

CIAA - 2021

José Roberto Cecatto

DIAST/CGCE-INPE

Email: jr.cecatto@inpe.br

APRESENTAÇÃO

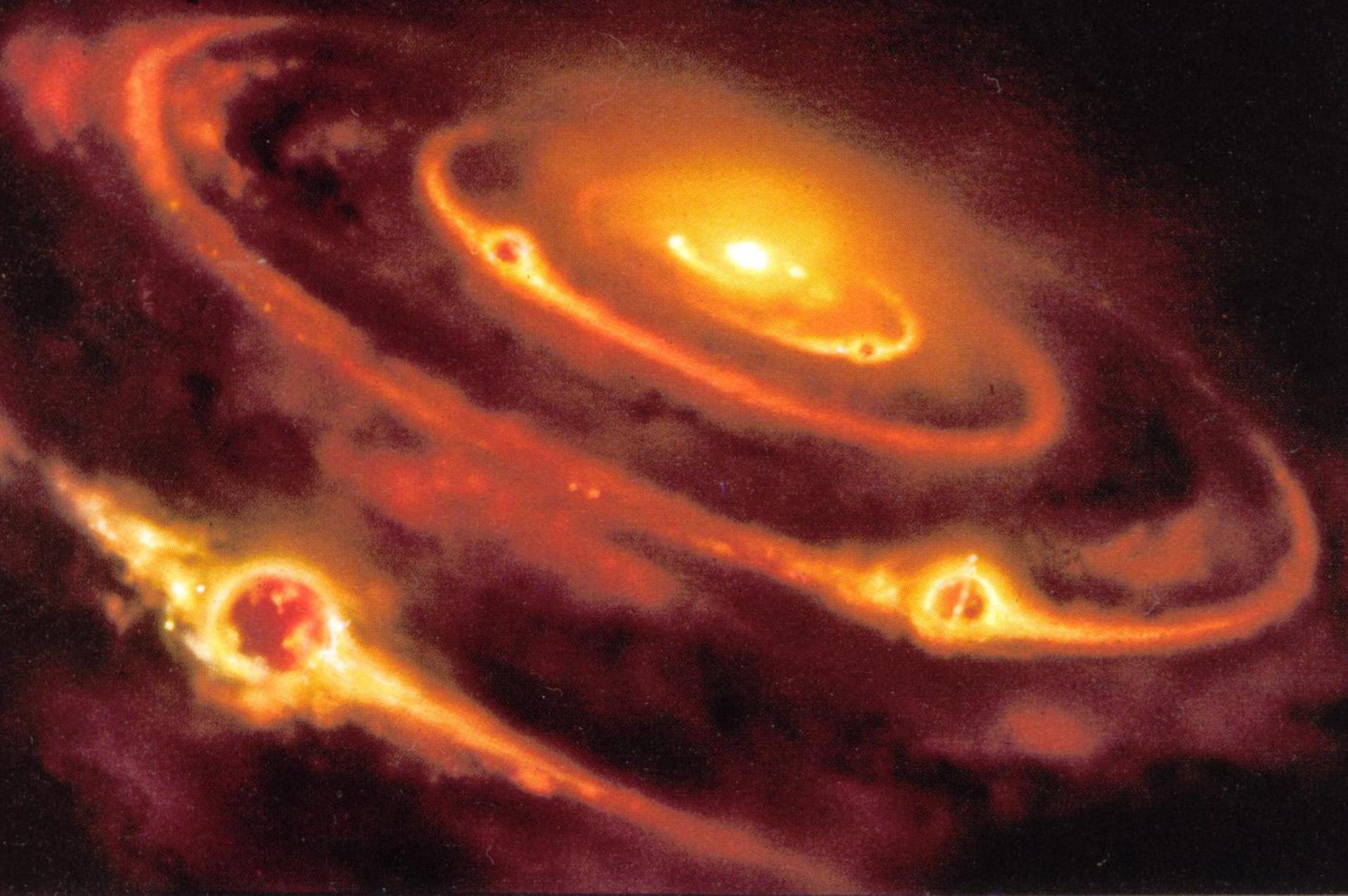
- Nascimento
- Visão humana
- Estrutura: Interior (F.E.) e Atmosfera
- Campos magnéticos do Sol
- Regiões ativas
- Ciclo de atividade
- Explosões (“flares”) solares
- Ejeções de massa coronal (CME)
- Relações solares-terrestres (C.E.)
- Espectro solar visível
- Vento solar
- Importância das pesquisas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



Nascimento - * + sist. solar





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

- Rochas sedimentares – ciclos datam $> 10^5$ anos;
- Concentrações C¹⁴ - espessura de anéis de crescimento de árvores, ~ 11 mil anos;



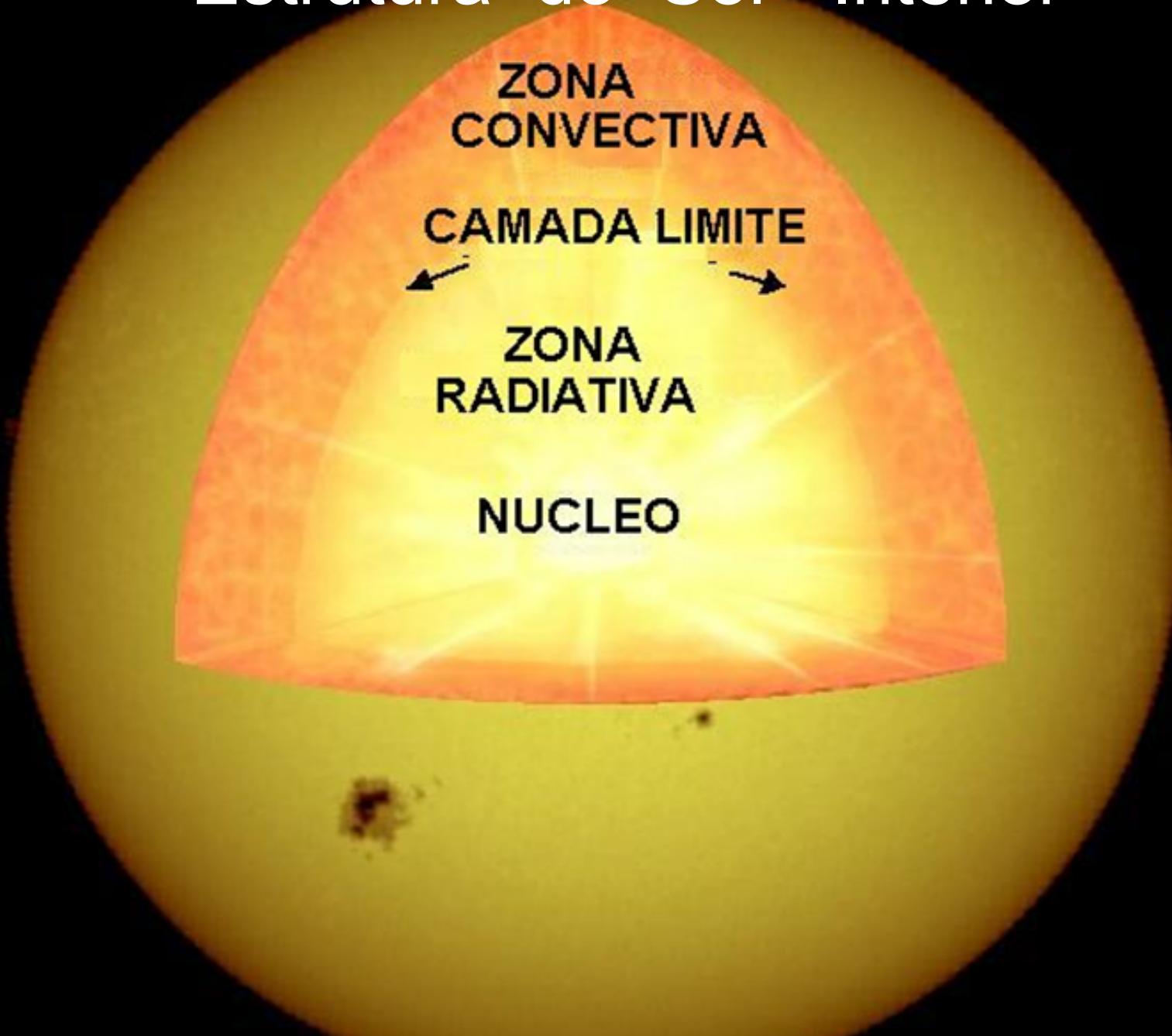
- A atividade solar - regularmente registrada desde babilônios – século XIX A.C.. No século VIII A.C. surgiu o primeiro relatório sobre manchas solares – uma publicação chinesa;
- Civilização ocidental - 1º registro 300 A.C., Grécia

CARACTERÍSTICAS DO SOL

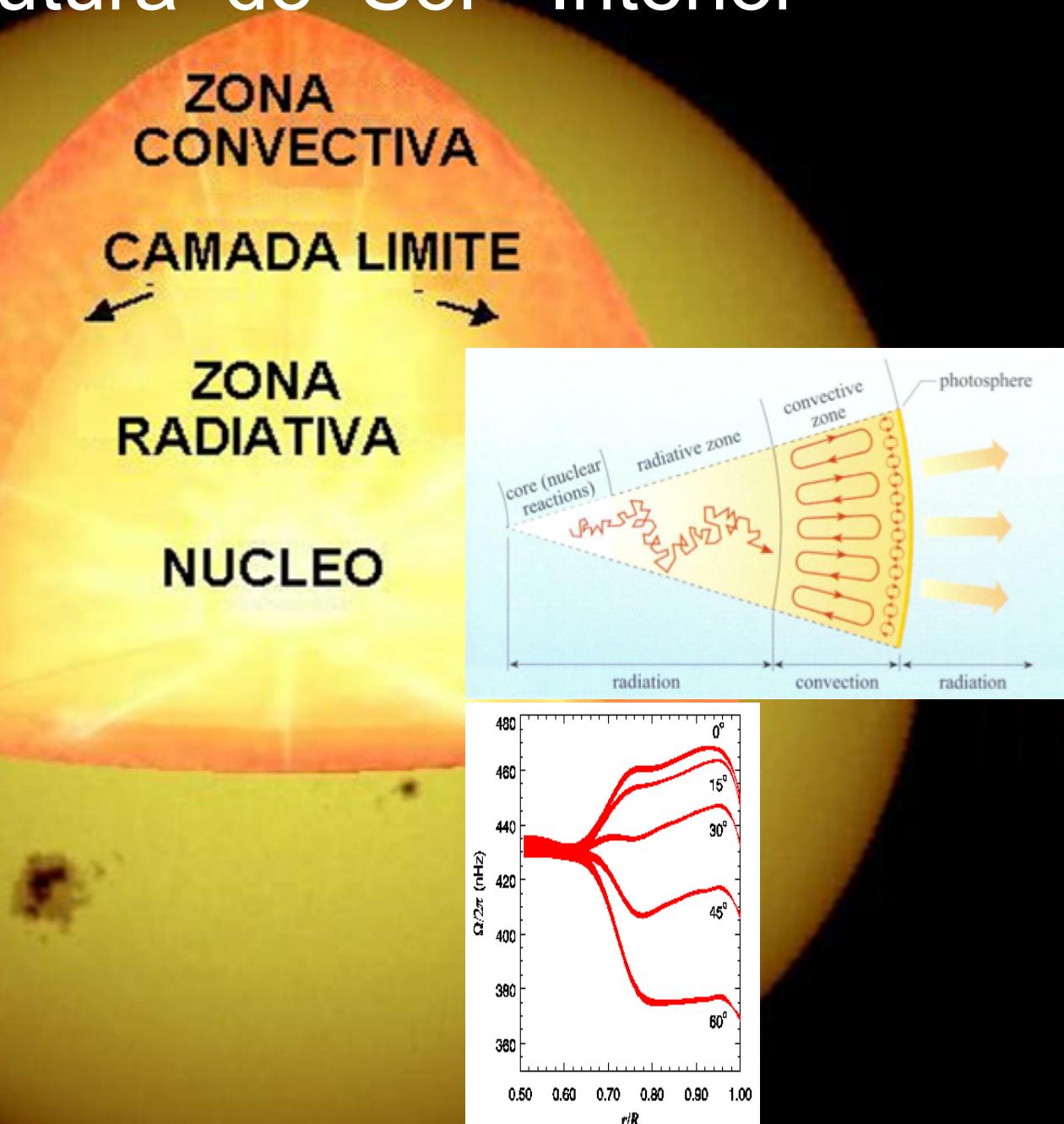
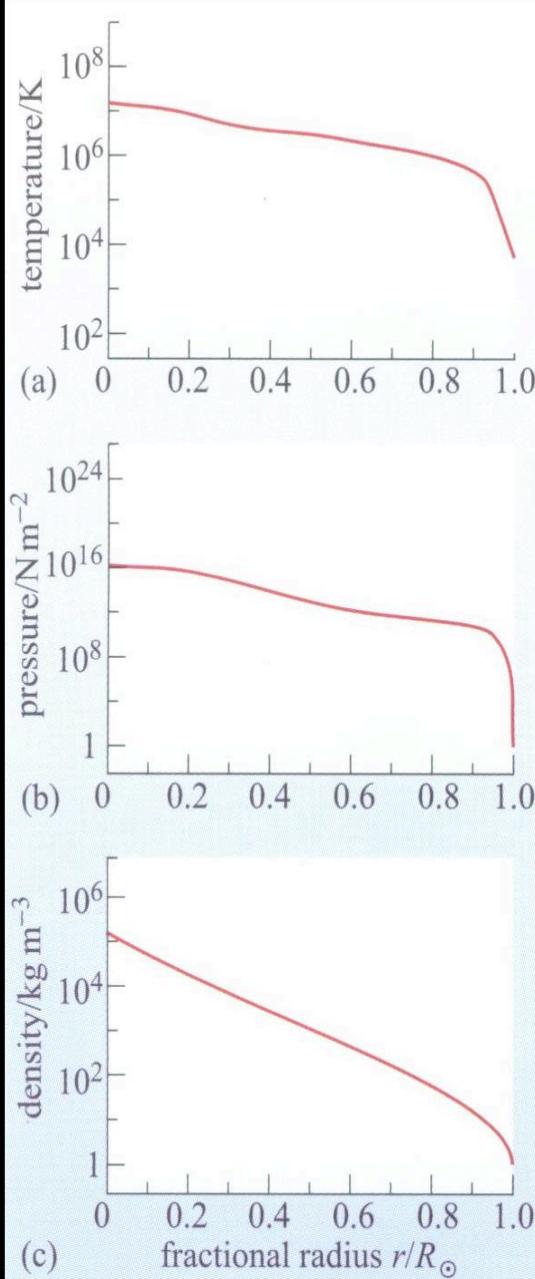
| | | |
|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| MASSA | $1,989 \times 10^{30}$ kg | 333000 massa da Terra |
| RAIO | 696.000 km | 109 vezes raio terrestre |
| DENSIDADE CENTRAL | 160.000 kg/m ³ | 12,4 vezes a terrestre |
| DENSIDADE MÉDIA | 1.409 kg/m ³ | ~ 26% densidade terrestre |
| LUMINOSIDADE | $3,85 \times 10^{26}$ W | |
| DISTÂNCIA MÉDIA À TERRA | 149.600.000 km | 8 min. 19 seg. Velocidade da luz |
| VELOCIDADE DE ESCAPE | 618 km | 55 vezes a terrestre |
| TEMPERATURA CENTRAL | $15,6 \times 10^6$ K | |
| TEMP. SUPERFICIAL | ~ 5780 K | 1-5 $\times 10^6$ K na coroa |
| IDADE | $4,6 \times 10^9$ 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; até moléculas orgânicas | |
| 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.

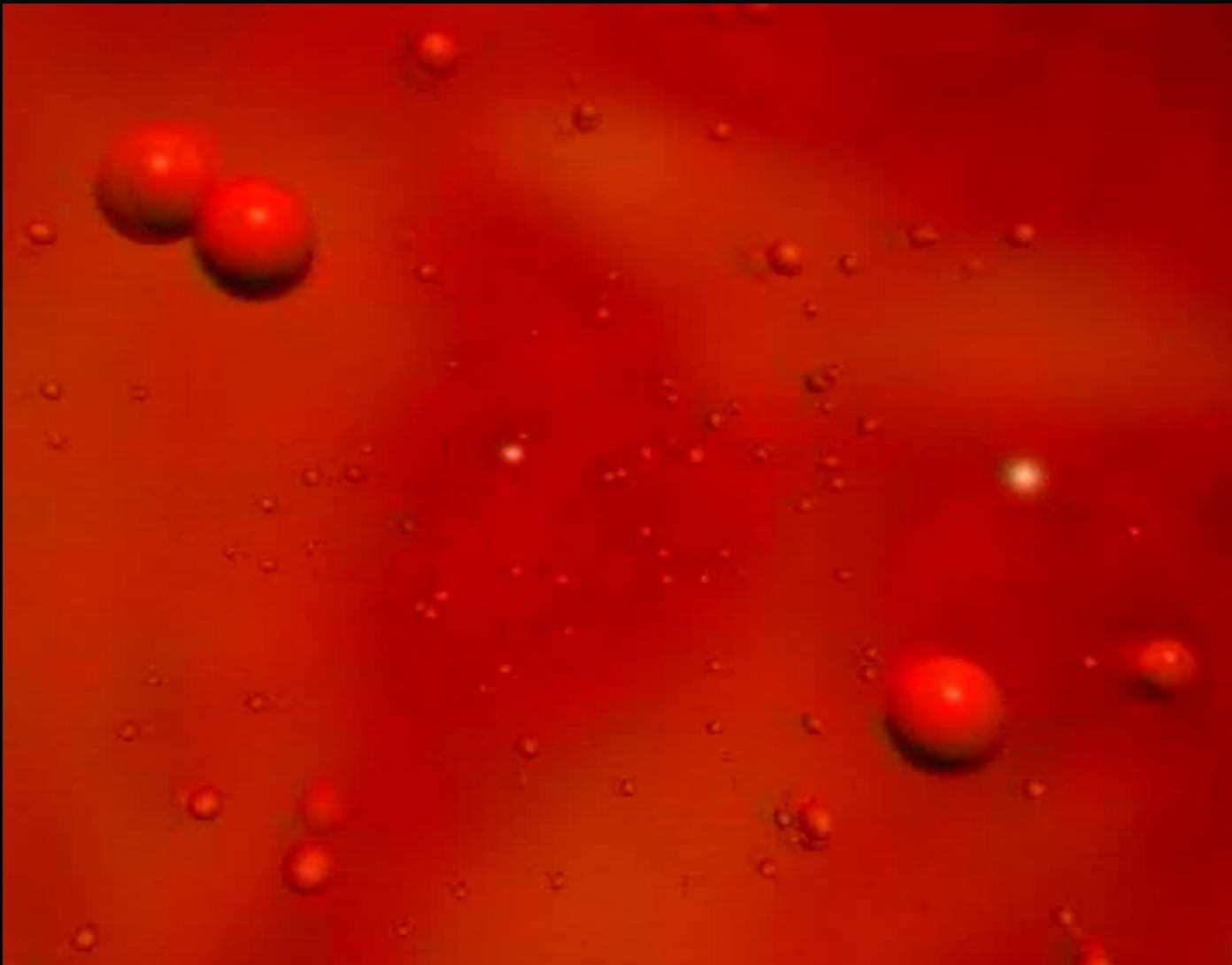
Estrutura do Sol - Interior



Estrutura do Sol - Interior

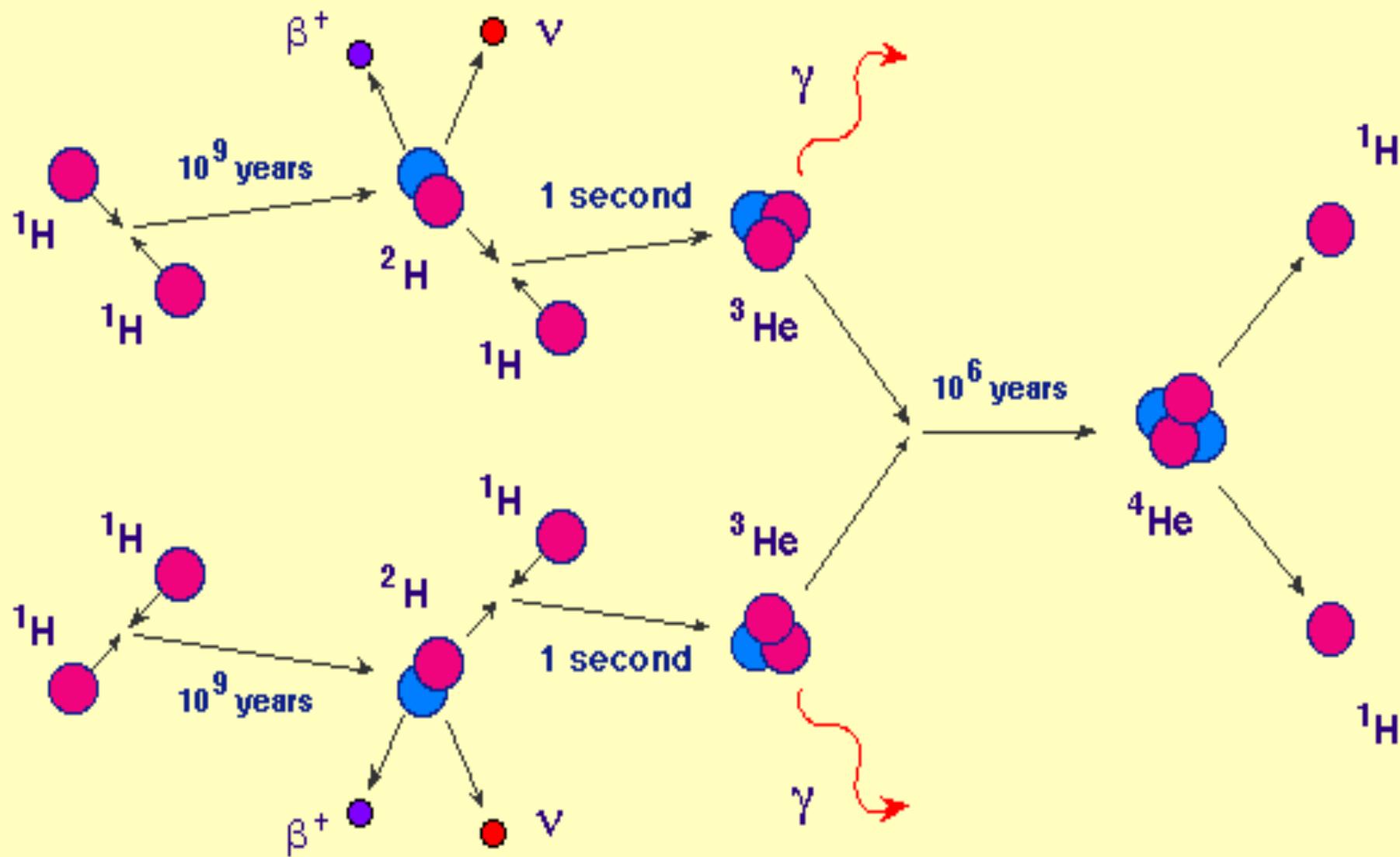


Interior (Produção de energia)

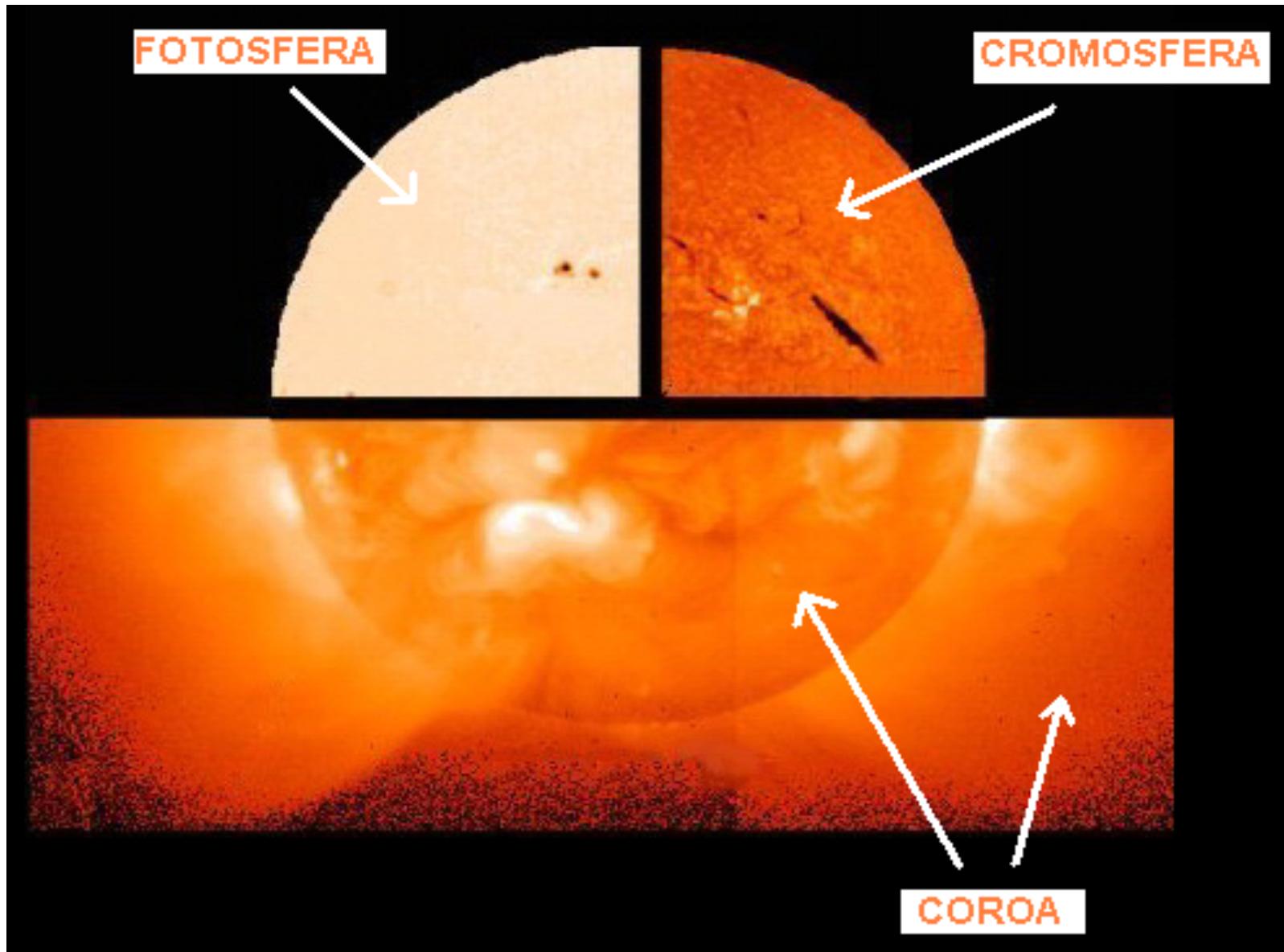


Estrutura - Interior (fonte de energia)

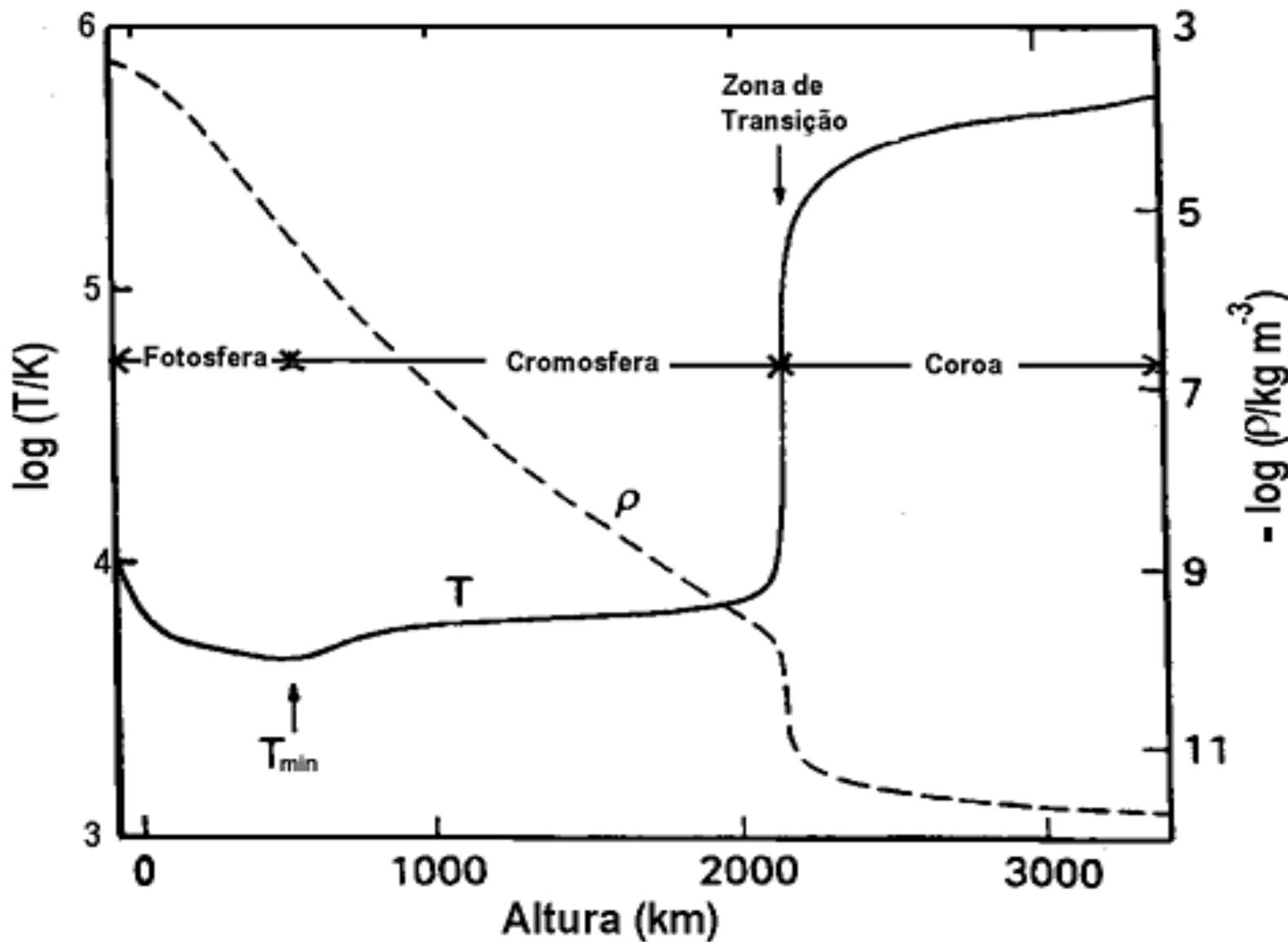
Reações de fusão termonuclear - CADEIA PP - Fusão de H em He



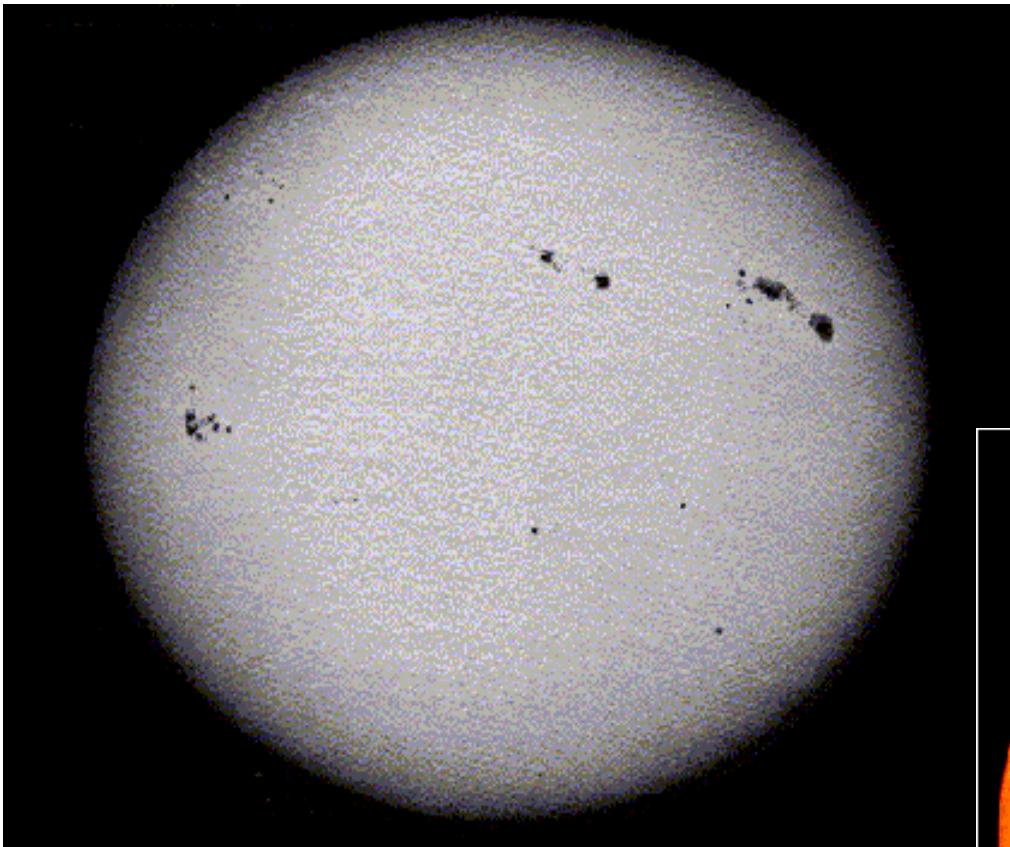
Estrutura - Atmosfera



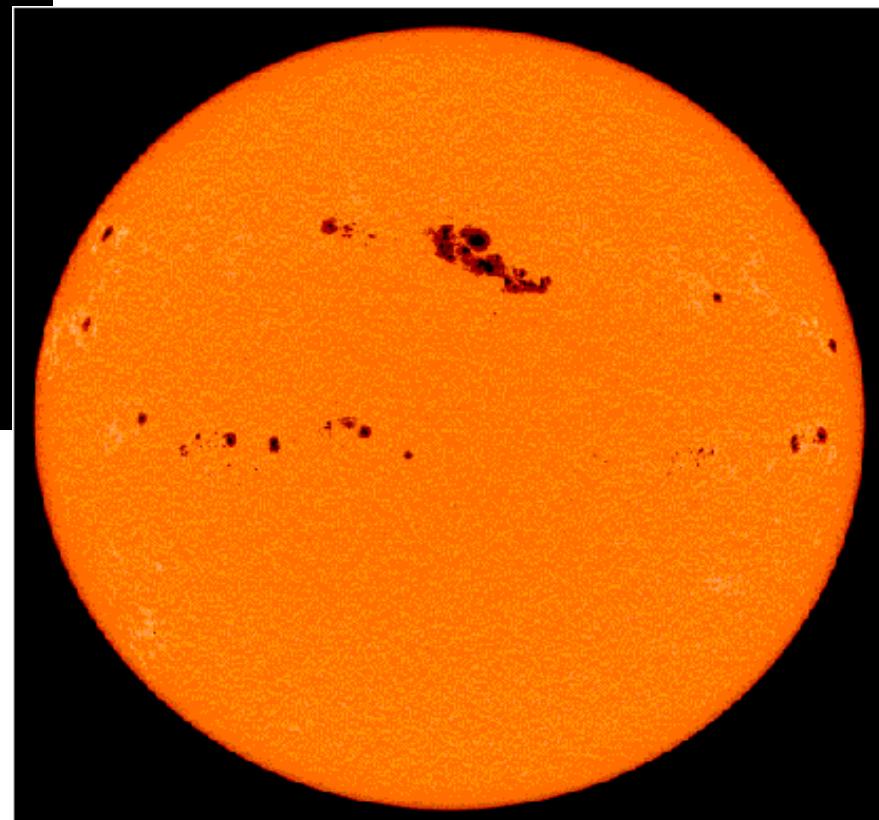
Atmosfera - T , N_e



Fotosfera - luz branca / visível



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



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

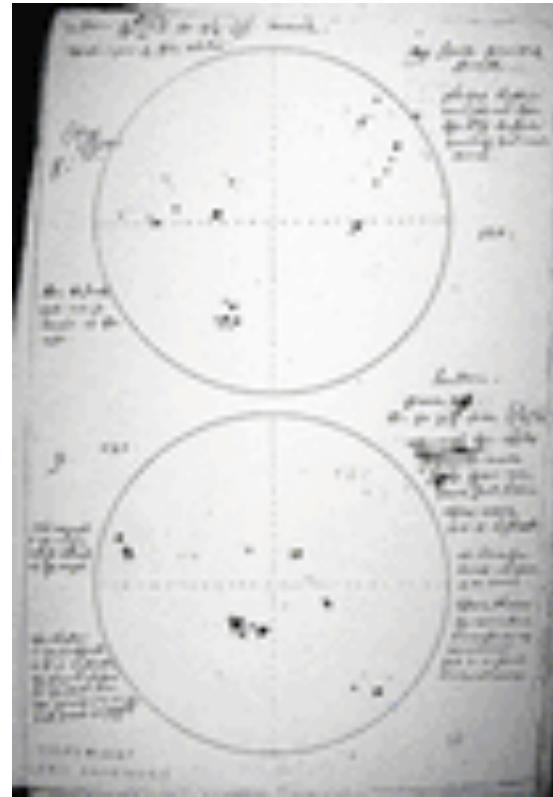
Manchas solares

Observação a olho nú – China, século 8 AC;

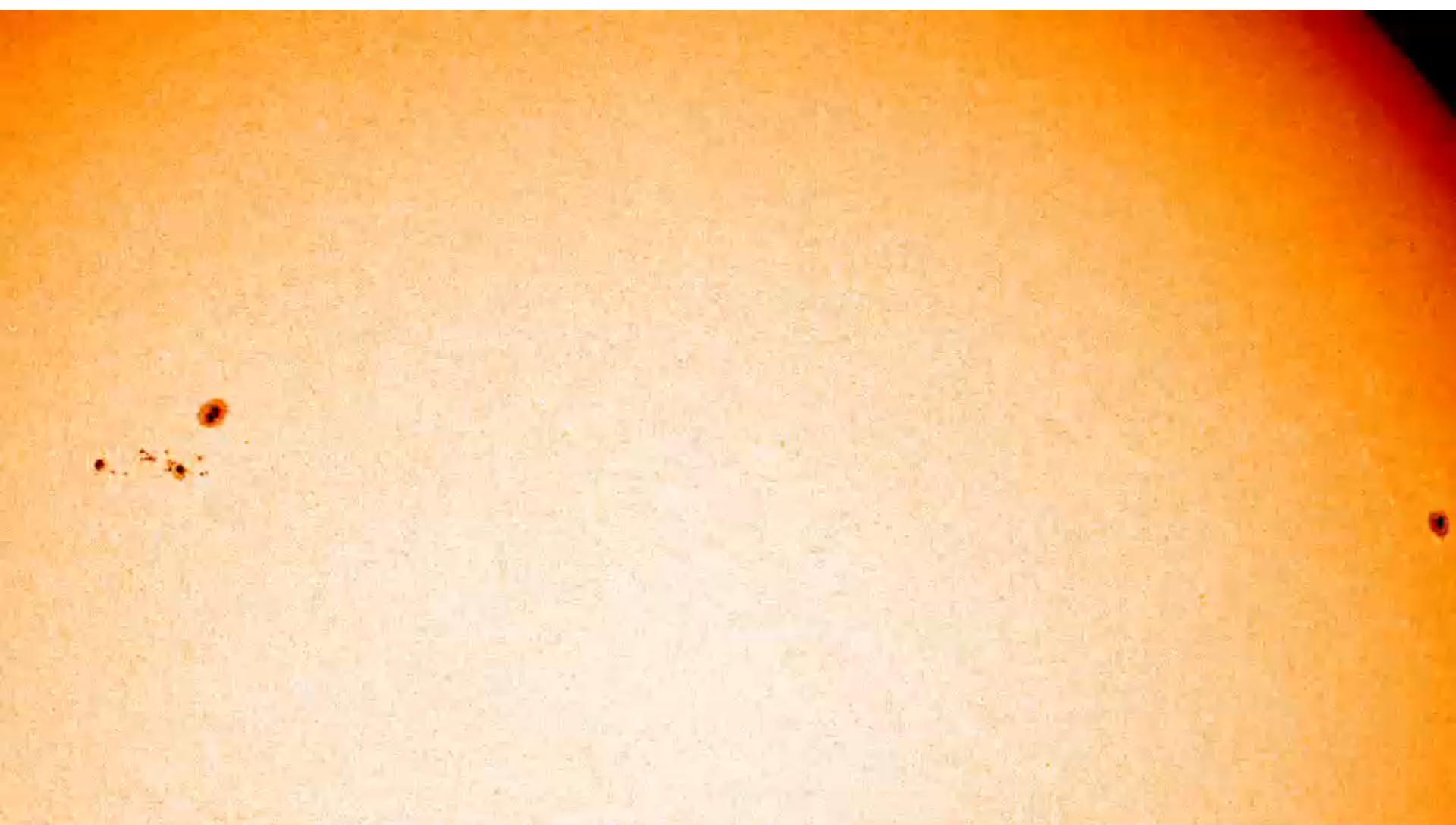
Registros de Anaxágoras de 467 AC;

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)

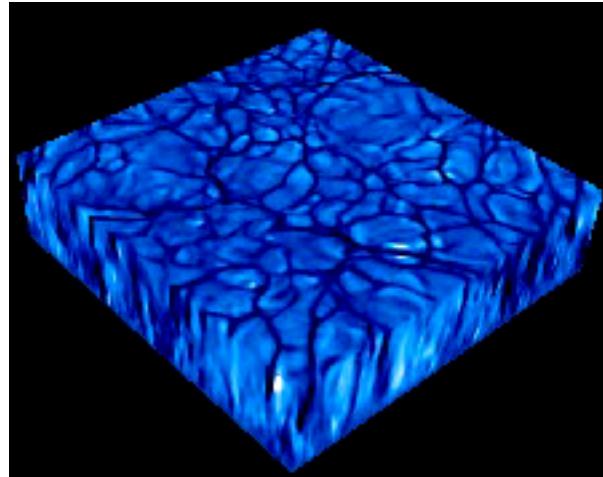
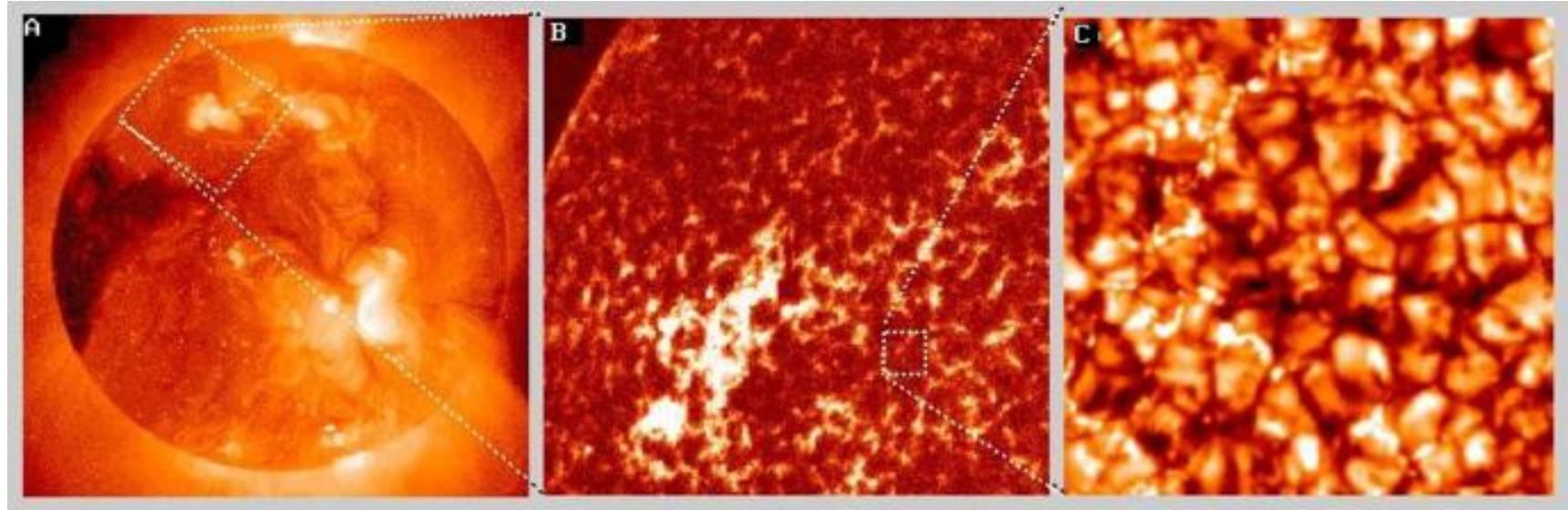


Fotosfera - Manchas solares

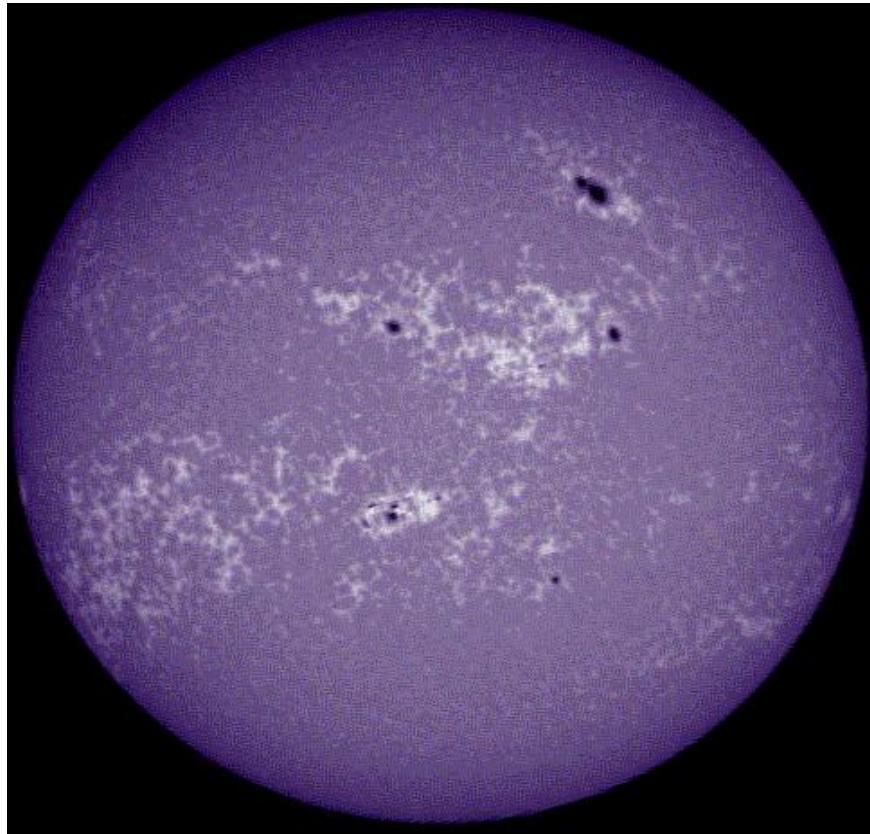


Fotosfera - granulação

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

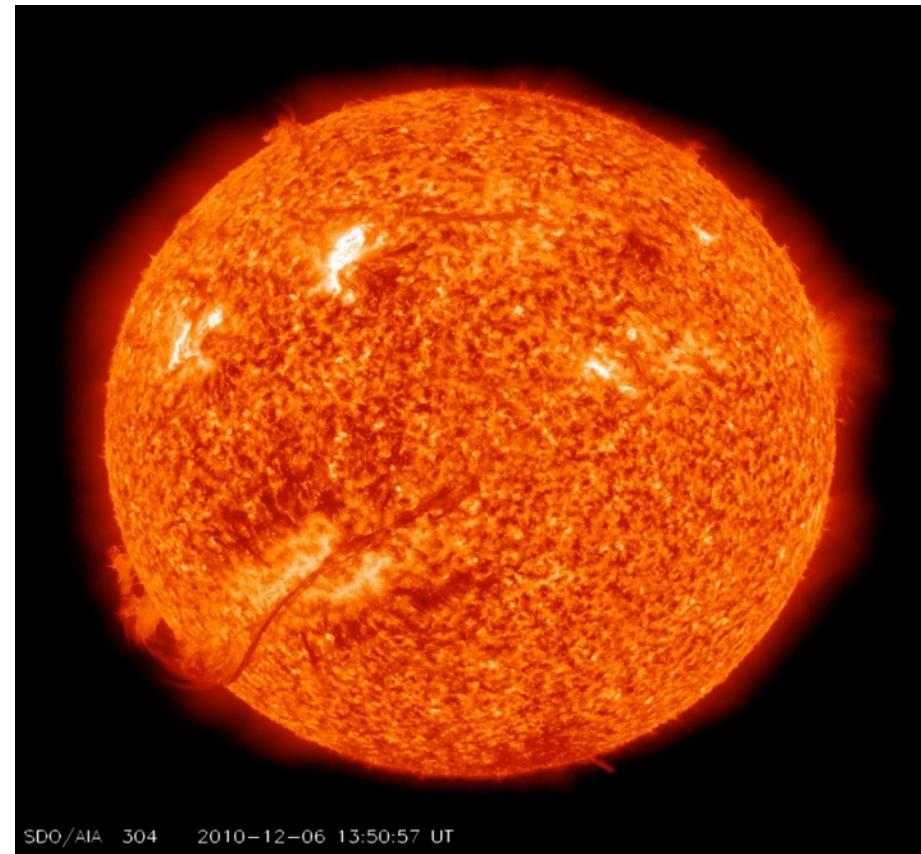


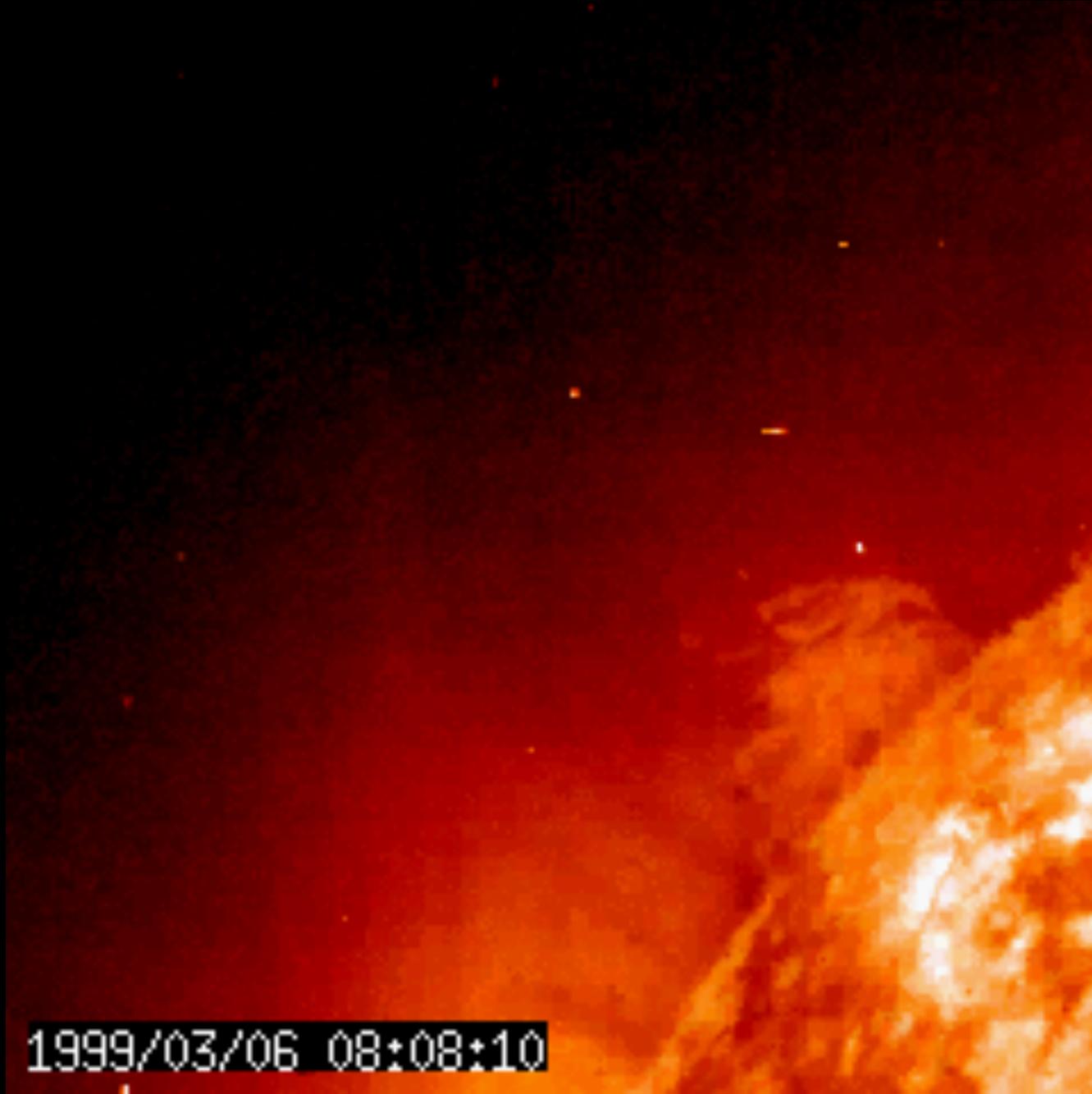
Cromosfera – imagem Ca II / H- α



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

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



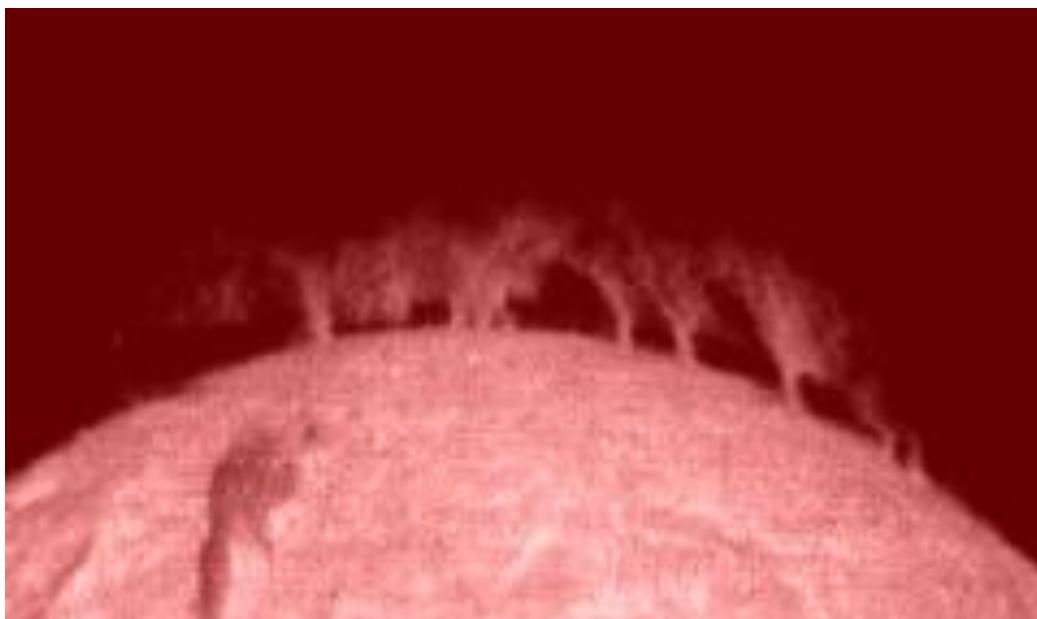


1999/03/06 08:08:10

Espículos



Proeminências



Coroa solar - características

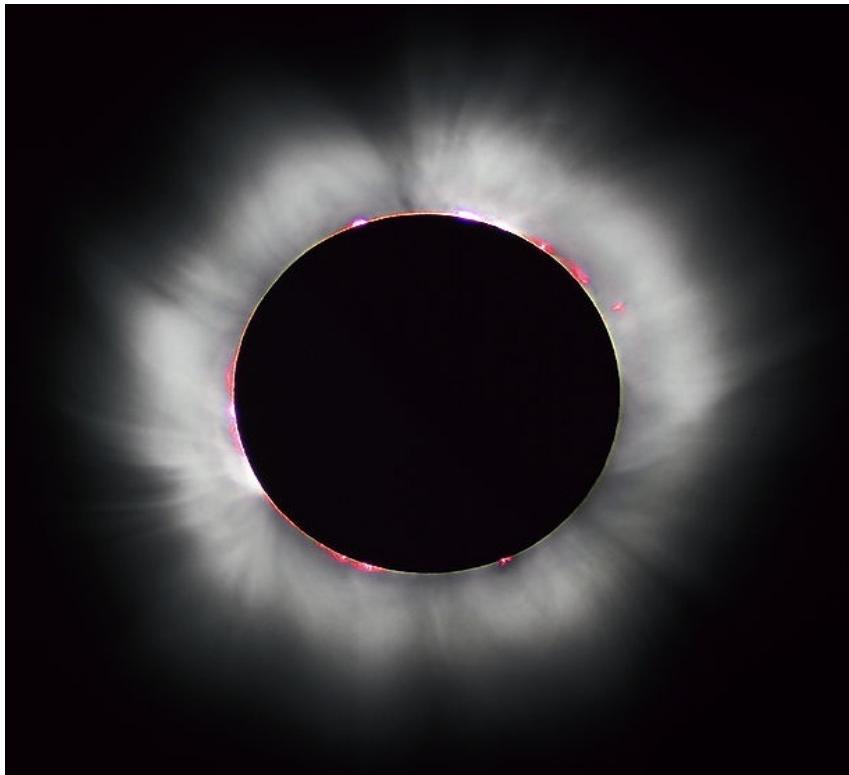
- Camada mais externa e tênue
- Extende-se por milhões de km
- Visível apenas durante eclipses totais
- Temperatura: 1-2 milhões de graus.
- Densidade de 2-3 ordens de grandeza mais baixa que na cromosfera
- Emite Raios-X e UV em abundância
- Matéria na forma de plasma
- RA - arcos magnéticos

Total Solar Eclipse
of
1994 November 3

taped at
La Lava, Bolivia
by

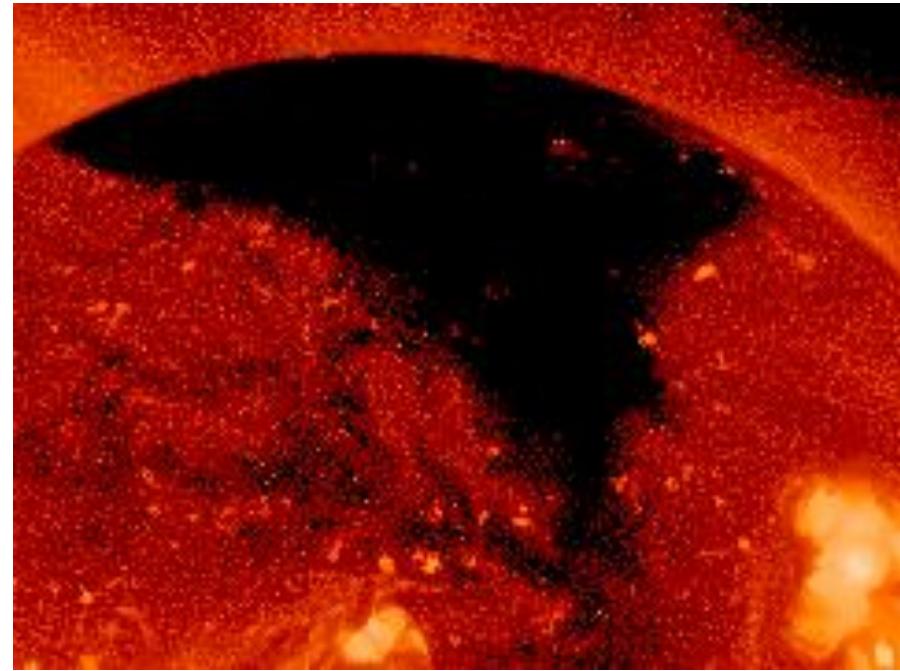
Fred Espenak

Coroa solar - Eclipse solar



X

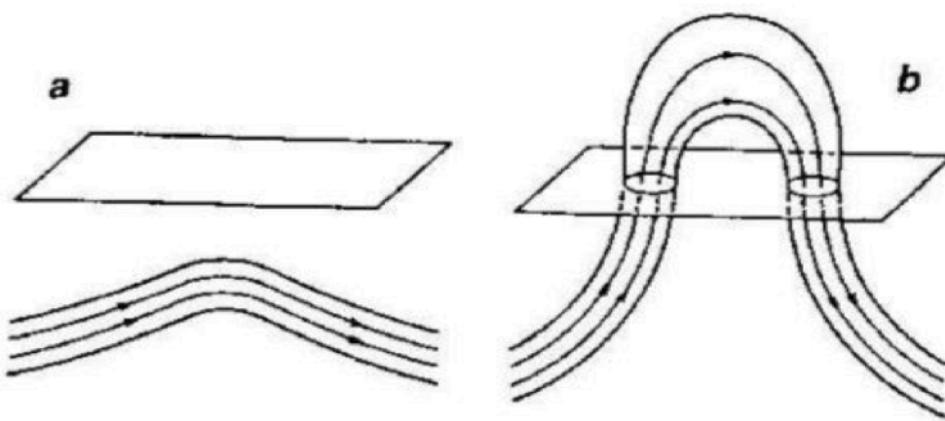
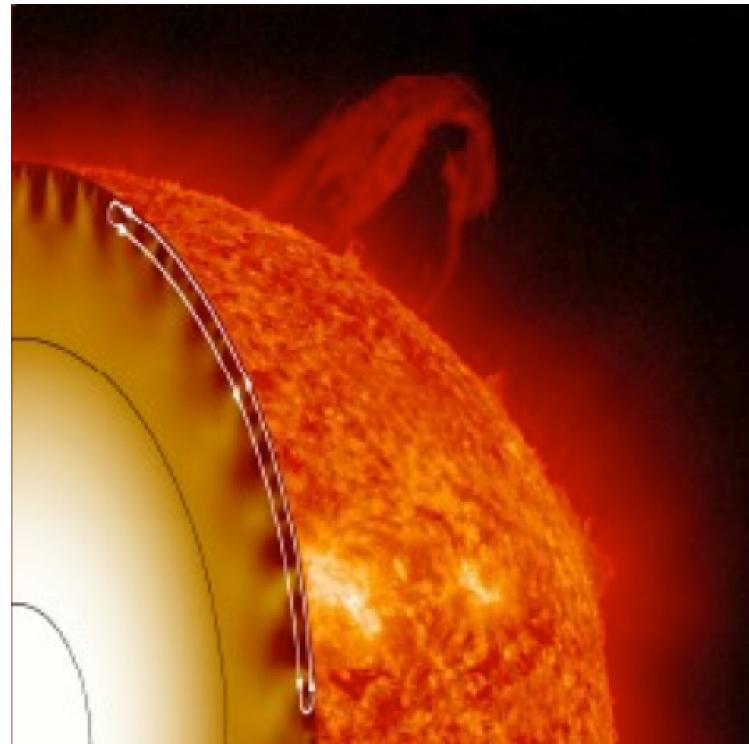
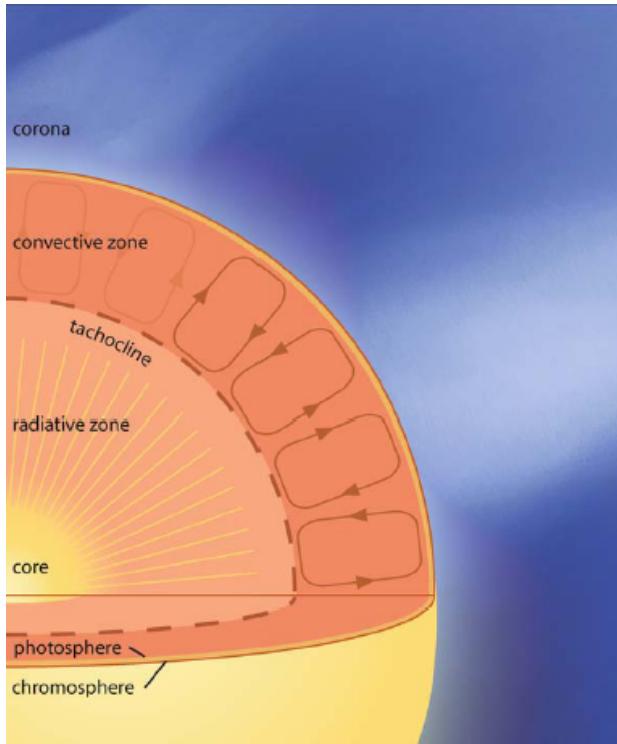
Buracos Coronais



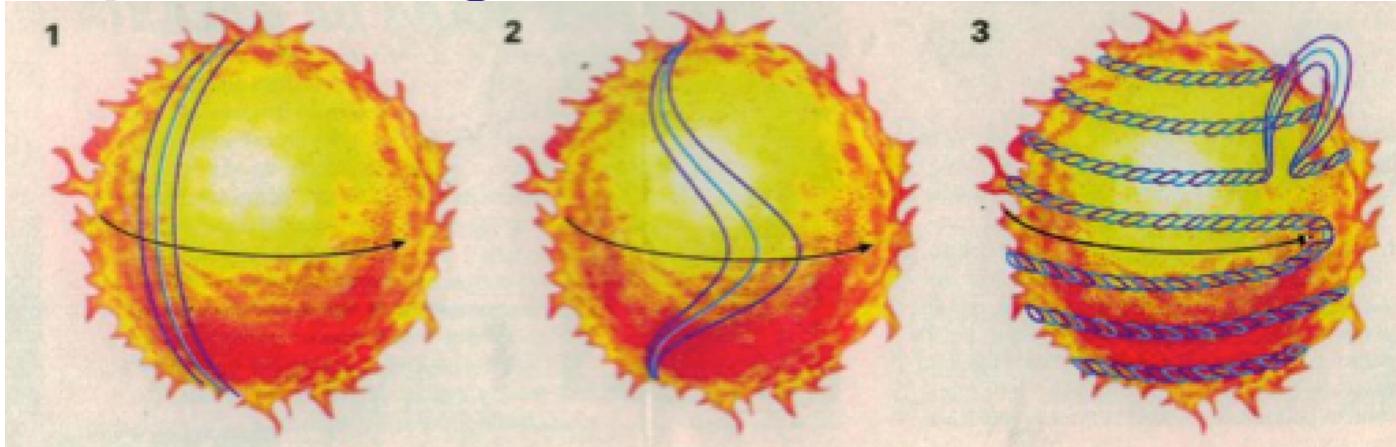
Streamers

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

Campos magnéticos do Sol – Ciclo



Campos magnéticos do Sol – Ciclo



Campos magnéticos do Sol – Ciclo

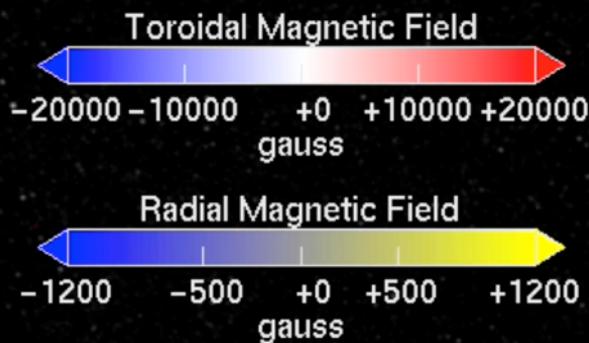
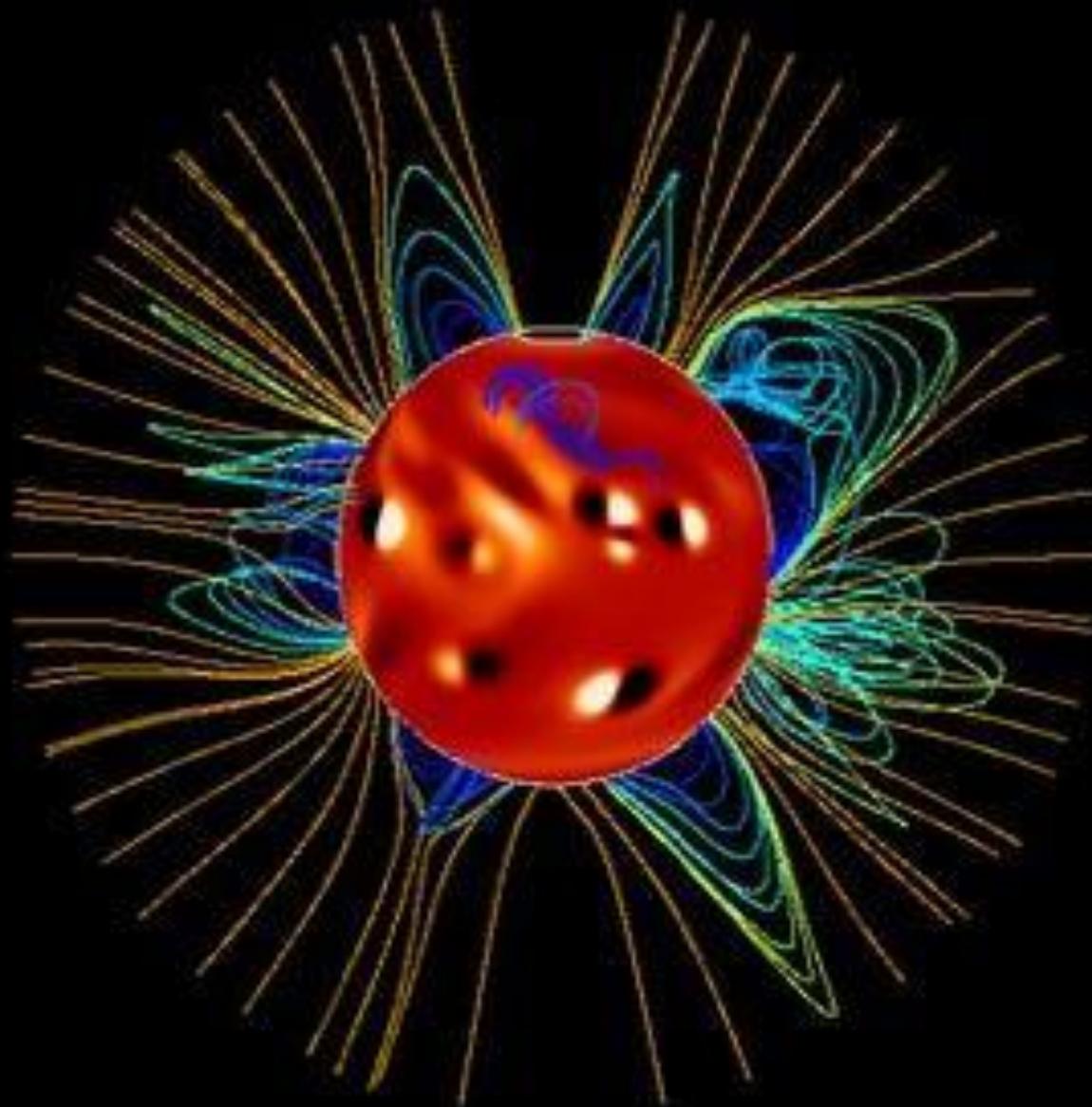


Tabela - Parâmetro β de plasma na atmosfera solar

| Parameter | Photosphere | Cool corona | Hot corona | Outer corona |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Electron density n_e (cm^{-3}) | 2×10^{17} | 1×10^9 | 1×10^9 | 1×10^7 |
| Temperature T (K) | 5×10^3 | 1×10^8 | 3×10^6 | 1×10^6 |
| Pressure p (dyne cm^{-2}) | 1.4×10^5 | 0.3 | 0.9 | 0.02 |
| Magnetic field B (G) | 500 | 10 | 10 | 0.1 |
| Plasma- β parameter | 14 | 0.07 | 0.2 | 7 |

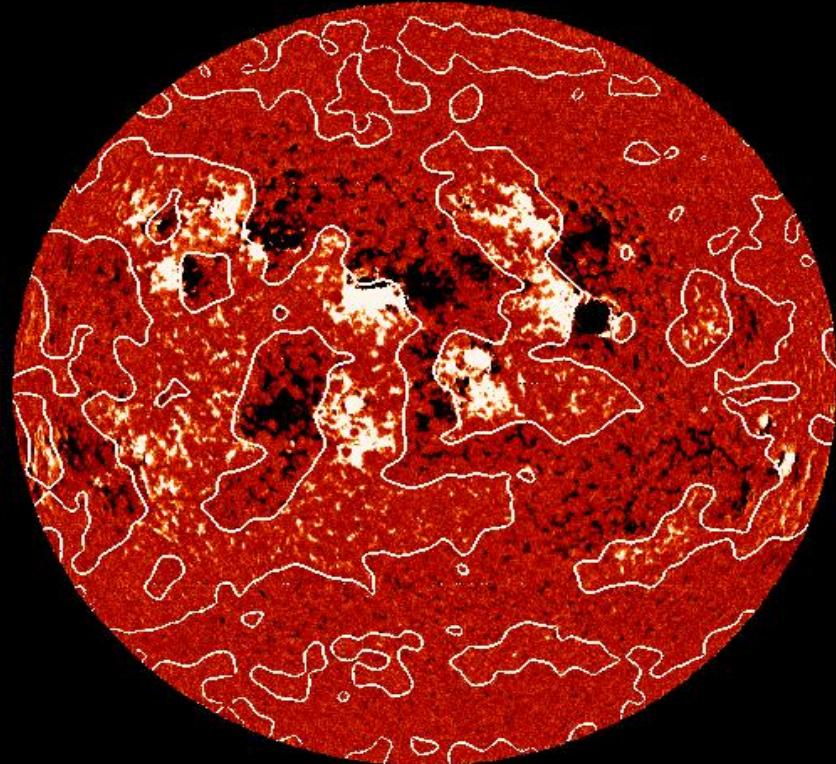
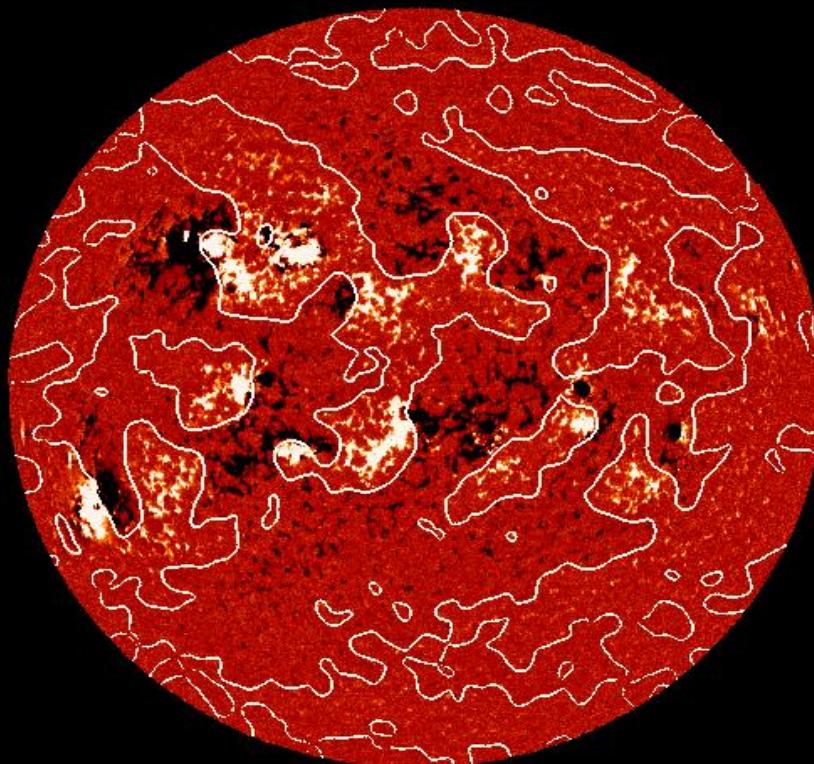
X



Campos magnéticos do Sol

28 Feb 1982 [Cycle 21]

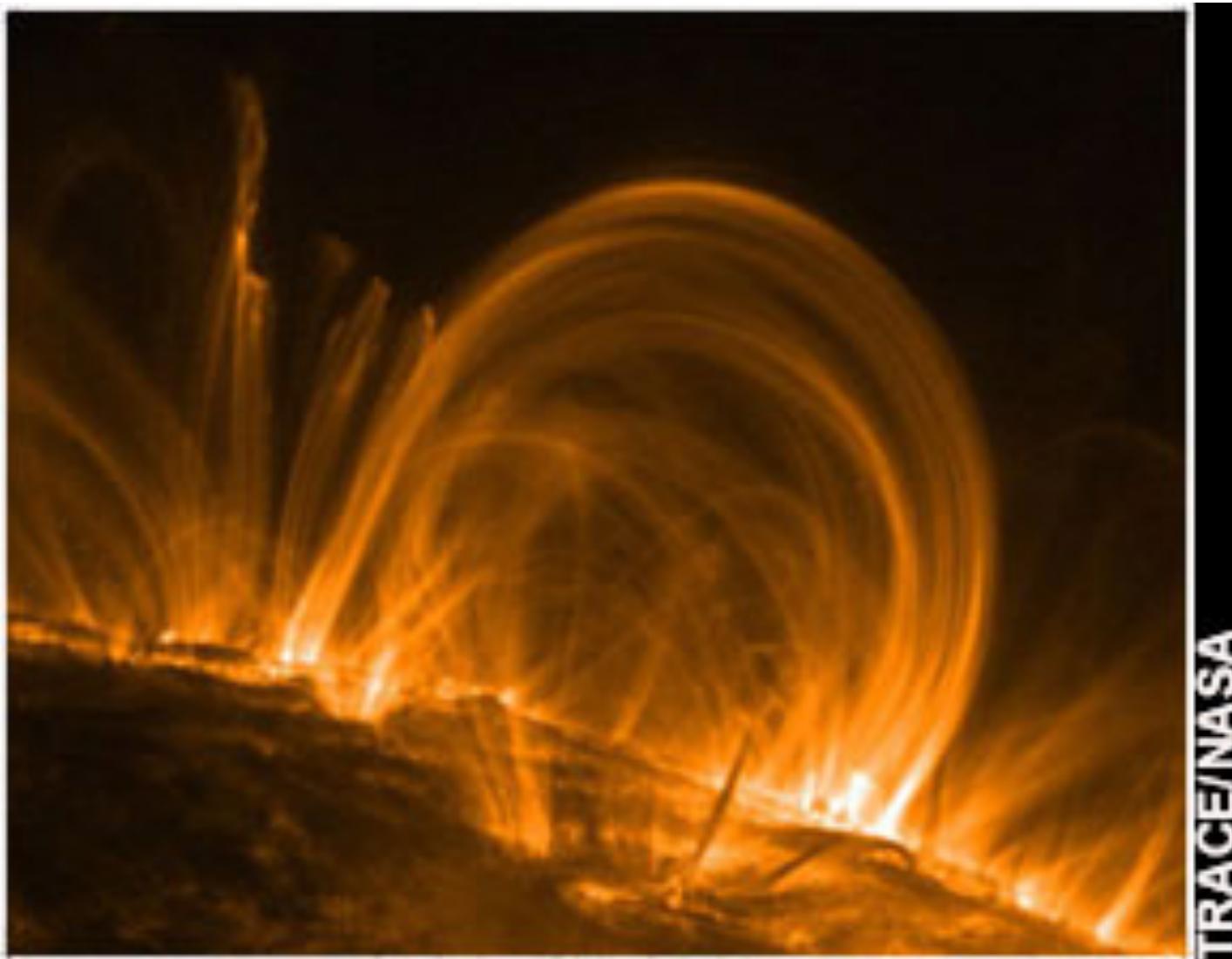
26 Feb 1992 [Cycle 22]



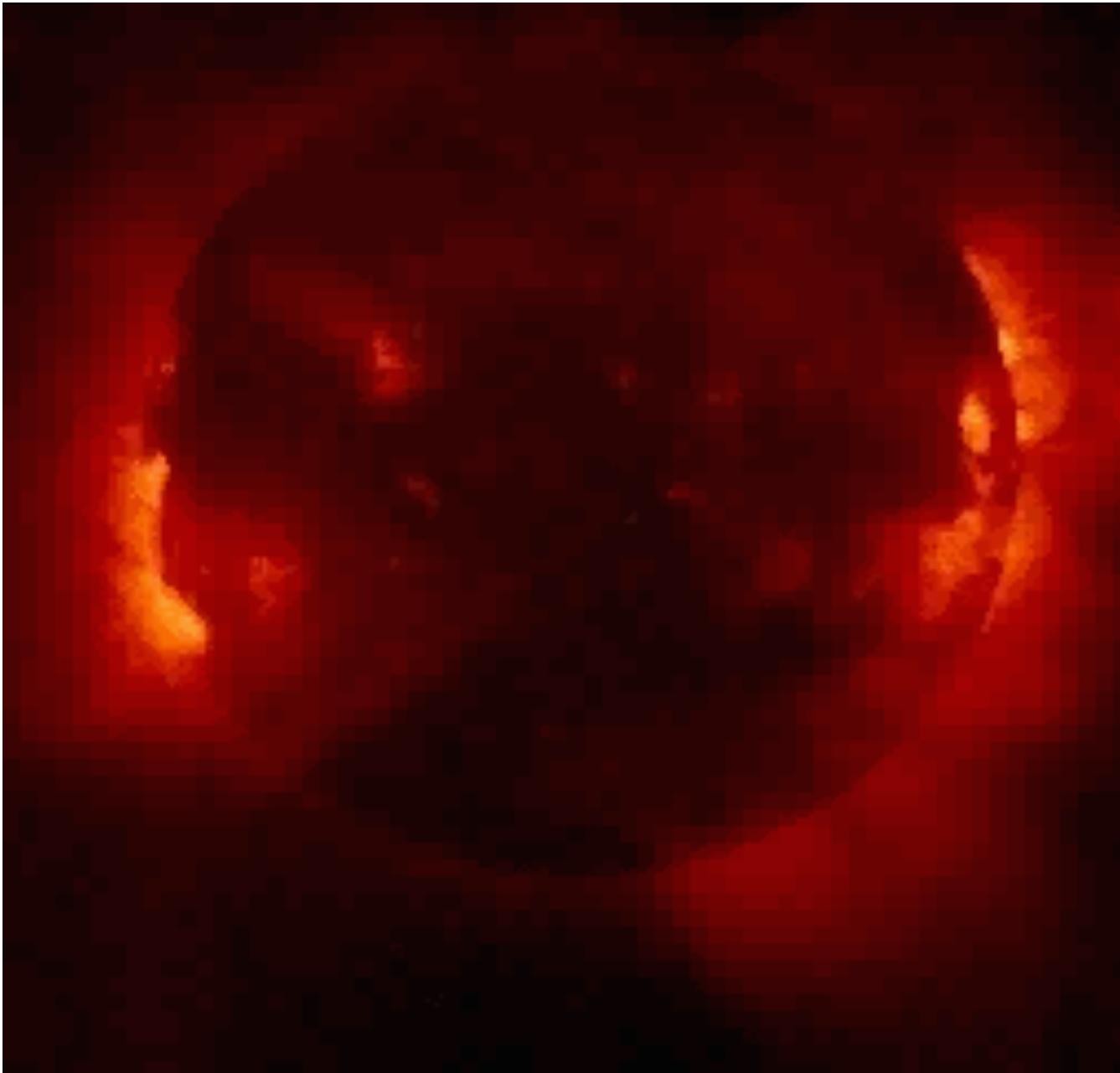
Source: National Solar Observatory (H. Jones)

HAO A-019

Regiões ativas - arcos magnéticos

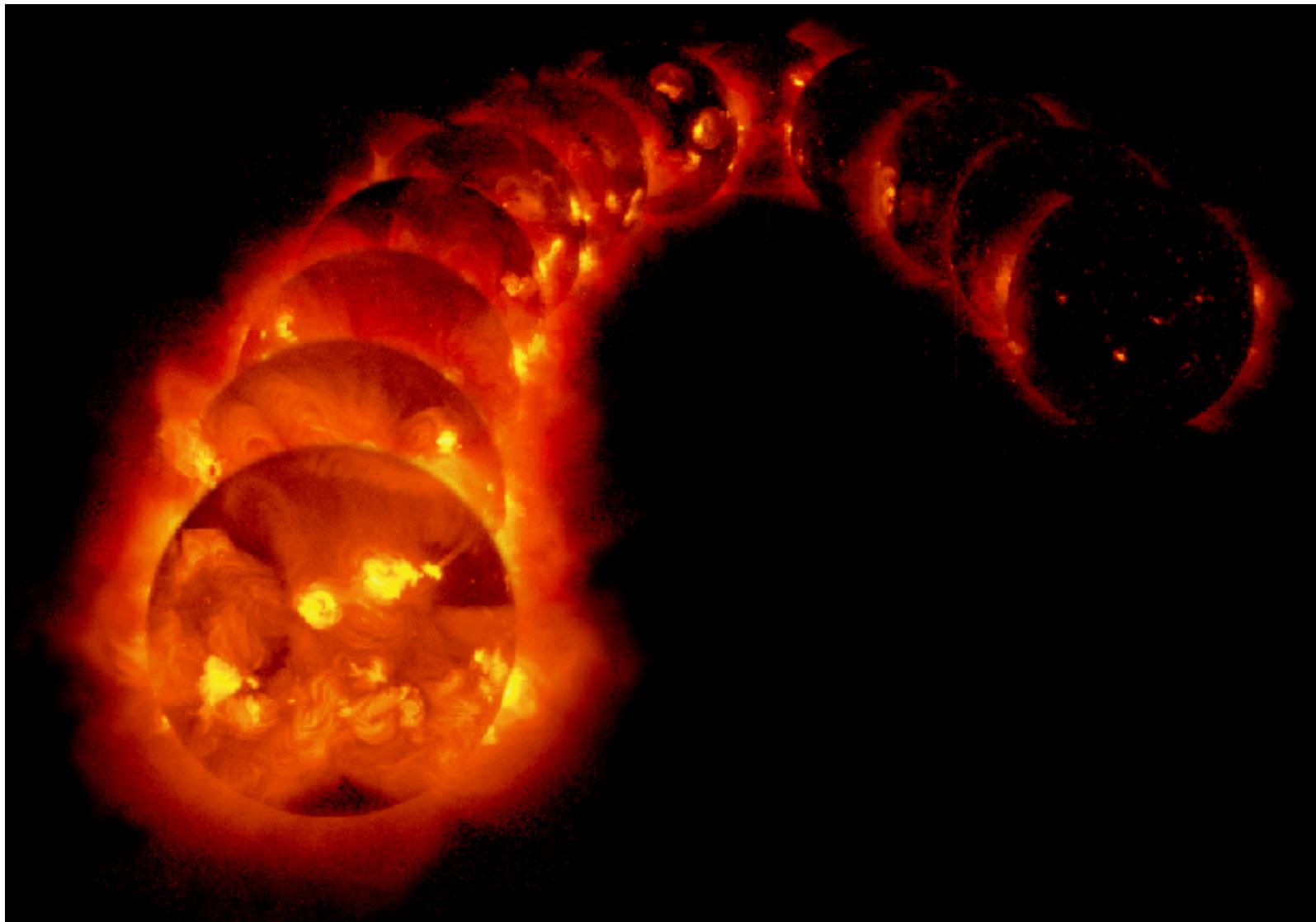


Evolução ciclo – Coroa solar

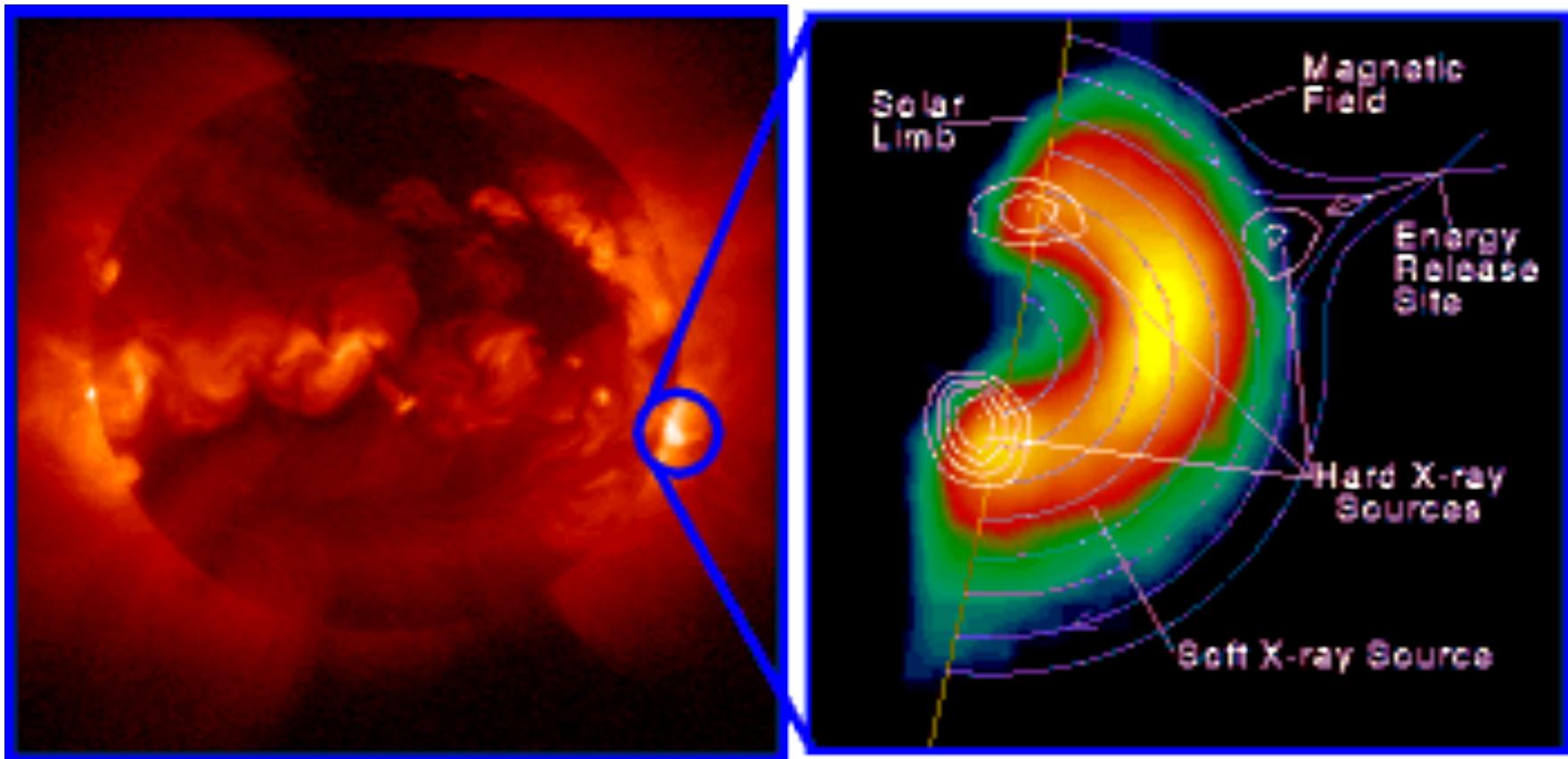


Campos magnéticos do Sol

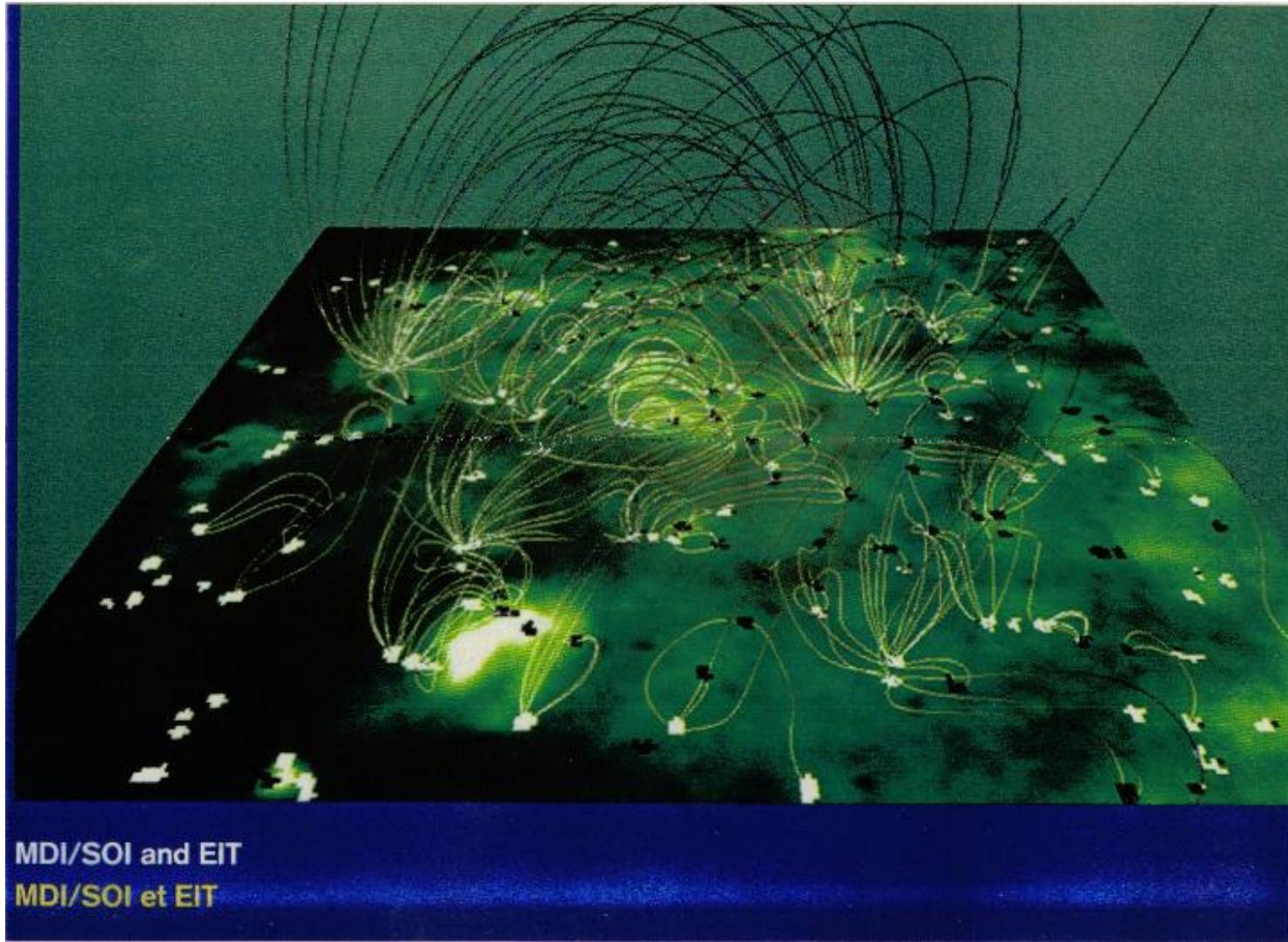
x



Região ativa - arco magnético

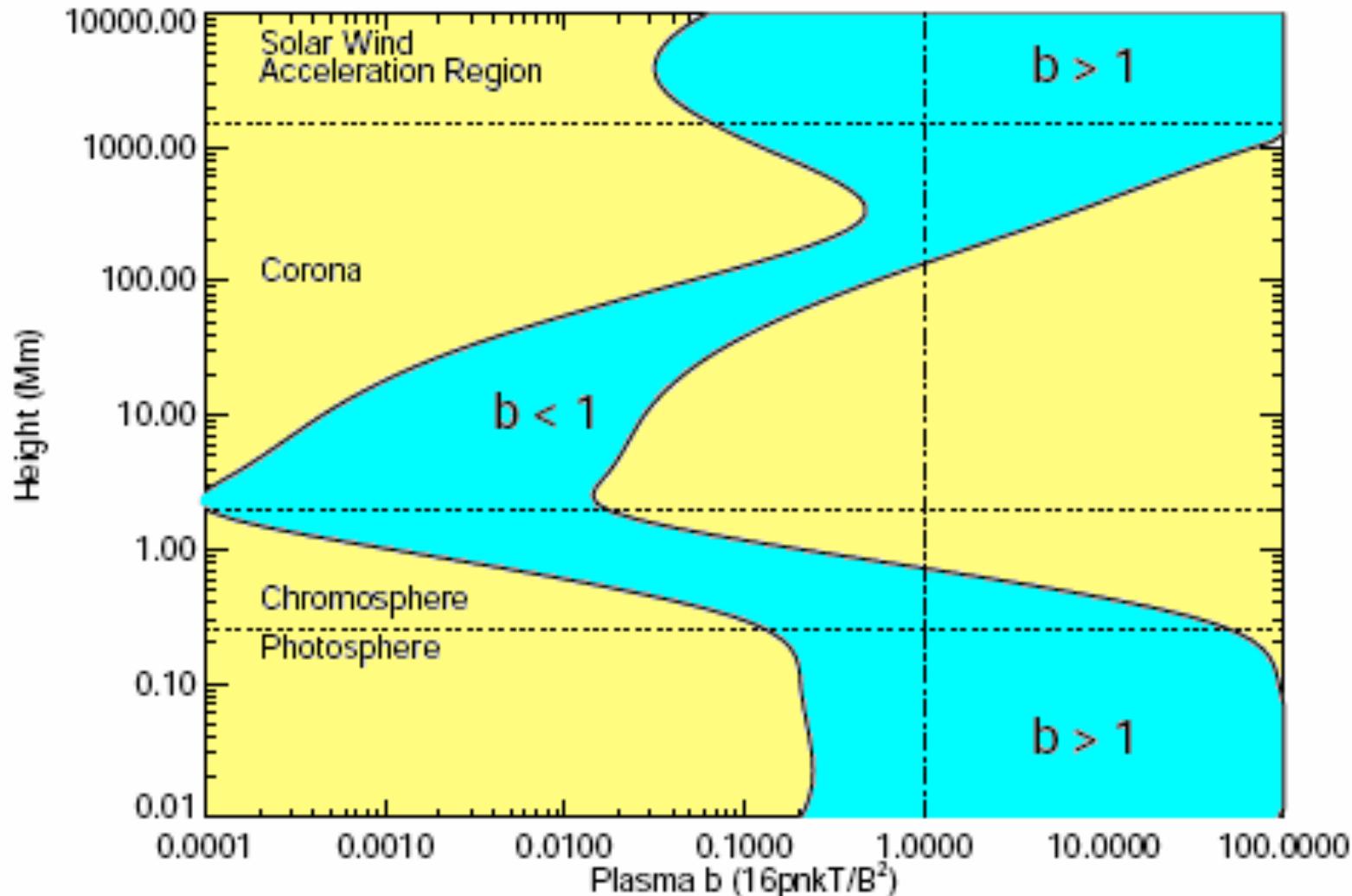


Região ativa evoluída

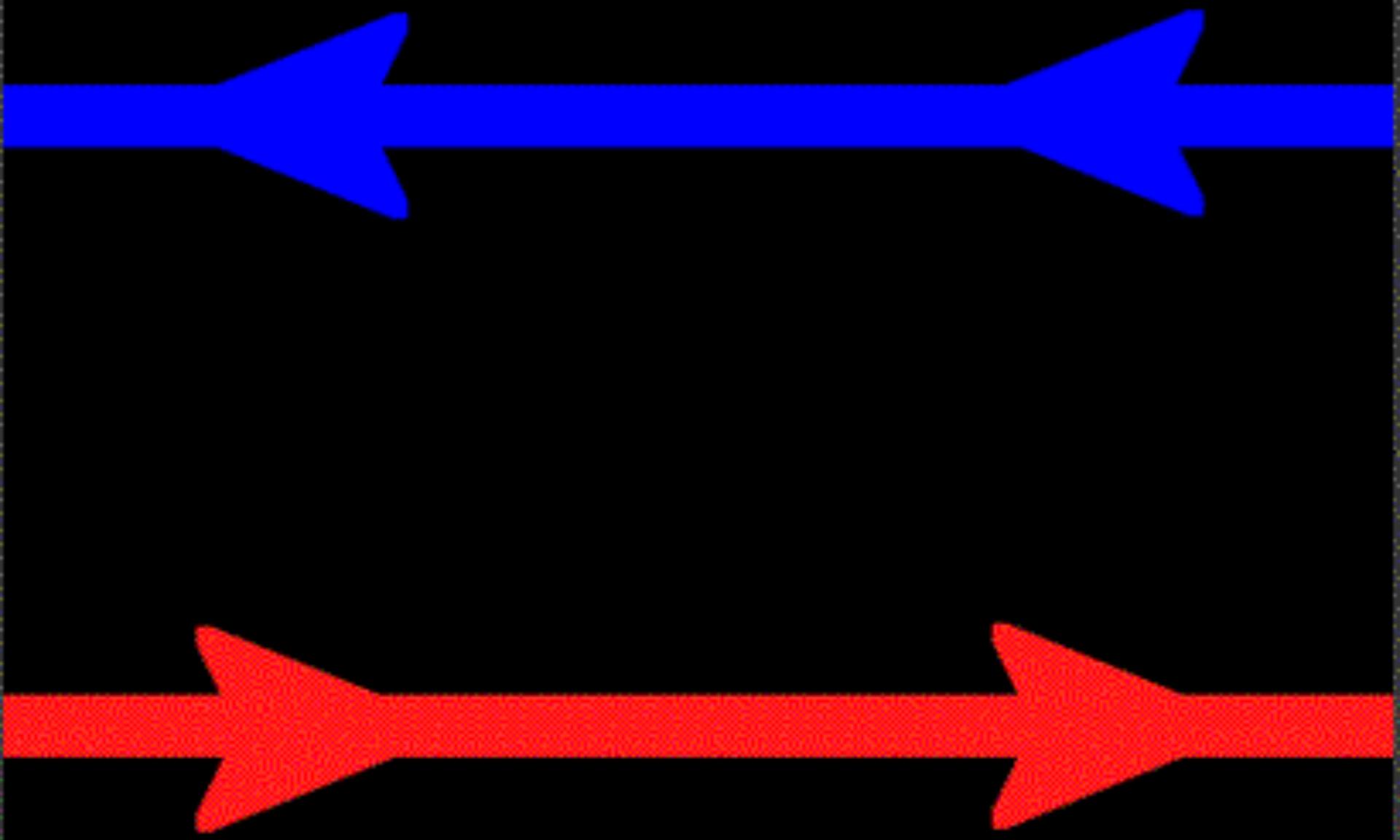


Parâmetro β de plasma

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



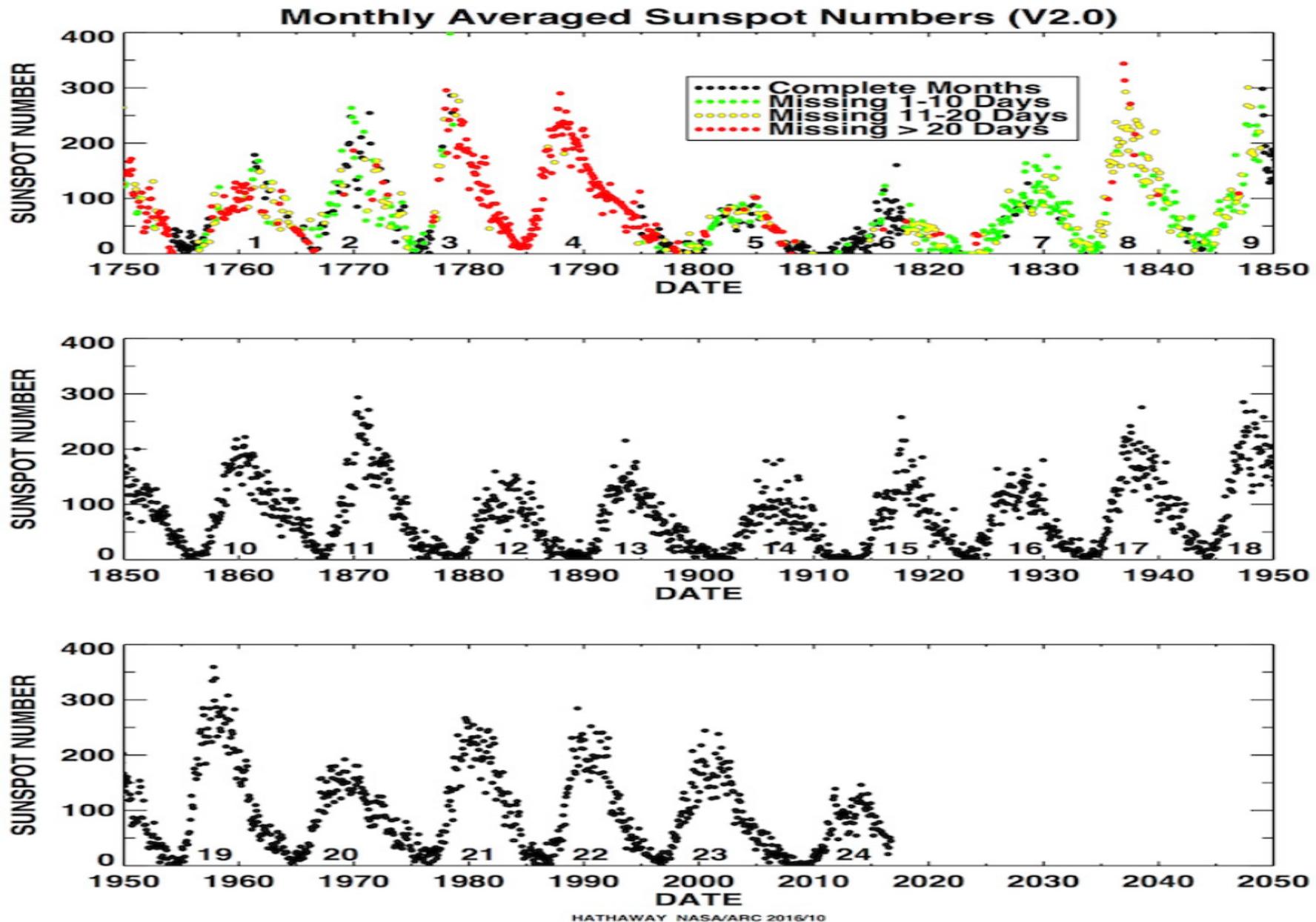
Reconexão de linhas campo magnético



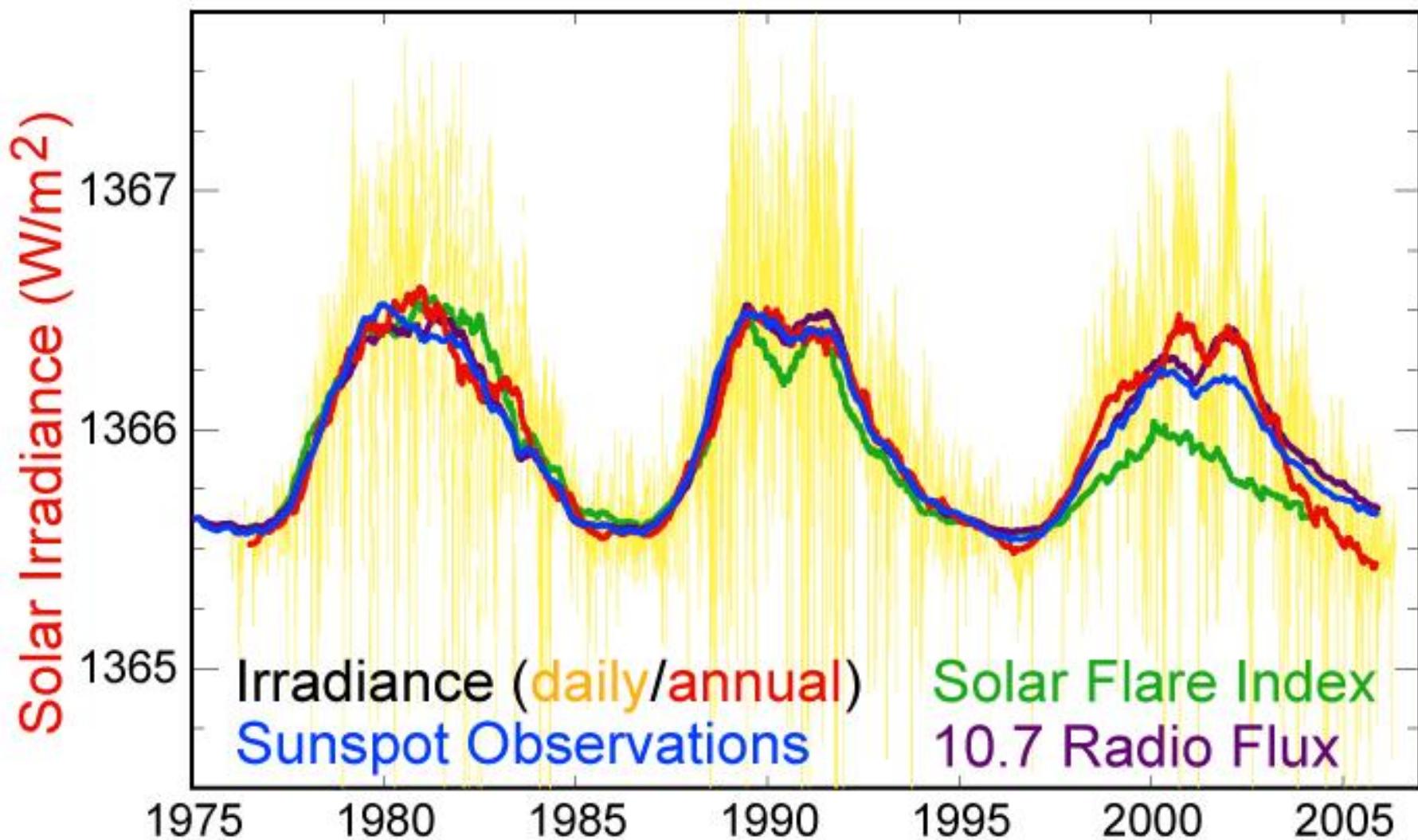
Ciclo de atividade solar

- 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

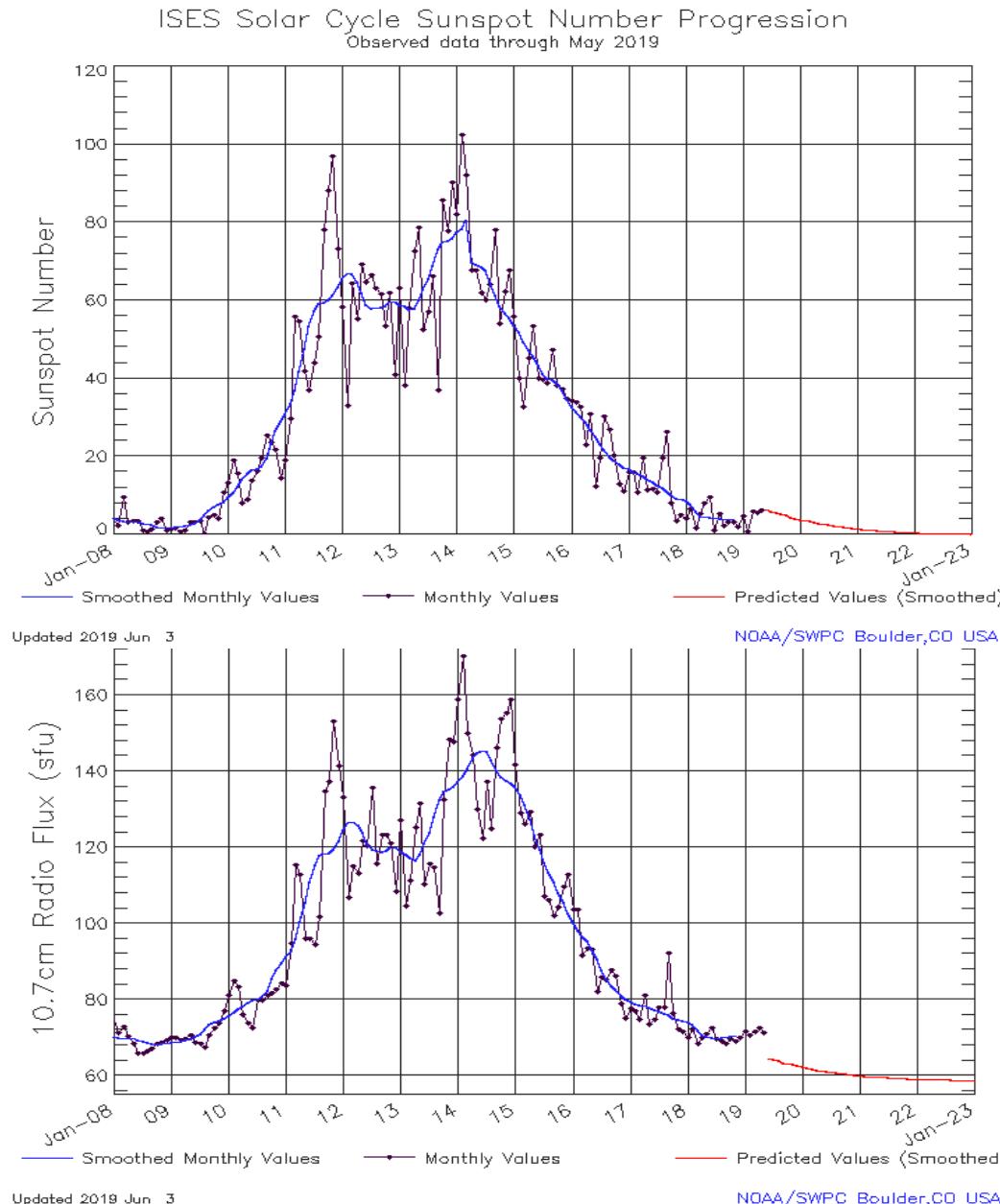


Solar Cycle Variations



Penúltimo ciclo (24): 2008-2019

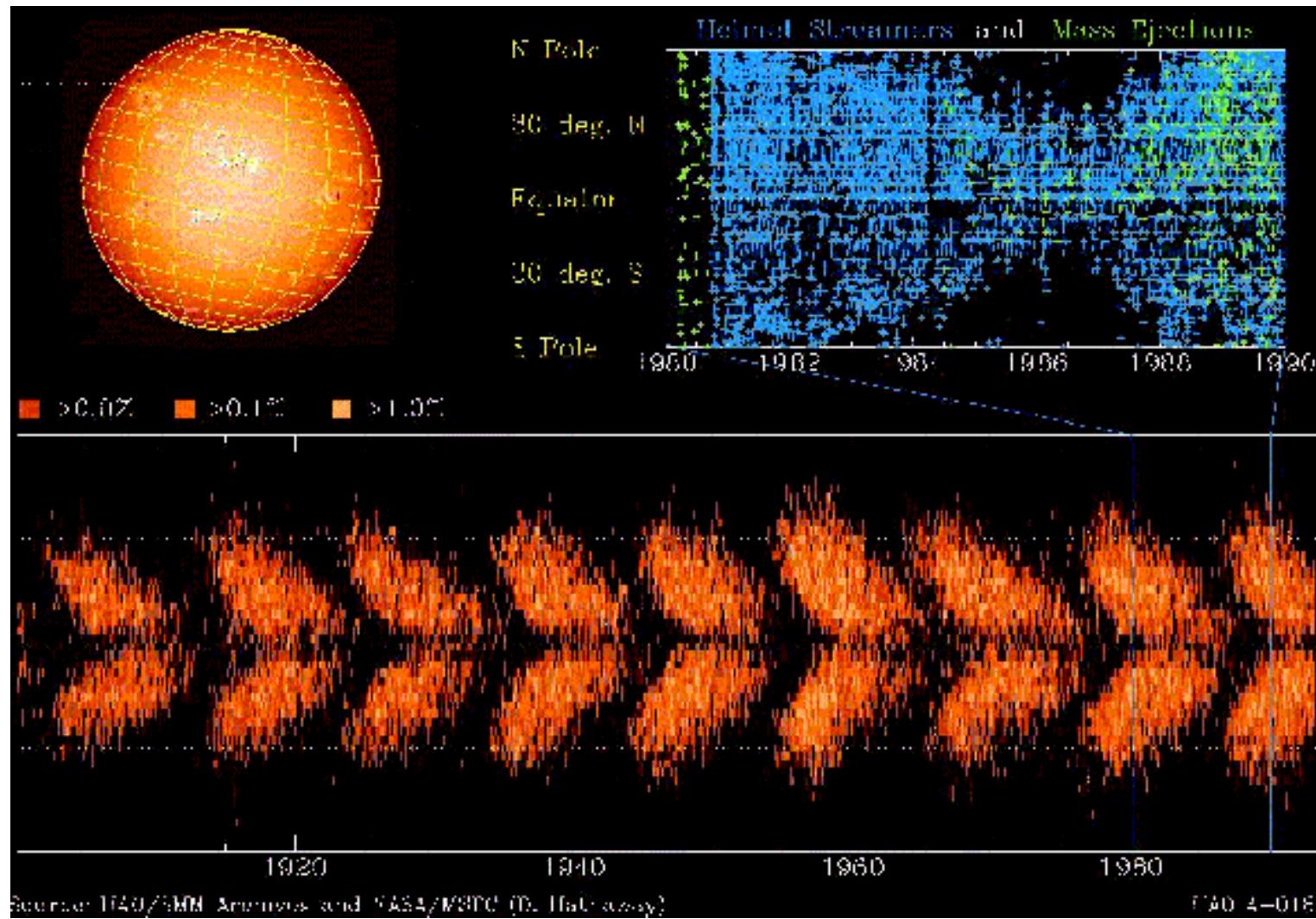
X



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



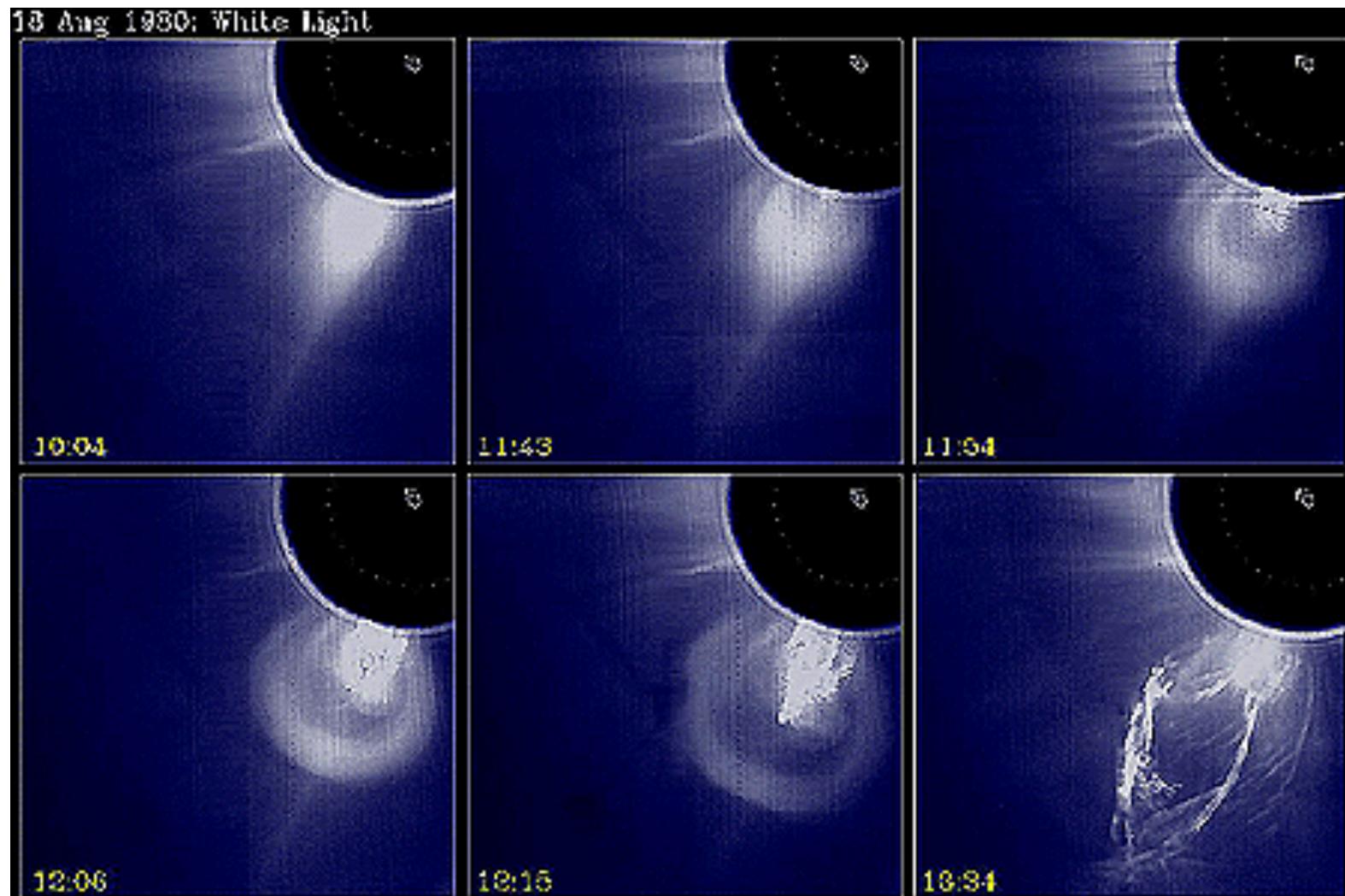
Ejeções massa coronal (CME)

- 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, ~ 2 dias p/ chegar a Terra.



Terra para
escala

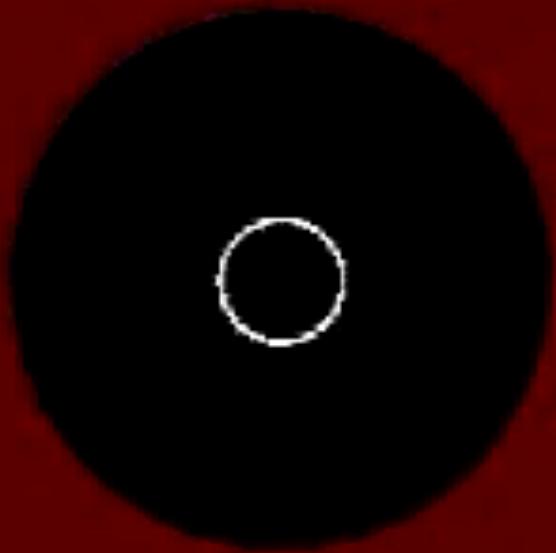
Exemplo de CME



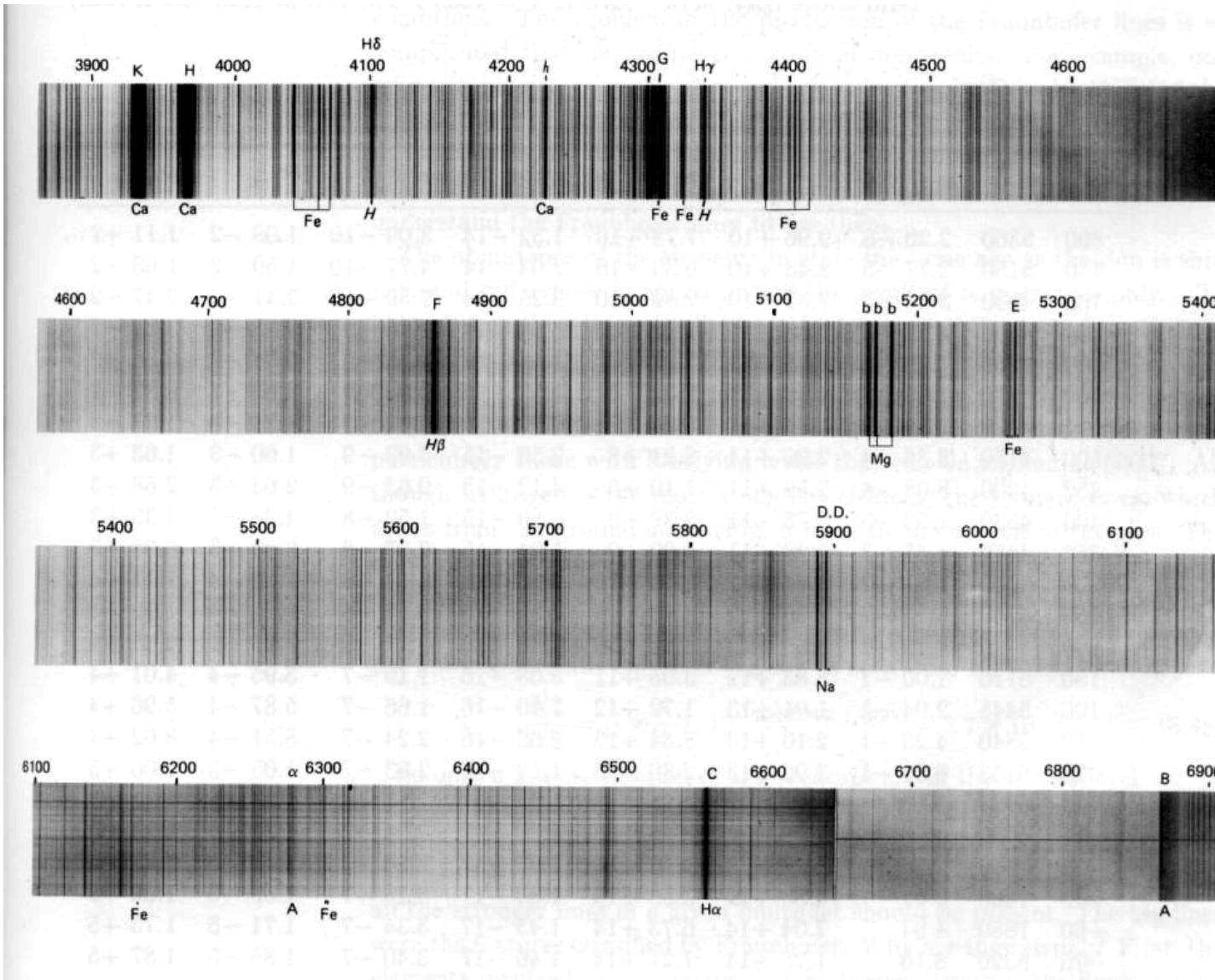
Source: High Altitude Observatory/Solar Maximum Mission Archives

HAO A-013

06:00



Espectro solar visível



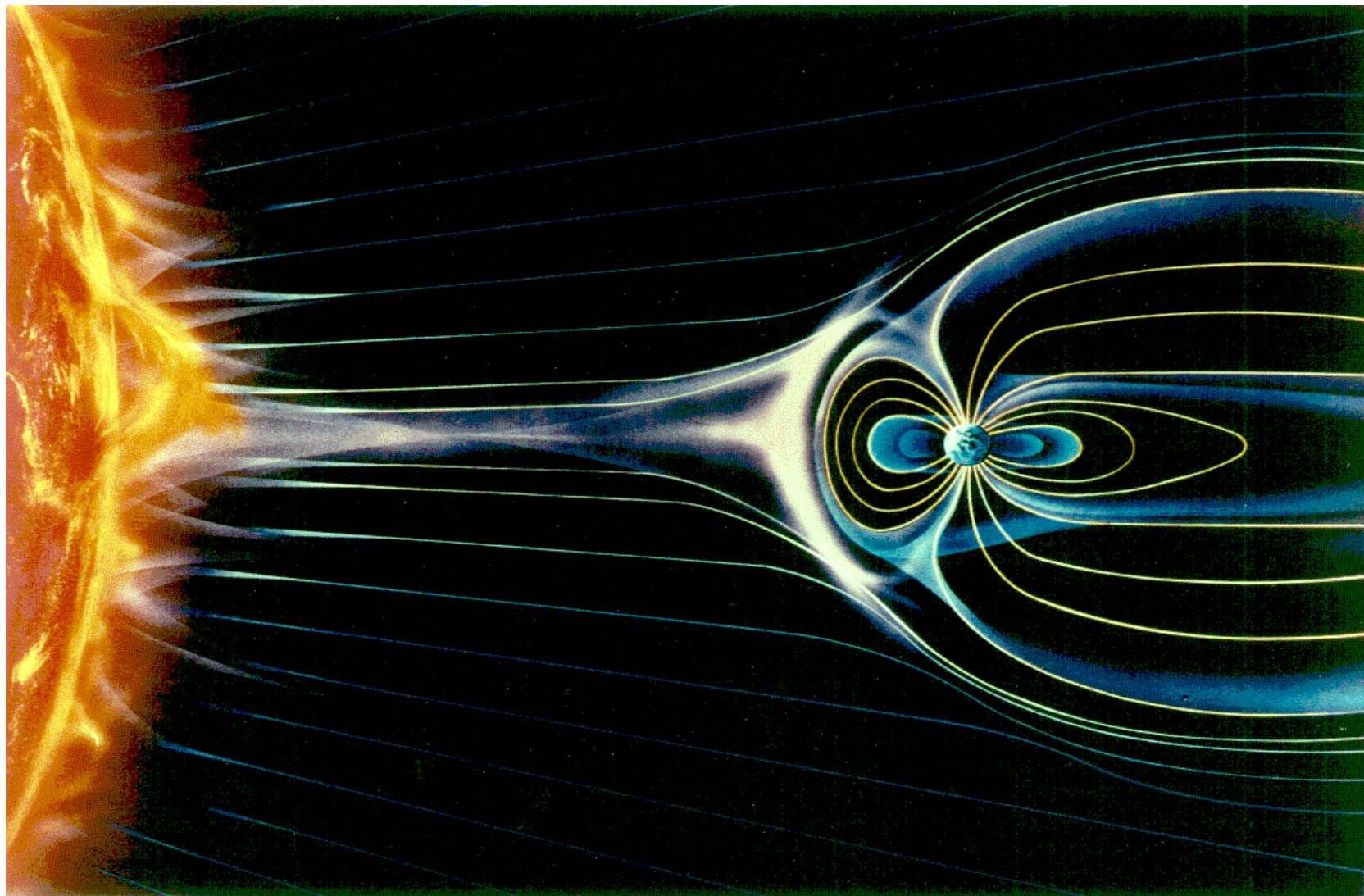
Espectro solar

- Átomos – absorção da luz em λ 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- α , H- β , H- γ , H- δ

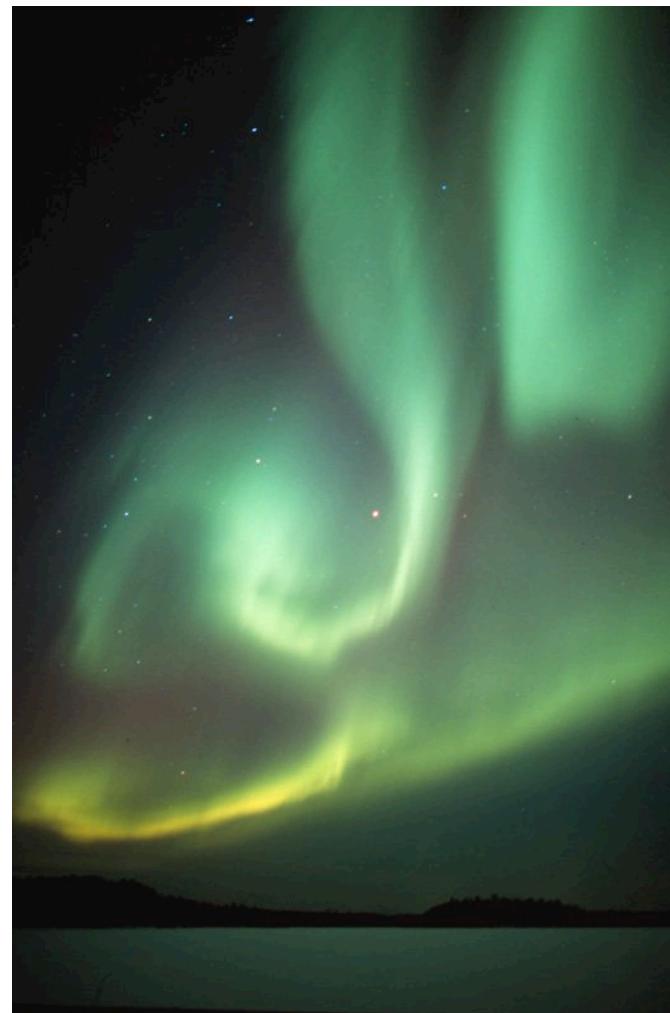
Vento solar

- 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 ráp - Origem nos chamados buracos coronais
- Eventualmente atinge a Terra podendo causar auroras e/ou perturbações na magnetosfera terrestre.

Vento solar



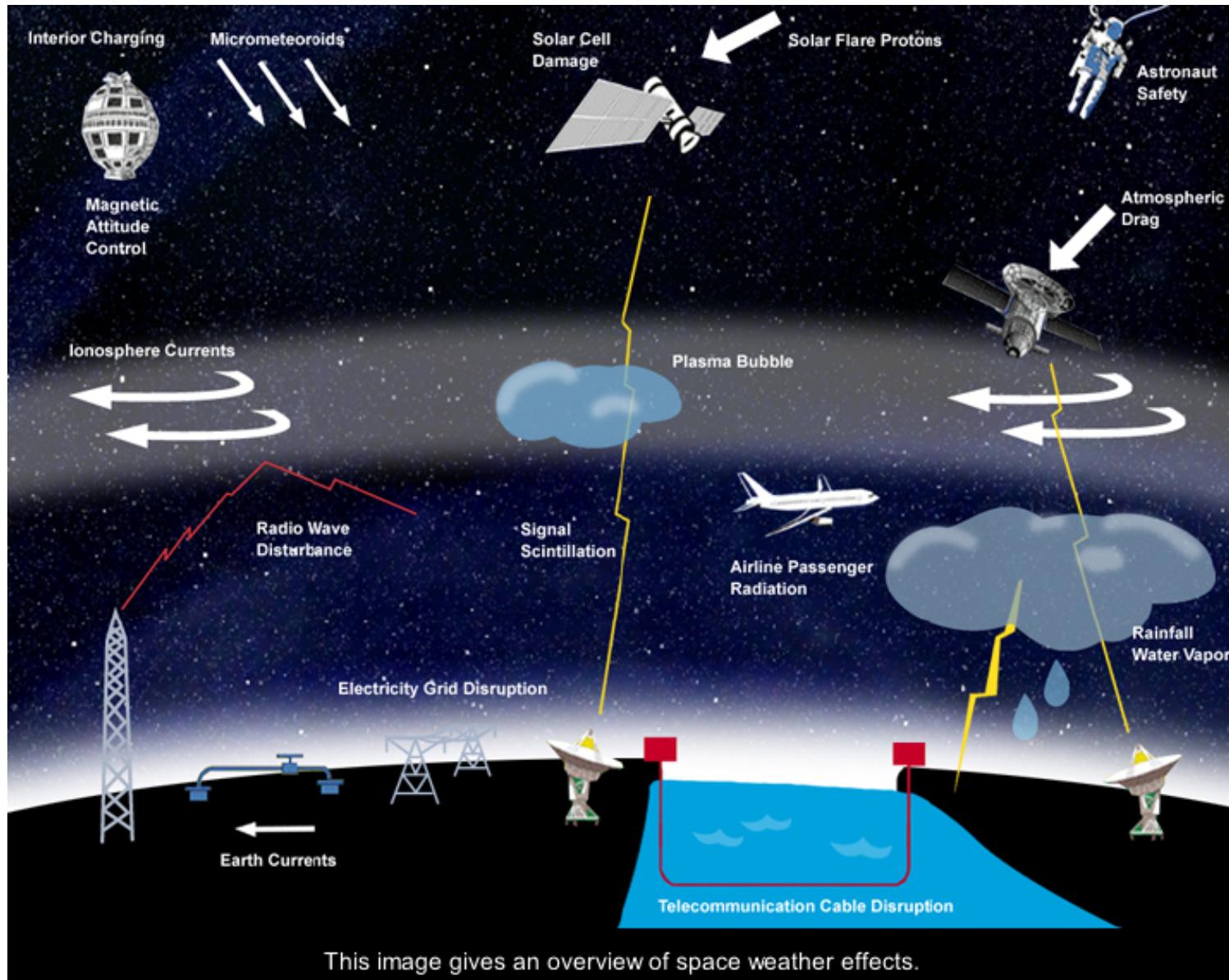
Exemplos de aurora



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);

A photograph of a sunset over a dark, textured body of water. The sky is a deep orange, and the sun is a large, bright yellow/orange sphere partially submerged in the water. In the foreground, the text "FIM" is overlaid in a large, white, sans-serif font.

FIM