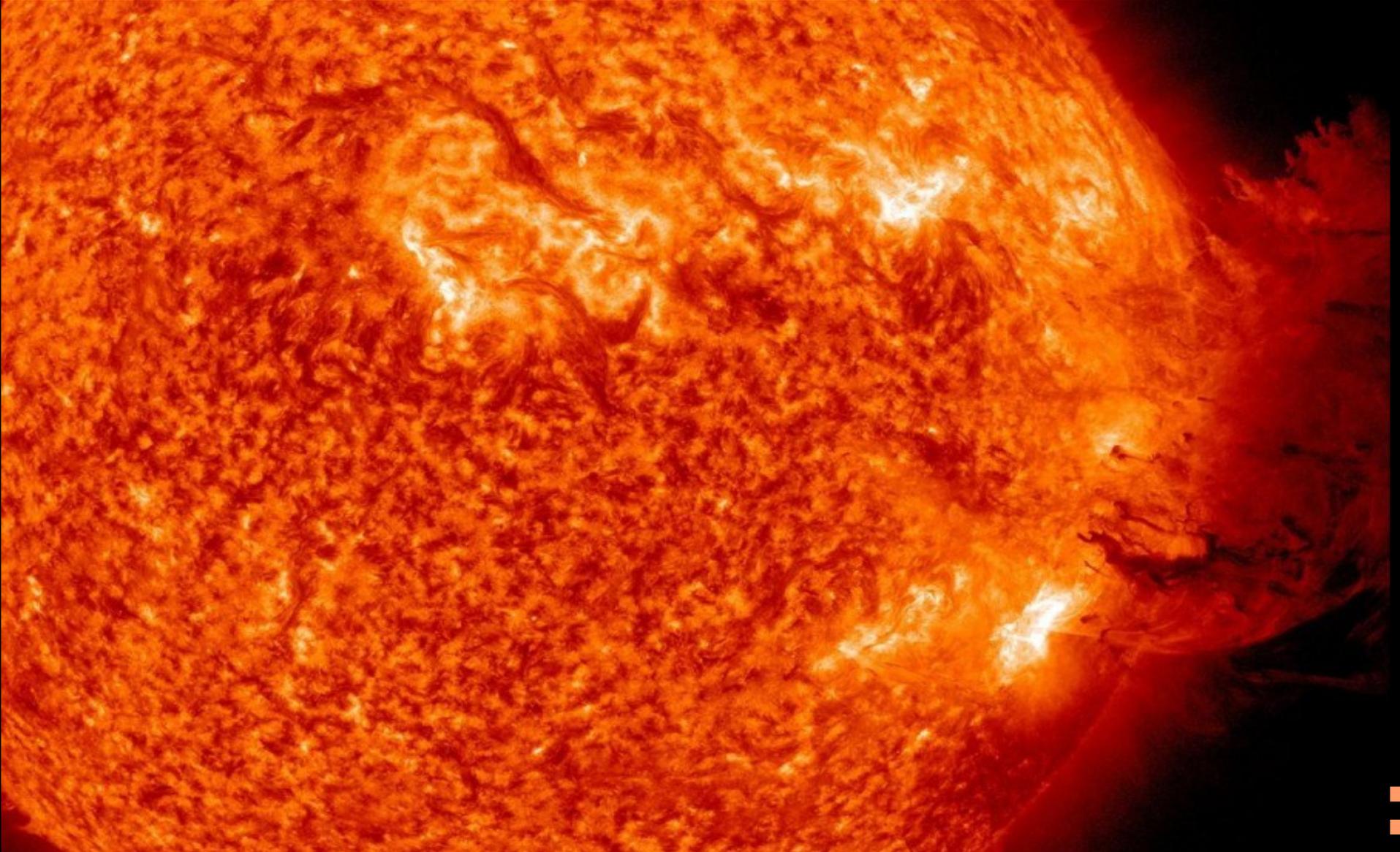


# ***Aula 6 - O Sol***

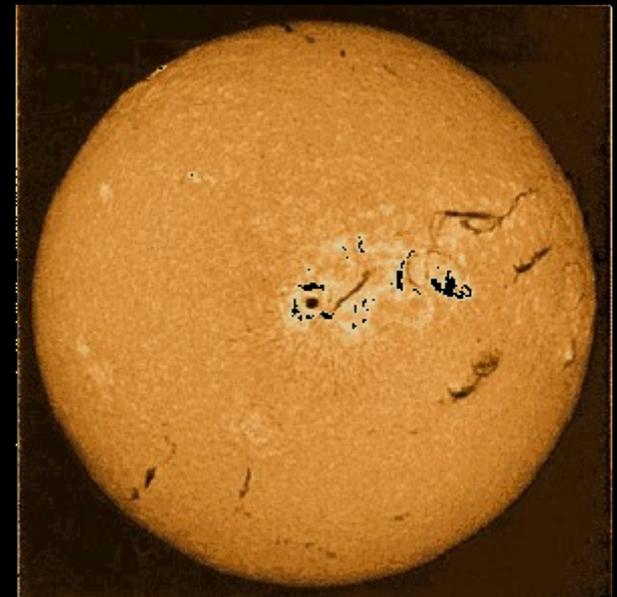
*S. Lorenz-Martins*

*Observatório do Valongo/UFRJ*



- O Sol: estrela mais próxima de nós e a que melhor conhecemos.
- Esfera de gás incandescente  
=> núcleo: reações termonucleares
- *Estudar o Sol serve de base para o conhecimento das outras estrelas*

***H $\alpha$ : (National Solar Observatory,  
EUA)***

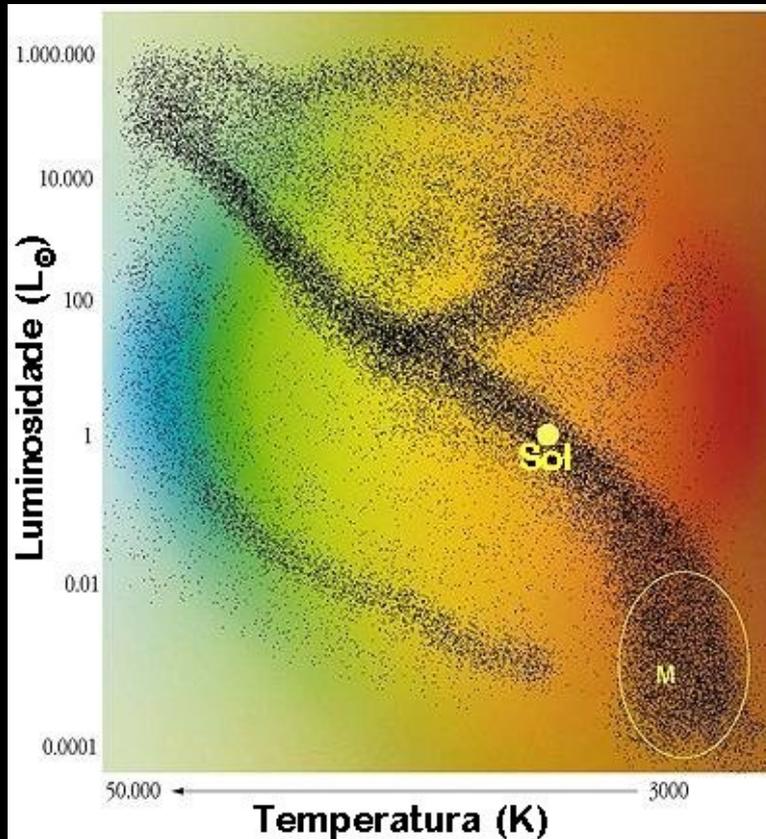


## O Sol - Dados Básicos

Massa	$m = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R = 696\,000 \text{ km}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidade central	$\rho_c = 160\,000 \text{ kg/m}^3$
Distância	$1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$
Luminosidade	$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva	$T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 10\,000\,000 \text{ K}$
Magnitude absoluta bolométrica	$M_{\text{bol}} = 4,72$
Magnitude absoluta visual	$M_V = 4,79$
Tipo espectral e classe de luminosidade	G2 V
Índices de cor	B-V=0,62
	U-B=0,10
Composição química principal (N°)	Hidrogênio = 91,2 %
	Hélio = 8,7%
	Oxigênio = 0,078 %
	Carbono = 0,043 %
Período rotacional no equador	25,67 d
	na latitude 75°

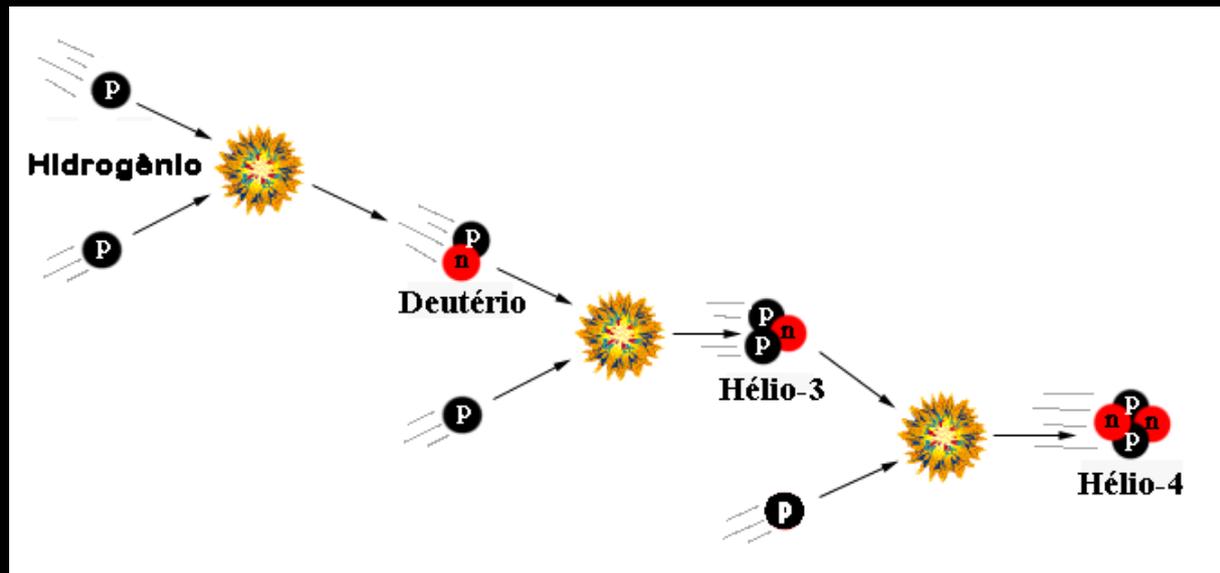
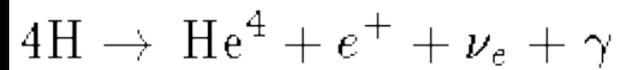
- Distância Terra-Sol: **Unidade Astronômica**, é medida por ondas de radar direcionadas a um planeta em uma posição favorável de sua órbita (por exemplo Vênus, quando Terra e Vênus estão do mesmo lado do Sol e alinhados com ele).
  - Tamanho do Sol: é obtido a partir de seu tamanho angular e da sua distância.
  - A massa do Sol pode ser medida a partir do movimento orbital da Terra (ou de qualquer outro planeta) usando a terceira lei de Kepler.
  - Sabendo então sua massa e seu raio temos a densidade média do Sol.
- 
-

# O Sol – Uma Estrela G2V Comum



- É composto basicamente por H (70%) e He (28%).
- Não possui superfície sólida: é uma bola de gás em grande parte ionizado = plasma.

# A fonte de Energia do Sol: A Fusão Nuclear



# ***SOL: Sequência Principal***

**Energia fornecida por**

**Cadeia PP: 75%**

**Ciclo CNO: 5%**

**Tempo gasto na SP: 12 Gyr**

**Estrutura: núcleo de He inerte, casca de H**

# ***SOL (Sackmann et al. 1993)***

Tempo de **contração**: 50 milhões de anos

Tempo gasto na **SP**: 12 bilhões de anos

Tempo gasto no **RGB**: 1 bilhão de anos

Tempo gasto no **HB + AGB**: 0.5 milhão de anos

## **Consequências:**

Luminosidade no fim da SP:  $2.2L_{\text{sol}}$

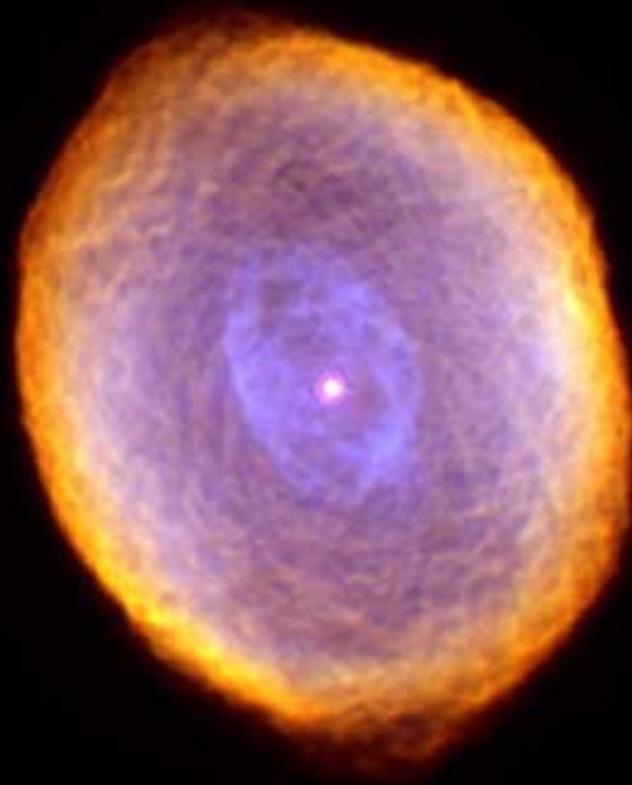
MAS, para  $L=1.4L_{\text{sol}}$  -> **fim dos oceanos**

Aumento do  $R_{\text{sol}}$  até a órbita de Mercúrio

---

---

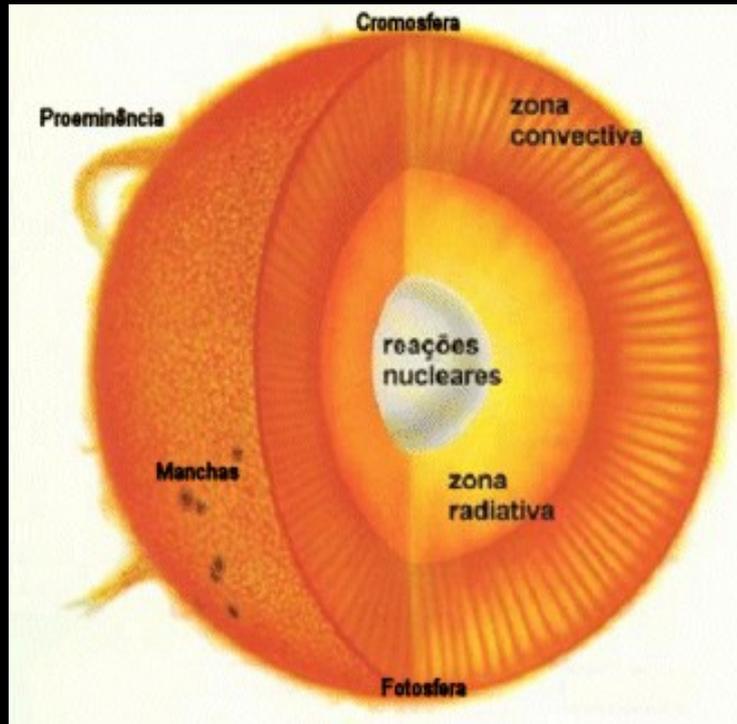
Planetary Nebula IC 418



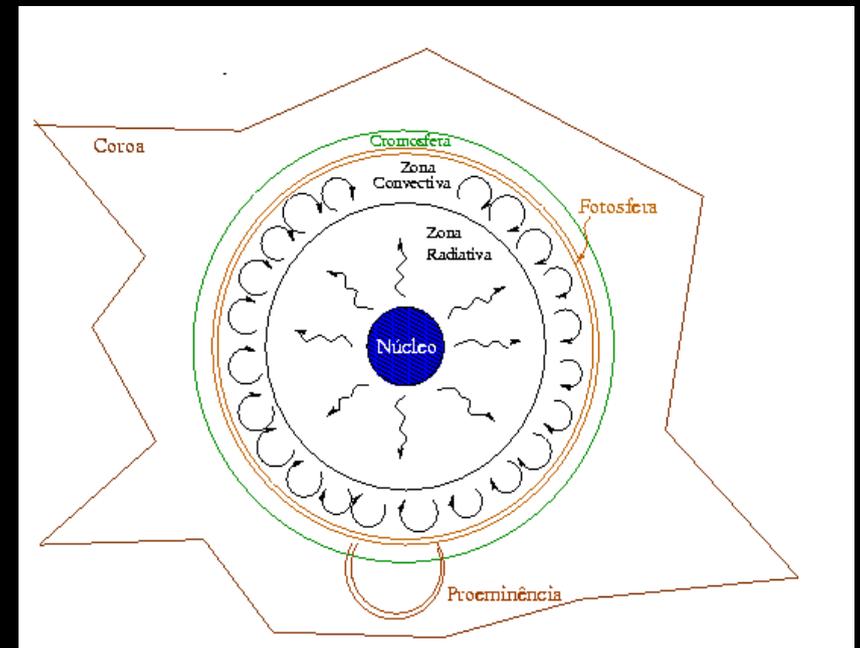
Hubble  
Heritage

# A Estrutura do Sol

- O interior do Sol costuma ser dividido estruturalmente em 3 áreas: núcleo, zona radiativa e zona convectiva



- Acima da zona convectiva, há outras regiões com características distintas



# *Abaixo da Fotosfera*

- **Zona convectiva:** 15% do raio solar. (Convecção)
  - **Zona radiativa:** (Radiação): não há movimento das quantidades de gás, só fótons.
  - **Núcleo:**  $T \sim 15$  milhões de graus Kelvin, é a região onde a energia é produzida, por reações termonucleareres
- 
-

# Acima da Fotosfera

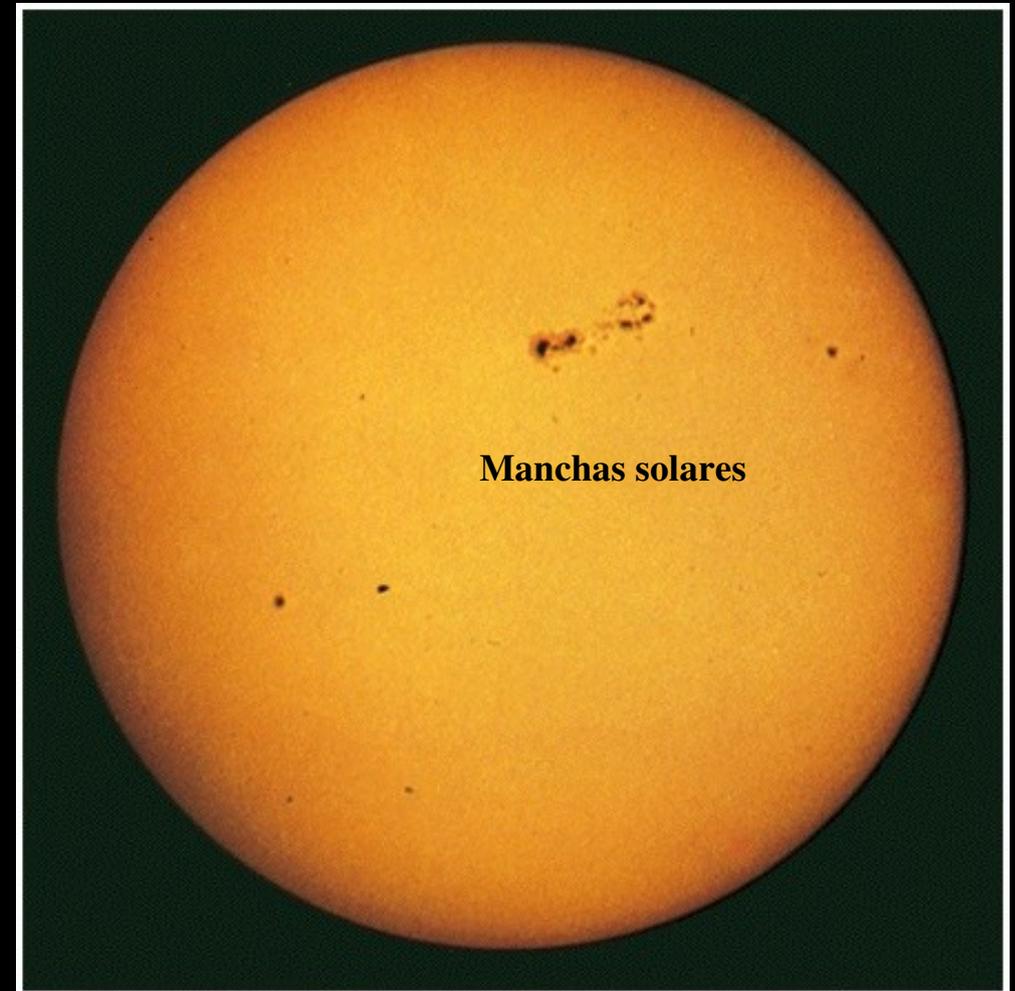
- **Cromosfera**
  - Visível durante os eclipses solares,
  - Tamanho: estende-se por 10 mil km acima da fotosfera T : cresce da base para o topo, tendo um valor médio de 15 mil K.
- **Coroa**: acima da cromosfera
  - Também visível durante os eclipses totais. A coroa se estende por cerca de dois raios solares.

# *Fotosfera: 330 km de espessura e $T \sim 5785 K$*

É a região do Sol que observamos, de onde os fótons escapam

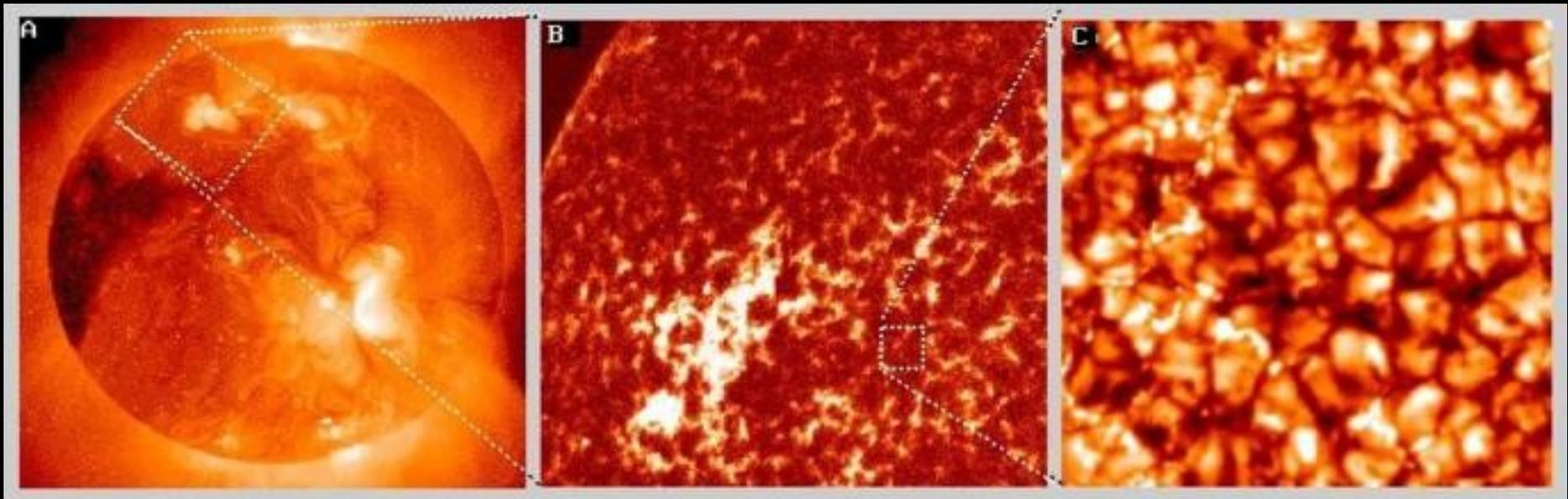
É delimitada por uma fronteira aparentemente bem marcada, que chamamos de limbo

Na fotosfera, observamos a presença de algumas regiões mais escuras, que chamamos de manchas solares

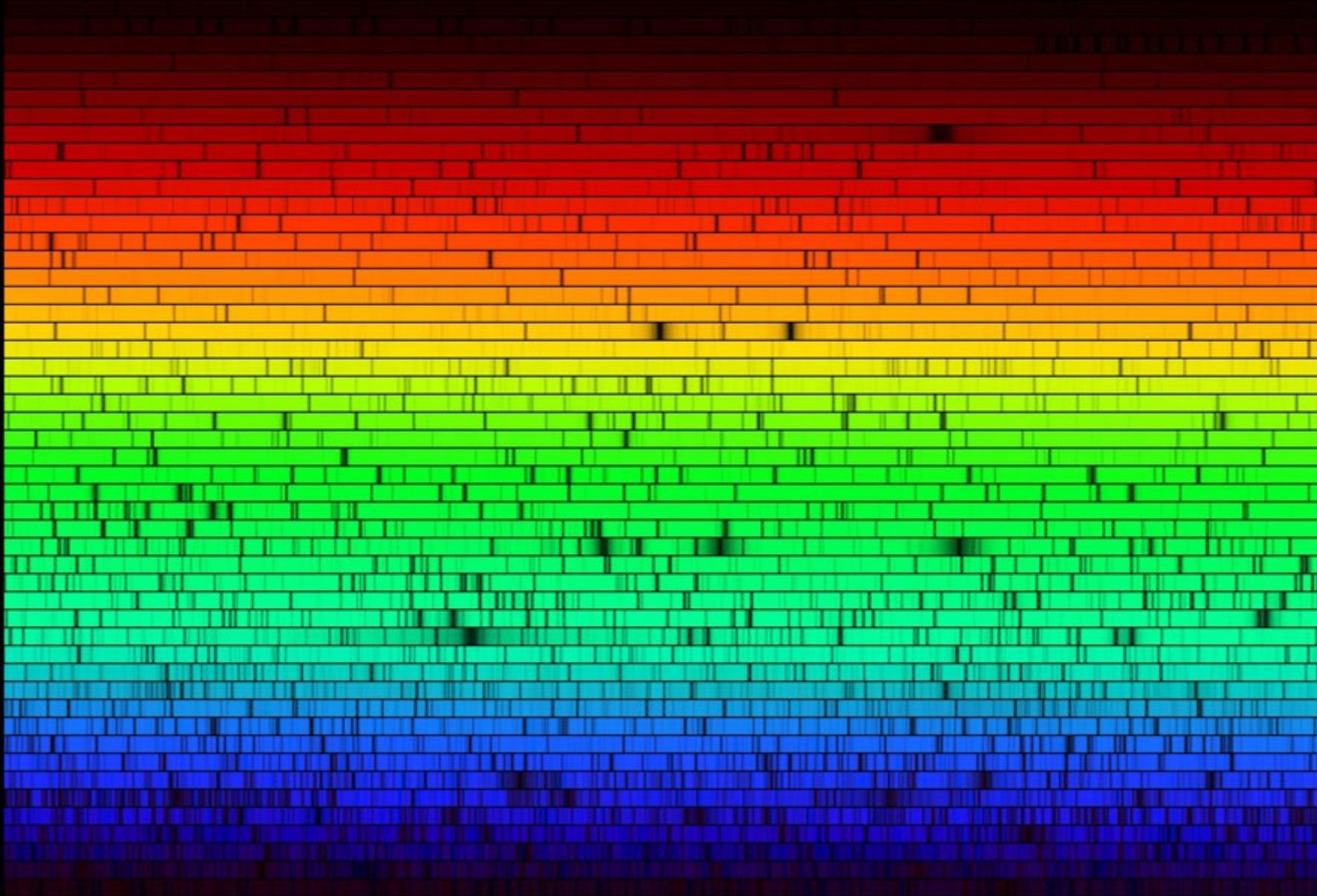


# A Fotosfera

- Aparência de um líquido em ebulição, cheia de bolhas, ou grânulos
- **Granulação fotosférica** (5.000 km de diâmetro e duram cerca de 10 min cada; topos das colunas convectivas de gás quente, que se forma na zona convectiva - abaixo da fotosfera)



# *Espectro Solar => Fotosfera*



# *Manchas solares*

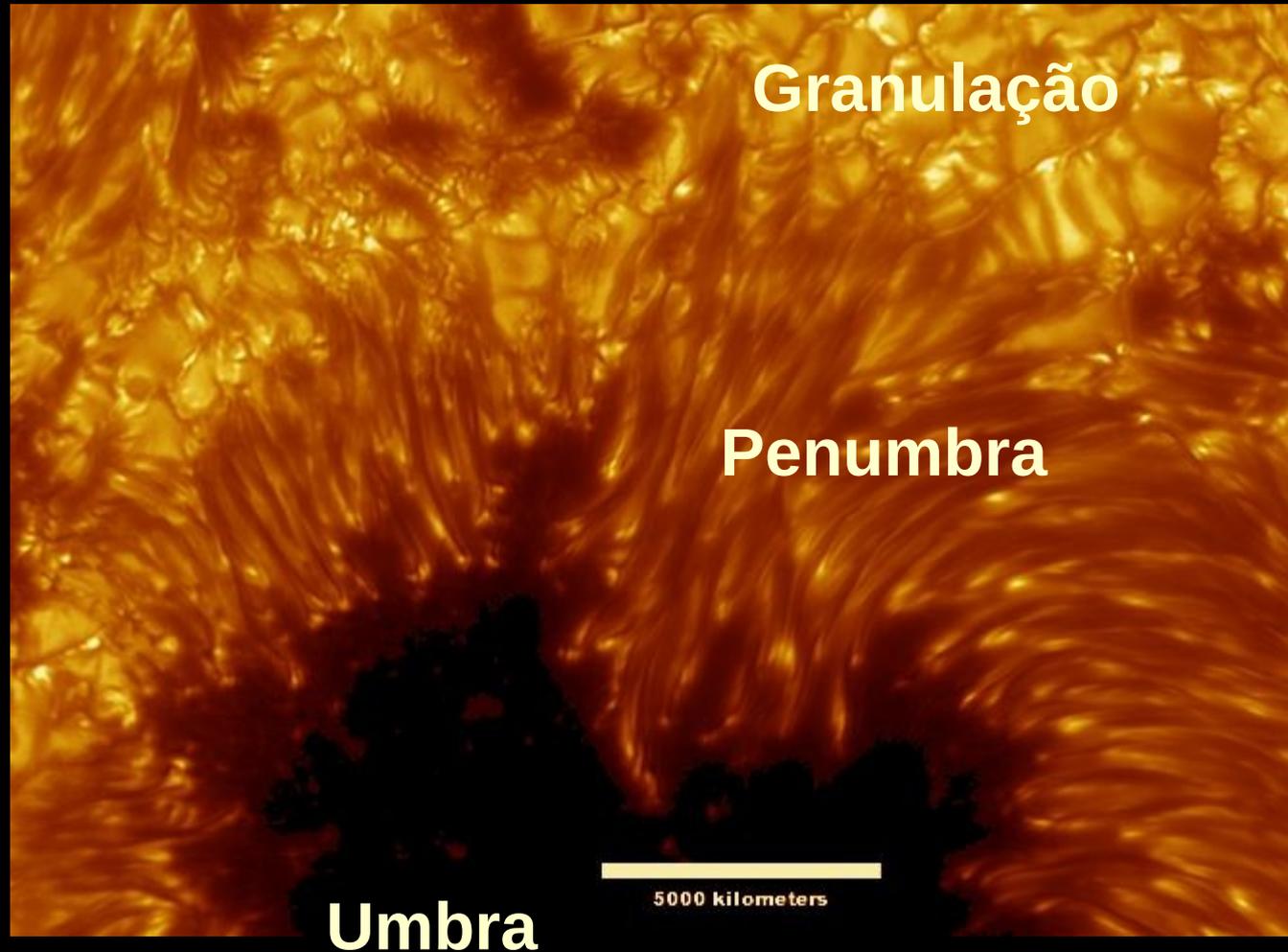


*As manchas solares tendem a se formar em grupos e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol.*

# Manchas solares

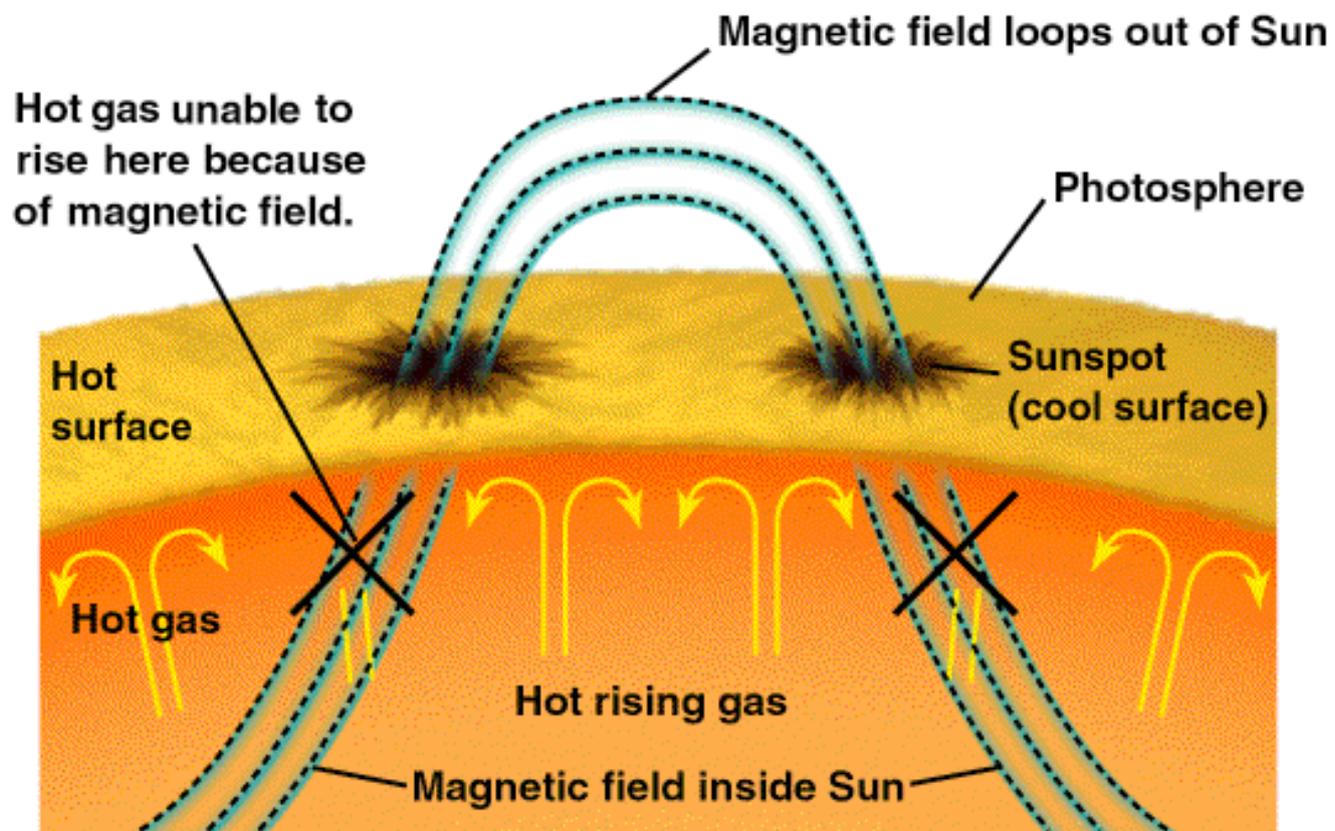
1 - Umbra, parte central mais escura (3800 K)

2 - Penumbra, região mais clara e com estrutura radial em torno da umbra.



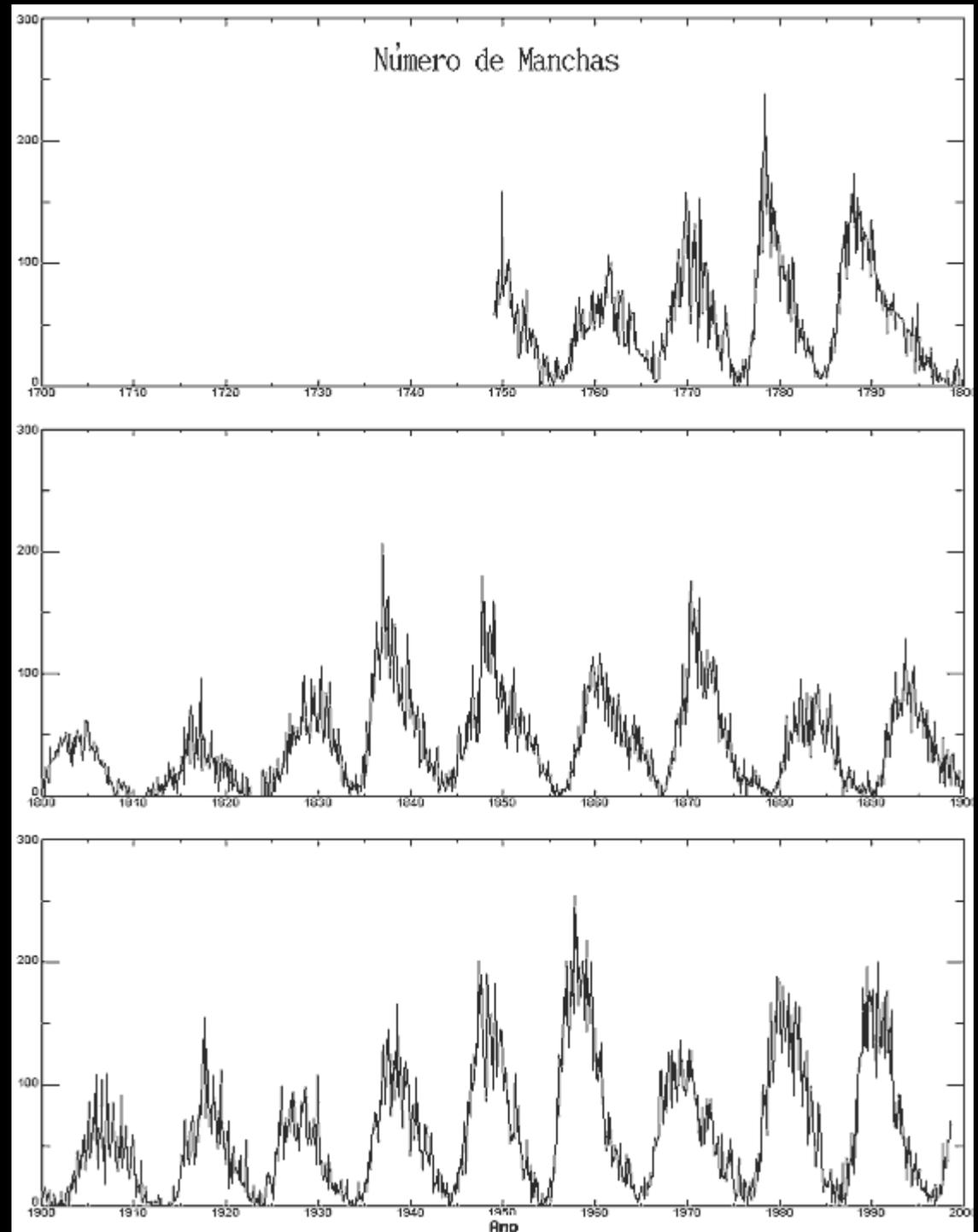
# Formação das manchas solares

## Why Sunspots are Dark



# *Ciclo de manchas*

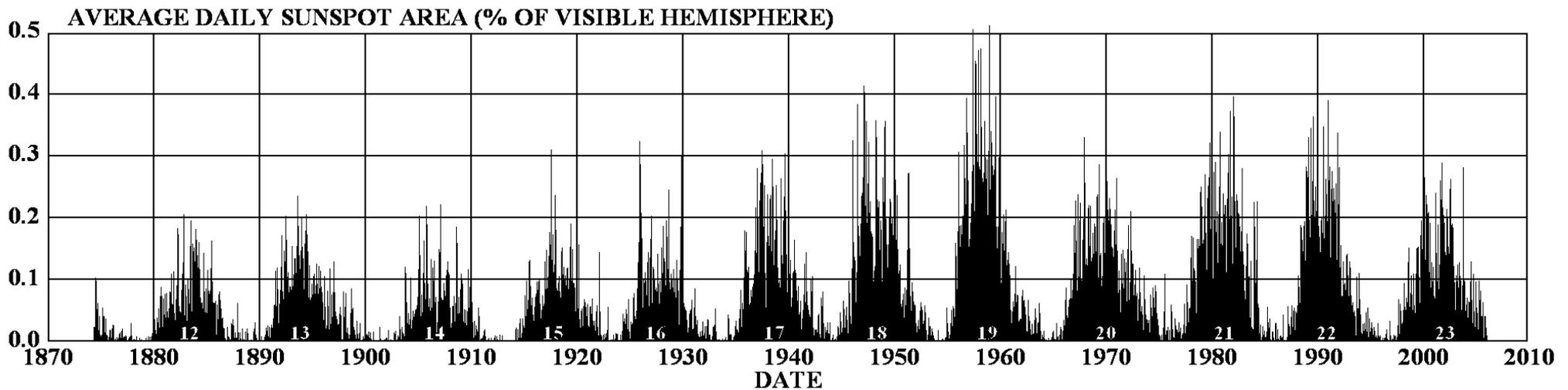
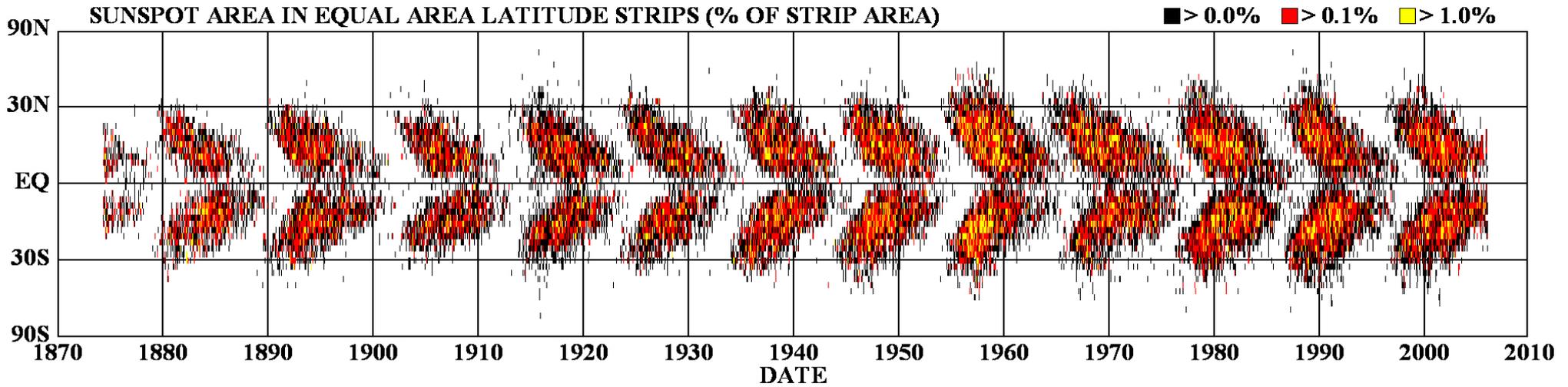
Descoberto em  
1843 pelo  
astrônomo  
amador alemão  
Samuel Heinrich  
Schwabe



# *Manchas solares*

- Registradas na China: 28 a.C.
  - Estudo científico começou com Galileo
  - Observadas (por projeção da imagem do Sol)
    - 1610: Thomas Harriot
    - 1611: Johannes; David Fabricius; Christoph Scheiner
  - *As manchas solares => ciclo de 11 anos em que o número de manchas varia entre máximos e mínimos*
- 
-

# DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



# *Ciclo Solar*

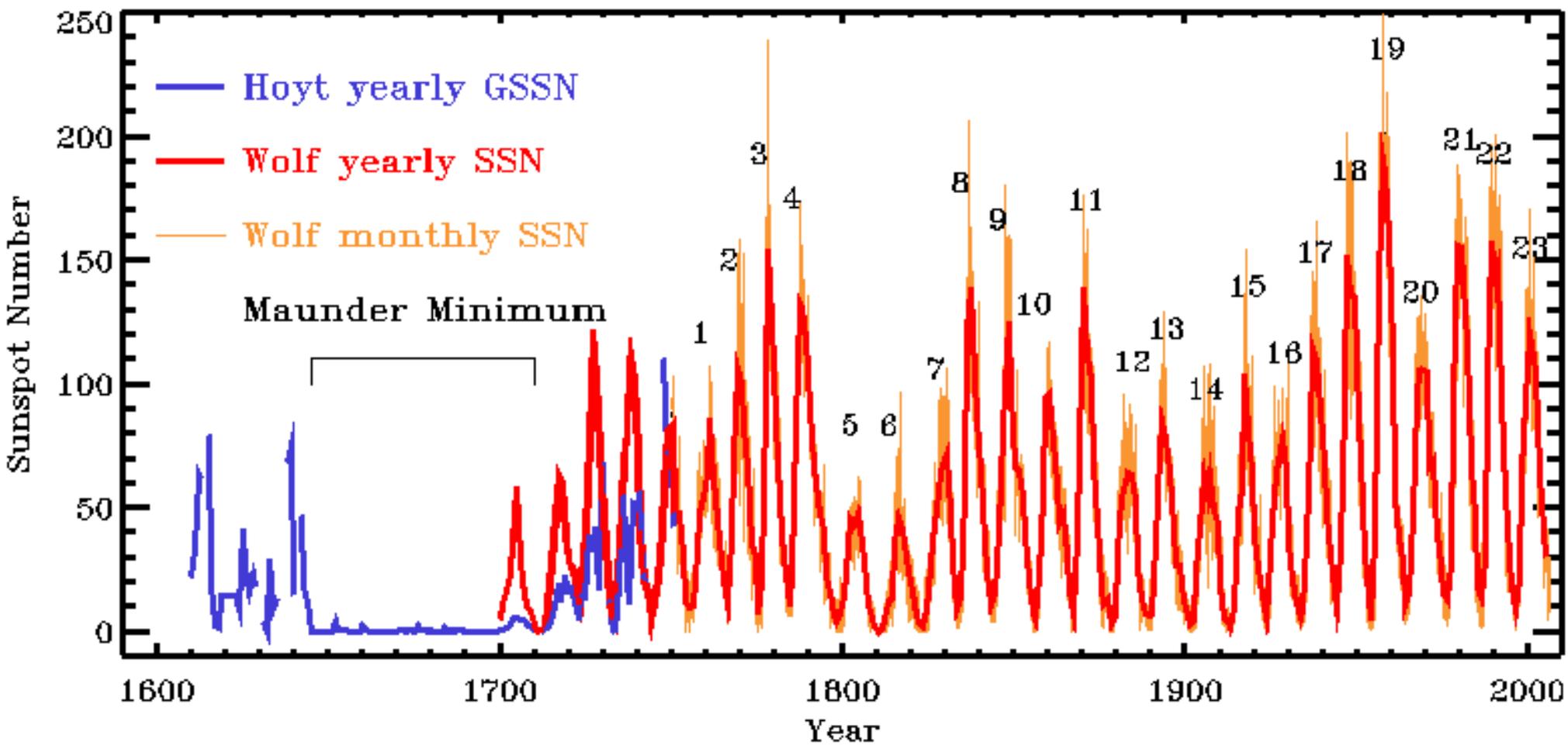
O ciclo solar constitui-se num período de aproximadamente 11 anos, durante o qual a atividade solar chega a um máximo e decai para níveis mínimos

Foi inicialmente descoberto através das contagens de manchas solares, porém pode ser constatado através de uma variedade de indicadores de atividade magnética (linhas de emissão, erupções, etc)

---

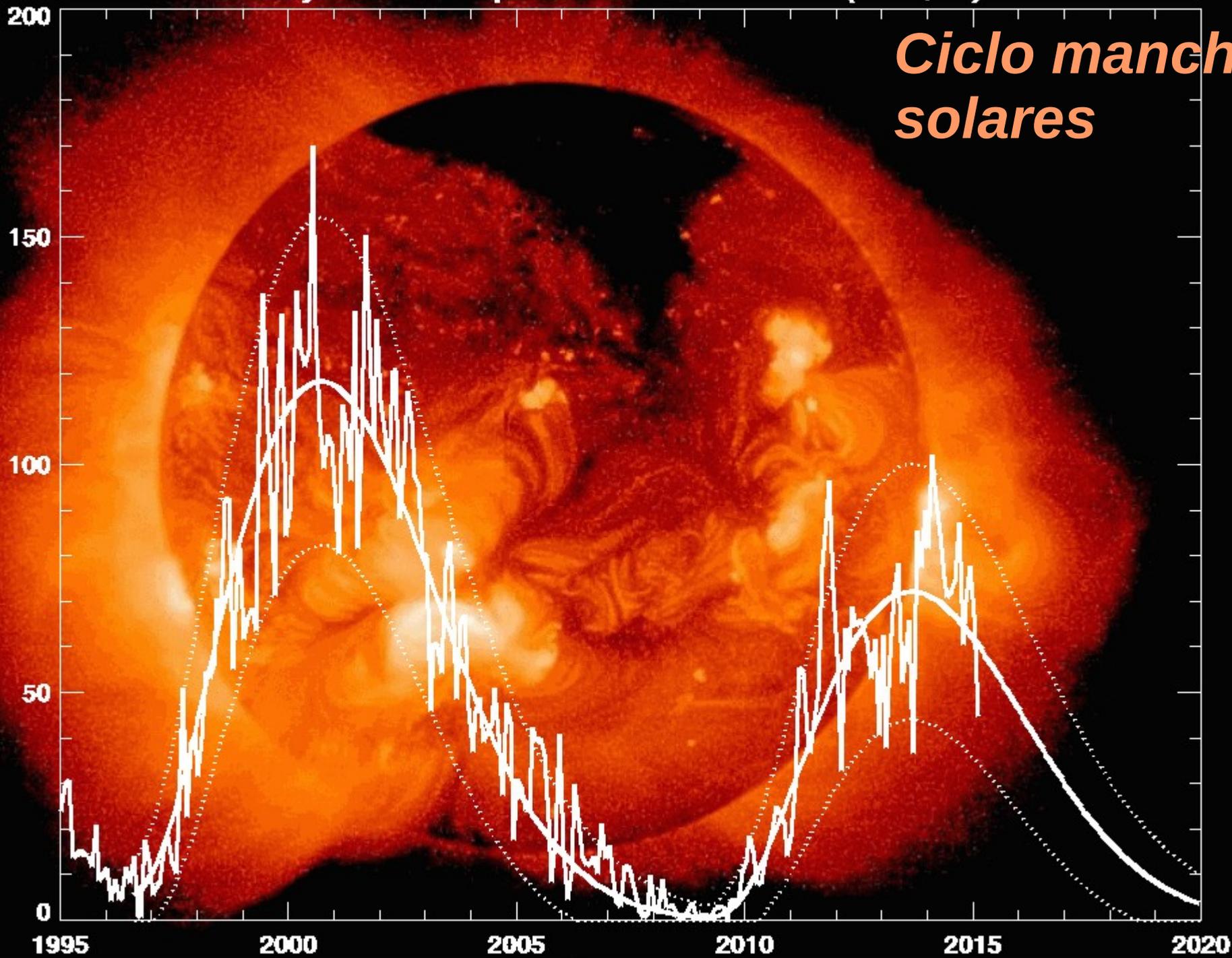
---

# Ciclo Solar



# Cycle 24 Sunspot Number Prediction (2015/03)

*Ciclo manchas  
solares*



Hathaway NASA/ARC

# Cromosfera

A cromosfera possui temperatura e localização intermediária entre aquelas da fotosfera e coroa.

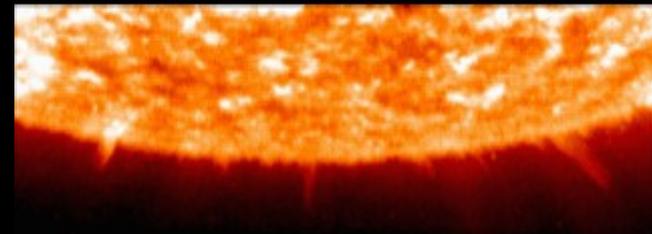
Mostra-se como uma região rosa-avermelhada vista pouco antes da totalidade de eclipses solares.

Sua temperatura vai de 6000 K a 50000 K.



# Cromosfera

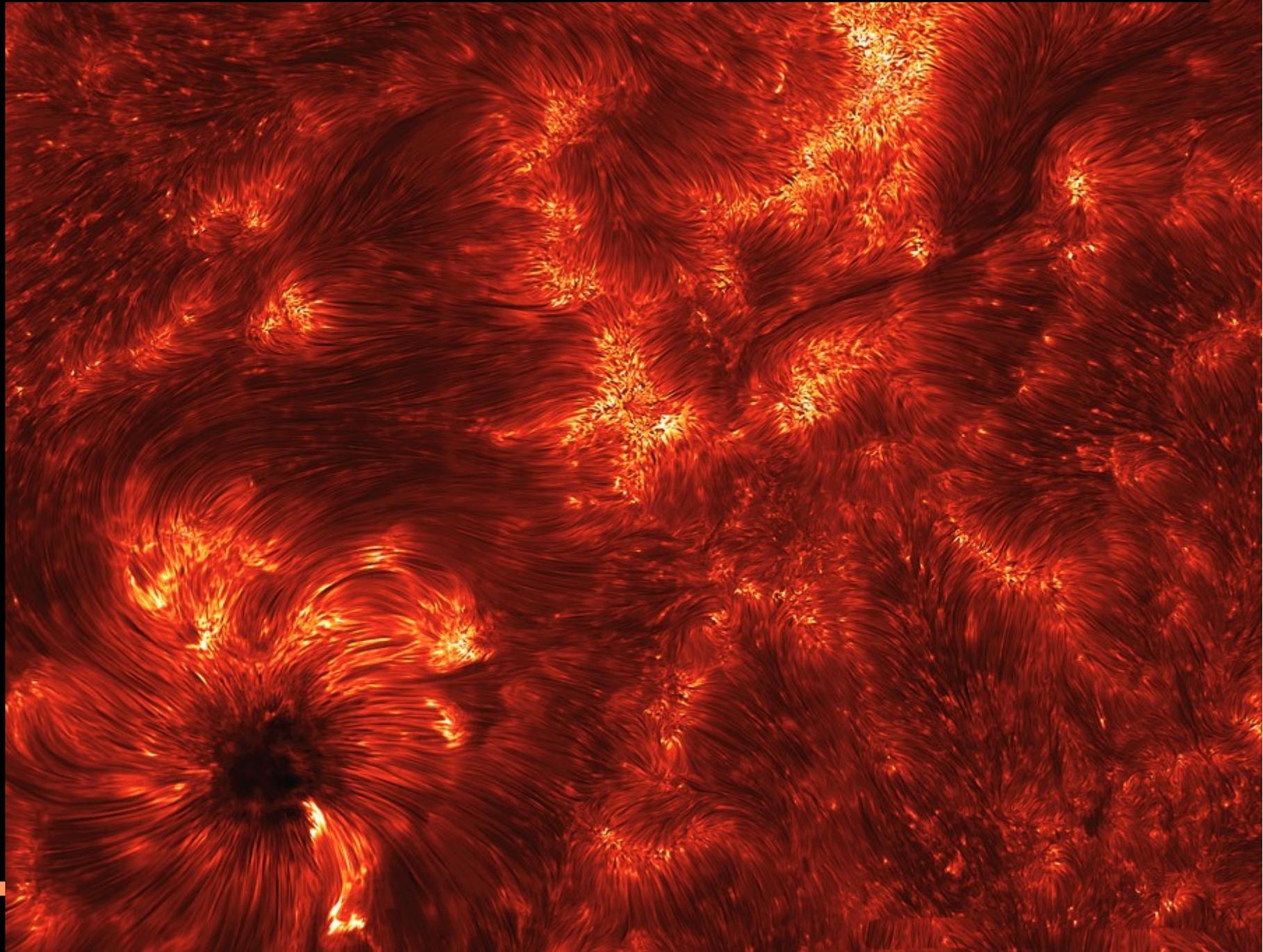
- **Espículas** (produzidas pelo campo magnético e energia mecânica na fotosfera), **aquecem** a cromosfera.
- Elas são aproximadamente cilíndricas, com cerca de 700 km de extensão e 7.000 km de altura, e duram entre 5 e 15 minutos.



2007/01/17 12:16:25 UT



*Espiculas; composição de imagens em em diferentes comprimentos de onda (National Solar Observatory (IBIS))*



- A **temperatura** na cromosfera: varia de 4300 K (base) a mais de 40.000 K (2500 km de altura)
- A **cromosfera** do Sol normalmente não é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera.
- Ela pode ser **observada**, no entanto, durante os **eclipses**, quando a Lua esconde o disco da fotosfera.

Foto do eclipse total de 4 de novembro de 1994



# Espectro da Cromosfera

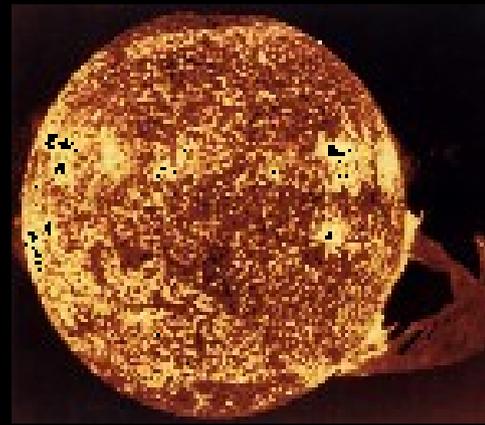
Durante um eclipse =>espectro da cromosfera

- Linhas brilhantes, que mostram que a cromosfera é constituída de gases quentes que emitem luz na forma de linhas de emissão.
  - *Essas linhas são difíceis de serem observadas contra a luz brilhante da fotosfera, por isso não as vemos no espectro solar normal.*
- **H $\alpha$  mais brilhante**

# A Coroa Solar



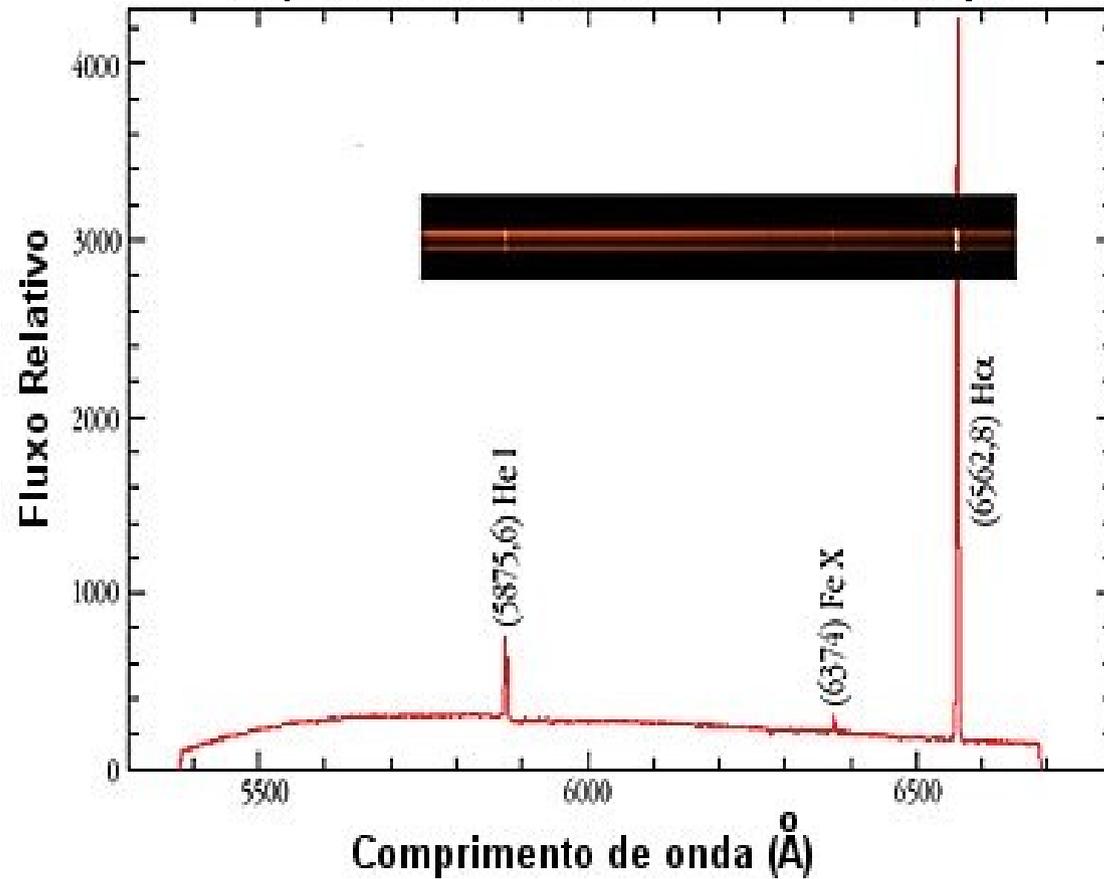
# Coroa



*Estação espacial Skylab da NASA (1973)*

- A cromosfera gradualmente se funde na **coroa**, a camada **mais externa e mais rarefeita** da atmosfera do Sol.
  - A coroa também é melhor observada durante eclipses, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível.
- 
-

Espectro do coroa solar durante um eclipse

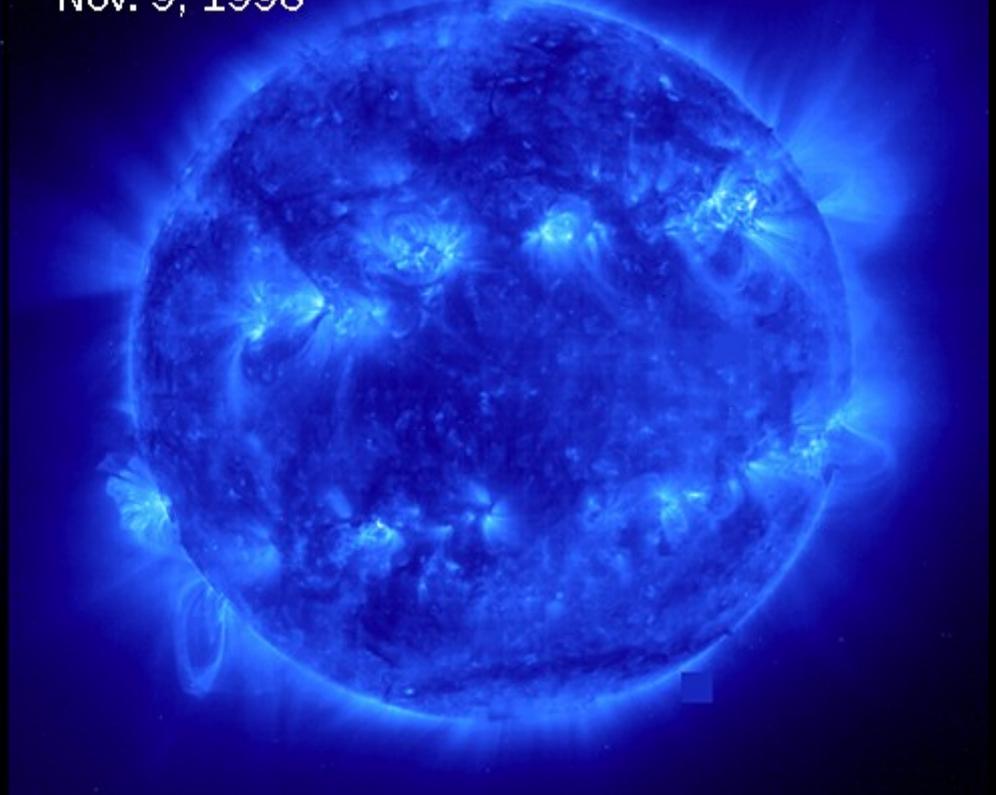


# *Coroa durante o máximo e mínimo solar*

Jan. 23, 1997

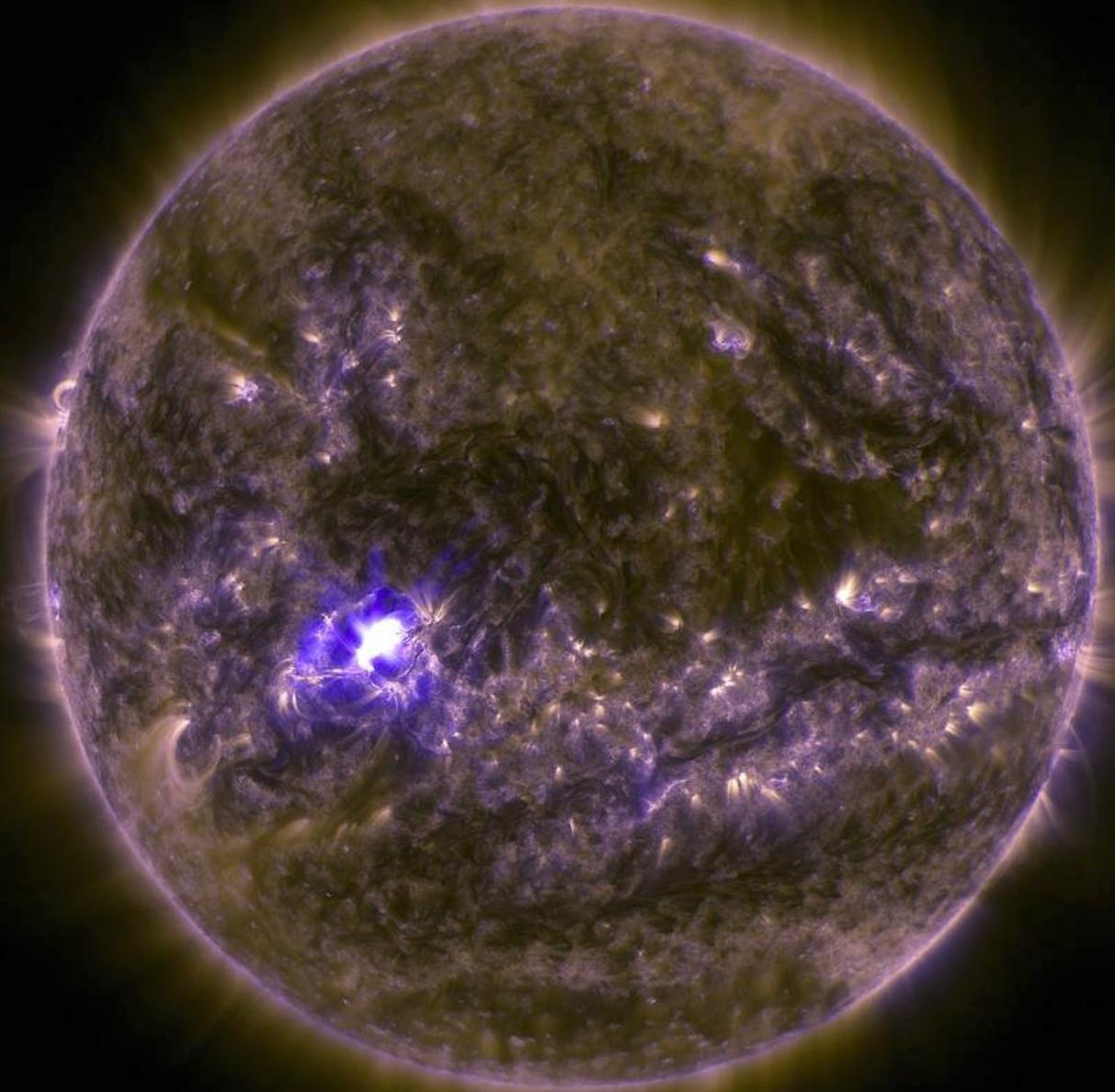


Nov. 9, 1998



## Sun Release X2.2-class Solar Flare

NASA's Solar Dynamics Observatory captured an image of a mid-level solar flare on March 11, 2015, seen as a bright flash of light on the left side of the sun. This image is a blend of two wavelengths of light -- 171 and 131 Angstroms -- typically colorized in gold and teal, respectively.



## ***Coroa: Fe, Ni, Ne, Ca altamente ionizados***



- Proeminencia: 588 000 km

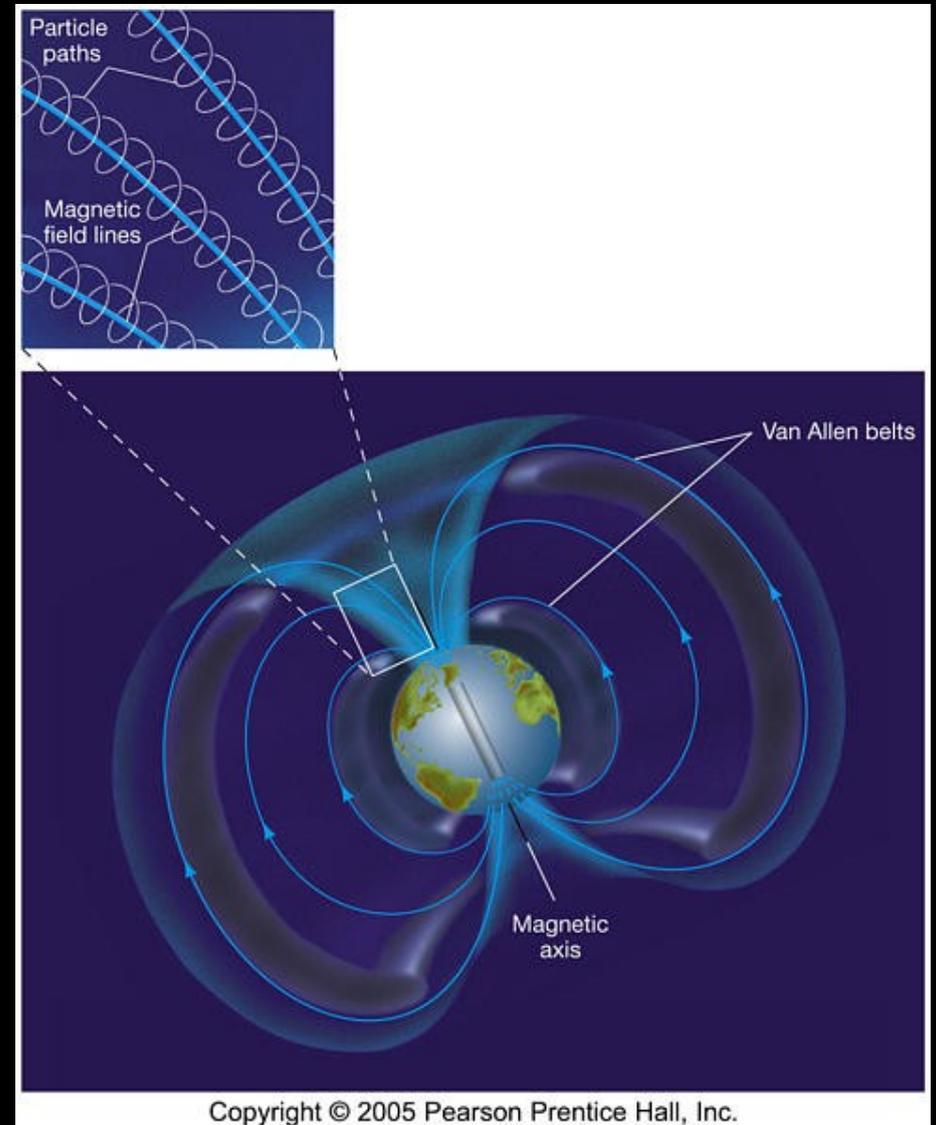


## Da Coroa:

- **Vento solar** (fluxo contínuo de partículas que acarretam uma perda de massa por parte do Sol em torno de  $10^{-13} M_{\text{sol}}$  por ano
  - O vento solar que atinge a Terra (aproximadamente 7 prótons/cm<sup>3</sup> viajando a cerca de 400 km/s) é capturado pelo campo magnético da Terra, formando o **cinturão de Van Allen**, na magnetosfera terrestre.
- 
-

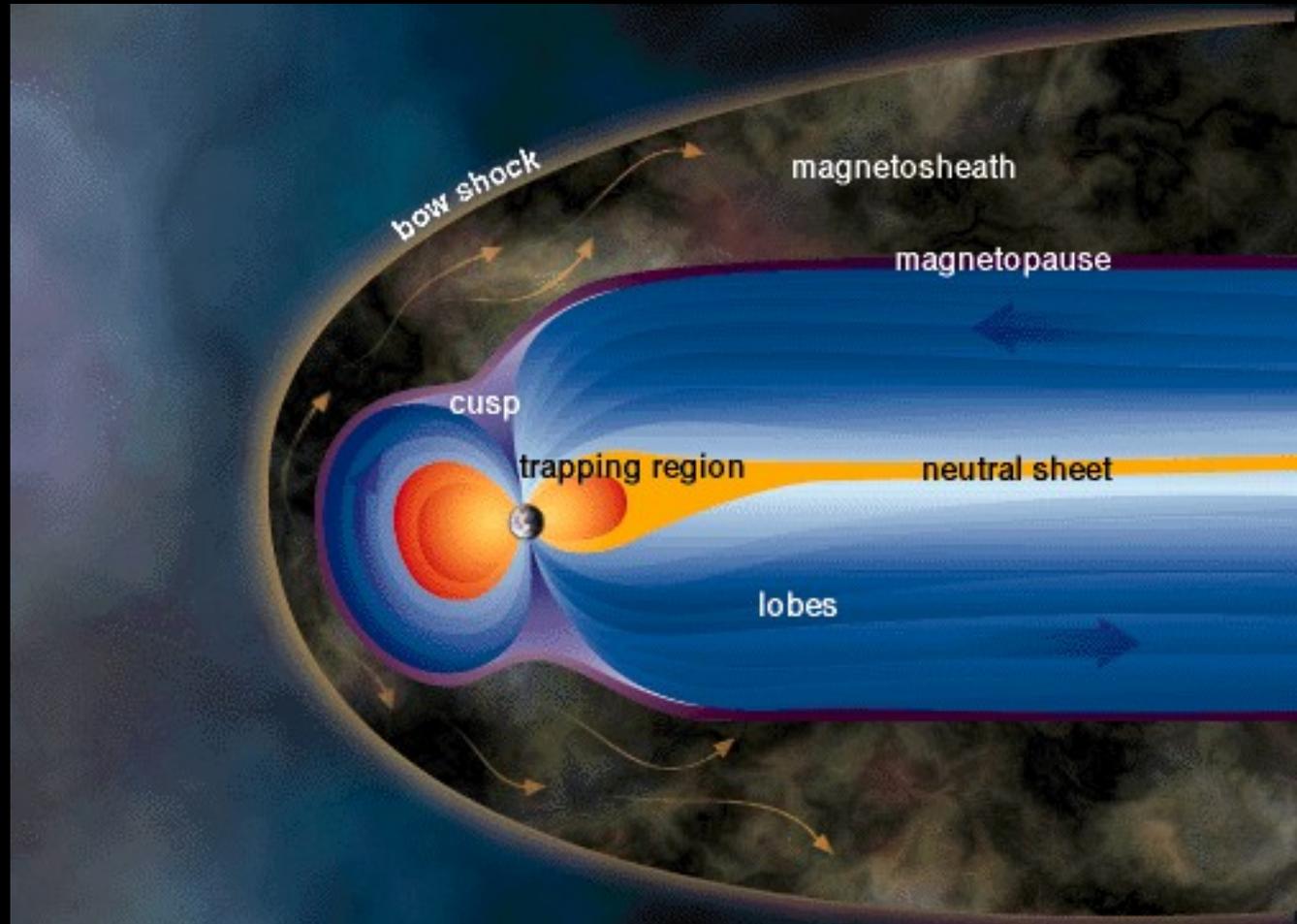
# *Interação do Vento Solar com o Campo Magnético Terrestre*

Cinturões de Van Allen são toros de partículas carregadas em torno da Terra, confinadas pelo campo magnético terrestre.



# Formação de Auroras

Quando o vento solar chega à Terra, algumas de suas partículas são capturadas pelo campo magnético terrestre, espiralando em direção aos pólos magnéticos. Quando elas se chocam com as partículas da atmosfera, causam o fenômeno das auroras.

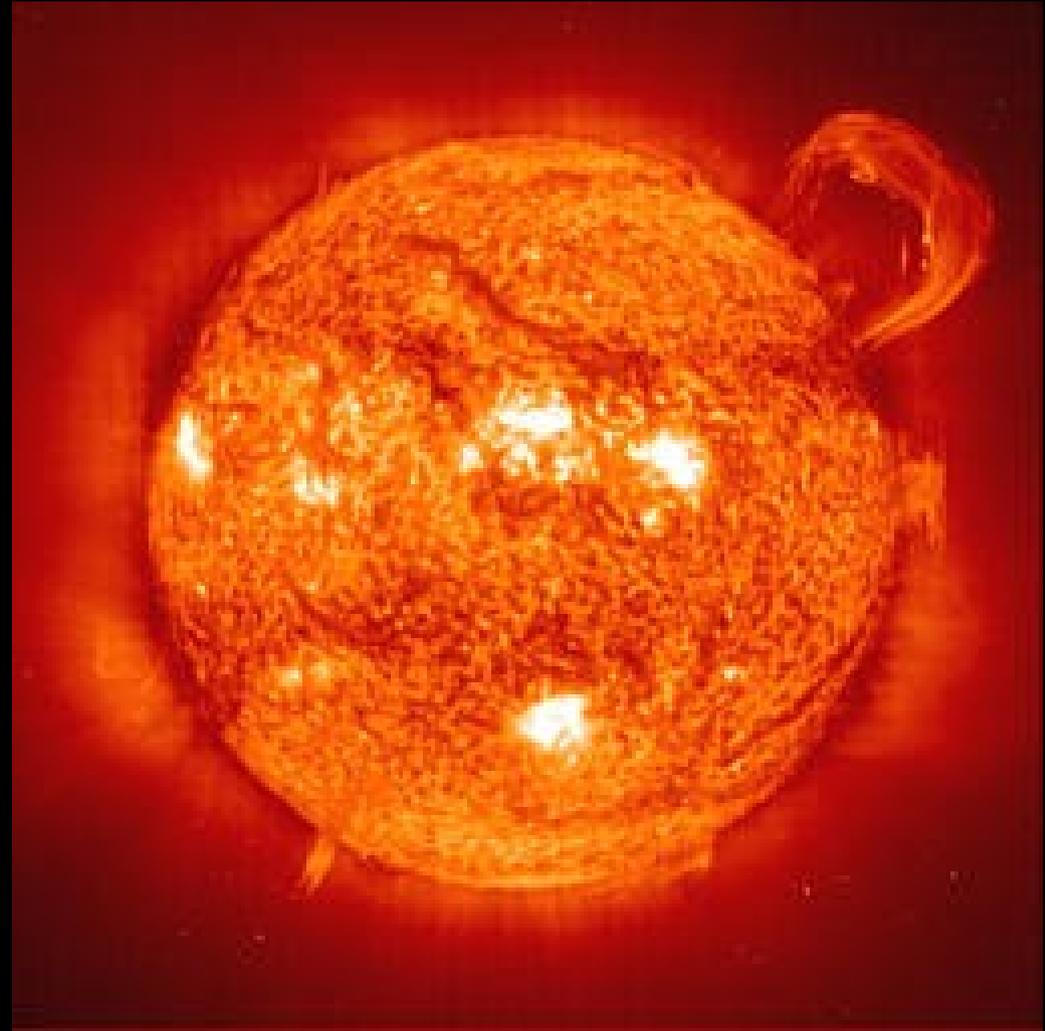


# Partículas entran pelos polos => AURORAS



# *Além do vento solar...*

- Grandes ejeções de massa associadas às *proeminências*
- => causam danos às redes elétricas e aos satélites
- Último ciclo: Fev 2012

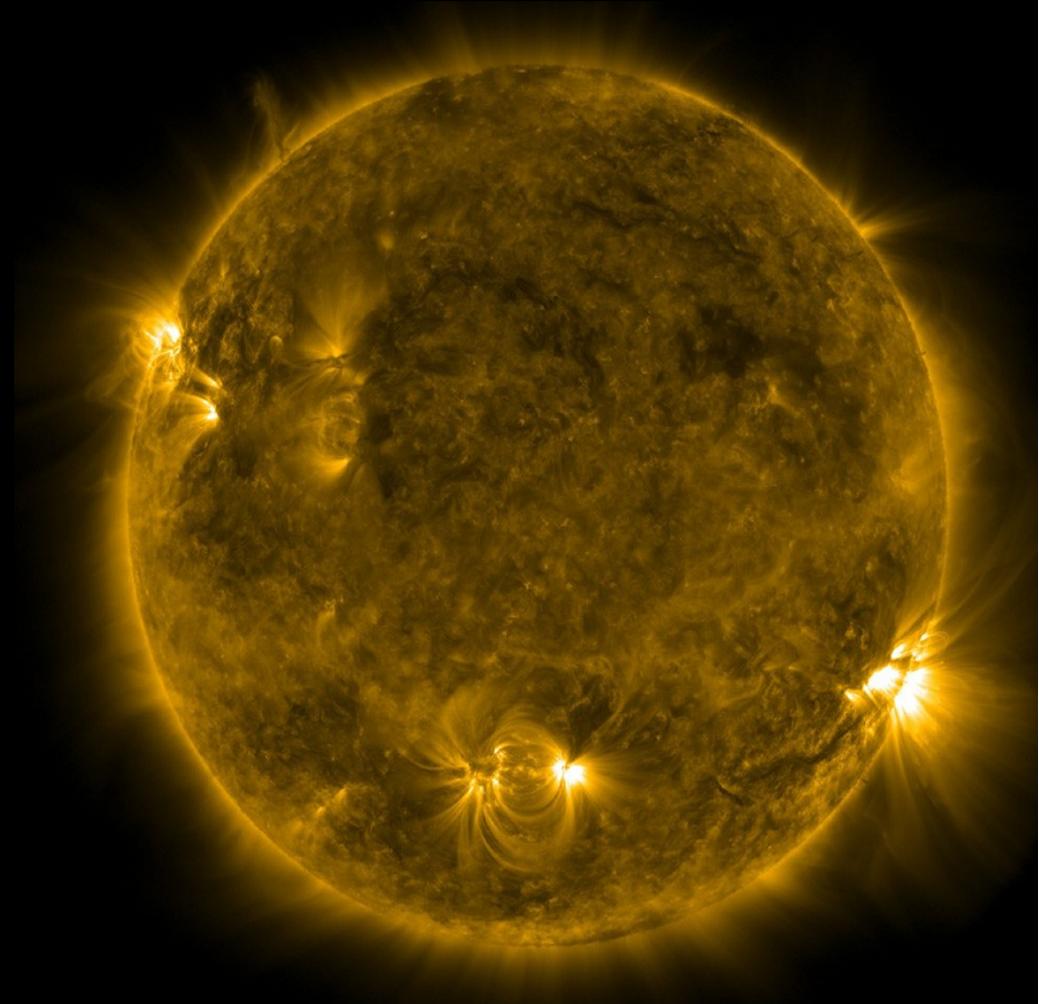
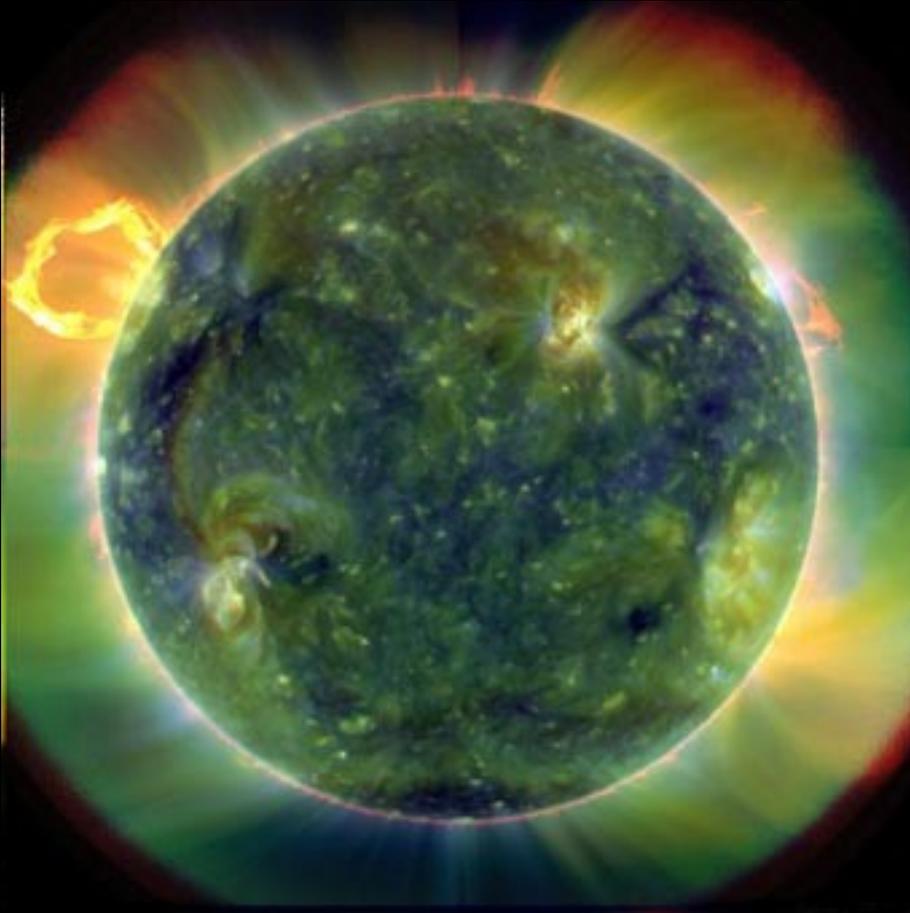


# *Escala da Terra*



Fe: extreme ultraviolet

# *Proeminencias*



# *Proeminencia*

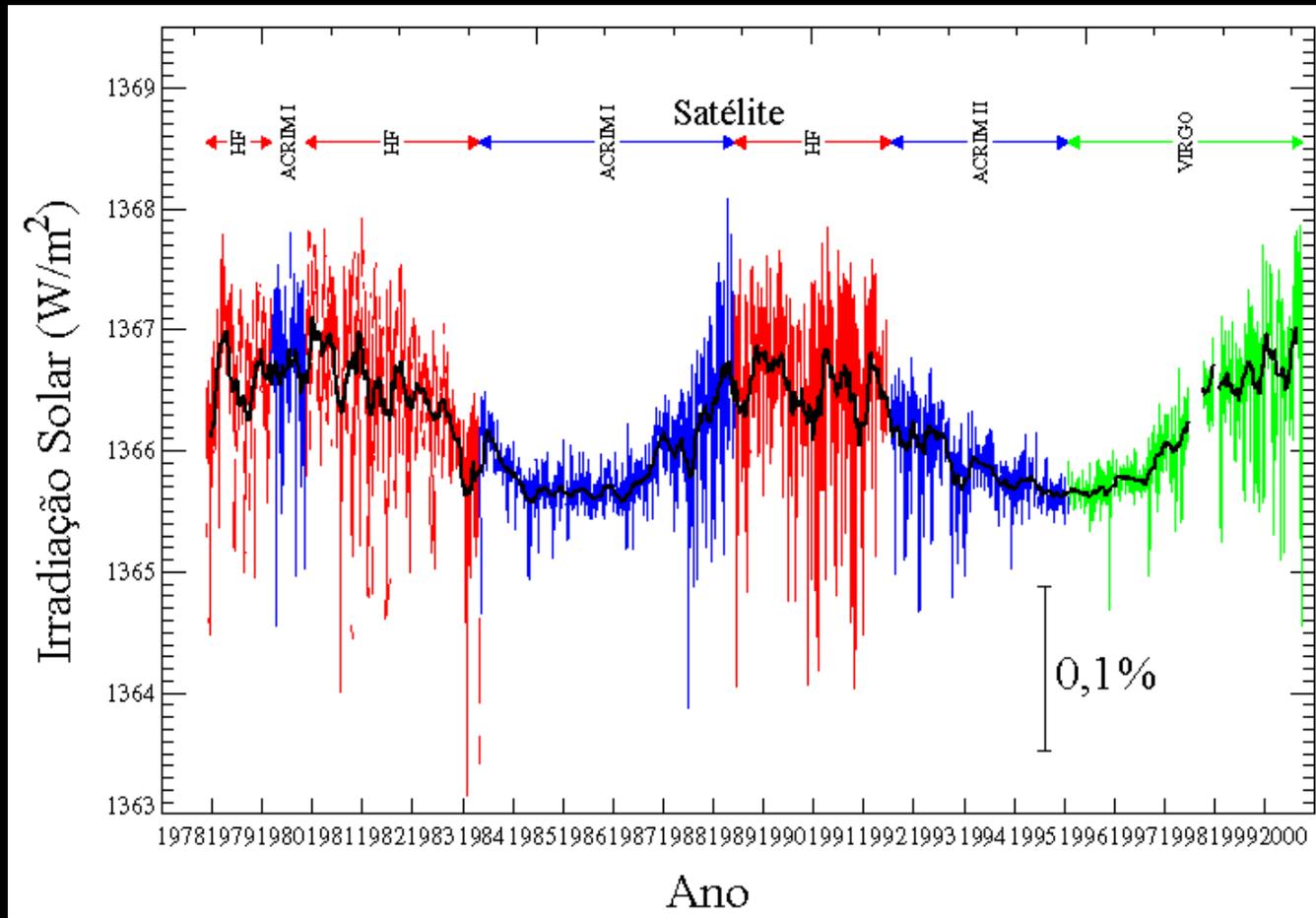


*Imagens do Observatório da Dinâmica Solar, da NASA, em 30 março e 8 de abril de 2010.*

---

---

# Variação da Irradiação Solar



Jean Richer e Giovanni Domenico Cassini (1673) determinaram a distância (paralaxe) de Marte e com esta estimaram a unidade astronômica

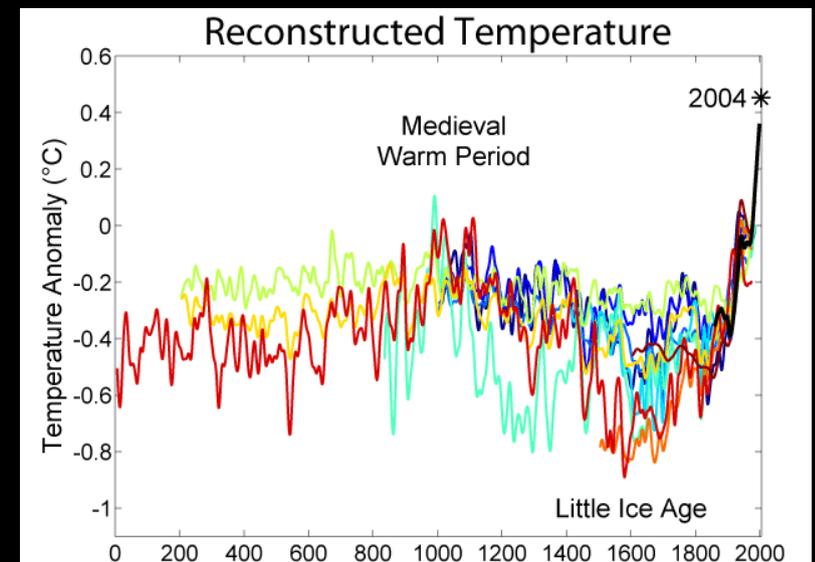
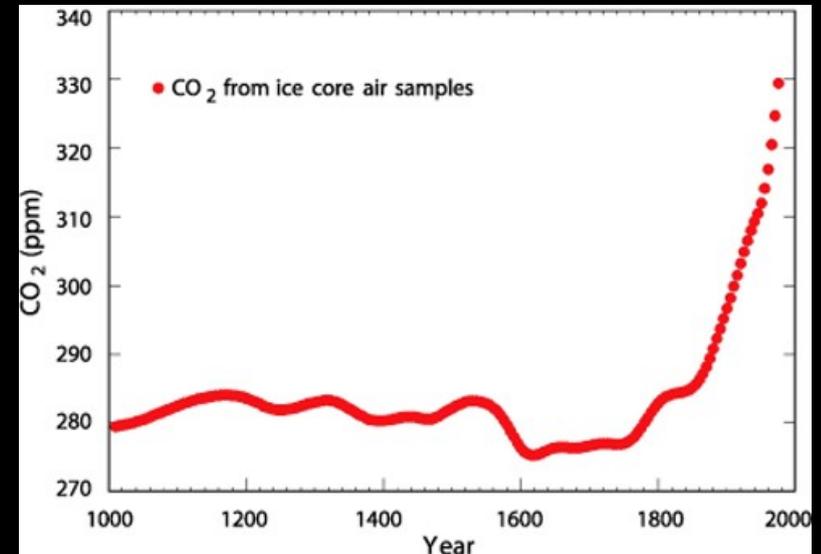
É possível determinar a sua luminosidade, que é a potência que ele produz.

$$L_{\text{sol}} = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s.}$$

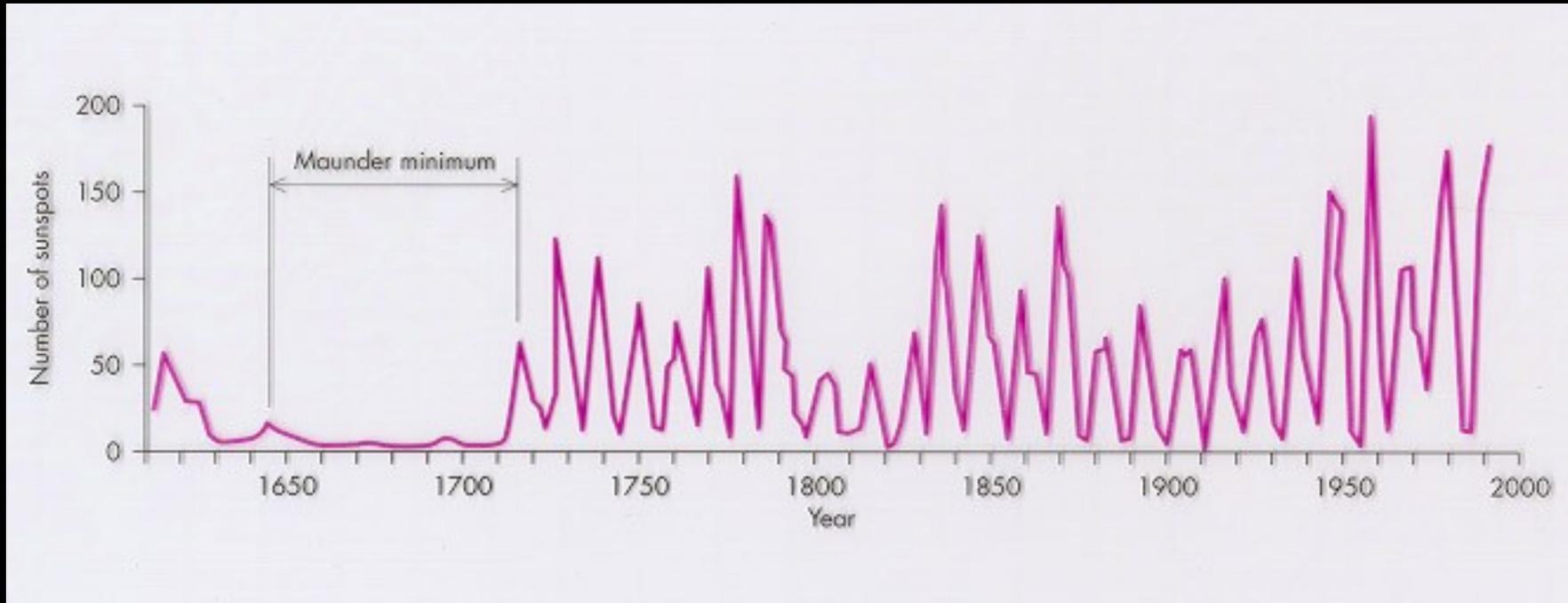
A constante solar varia, dependendo da época no ciclo de 11 anos, de 1364,55 a 1367,86 Watts/m2

# Aquecimento global

- O tema do aquecimento global está na moda já há umas 2-3 décadas.
- Explicação: aumento na taxa de emissão de gases (gado) de efeito estufa está fazendo com que a atmosfera do planeta retenha mais e mais calor.



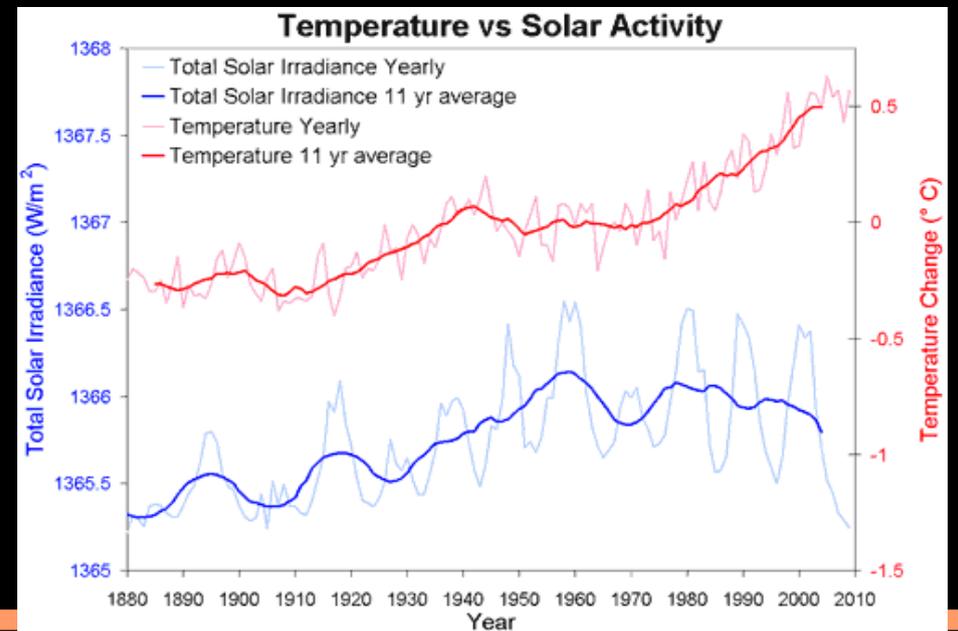
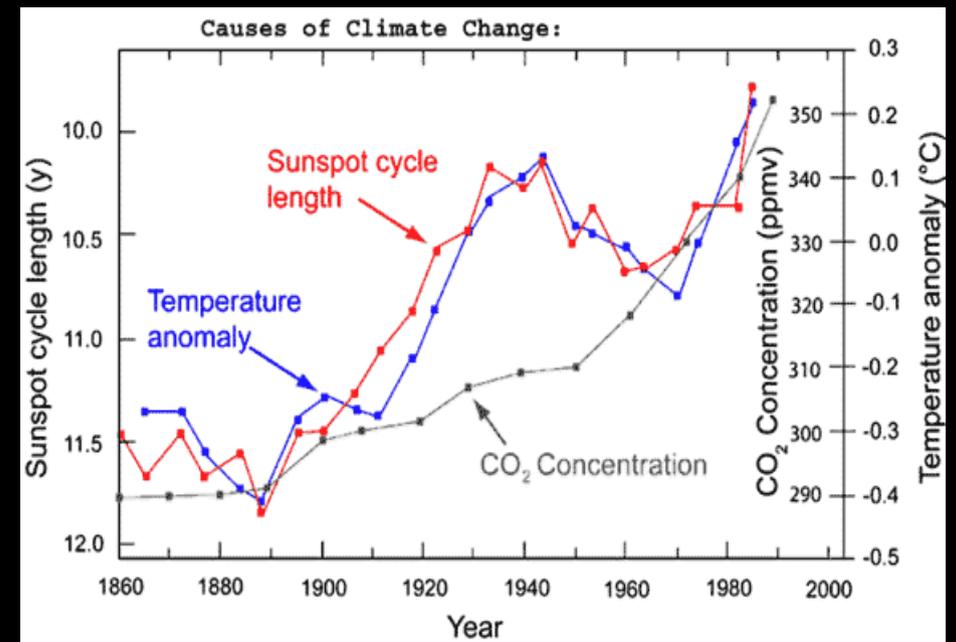
# *Mínimo de Maunder*



Entre 1650 e 1710, observou-se um período de atividade anormalmente calma no Sol. Este período, chamado de Mínimo de Maunder, coincidiu com um período de invernos rigorosos na Europa.

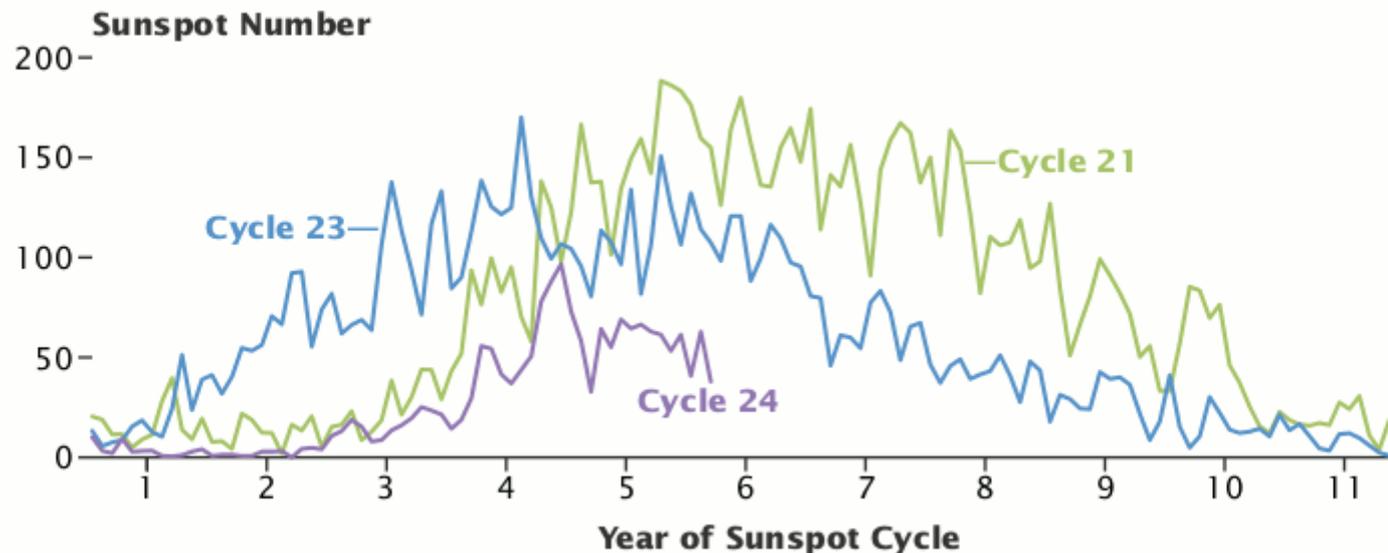
# Quem está com a razão?

- Ao lado, temos uma tentativa de relacionar o aumento da temperatura com o aumento na duração do ciclo solar.
- Todavia, se tentarmos relacionar a temperatura diretamente com a irradiância solar, teríamos outra conclusão...



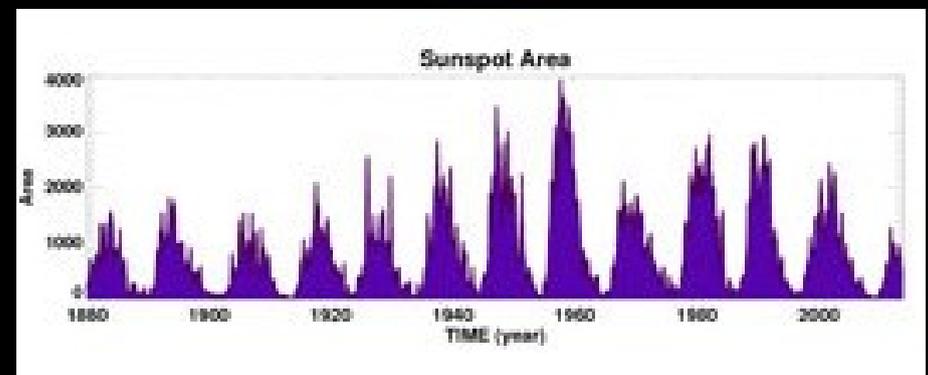
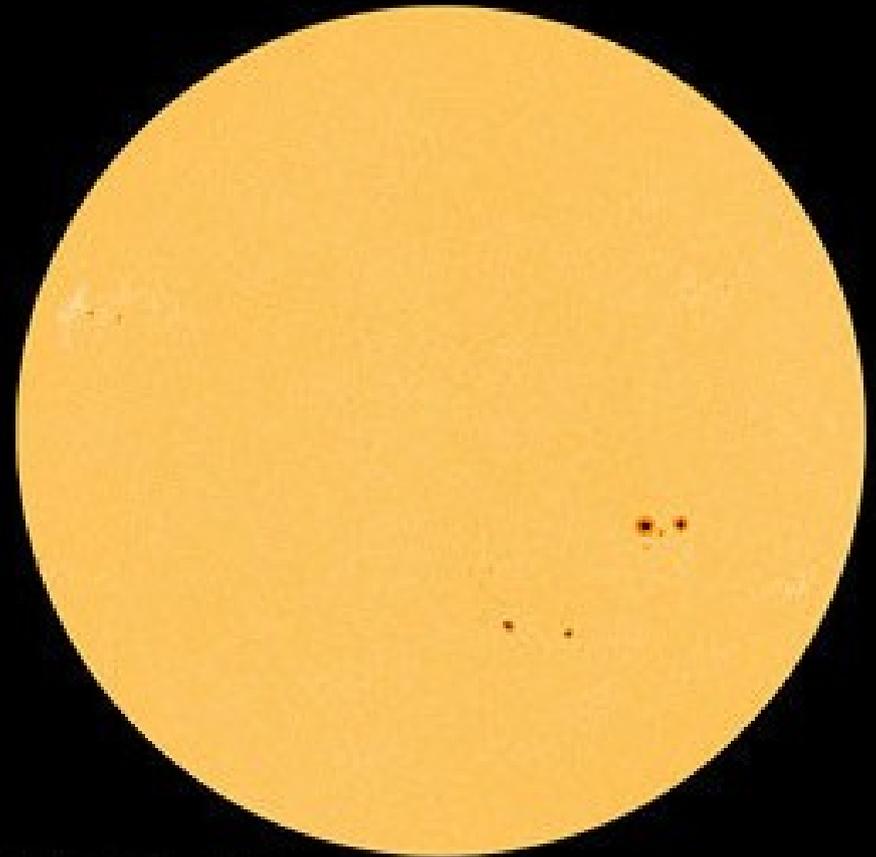
# *Sol calmo*

- Ciclos solar 21 (pico único), 23 (pico duplo) e atual (24)



# *Sol calmo*

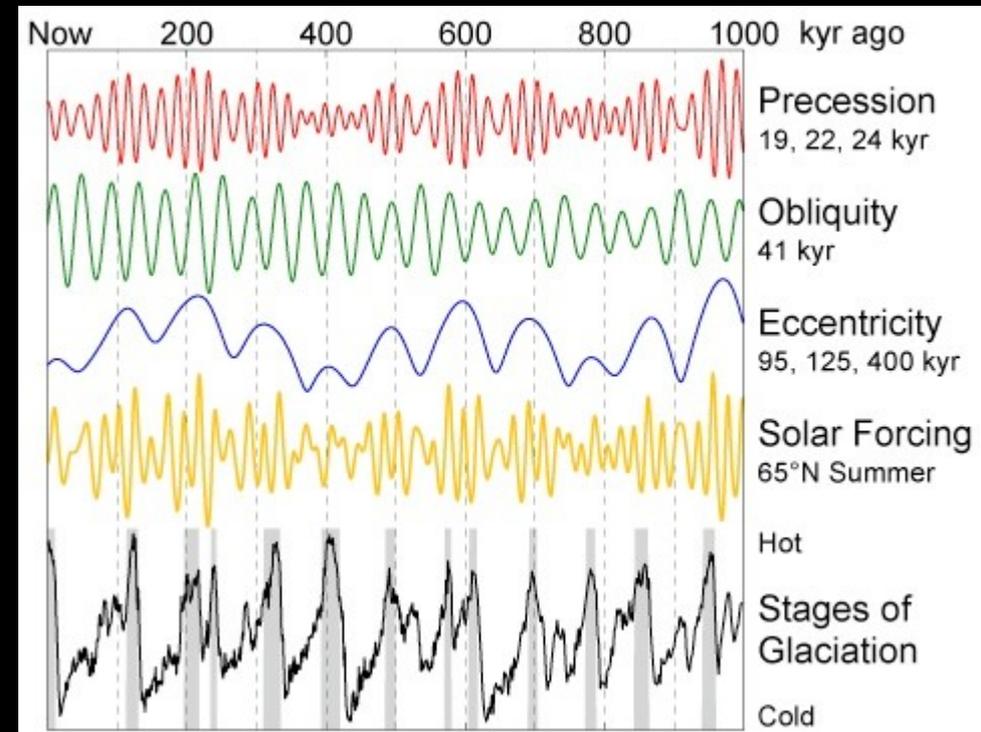
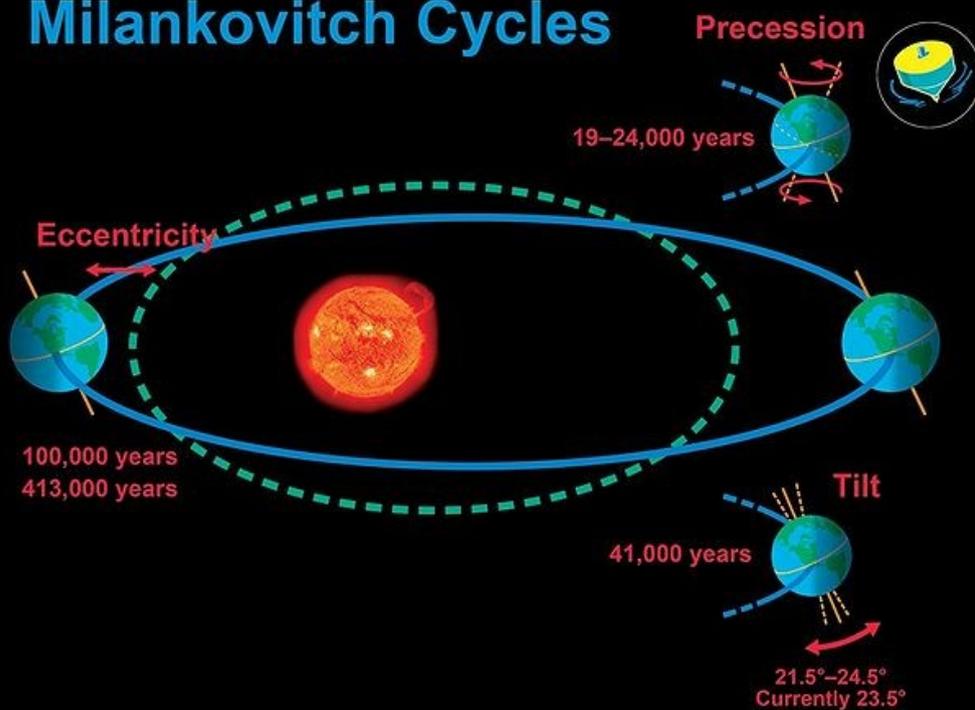
- Sol em 15 de outubro de 2013 (AIA – NASA Solar Dynamics Observatory); e ciclos solares (contagem desde o ciclo 12 em 1898)



# Ciclos de Milankovitch

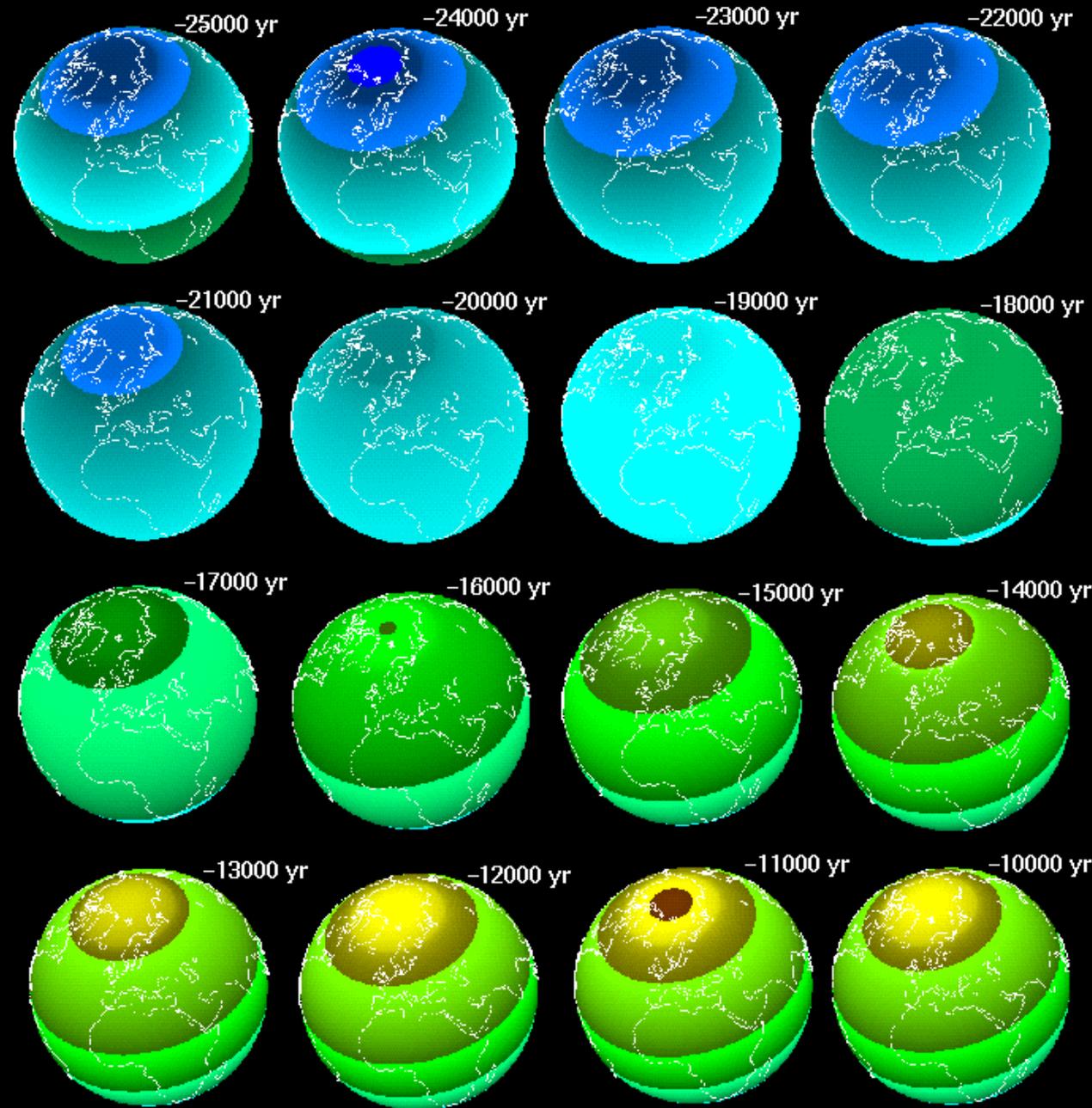
- Vários ciclos climáticos e biológicos parecem estar relacionados a ciclos astronômicos da órbita terrestre: os ciclos de Milankovitch.

## Milankovitch Cycles



# Ciclos de Milankovitch

- Pela Teoria de Milankovitch, estamos num período interglacial, que, em alguns milhares de anos levará a uma nova Era do Gelo.



Reproduction is permitted with proper attribution: ASU Depts of Geography & Computer Science, 1996

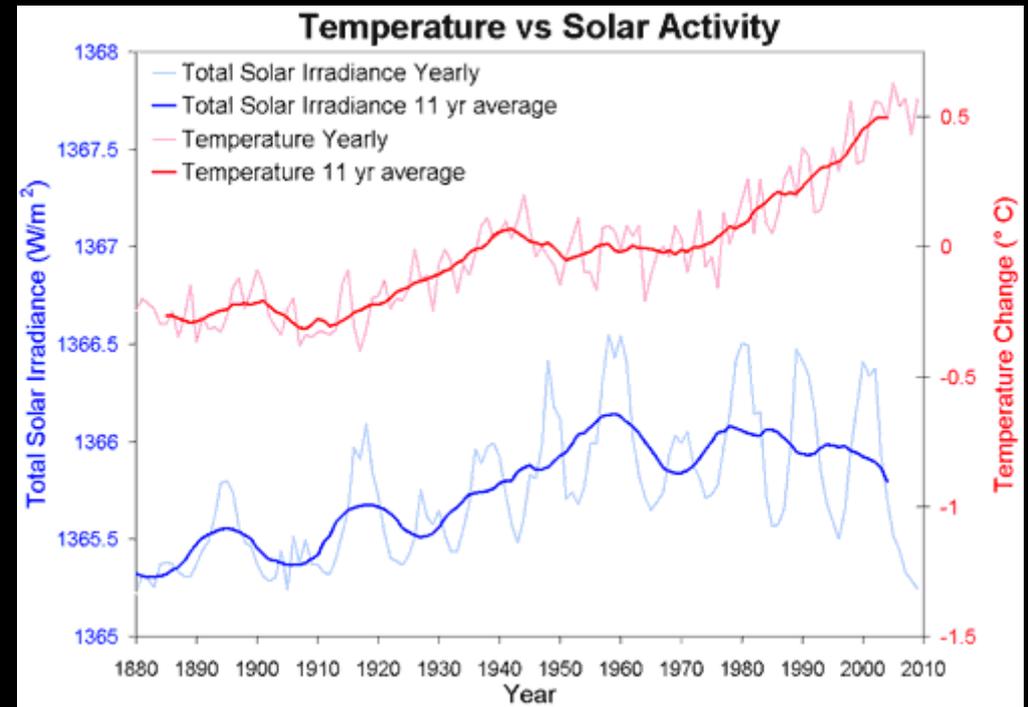
Daily Total Solar Radiation ( $\text{MJ m}^{-2}$ )  
June Solstice

Reproduction is permitted with proper attribution: ASU Depts of Geography & Computer Science, 1996



# *Ou Resfriamento Global ?*

- Estudos em 2011 sugerem que a atividade solar está menos intensa e que o início do próximo ciclo pode atrasar
- Alguns autores chegam a sugerir que o Sol poderá entrar, em breve, num novo Mínimo de Maunder
- Não está claro qual será o papel desse novo mínimo solar no aquecimento da atmosfera terrestre, devido ao contrabalanço produzido pelos gases de efeito estufa.

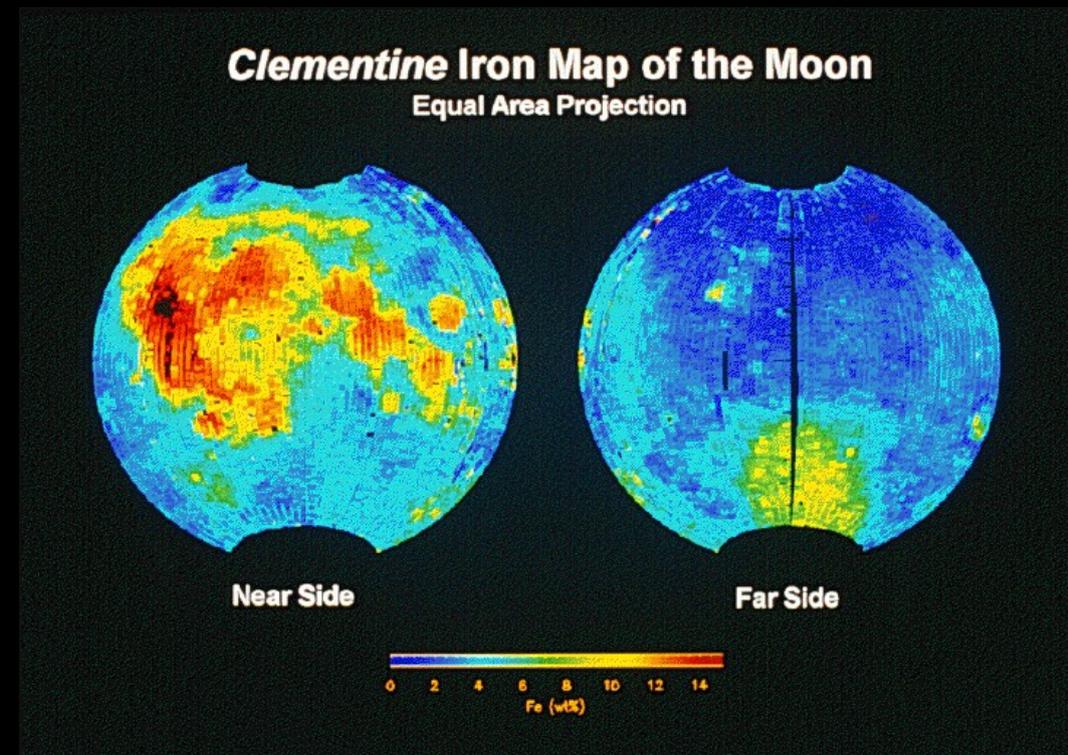
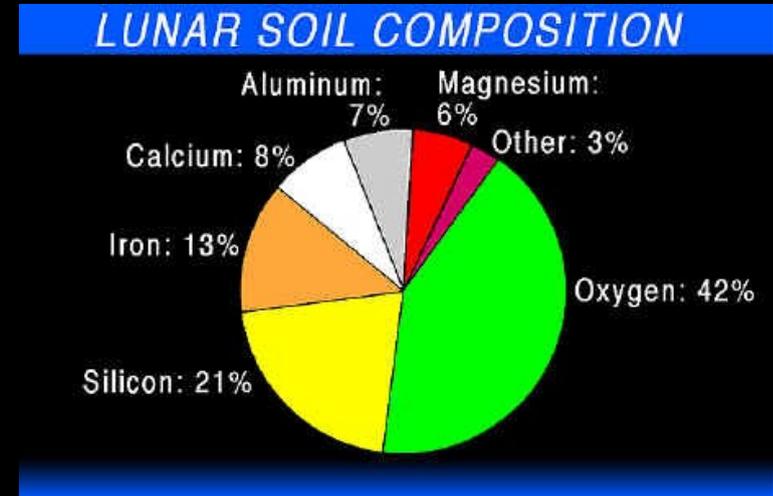


# Composição da Lua

A Lua possui uma composição um pouco semelhante à da Terra. Porém, possui poucos voláteis, incluindo água.

Os mares lunares são mais ricos em Ferro e Titânio do que os planaltos.

A sonda Clementine encontrou evidências da existência de gelo em crateras profundas no pólo sul lunar. Este gelo possivelmente proveio de cometas.



# Origem da Lua

A origem da Lua provavelmente envolveu uma colisão entre a Prototerra e algum planetésimo de grandes proporções, por causa dos seguintes fatos:

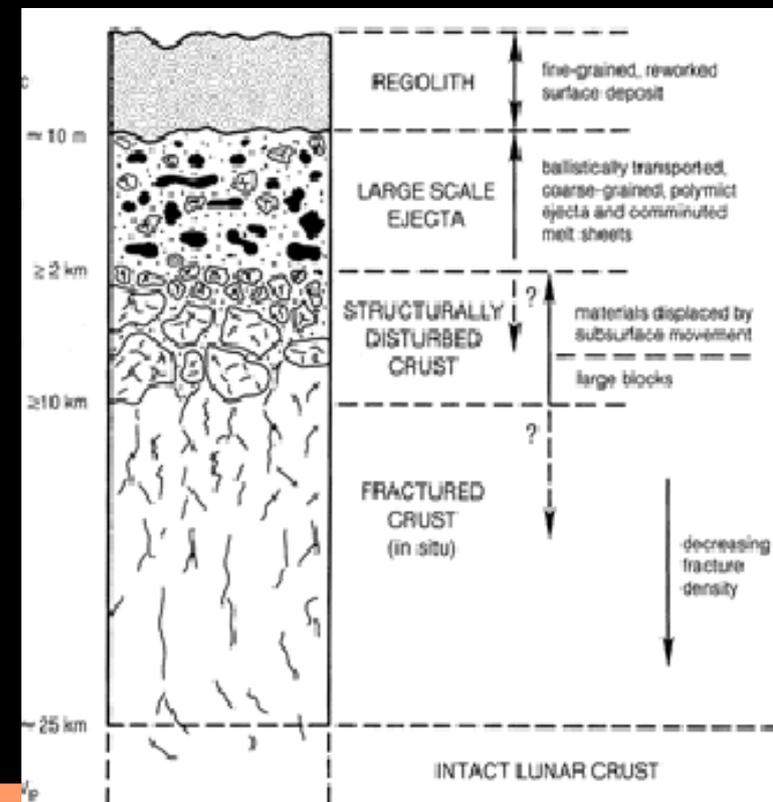
- 1) Planetas terrestres não formaram discos circumplanetários substanciais.
  - 2) A razão de massa Lua-Terra excede a de qualquer outro satélite-planeta, exceto Caronte-Plutão.
  - 3) A Lua possui uma densidade baixa e, ainda assim, poucos voláteis. Sua composição é similar a da crosta terrestre desprovida de voláteis.
  - 4) A Lua não possui um caroço denso. De modo geral, é deficitária em metais pesados.
  - 5) A Lua possui razão isotópica  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  similar a da Terra.
- 
-



SCIENCEPHOTOLIBRARY

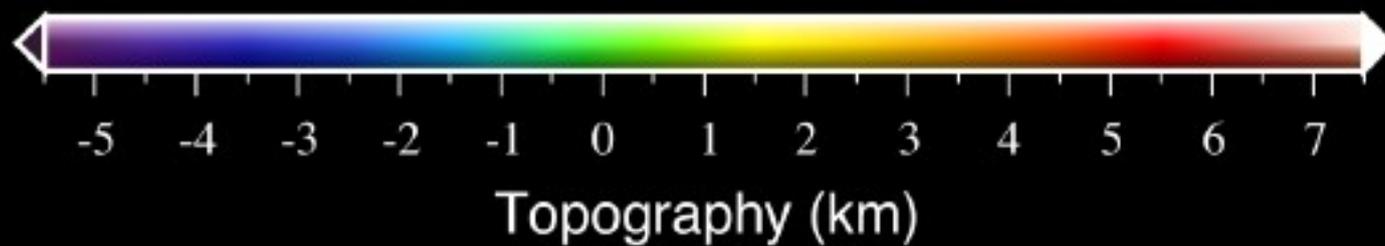
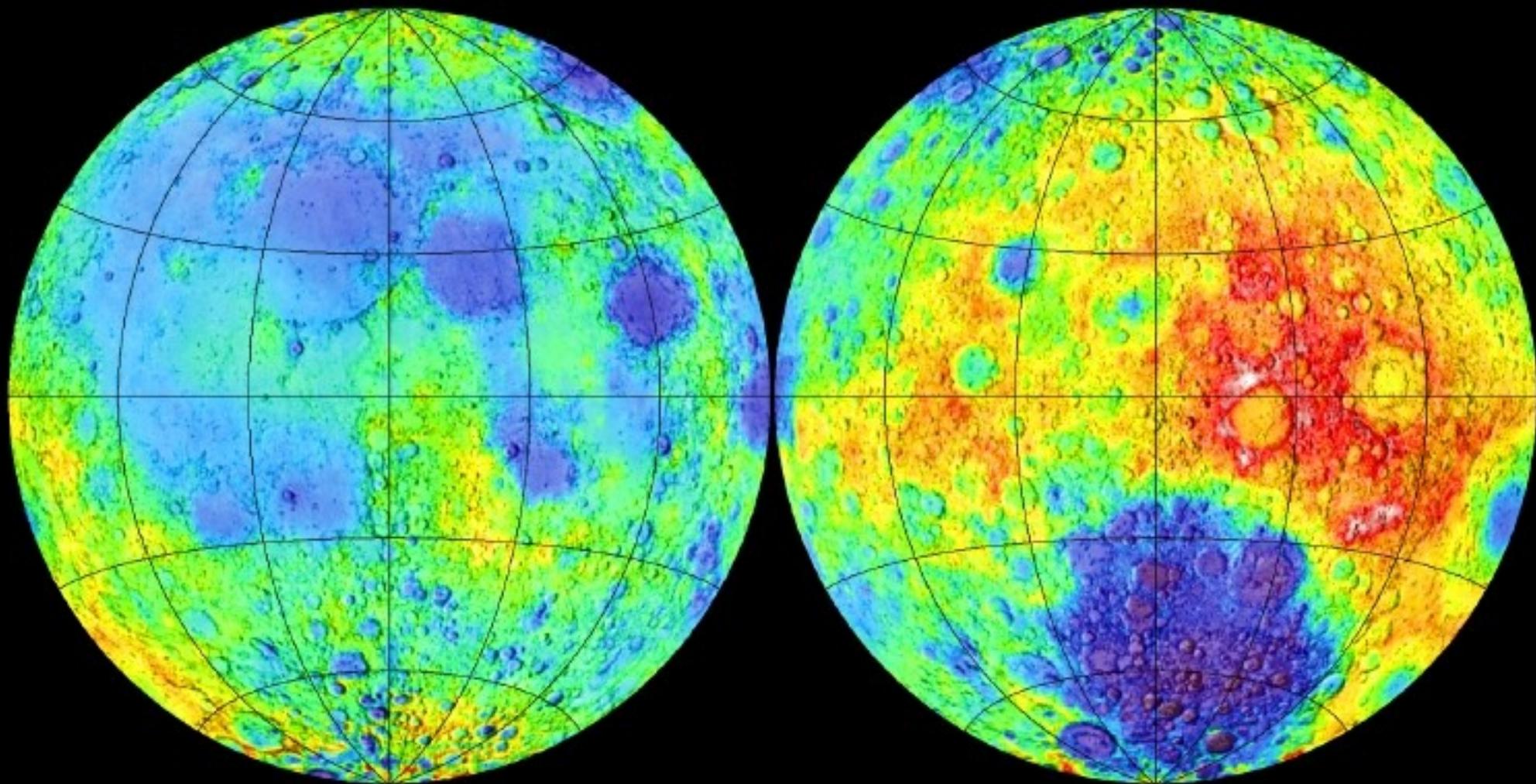
# Superfície lunar

A superfície lunar é coberta por uma camada de poeira chamada regolito, composta por microfragmentos de rochas criados durante anos de bombardeamento meteorítico.



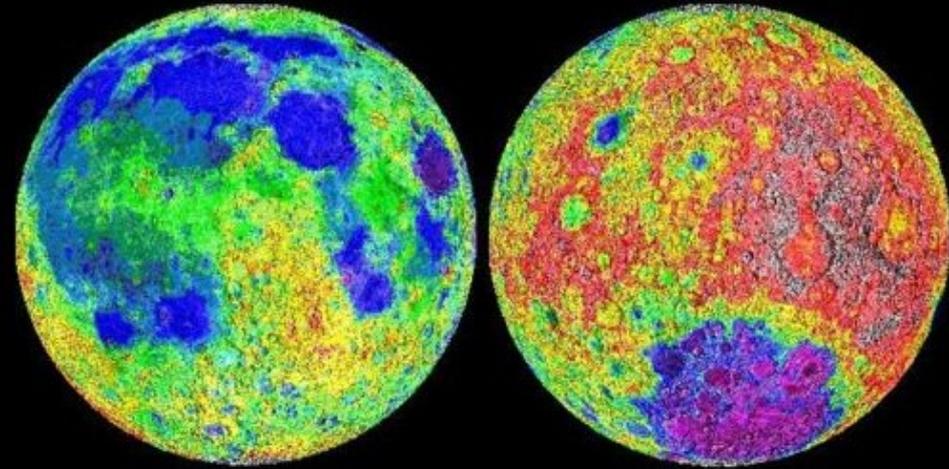
**Near side**

**Far side**

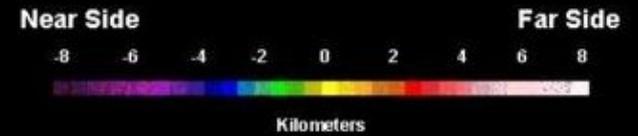
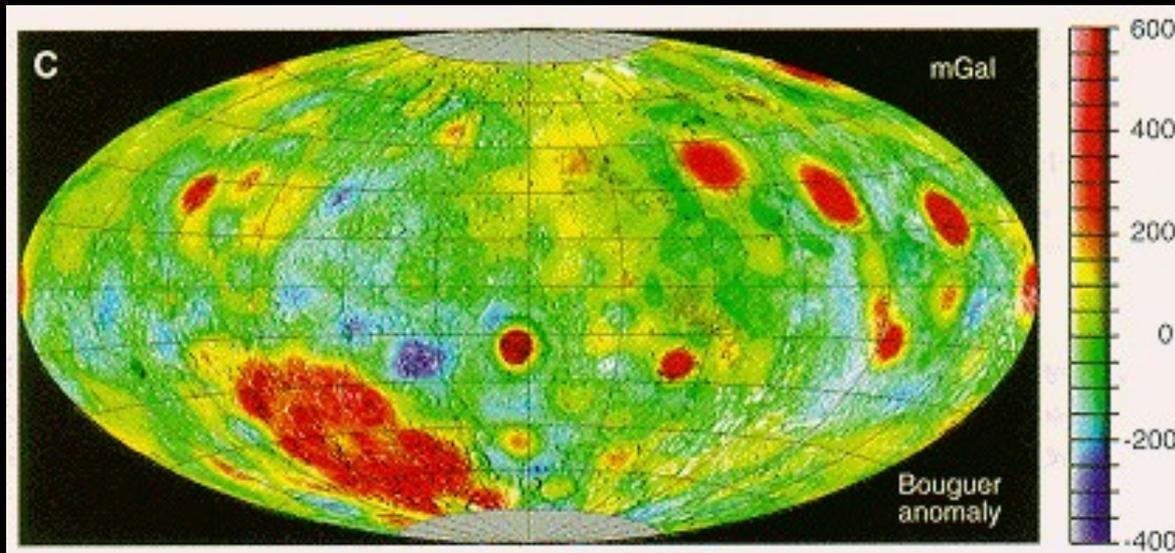


# Mapa gravimétrico da Lua

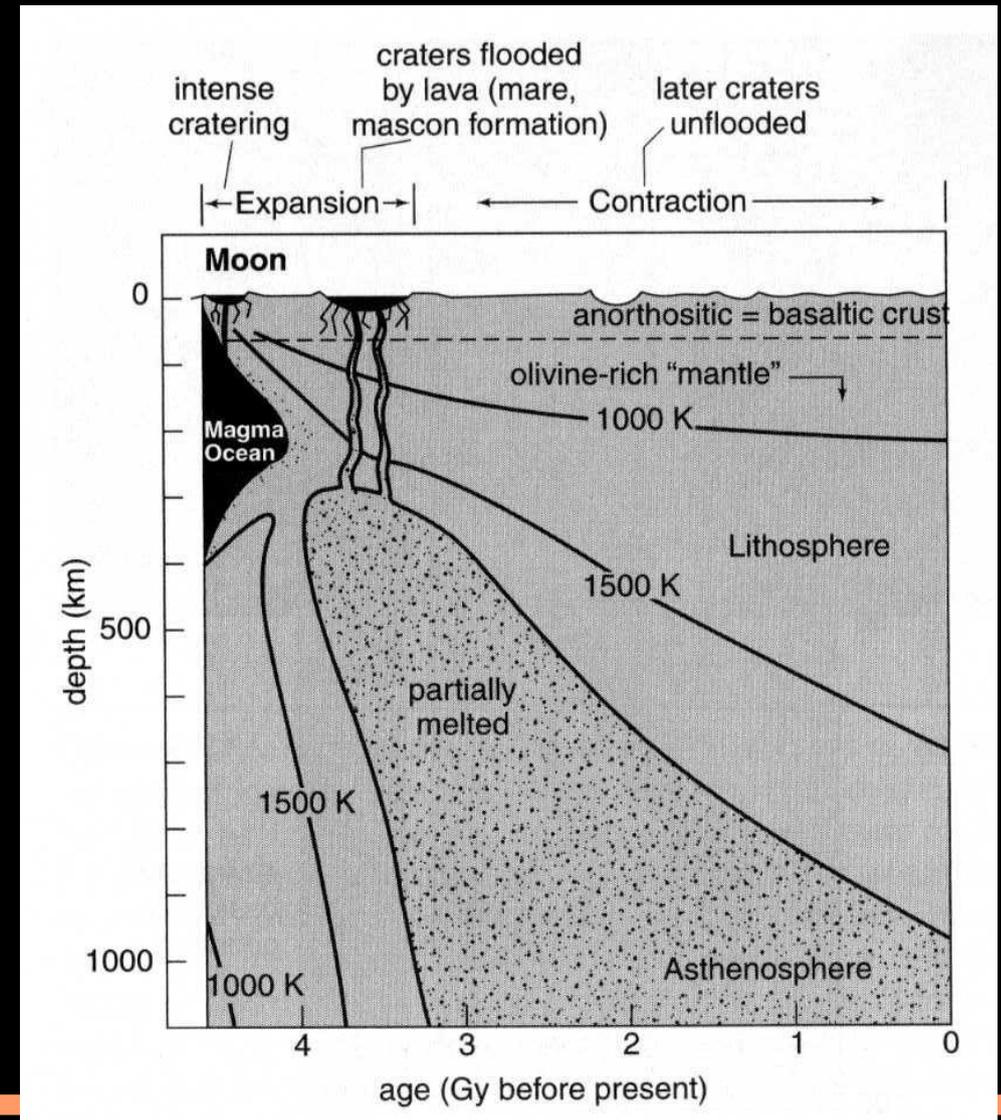
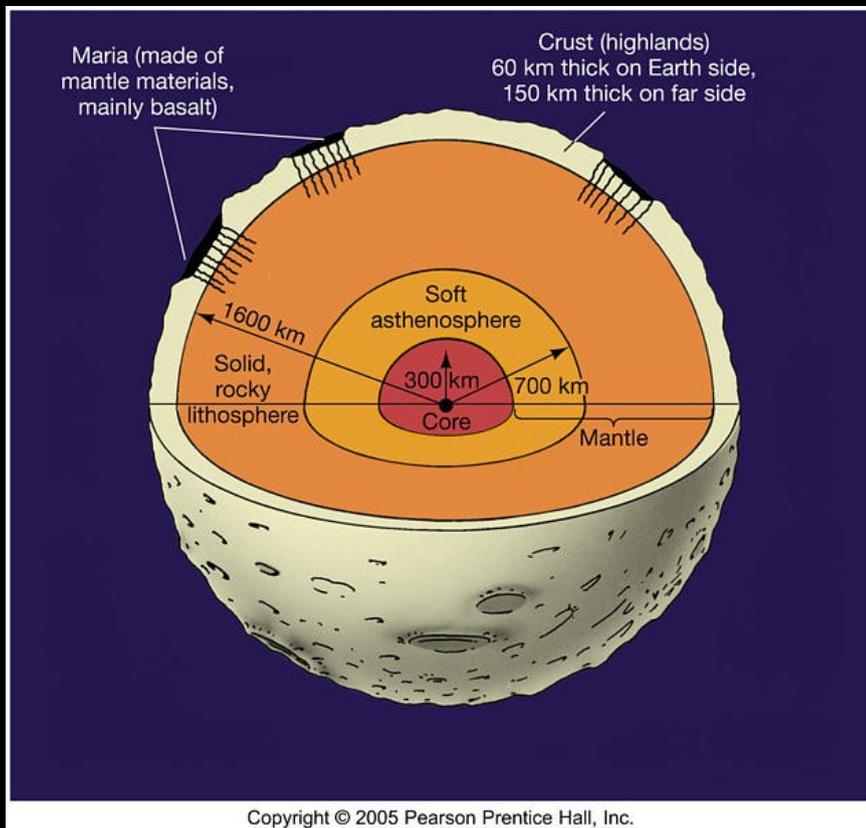
Mapa altimétrico



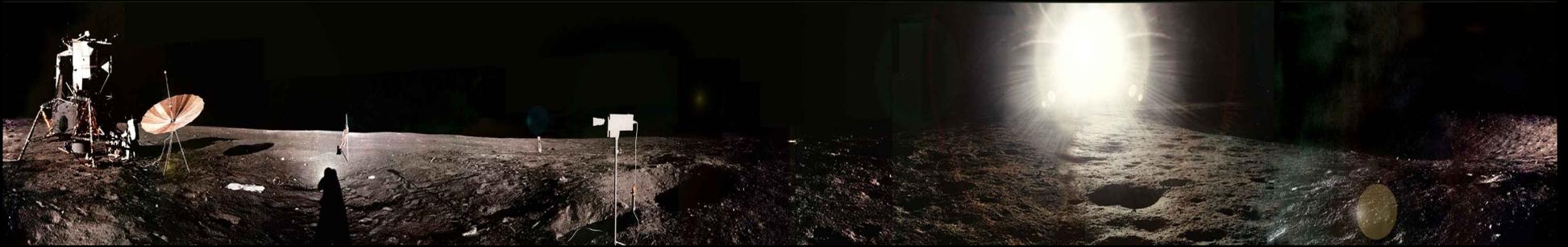
Mapa gravimétrico



# Evolução do Interior Lunar

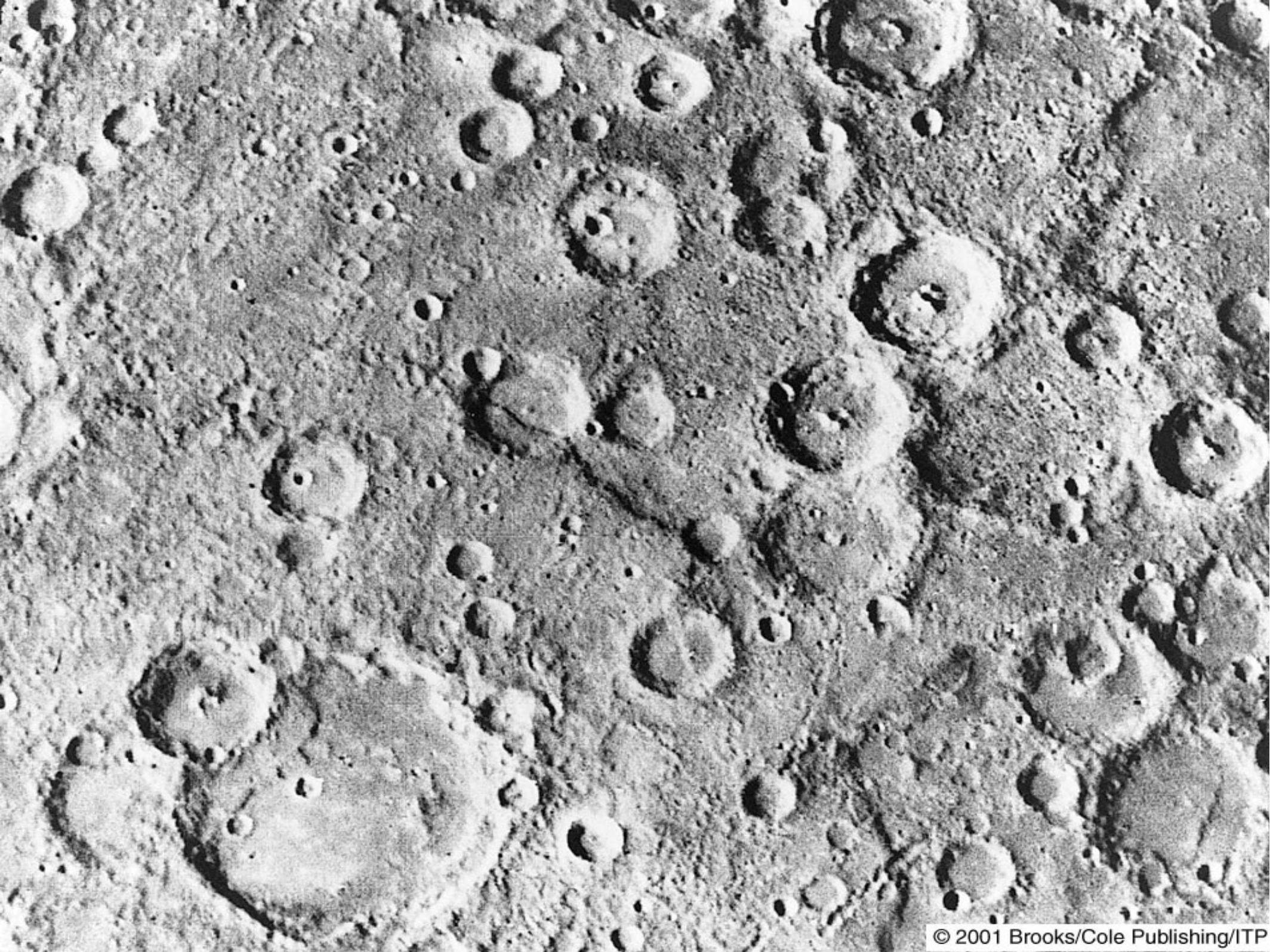


# *Panorama Lunar*



O panorama lunar é marcado pela existência de rochas em diversos níveis de fragmentação devido à craterização generalizada da Lua e da ausência de vulcanismo.





# *Sites Interessantes*

- <http://apod.nasa.gov/apod/>
- <http://astro.if.ufrgs.br/>
- <http://nineplanets.org/>
- <http://hubblesite.org/gallery/>

