

**CIAA - 2021**

**José Roberto Cecatto**

**DIAST/CGCE-INPE**

**Email: [jr.cecatto@inpe.br](mailto:jr.cecatto@inpe.br)**

# APRESENTAÇÃO

- Nascimento
- Visão humana
- Estrutura: Interior (F.E.) e Atmosfera
- Campos magnéticos do Sol
- Regiões ativas
- Ciclo de atividade
- Explosões (“flares”) solares
- Ejeções de massa coronal (CME)
- Relações solares-terrestres (C.E.)
- Espectro solar visível
- Vento solar
- Importância das pesquisas científicas sobre o Sol
- Pesquisas sobre o Sol na DIAST

# Nascimento

Colapso de uma gigantesca nuvem de gás e poeira  
Crescem P, densidade e T. Cresce a rotação da nuvem  
Transferência de momento angular  
Formação de grãos e “planetésimos”  
Evolução de planetas a partir dos protoplanetas

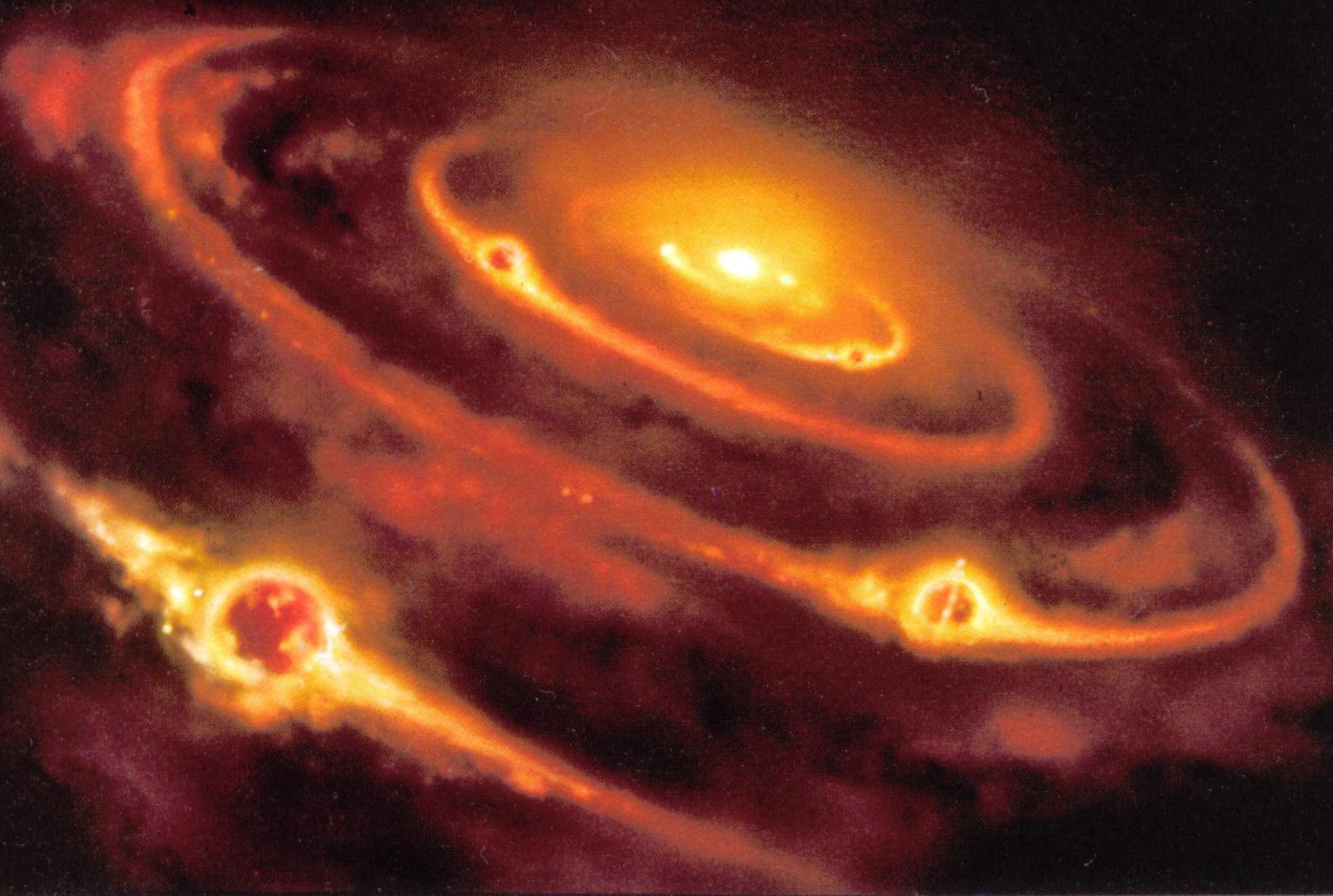


**Star-Birth Clouds • M16**

**HST • WFPC2**




**Nascimento - \* + sist. solar**









- 
- **Deus: Helios, Mitra, Ra**
  - **Fonte energia, luz e calor, saúde e fertilidade.**



- Rochas sedimentares – ciclos datam  $> 10^5$  anos;
- Concentrações  $C^{14}$  - espessura de anéis de crescimento de árvores,  $\sim 11$  mil anos;



- A atividade solar - regularmente registrada desde babilônios – século XIX A.C.. No século VIII A.C. surgiu o primeiro relatório sobre manchas solares – uma publicação chinesa;
- Civilização ocidental - 1º registro 300 A.C., Grécia

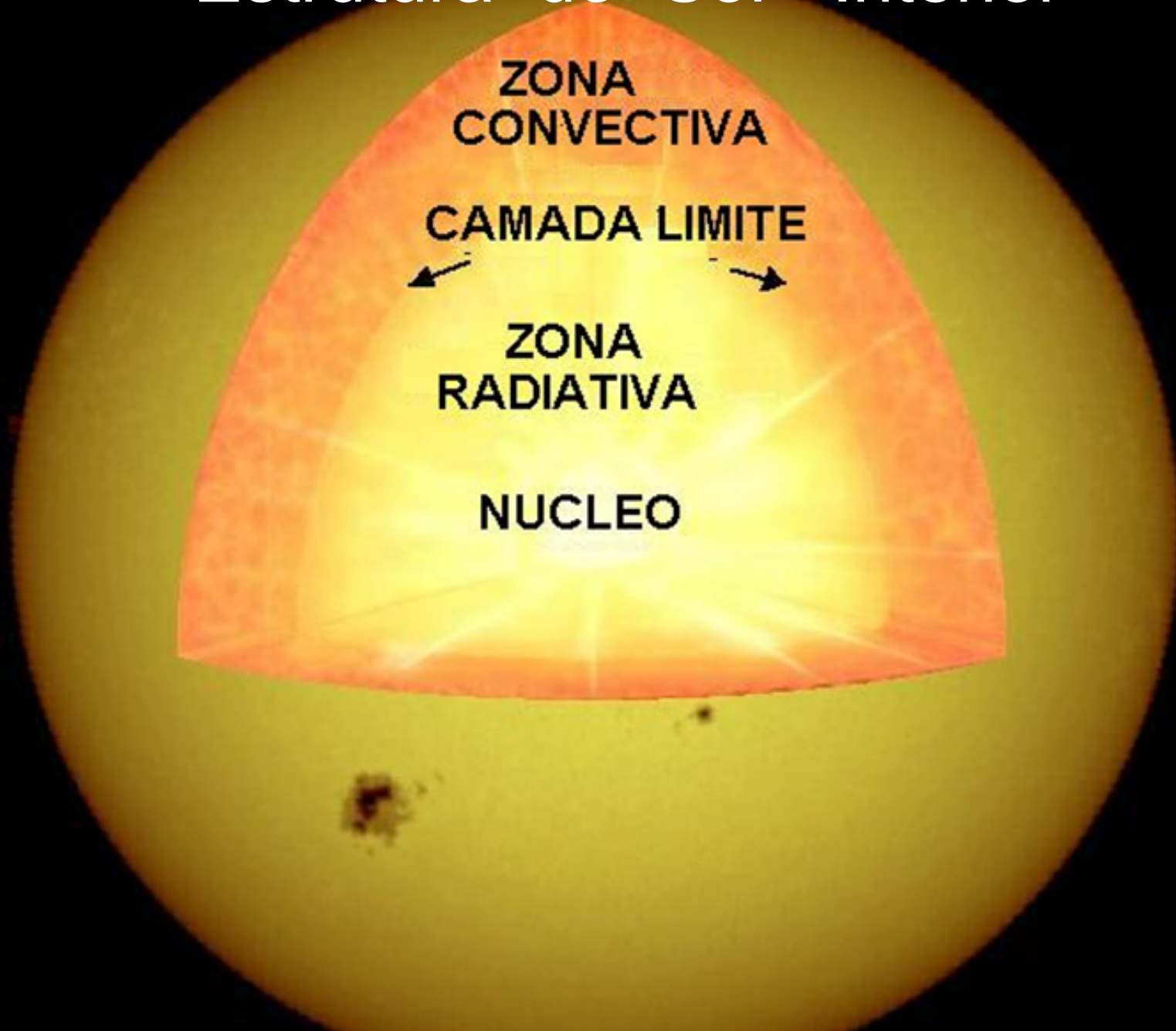
## CARACTERÍSTICAS DO SOL

MASSA	$1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$	333000 massa da Terra
RAIO	696.000 km	109 vezes raio terrestre
DENSIDADE CENTRAL	$160.000 \text{ kg/m}^3$	12,4 vezes a terrestre
DENSIDADE MÉDIA	$1.409 \text{ kg/m}^3$	~ 26% densidade terrestre
LUMINOSIDADE	$3,85 \times 10^{26} \text{ W}$	
DISTÂNCIA MÉDIA À TERRA	<b>149.600.000 km</b>	8 min. 19 seg. Velocidade da luz
VELOCIDADE DE ESCAPE	618 km	55 vezes a terrestre
TEMPERATURA CENTRAL	$15,6 \times 10^6 \text{ K}$	
TEMP. SUPERFICIAL	~ 5780 K	1-5 $\times 10^6 \text{ K}$ na coroa
IDADE	$4,6 \times 10^9 \text{ anos}$	
PERÍODO DE ROTAÇÃO EQUATORIAL	~ 26 dias	
PERÍODO DE ROTAÇÃO POLAR	~ 34 dias	
TIPO ESPECTRAL	G2V	*+ Q: O, B, A, F;    *+F: K, M, L, T
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	H - 92,1; He - 7,8; O - 0,06; C - 0,03; N - 0,0084; Ne - 0,0076; Fe - 0,0037; Si - 0,0031; Mg - 0,0024; S - 0,0015; <b>até moléculas orgânicas</b>	
PRINCIPAIS ELEMENTOS*		

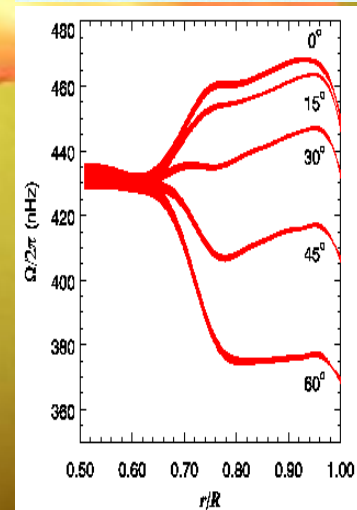
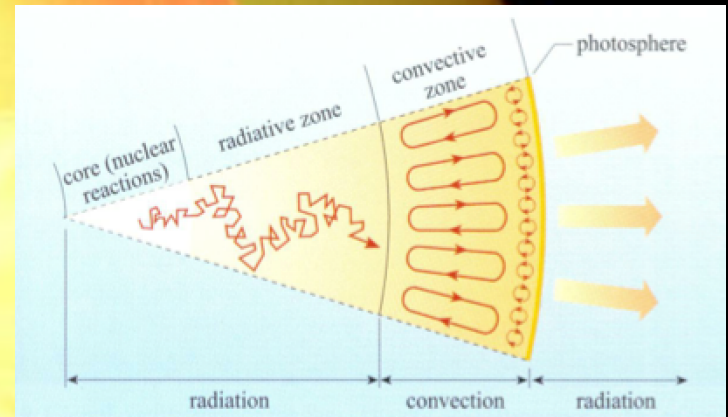
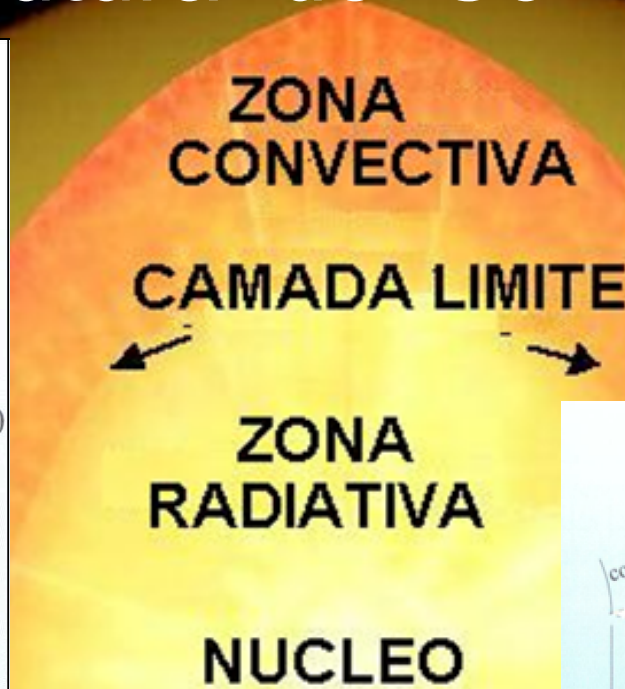
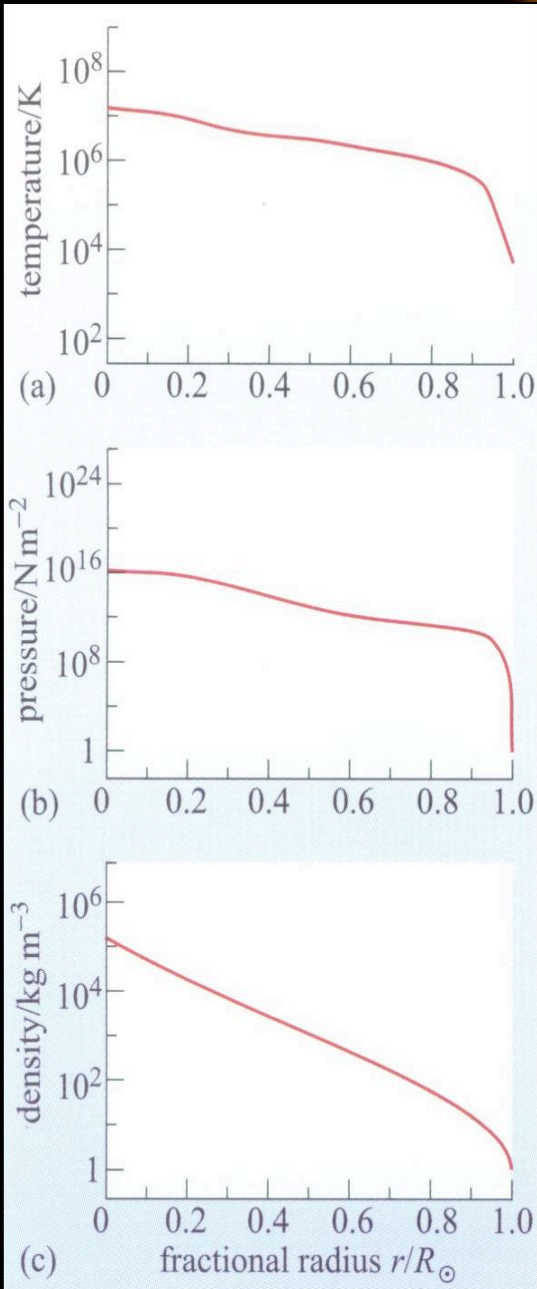
O Sol apresenta rotação diferencial, isto é, o período de rotação depende da latitude;  
 Centro geométrico e gravitacional do sistema solar;  
 ~ 8 minutos-luz de distância da Terra.



# Estrutura do Sol - Interior

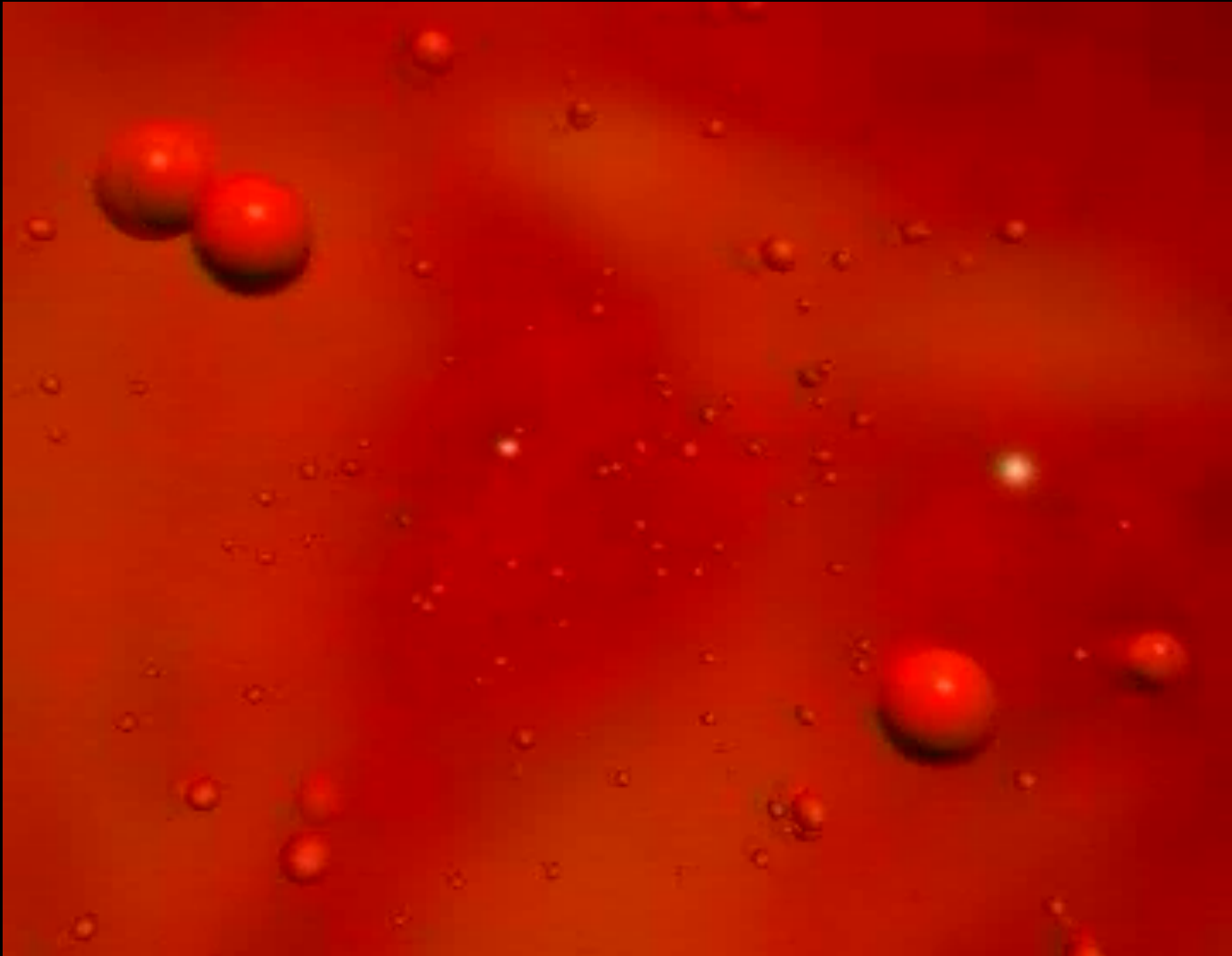


# Estrutura do Sol - Interior



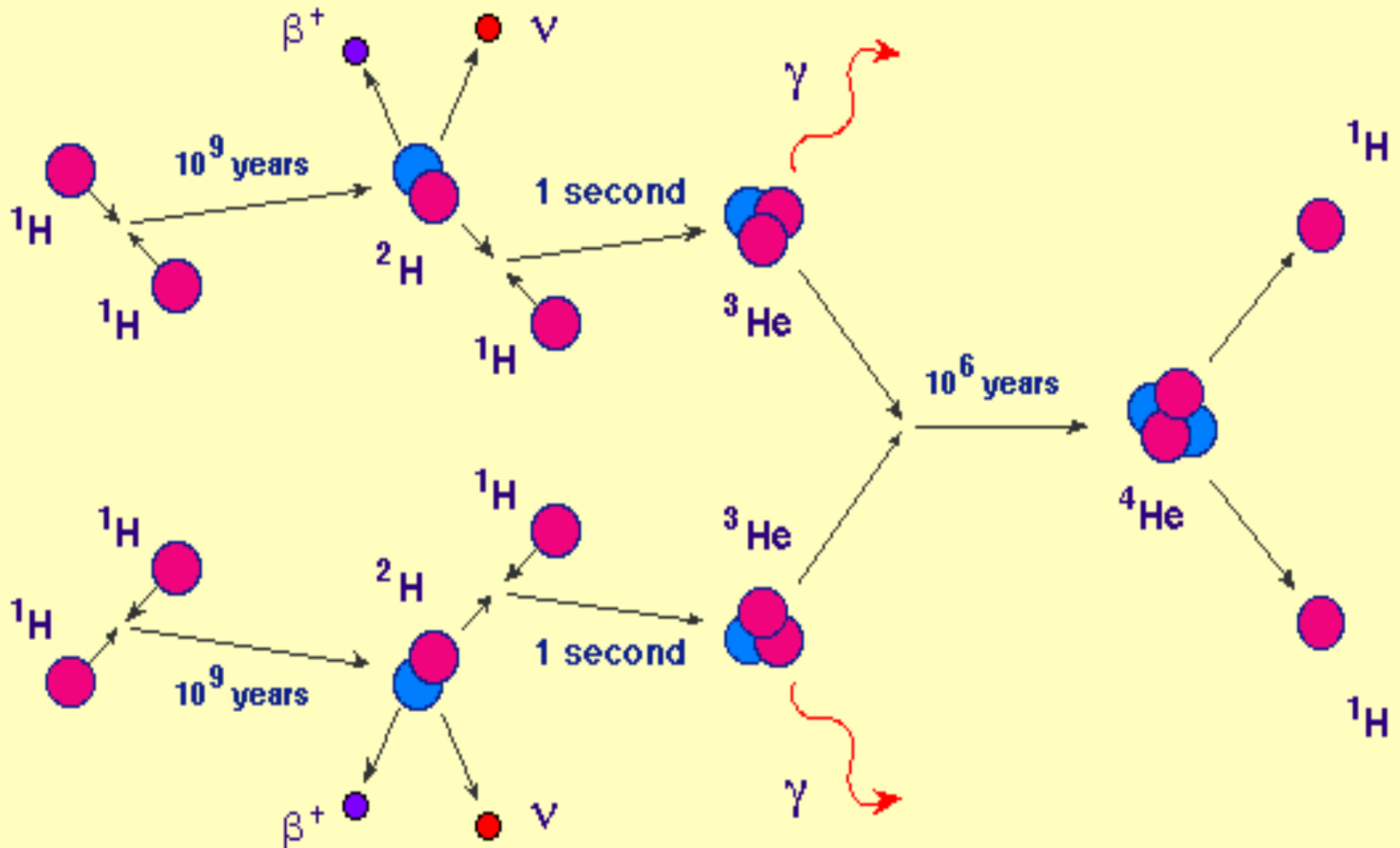


# Interior (Produção de energia)



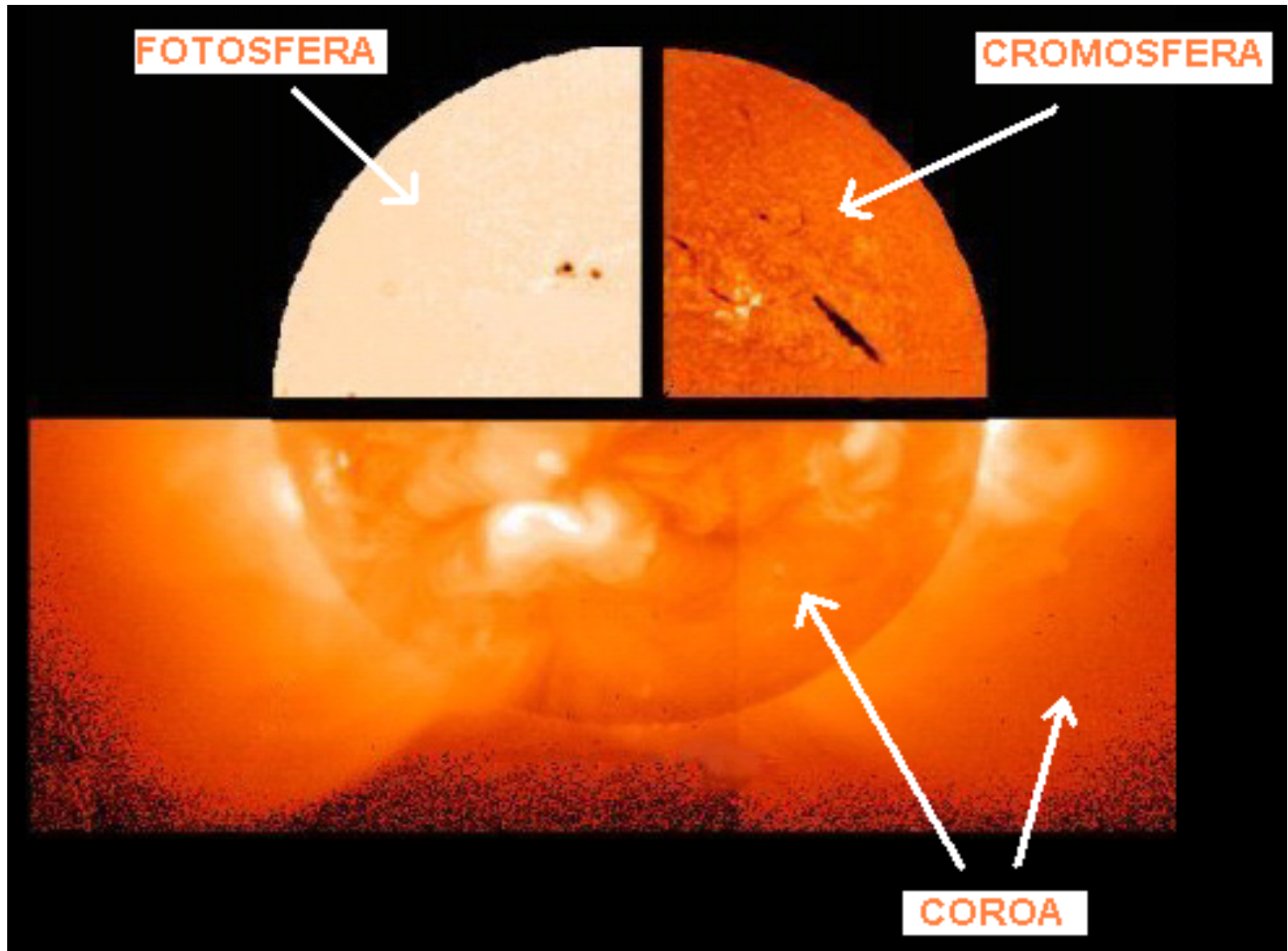
# Estrutura - Interior (fonte de energia)

## Reações de fusão termonuclear - CADEIA PP - Fusão de H em He

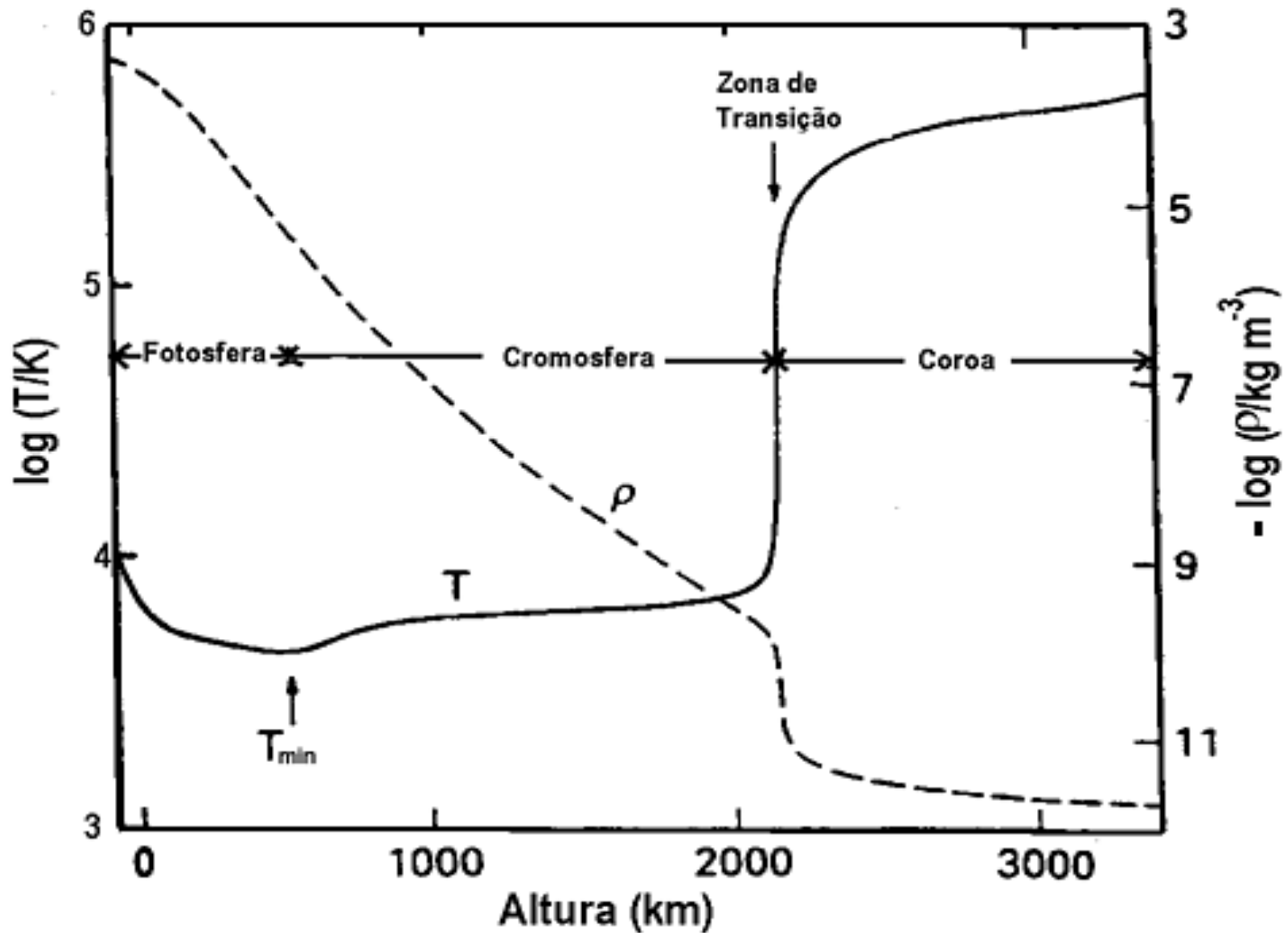




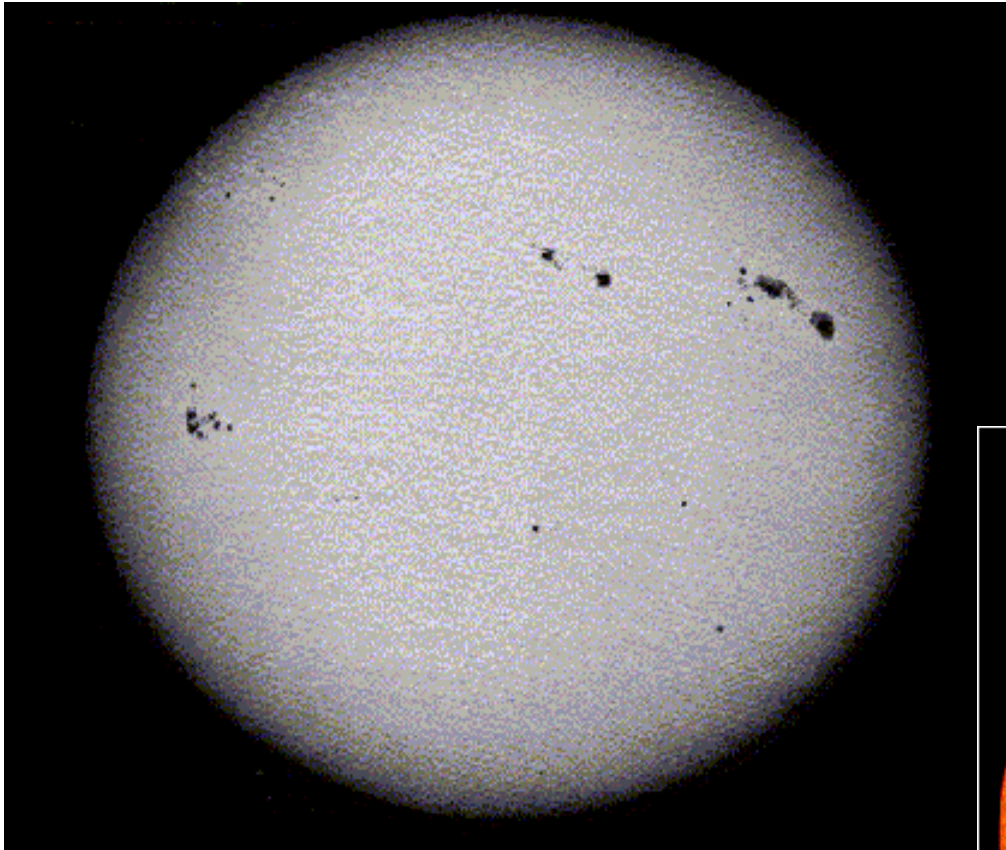
# Estrutura - Atmosfera



# Atmosfera - T, N<sub>e</sub>

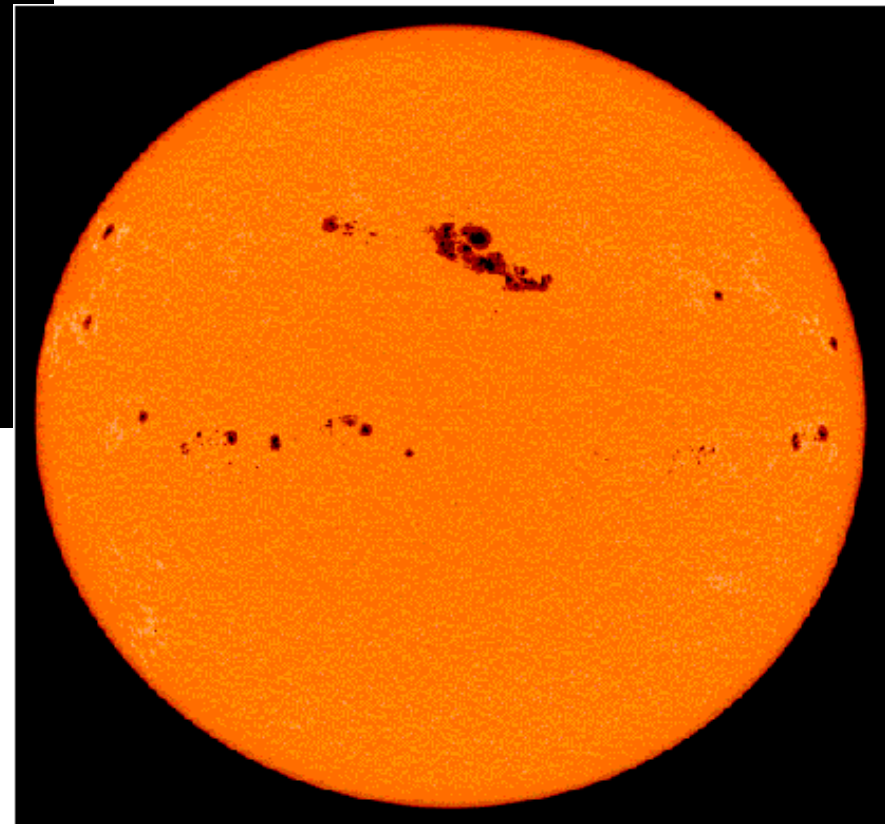


# Fotosfera - luz branca / visível



- Espessura  $\sim 500$  km
- Luz visível do disco
- Densidade  $10^{13}$ - $10^{15}$  cm $^{-3}$
- Rotação diferencial disco
- Manchas solares

- $T_{\text{sup}} \sim 5800$  K, cai a  $\sim 4200$  K na sua parte mais elevada
- Obscurecimento (limbo)
- Granulação





# Manchas solares

**Observação a olho nú – China, século 8 AC;**

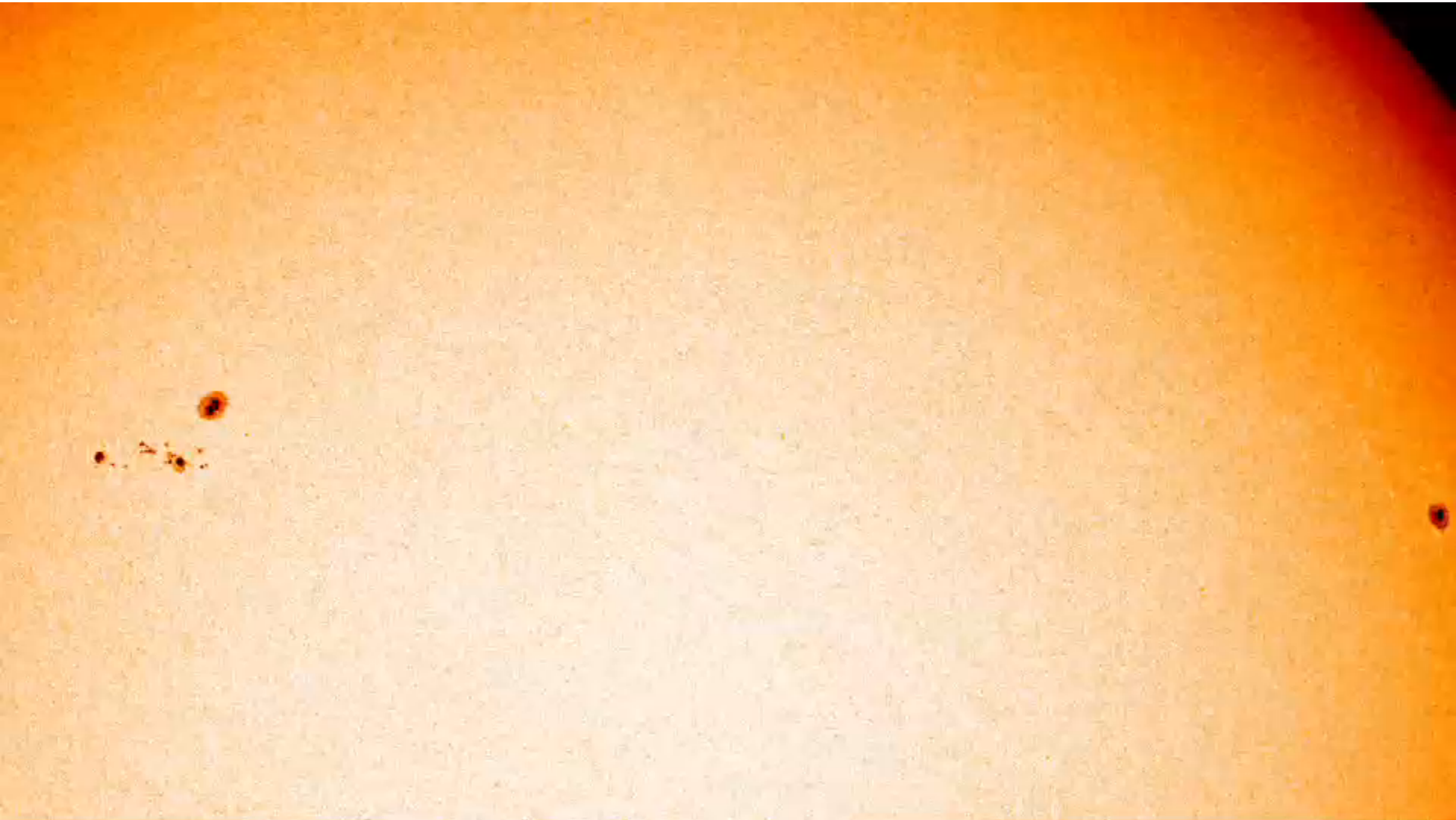
**Registros de Anaxágoras de 467 AC;**

**Em 1607 Kepler - trânsito de Mercúrio: a imagem do disco (camera escura) mostrou uma mancha escura.**

**Galileo e Thomas Harriot foram os primeiros a observar usando um telescópio (~ 1610)**

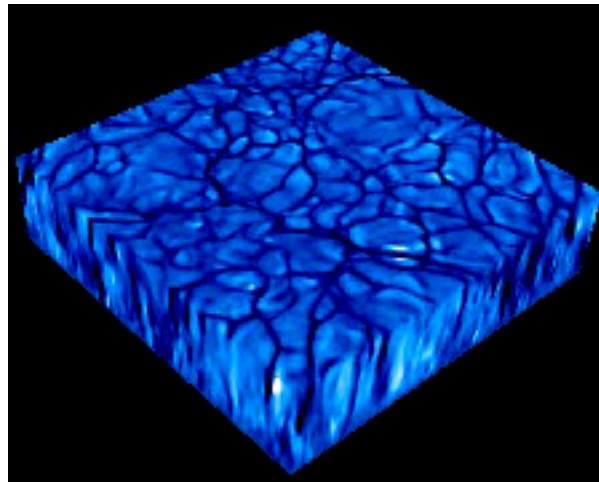
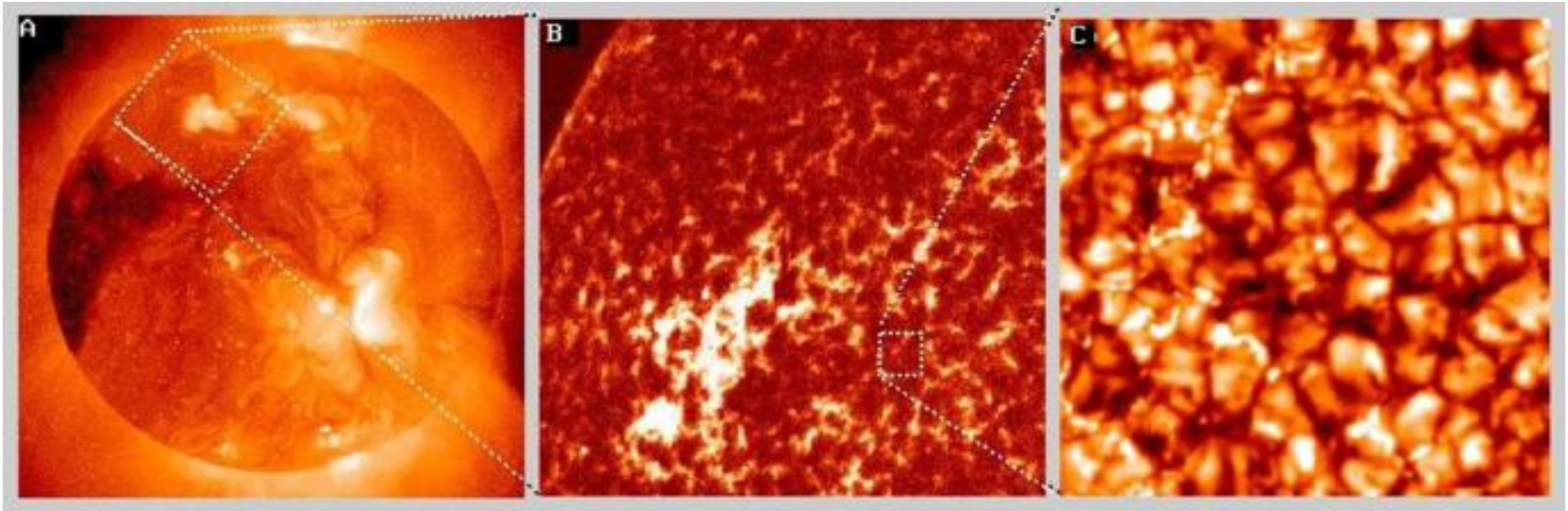


# Fotosfera - Manchas solares



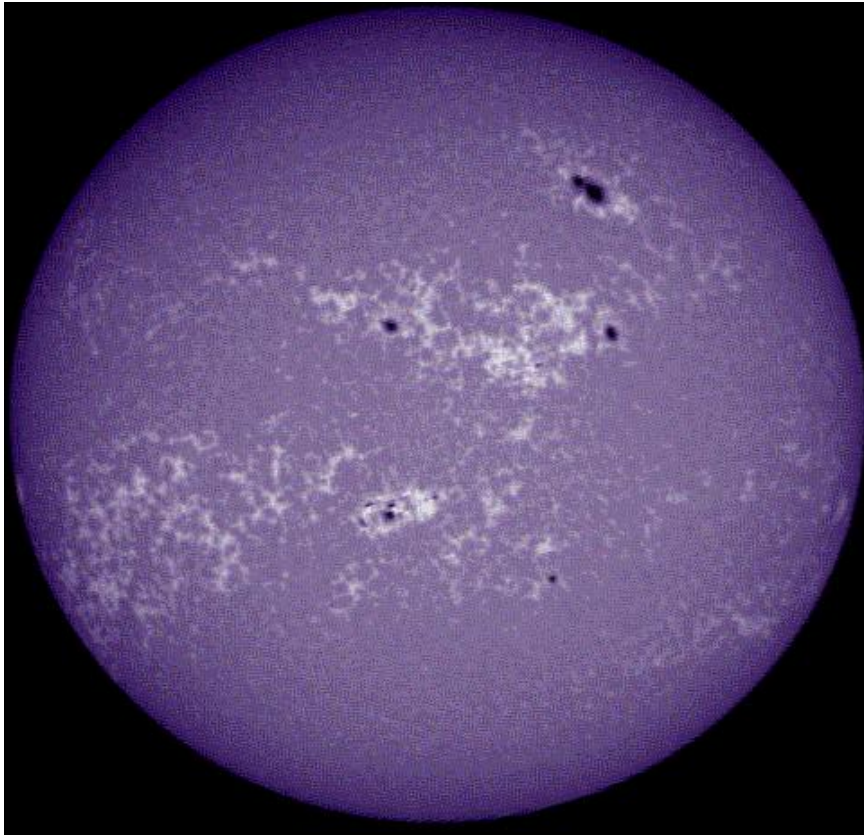
# Fotosfera - granulação

As células de convecção têm cerca de 5000 km e se movimentam em escalas de 10 minutos.

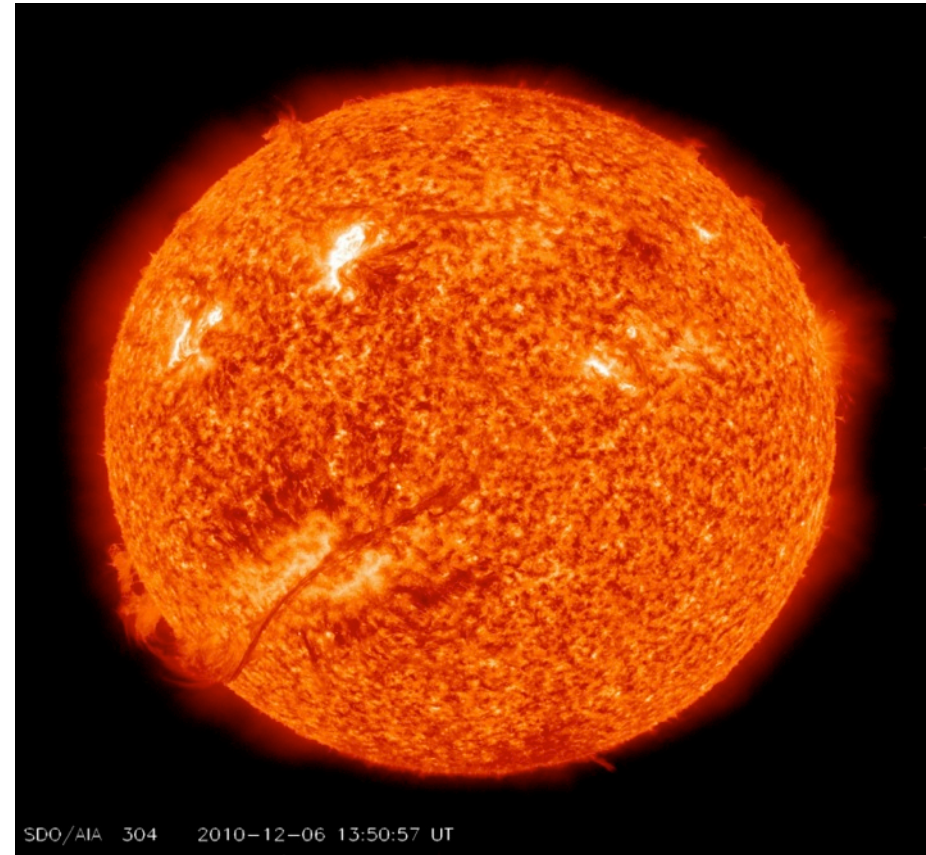




# Cromosfera – imagem Ca II / H- $\alpha$



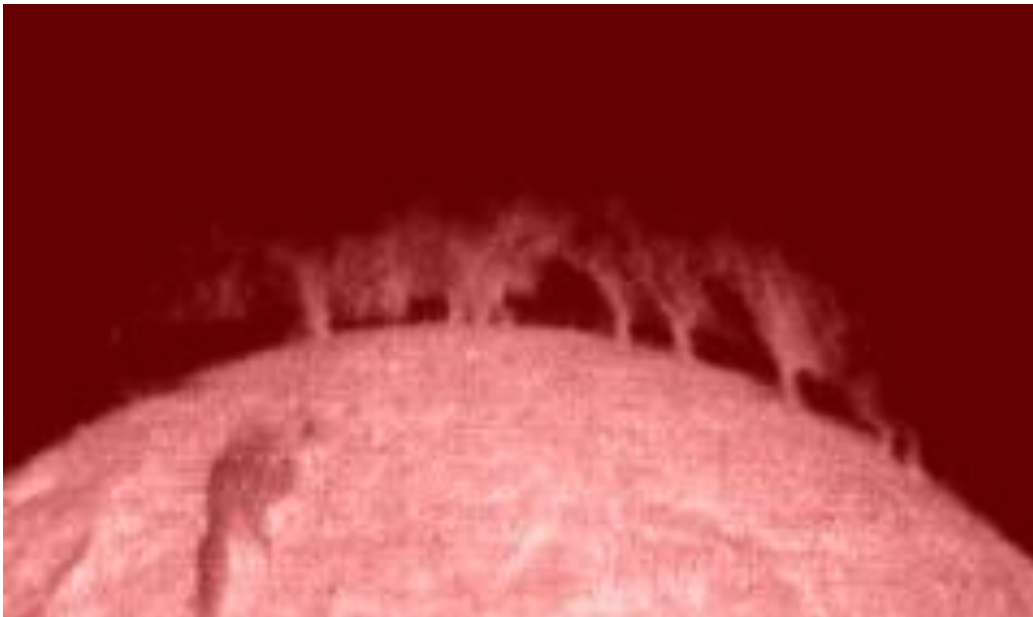
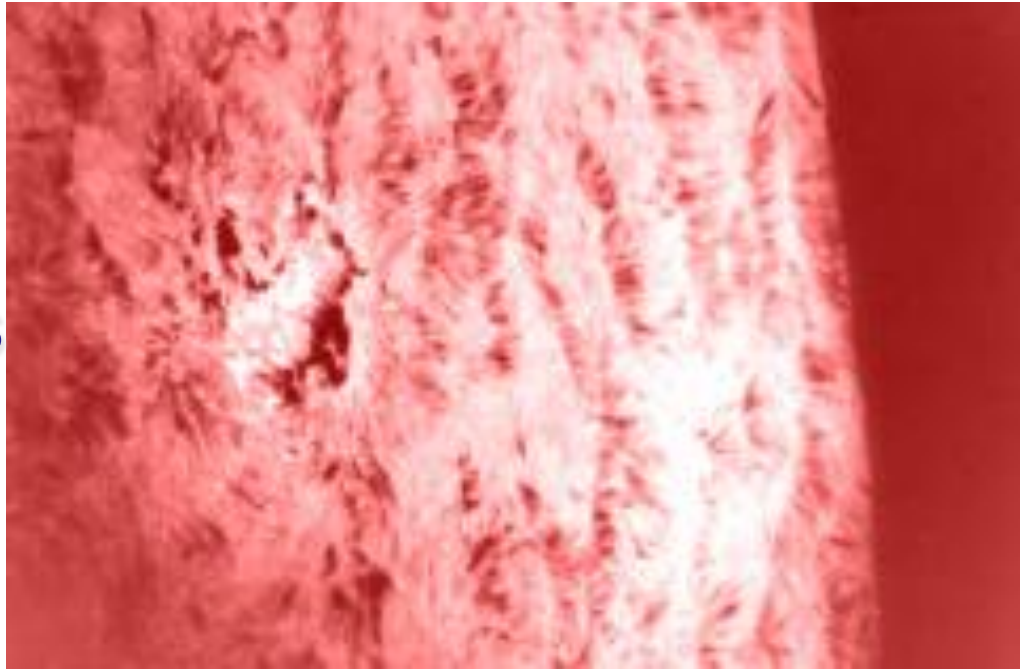
- $\sim 10^3$  km acima da fotosfera
- $10^4 < T < 10^5$  K
- Dens. 1 a 2 ordens de grandeza menor que fotosfera
- Observ. em H- $\alpha$  e linha do Ca II.



- Proeminências, filamentos, “praias” brilhantes, fáculas, espículos.
- Algumas estruturas visíveis durante eclipses totais.

1999/03/06 08:08:10

**Espículos**



**Proeminências**



# Coroa solar - características

- Camada mais externa e tênue
- Estende-se por milhões de km
- Visível apenas durante eclipses totais
- Temperatura: 1-2 milhões de graus.
- Densidade de 2-3 ordens de grandeza mais baixa que na cromosfera
- Emite Raios-X e UV em abundância
- Matéria na forma de plasma
- RA - arcos magnéticos

Total Solar Eclipse  
of  
1994 November 3

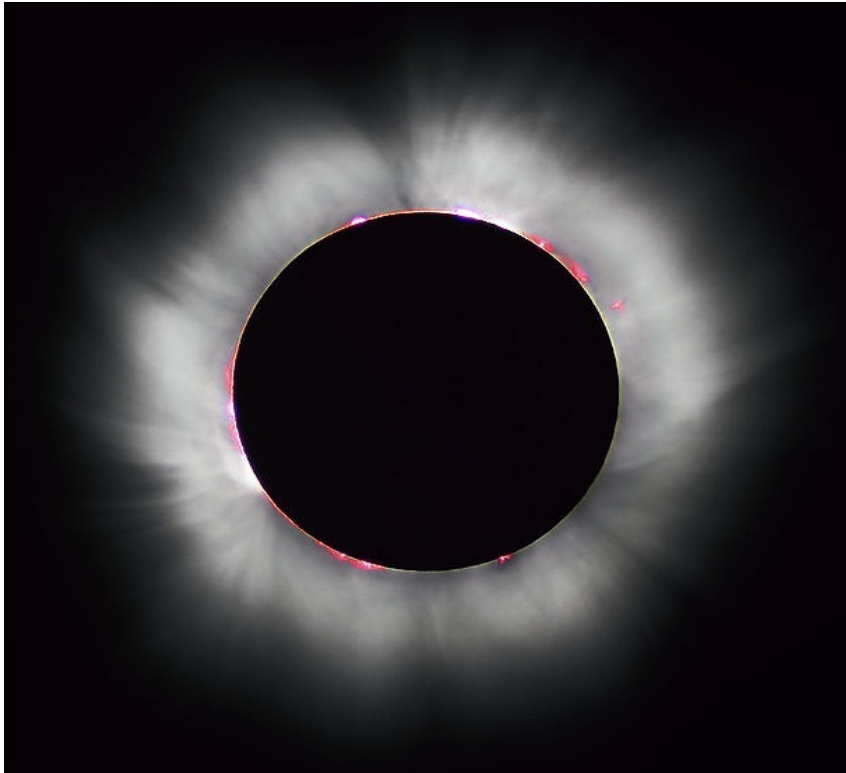
taped at  
La Lava, Bolivia  
by

Fred Espenak

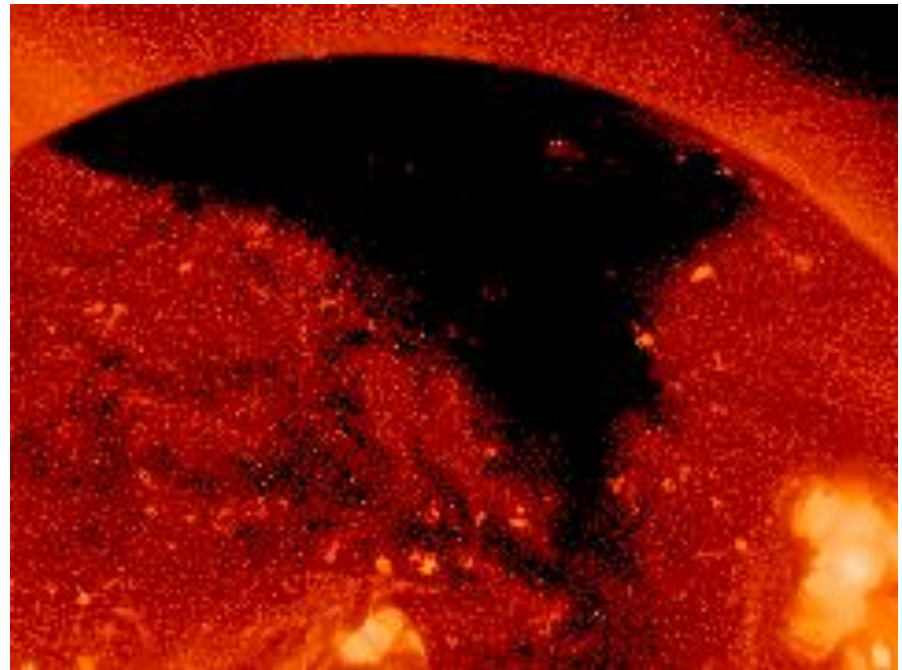


# Coroa solar - Eclipse solar

x



# Buracos Coronais

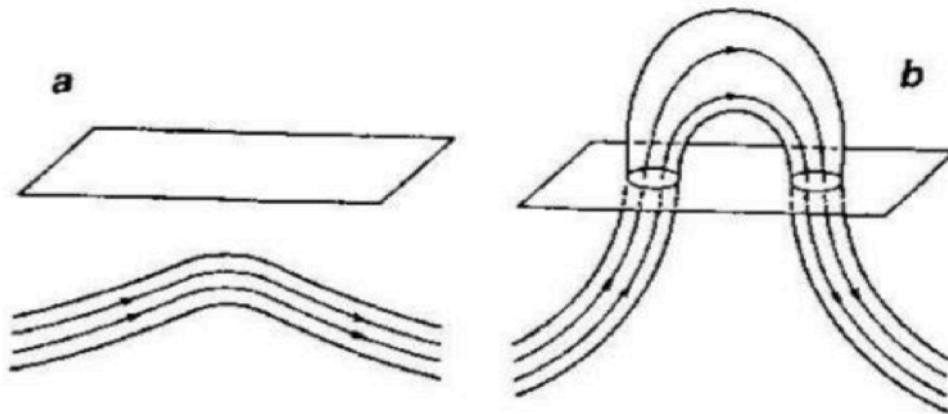
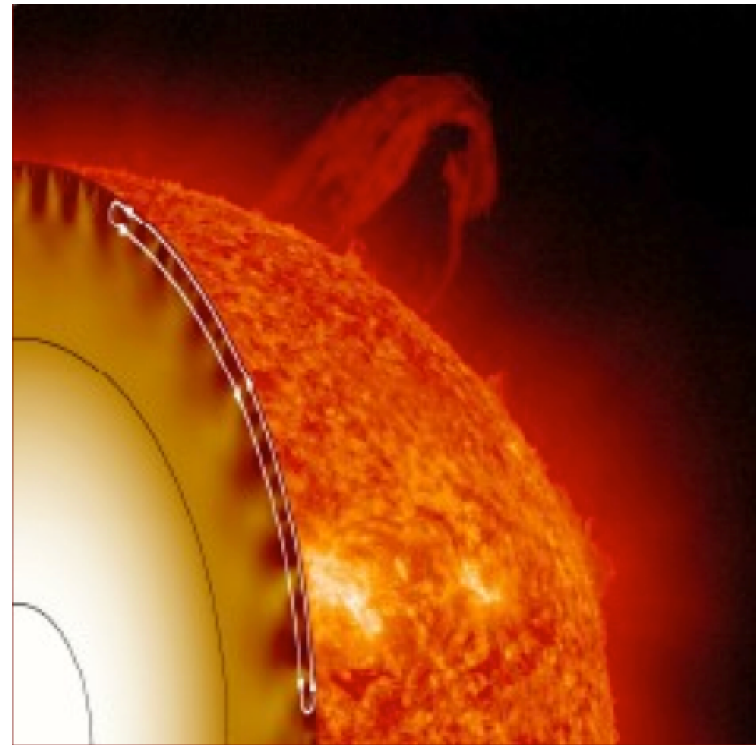
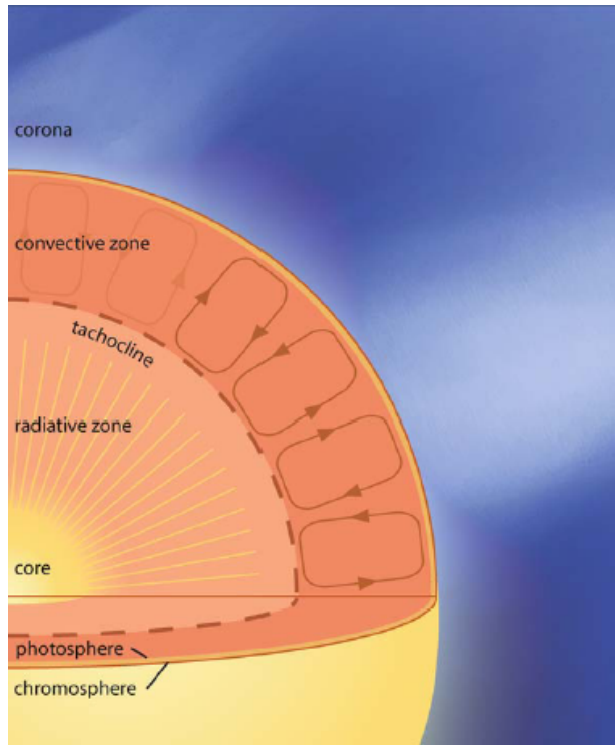


# Streamers

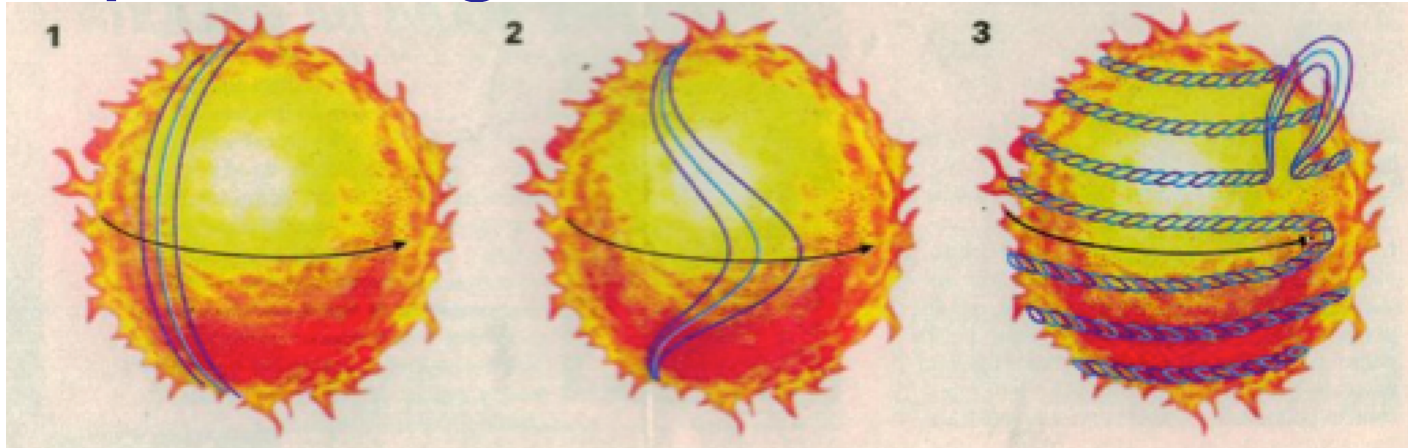
<b>Elemento</b>	<b>Comprimento de onda (Å)</b>	<b>Temperatura (<math>\times 10^4</math> K)</b>	<b>Região de observação</b>
<b>Ca IX</b>	<b>821</b>	<b>63</b>	<b>Região de transição</b>
<b>Fe IX/X</b>	<b>171</b>	<b>100</b>	<b>Coroa</b>
<b>Fe XII</b>	<b>195</b>	<b>150</b>	<b>Coroa</b>
<b>Fe XII</b>	<b>1242</b>	<b>160</b>	<b>Coroa</b>
<b>Fe XV</b>	<b>284</b>	<b>200</b>	<b>Coroa</b>
<b>He I</b>	<b>584,3</b>	<b>2</b>	<b>Cromosfera</b>
<b>He II</b>	<b>304</b>	<b>6 – 8</b>	<b>Cromosfera</b>
<b>Mg IX</b>	<b>368</b>	<b>95 – 100</b>	<b>Coroa</b>
<b>Mg X</b>	<b>625</b>	<b>105 – 110</b>	<b>Coroa</b>
<b>N V</b>	<b>1238,8</b>	<b>18</b>	<b>Região de transição</b>
<b>Ne VII</b>	<b>356</b>	<b>40</b>	<b>Região de transição</b>
<b>O V</b>	<b>629,7</b>	<b>23 – 25</b>	<b>Região de transição</b>
<b>S VI</b>	<b>933</b>	<b>20</b>	<b>Região de transição</b>
<b>Si XII</b>	<b>520,7</b>	<b>200</b>	<b>Coroa</b>
<b>UV contínuo</b>		<b>* <math>10^4</math></b>	<b>Cromosfera</b>
<b>Contínuo</b>	<b>Luz branca</b>	<b>~0,6</b>	<b>Fotosfera</b>



# Campos magnéticos do Sol – Ciclo



# Campos magnéticos do Sol – Ciclo



# Campos magnéticos do Sol – Ciclo

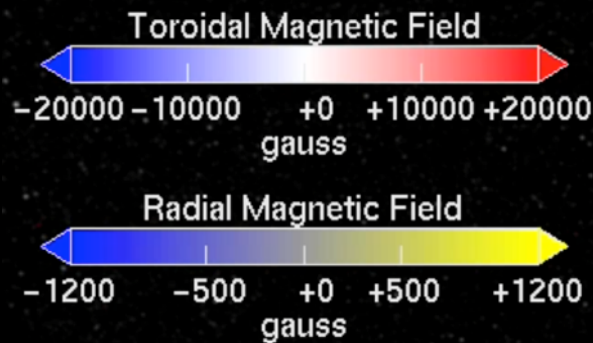
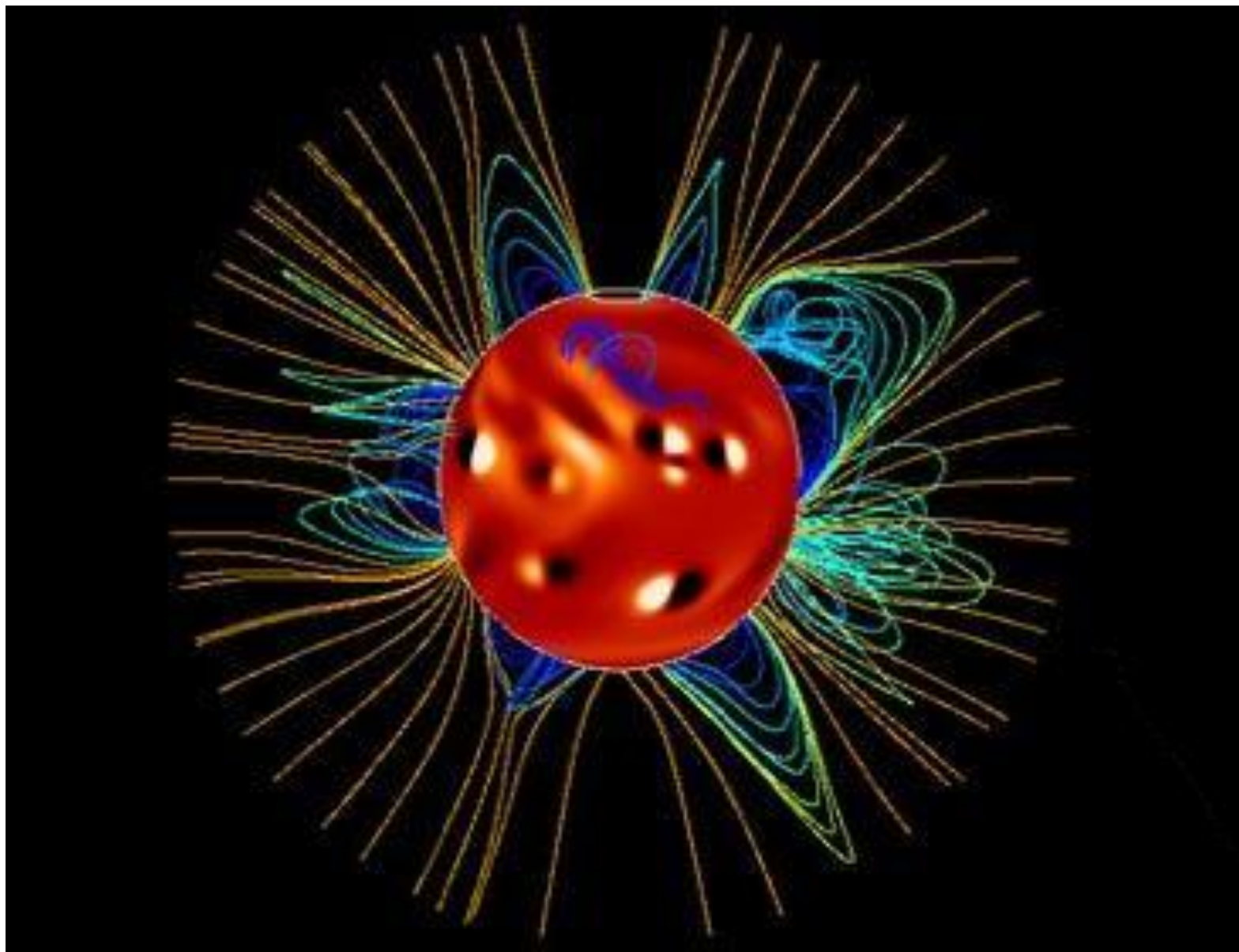


Tabela - Parâmetro  $\beta$  de plasma na atmosfera solar

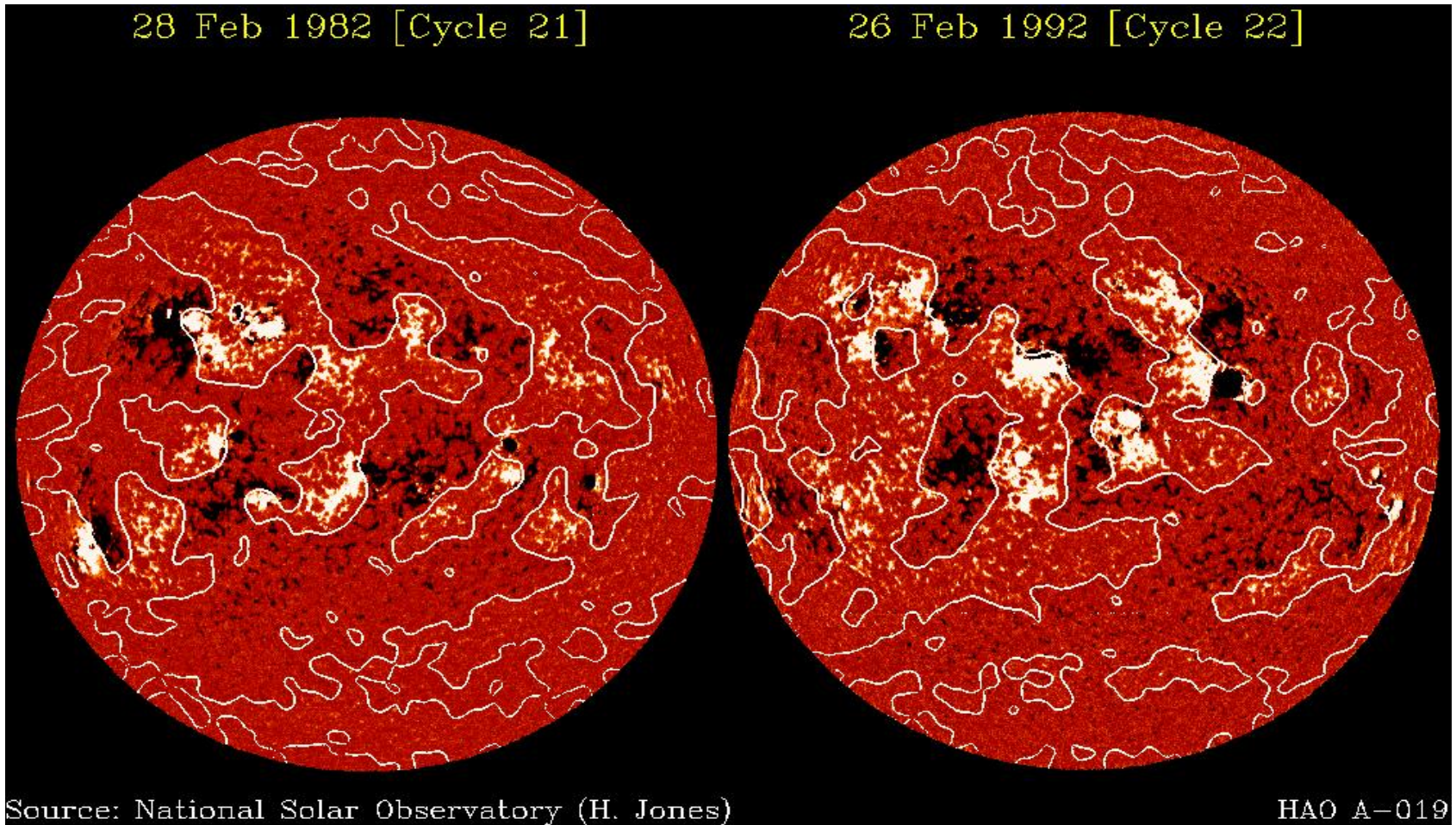
Parameter	Photosphere	Cool corona	Hot corona	Outer corona
Electron density $n_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \times 10^{17}$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^7$
Temperature $T$ (K)	$5 \times 10^3$	$1 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$1 \times 10^6$
Pressure $p$ ( $\text{dyne cm}^{-2}$ )	$1.4 \times 10^5$	0.3	0.9	0.02
Magnetic field $B$ (G)	500	10	10	0.1
Plasma- $\beta$ parameter	14	0.07	0.2	7



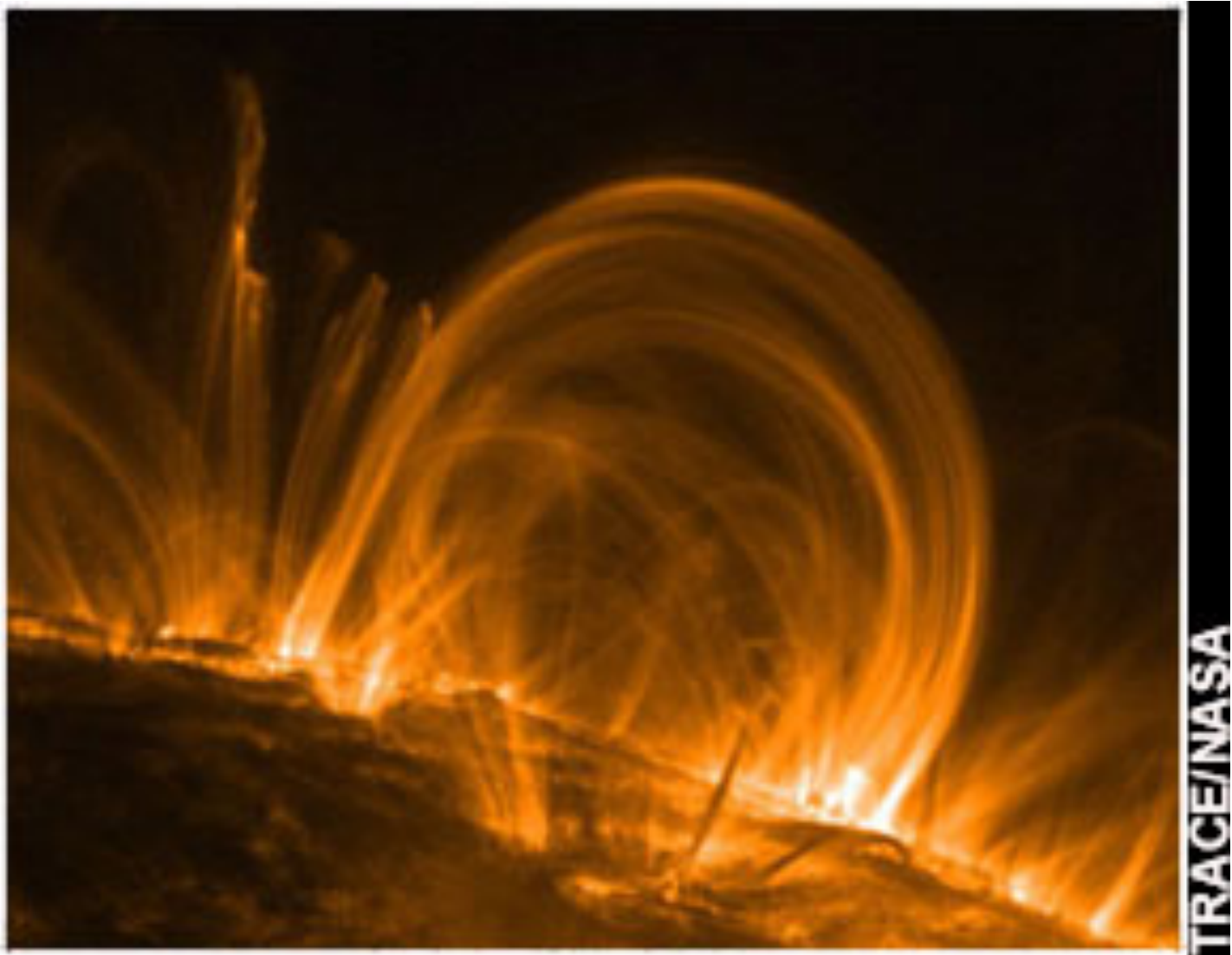


X

# Campos magnéticos do Sol

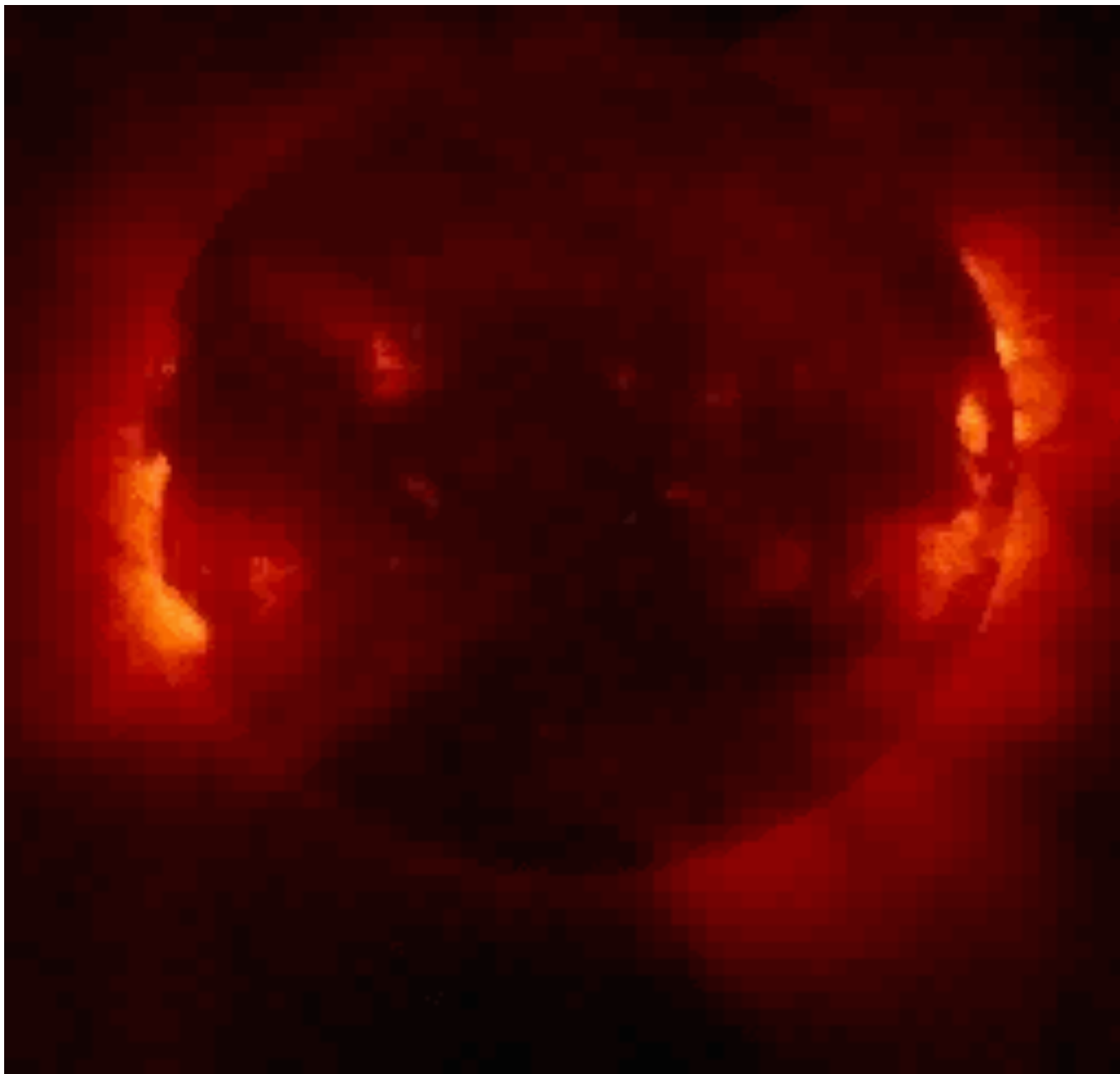


# Regiões ativas - arcos magnéticos



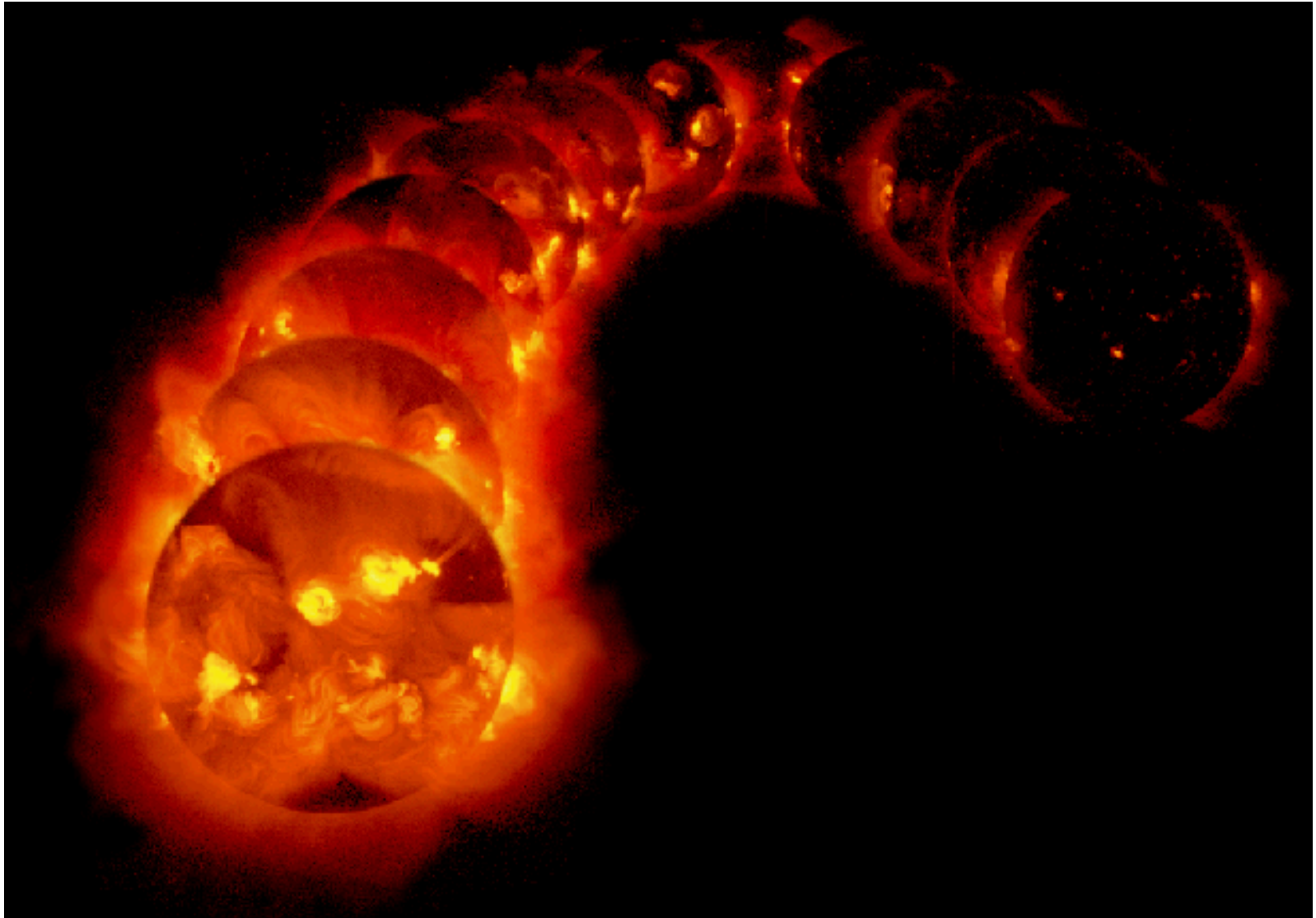


## Evolução ciclo – Coroa solar

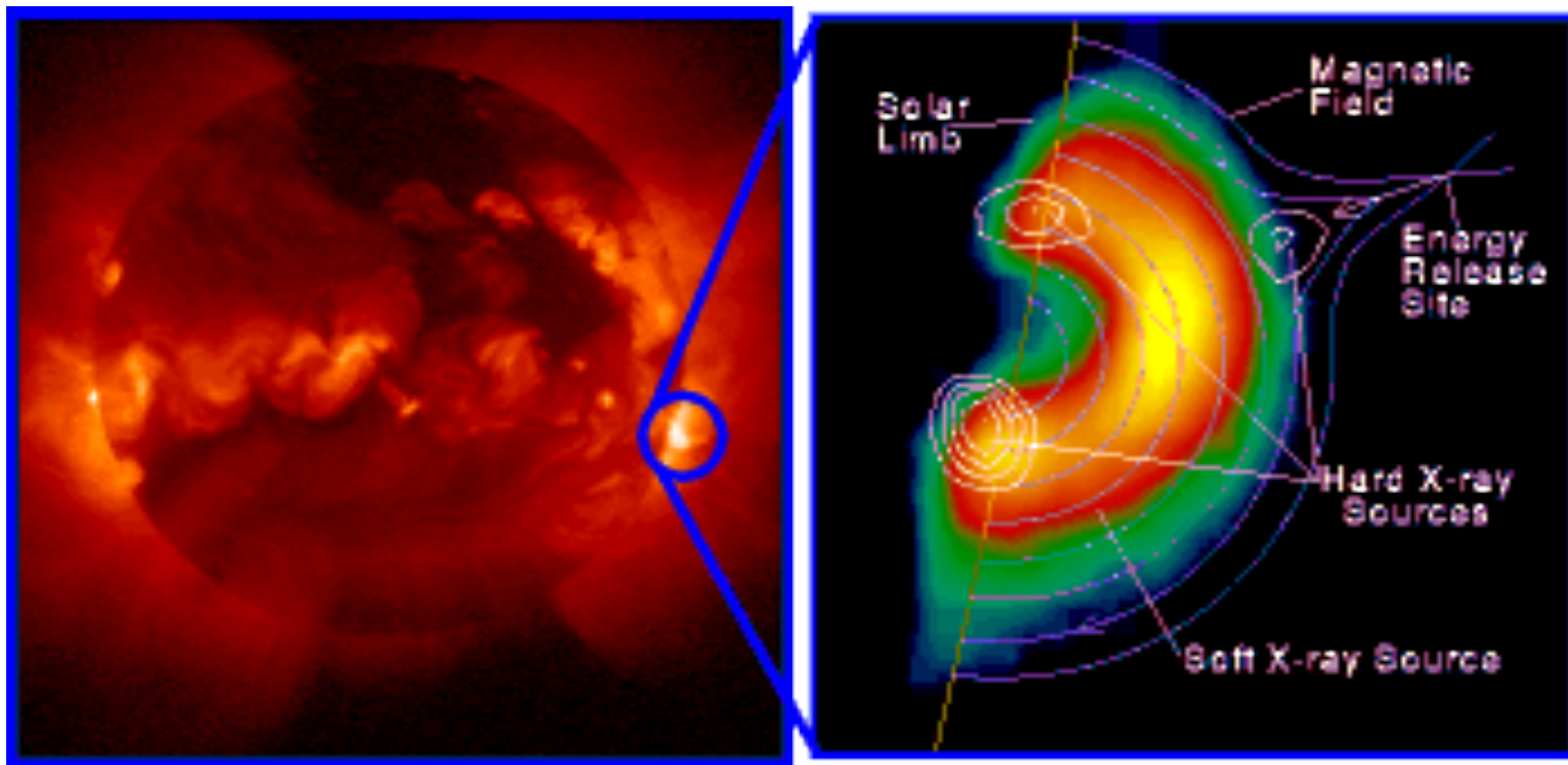


# Campos magnéticos do Sol

x



# Região ativa - arco magnético



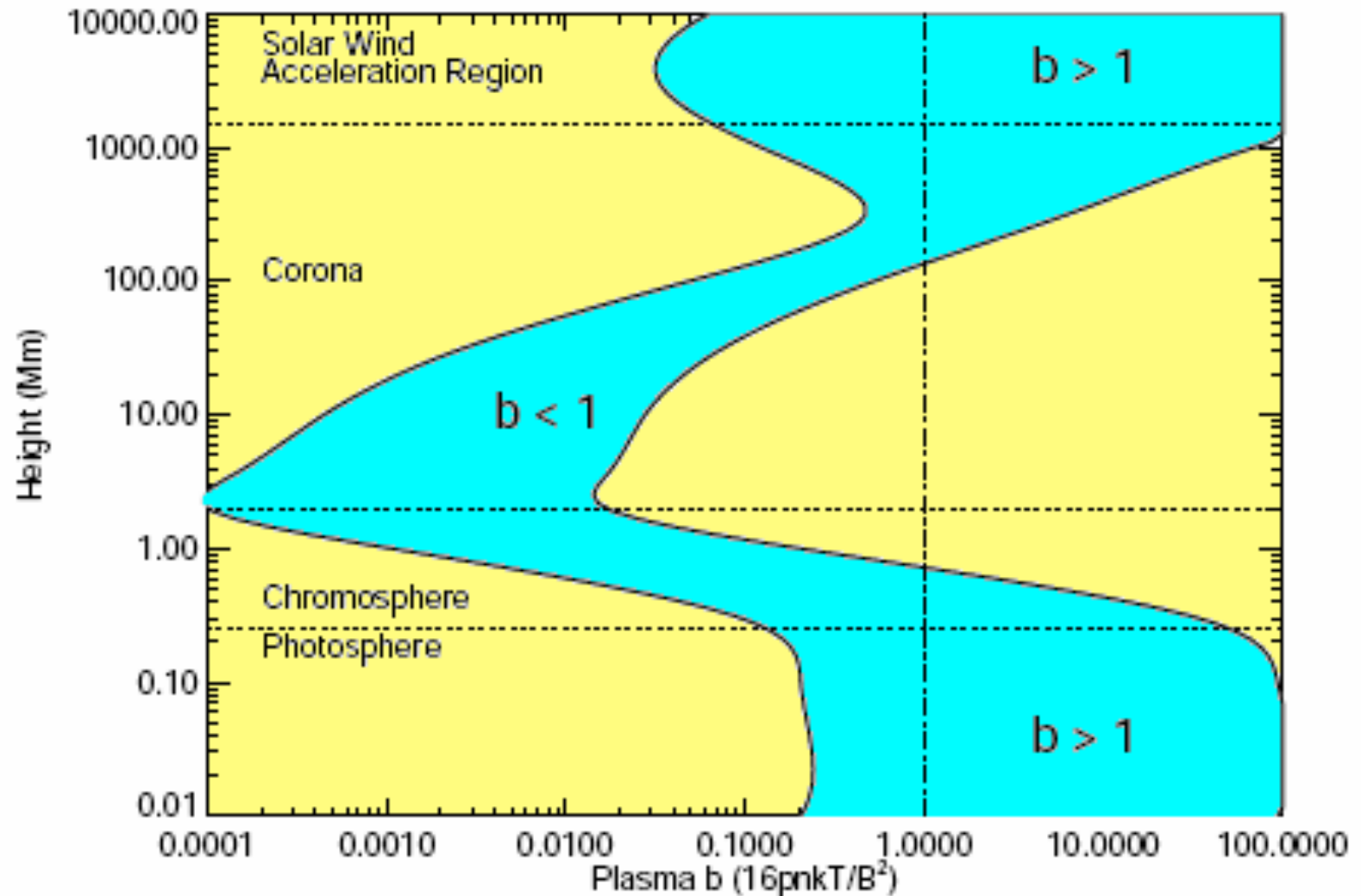


# Região ativa evoluída

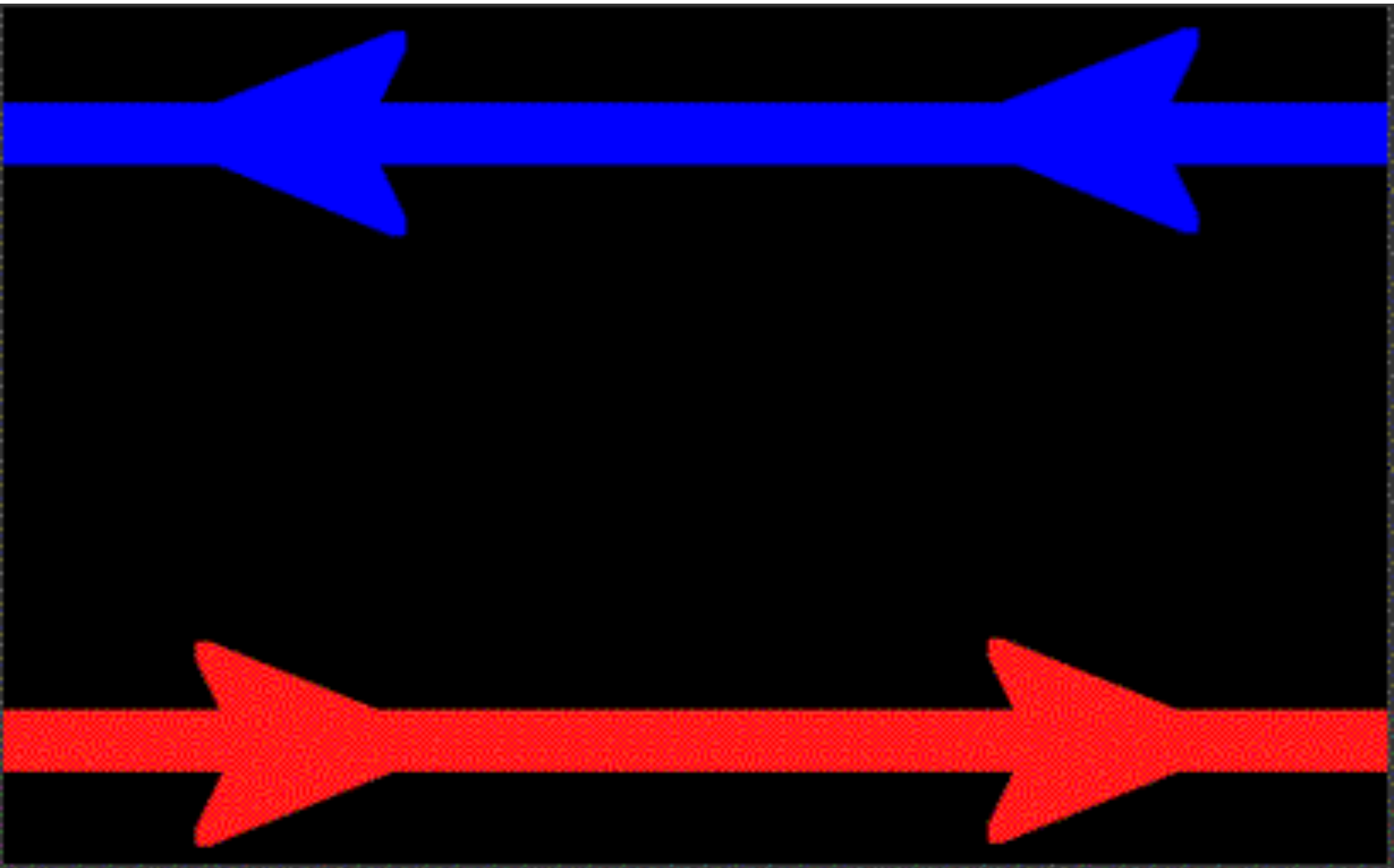


# Parâmetro $\beta$ de plasma

$\beta = \text{Pr. térmica} / \text{Pr. magnética} = 2\xi n_e k_B T_e / (B^2 / 8\pi)$ ;  $\xi$  - fração ionização,  $\xi = 1$  coroa,  $\xi = 0.5$  fotosfera



# Reconexão de linhas campo magnético

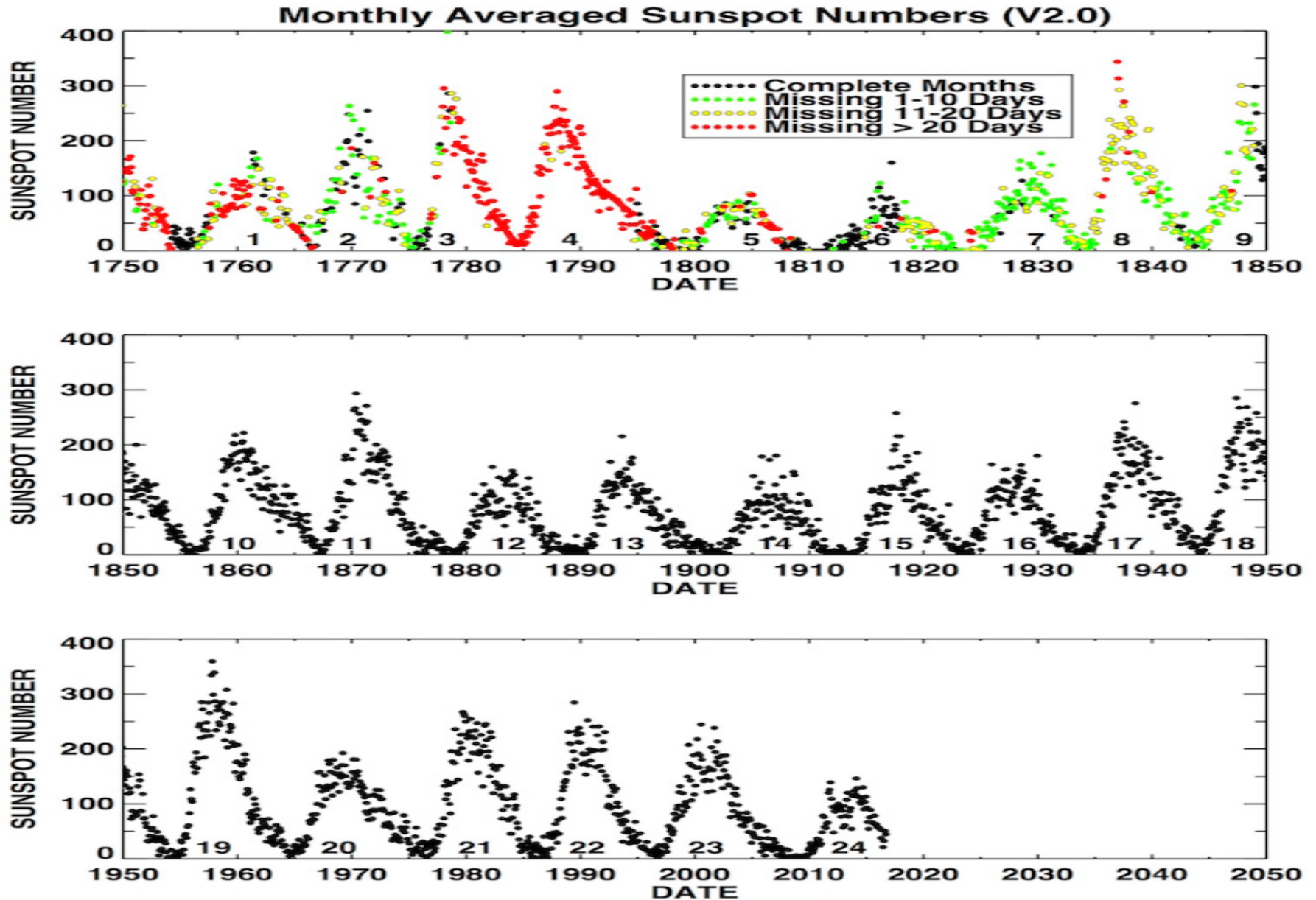




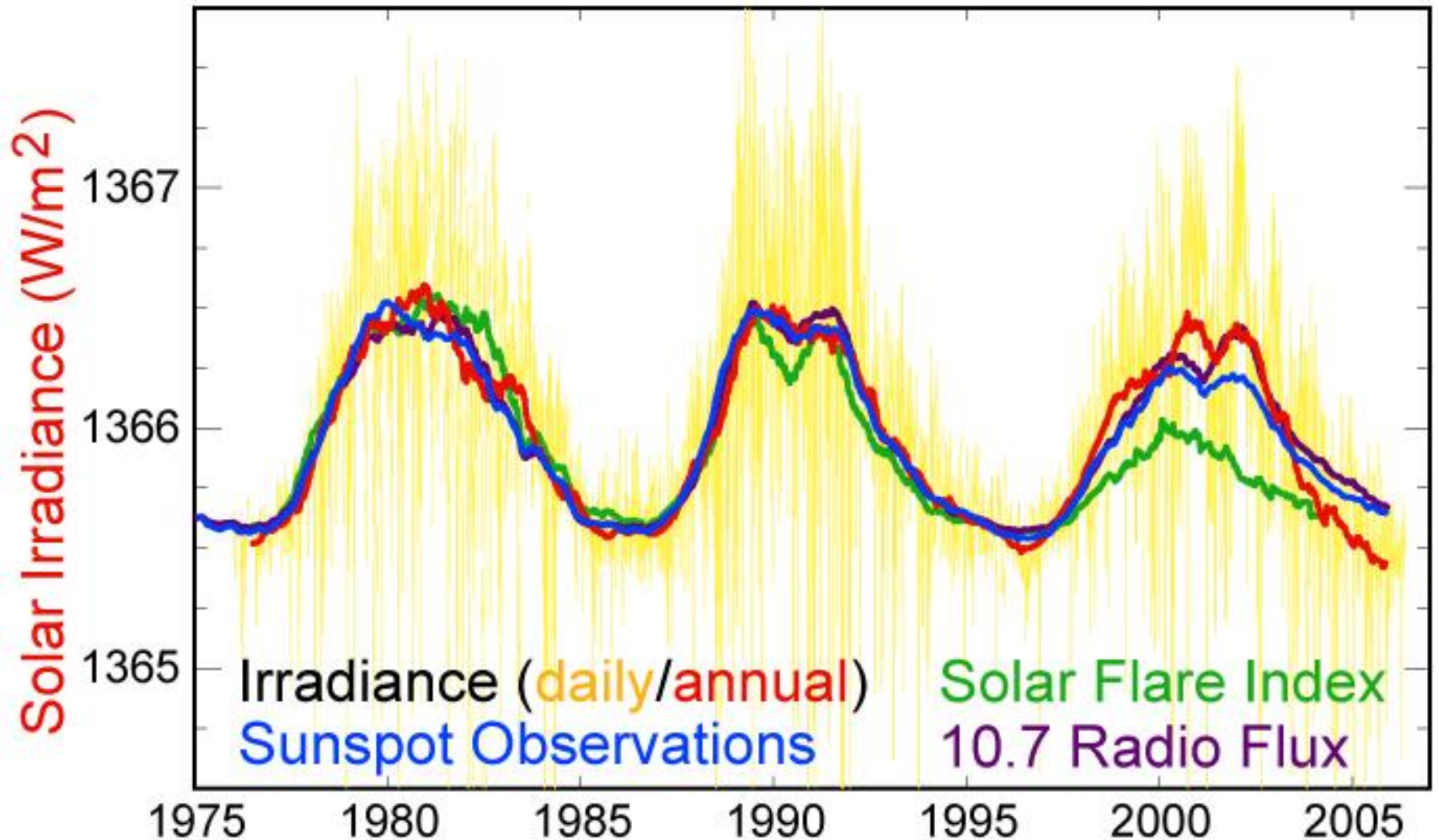
# Ciclo de atividade solar

- Crescimento e diminuição graduais n°. de manchas
- Período médio 11 anos
- 2012, 2014 - máximos ciclo 24
- Ciclo de atividade magnética ~22 anos -mesma pol. magn.
- No máximo ocorre grande aumento número de fenômenos energéticos (“flares”)
- Atividade solar afeta atividades humanas: comunicações, sist. navegação, órbita satélites, sist. distribuição energia, etc.

# Ciclos de atividade: 1750 - 2017



# Solar Cycle Variations

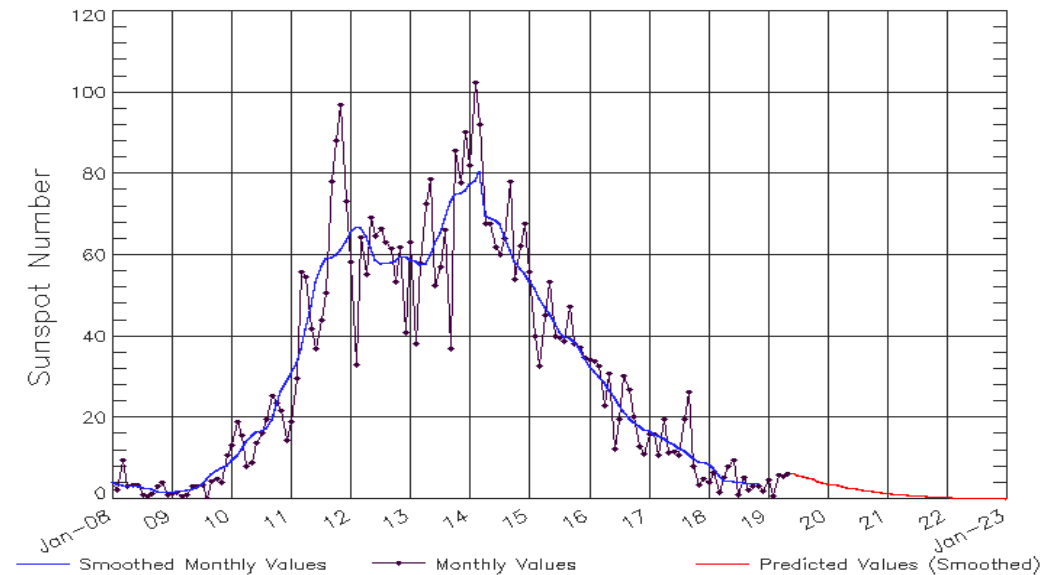




# Penúltimo ciclo (24): 2008-2019

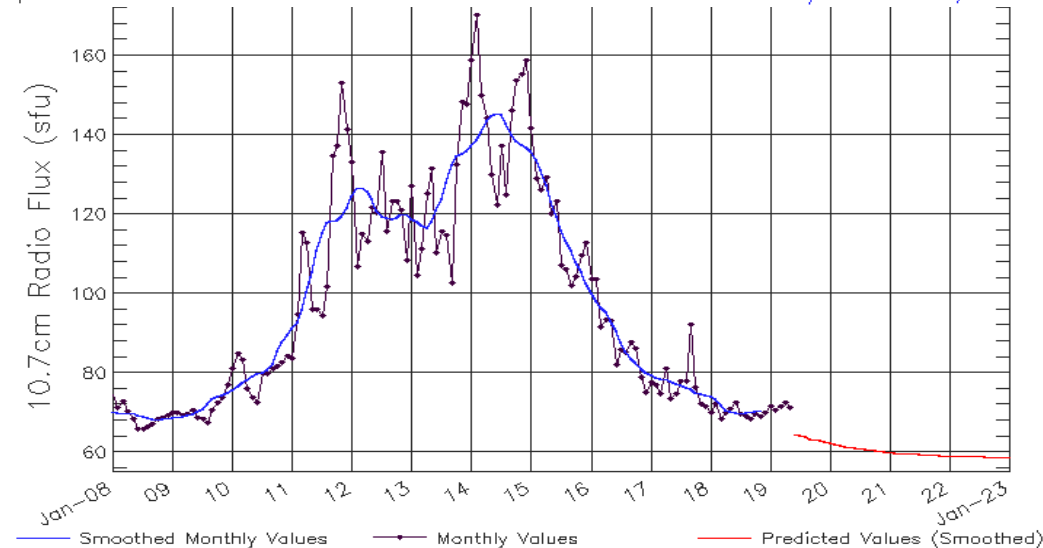
X

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression  
Observed data through May 2019



Updated 2019 Jun 3

NOAA/SWPC Boulder, CO USA



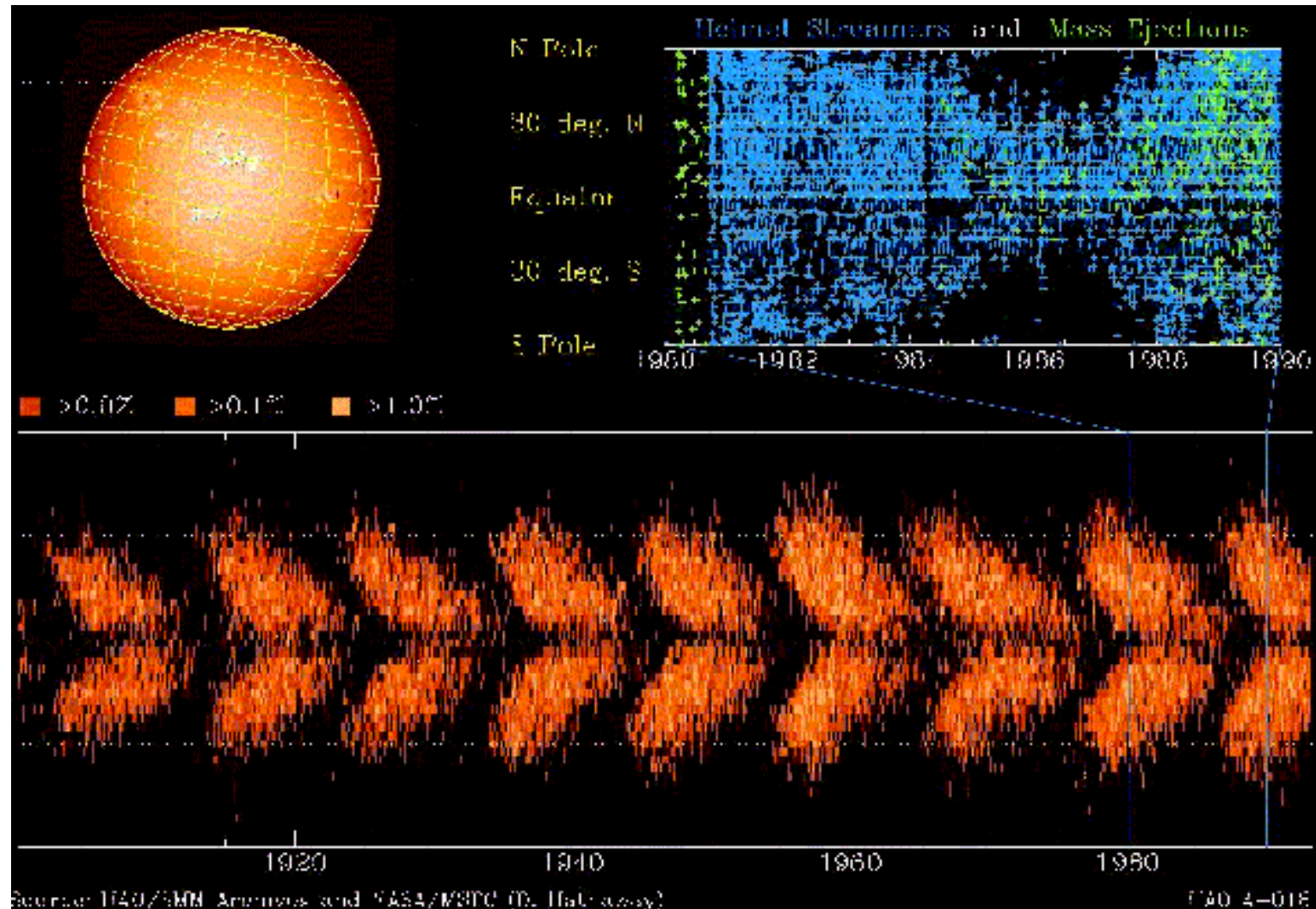
Updated 2019 Jun 3

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Ciclo de atividade - manchas

**Solar  
Magnetic Field  
Evolution**

# Ciclo de atividade - manchas



# Explosões (“flares”) solares

- Carrington & Hodgson (1859)
- Emissão  $10^{26}$  -  $10^{32}$  erg (seg – hrs)
- Energia equiv.  $\sim 10^9$  anos Itaipu a plena Potencia
- Energia magnética armazenada nas RA
- Part. energizadas interagem com o meio ambiente e geram emissão radiação (rádio, RX e Raios-gama) e correntes de partículas energéticas.
- Eventualmente CMEs.
- Algumas associadas a tempestades geomagn.



# Explosões (“flares”) solares

**Solar Flare**  
**1972 August 07**

**Big Bear Solar Observatory**



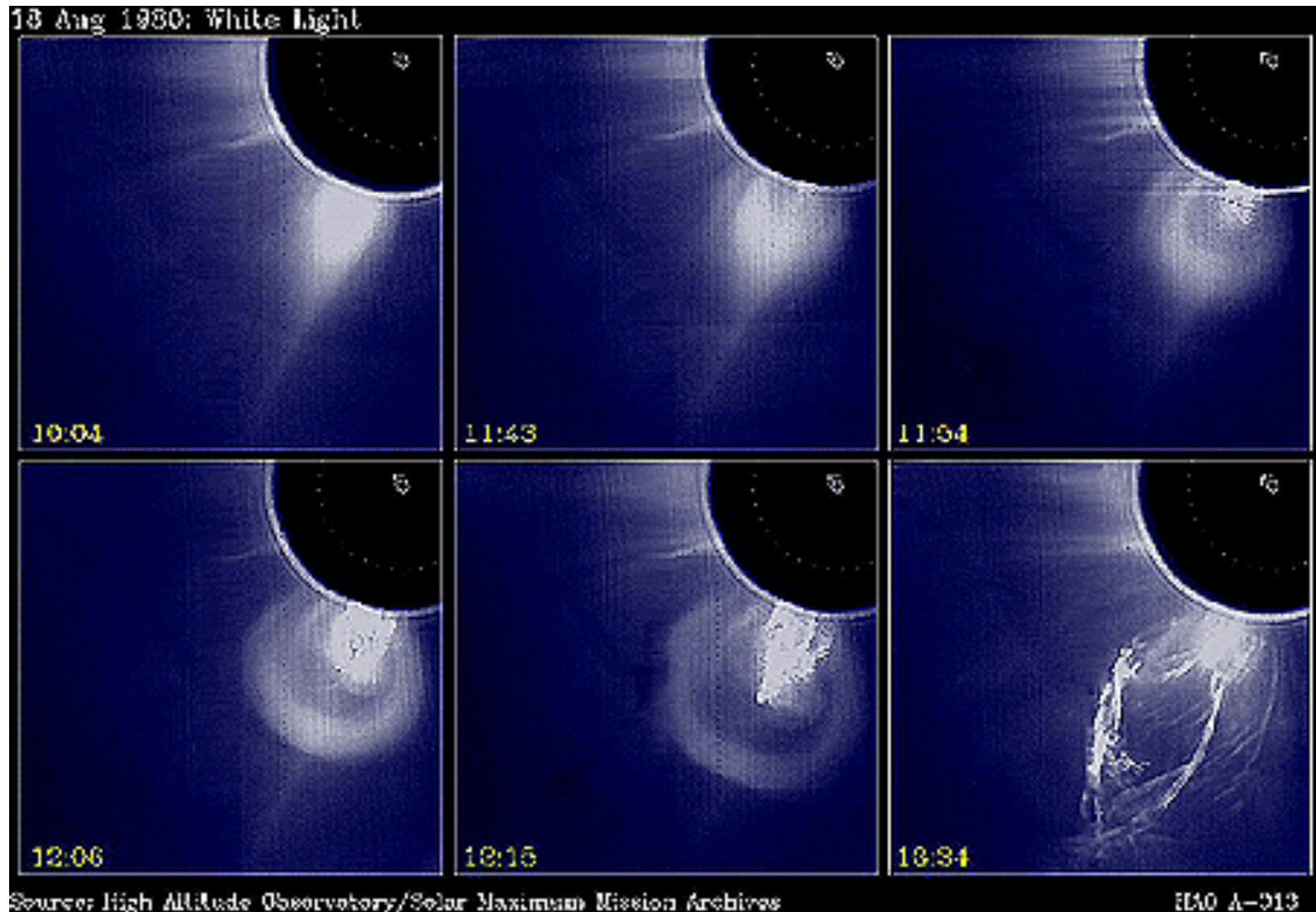
# Ejeções massa coronal (CME)

- Expulsão de grandes quantidades de matéria ( $10^{15}$  -  $10^{16}$  g) do Sol para o espaço a velocidades de  $10^2$  -  $10^3$  km/s, que carregam campo magnético.
- Causa e origem ainda pouco conhecidos
- Metade associados proeminências eruptivas e outra parte acompanha os “flares”. Associados instabilidades proem.
- Produzem ondas choque,  $\sim 2$  dias p/ chegar a Terra.



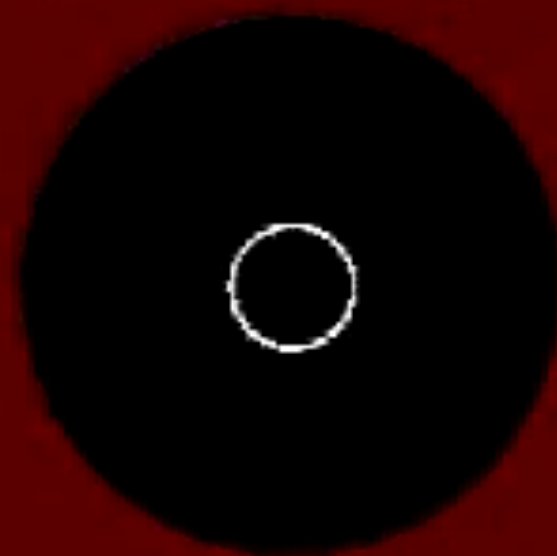
Terra para  
escala

# Exemplo de CME

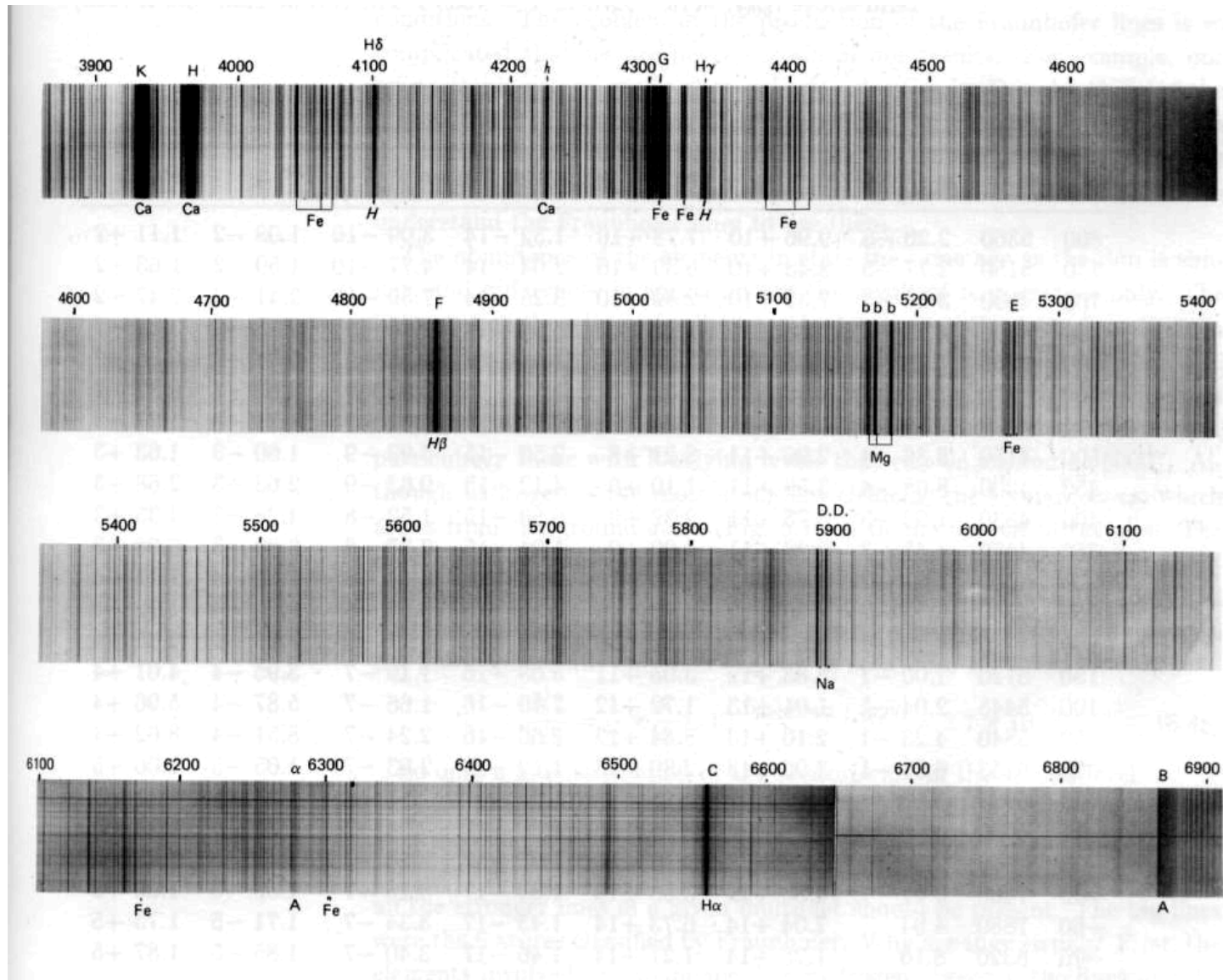




06:00



# Espectro solar visível



# Espectro solar

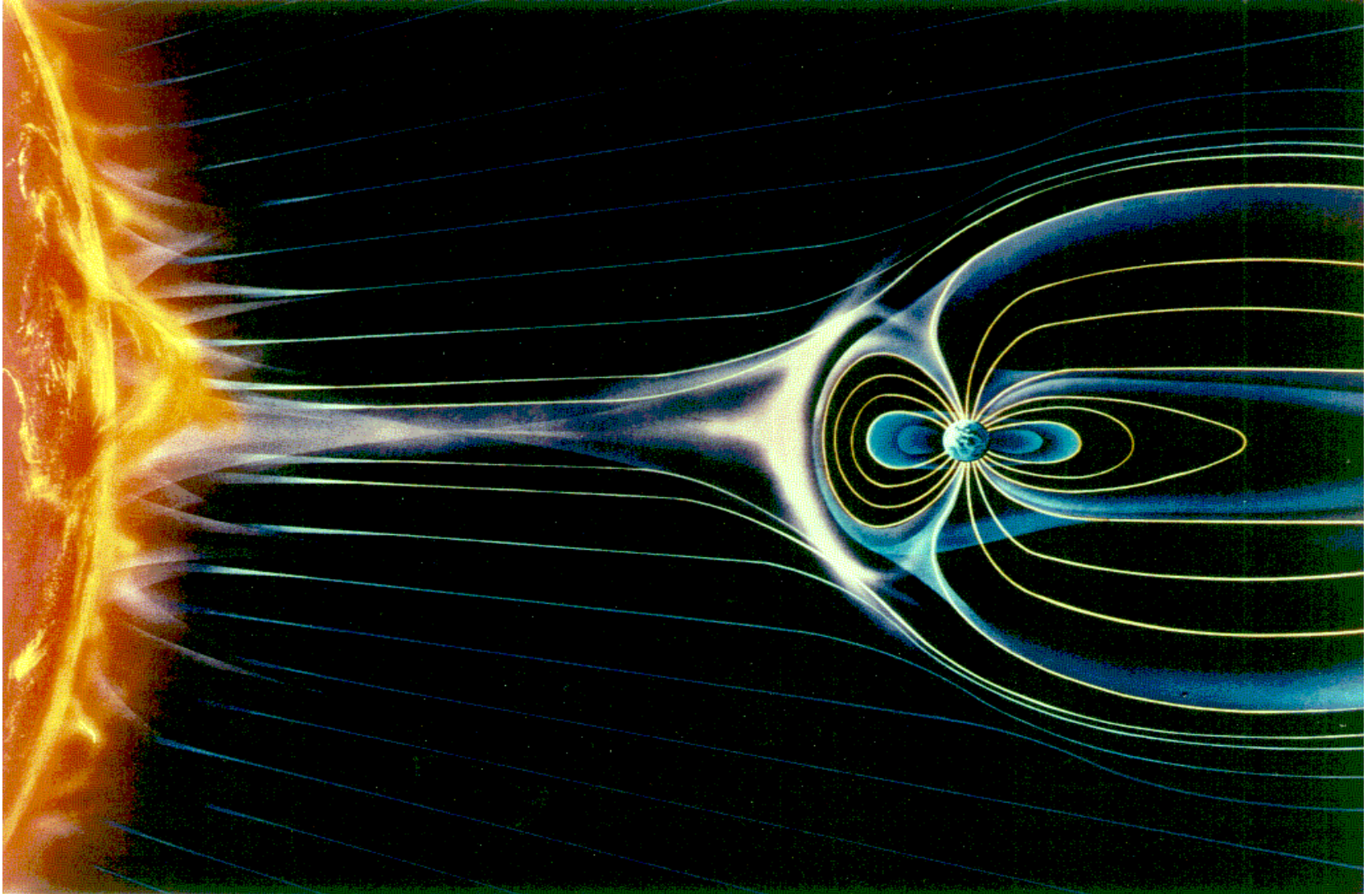
- Átomos – absorção da luz em  $\lambda$  específicos (espectroscópio) → elem. químicos presentes no Sol.
- Abundância elementos e Temperatura da região onde estão presentes na atmosfera solar.
- Espectro solar – classificação espectral G2V
- ☀ - estrela baixa atmosf. fria ( $T \sim 5800$  K)
- Presença de átomos de elementos metálicos
- Maioria átomos neutros – aqueles com níveis de energia baixos p/ excitação a 6000 K.
- Ca, Mg, Na, Fe
- Linhas do H: H- $\alpha$ , H- $\beta$ , H- $\gamma$ , H- $\delta$

# Vento solar

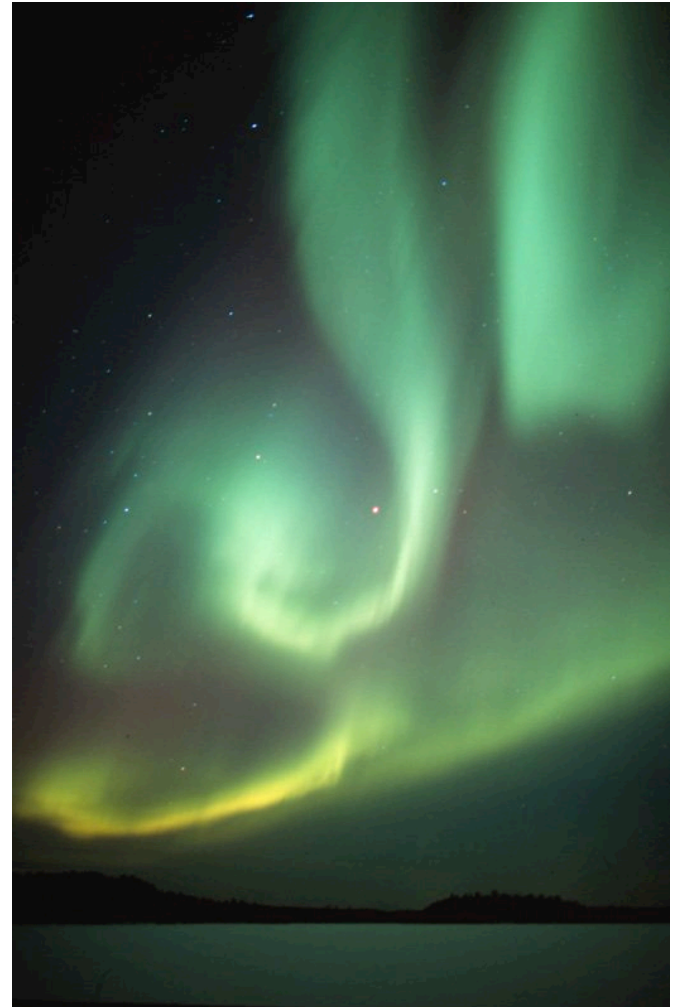
- Trata-se de um fluxo de elétrons e íons positivos expulsos da coroa p/ meio interpl. com  $v = 10^2$  km/s
- Escapam ao espaço através de linhas de campo “abertas”
- Vento rápido - Origem nos chamados buracos coronais
- Eventualmente atinge a Terra podendo causar auroras e/ou perturbações na magnetosfera terrestre.



# Vento solar



# Exemplos de aurora

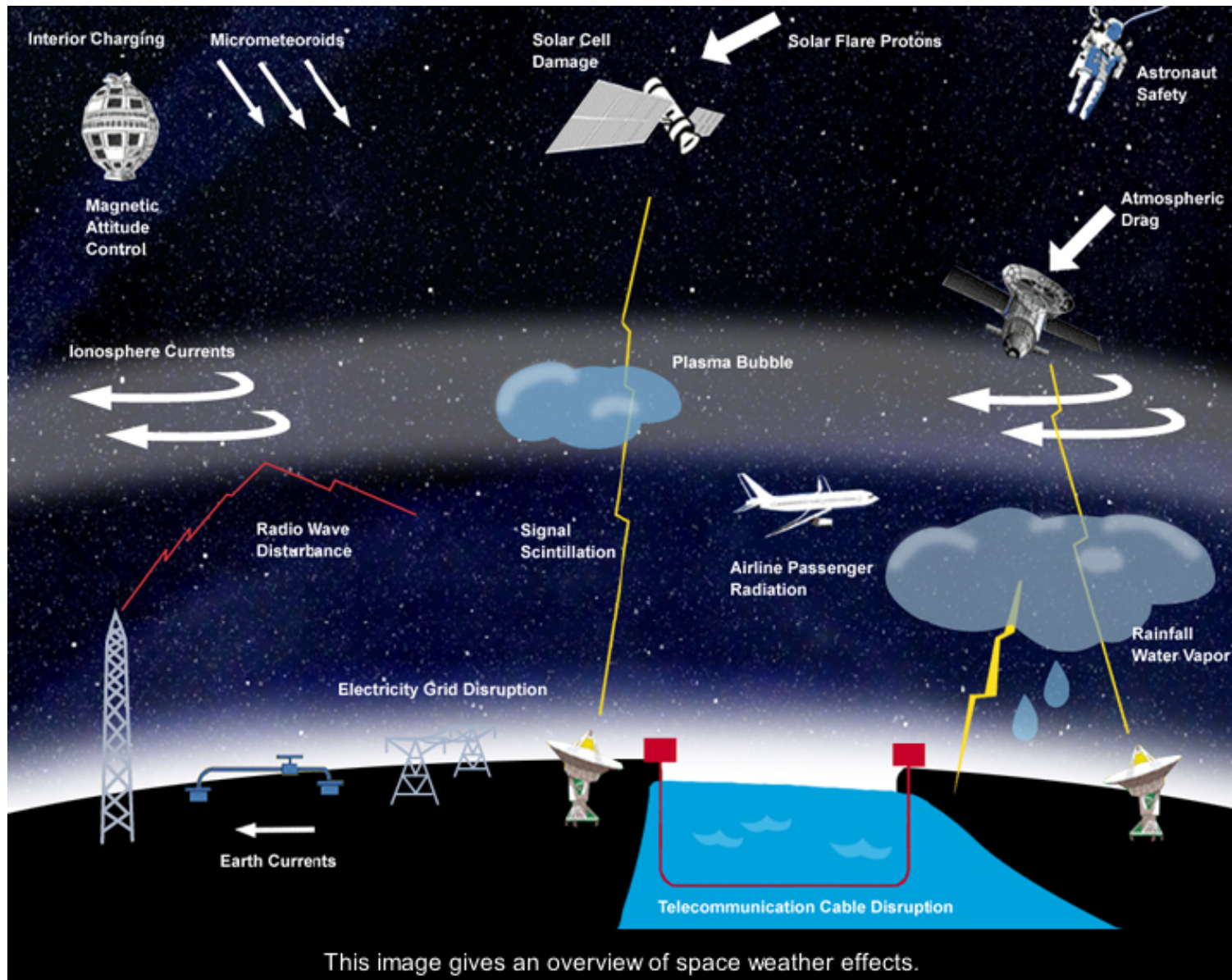


# Importância pesquisas sobre Sol

Produtos de alta tecnologia usados na vida diária são extremamente sensíveis aos efeitos da atividade solar. Logo, esta influencia direta ou indiretamente as atividades humanas. Portanto, é muito importante a investigação científica da atividade e fenômenos solares para reduzir os prejuízos que causam nas atividades humanas.



# Importância pesquisas sobre Sol





# Investigações solares na DIAST

- Desenvolvimento de instrumentação rádio: Espectroscópios (BSS, Callisto)  
Interferômetro (BDA)
- Observações simultâneas com satélites SOHO, TRACE, RHESSI, Hinode, SDO
- Participação Campanhas Internacionais de Observações - Programa “Max Millenium”
- Pesquisas: “Flares”, CMEs e prev.

# Espectroscópio - BSS





# Interferômetro - BDA





# Pesquisas

- Recorrência de BC e efeitos no ambiente terrestre;
- Processos de aquecimento coronal;
- Modelos solares;
- Investigações do interior solar;
- Modelo de explosão (“flare”) solar;
- Previsão de ocorrência de explosões (“flares”) solares e ejeções de massa coronal (CME);
- Interação de fenômenos solares com o meio interplanetário / ambiente terrestre / sist. tecnológicos;
- Átomos e moléculas presentes - atmosfera solar (IC);
- Determinação da temperatura de alturas distintas na atmosfera solar (IC);





FIM