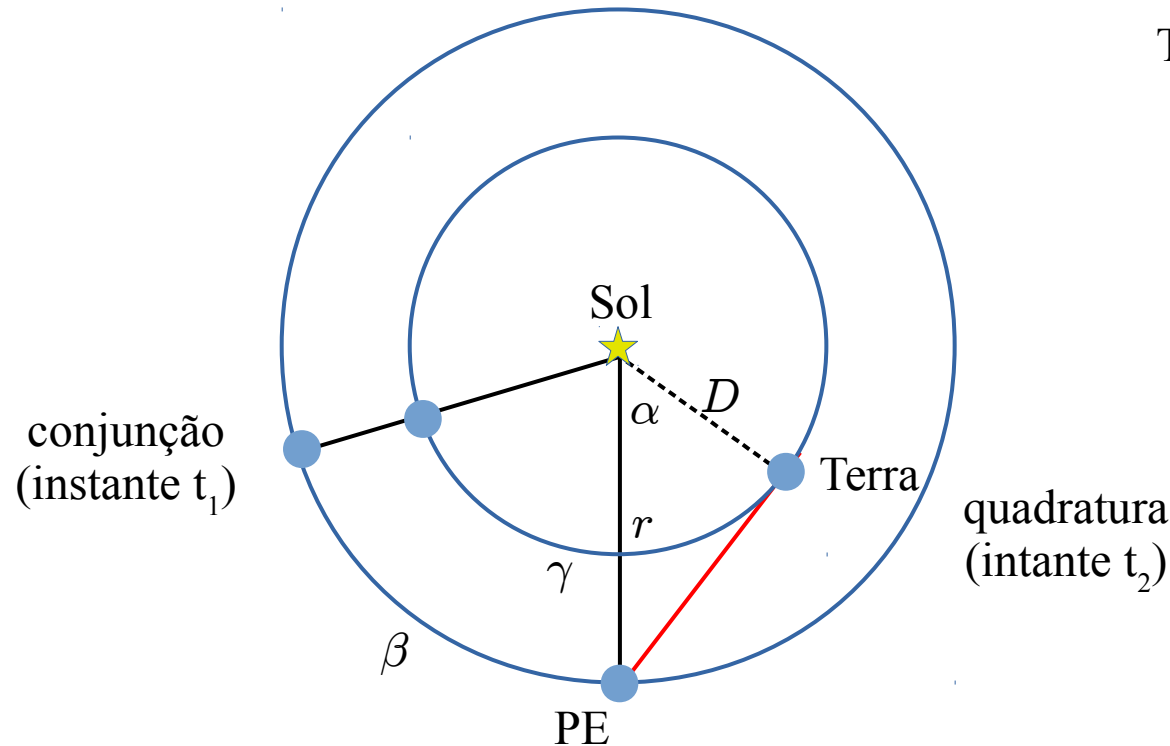
Distância planeta interior-Sol
(Usa-se a máxima elongação)



$$r = D \sin \varepsilon$$

Distâncias no sistema Solar

Distância planeta exterior-Sol
(conjunção e quadratura)



quadratura: $r = \frac{D}{\cos \alpha} = \frac{D}{\cos(\gamma - \beta)}$

Tempo entre a conjunção e a quadratura

$$t = t_2 - t_1$$

$$\Rightarrow \beta = \omega_{PE} t = \frac{2\pi}{T_{PE}} t$$

$$\Rightarrow \gamma = \omega_{Terra} t = \frac{2\pi}{1 \text{ ano}} t$$