

Dínamo Solar

Como, quando e porquê?

Dário Passos,
Univ. Évora, CENTRA/IST

Raios C3smicos

Diferenciais el3ctricos



Controlo de atitude magn3tico

Deteriora33o da electr3nica

Deteriora33o de paineis fotovoltaicos



Particulas carregadas (flares)



Seguran3a de Astronautas

Atrito Atmosf3rico



Correntes Ionosf3ricas



Nuvens de plasma

Pertuba33es / Interfer3ncias nas bandas r3dio

Intermit3ncia de sinal



Radia33o nos voos

Forma33o de nuvens?



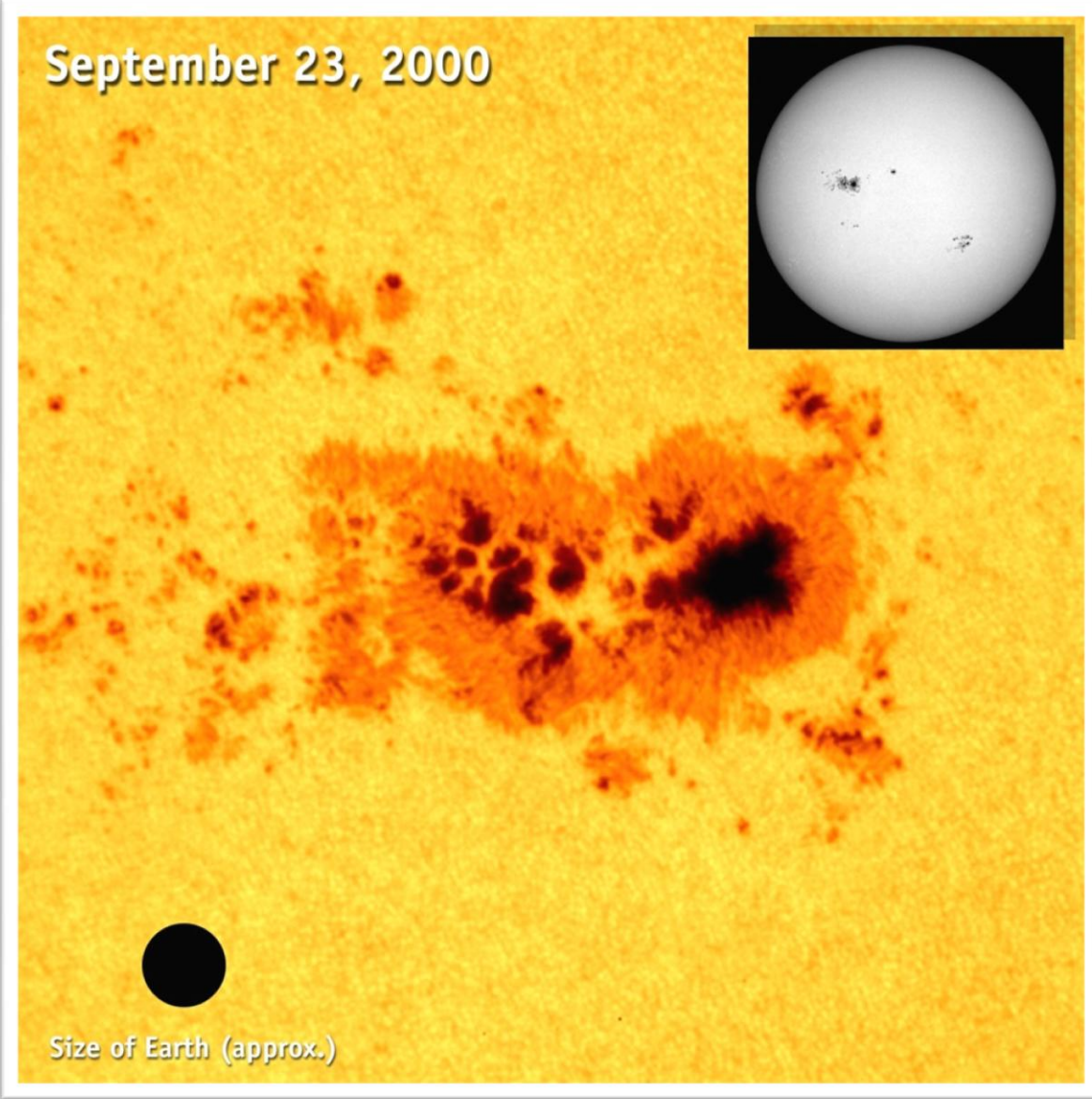
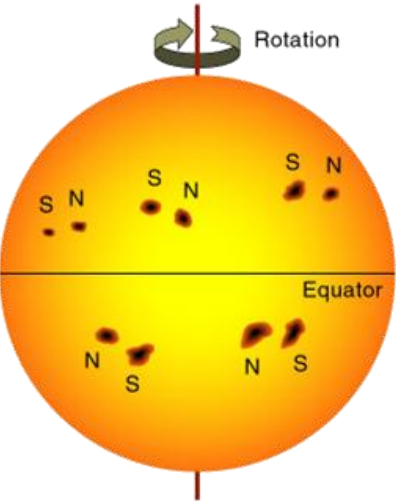
Sobrecarga de linhas de alta-tens3o

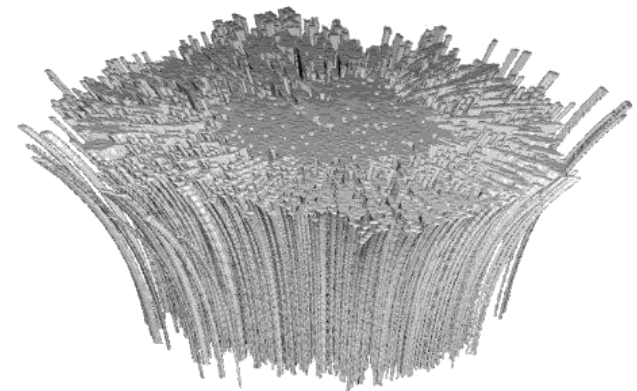
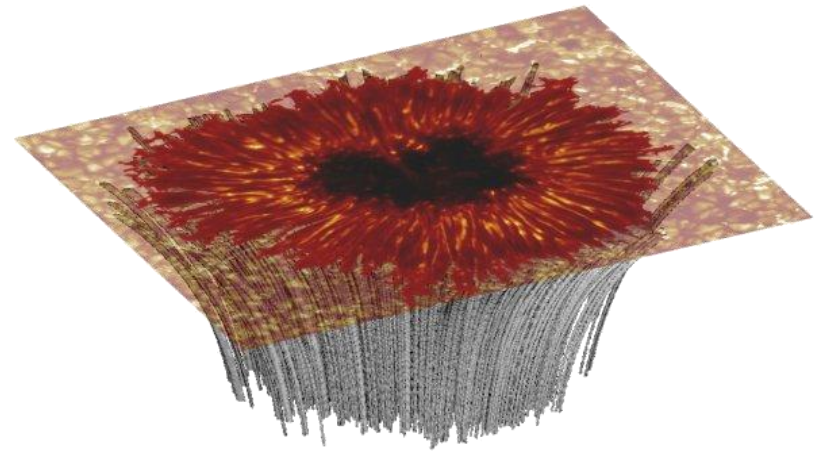
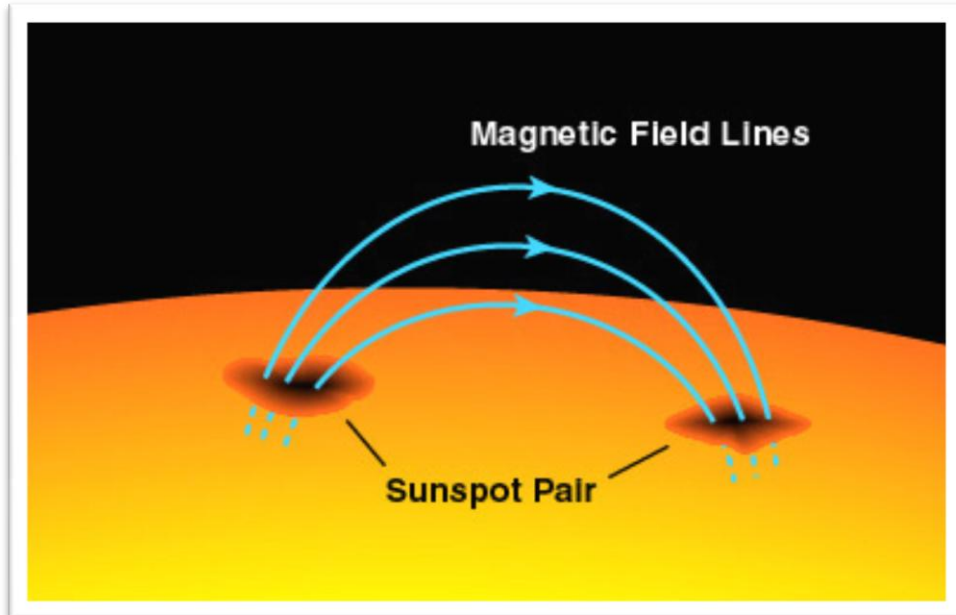


Avarias em cabos de telecomunica33es



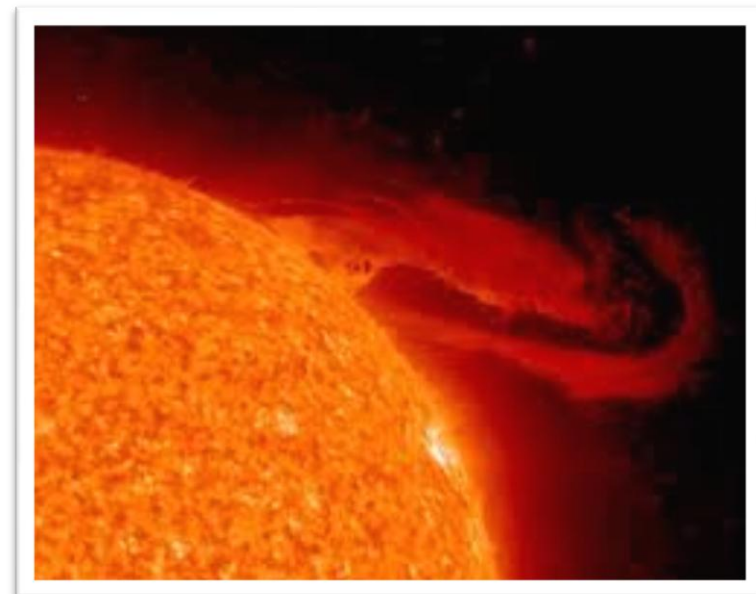
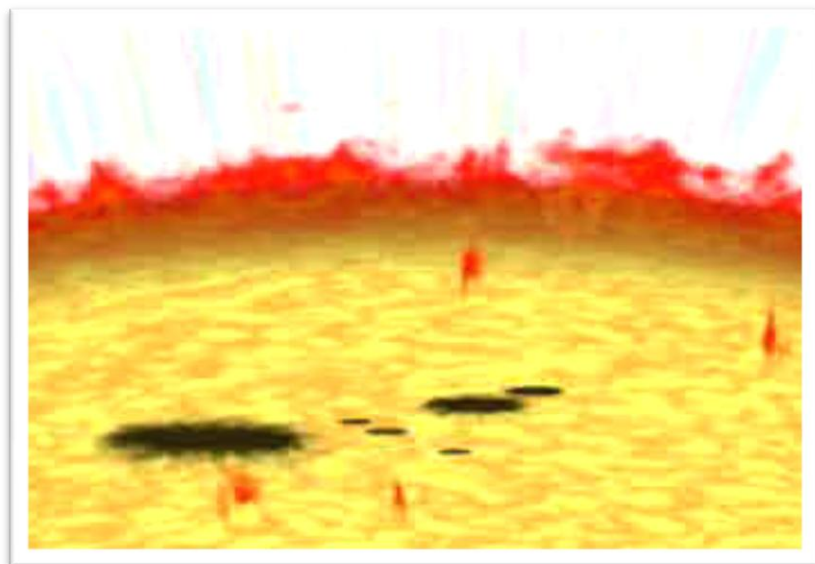
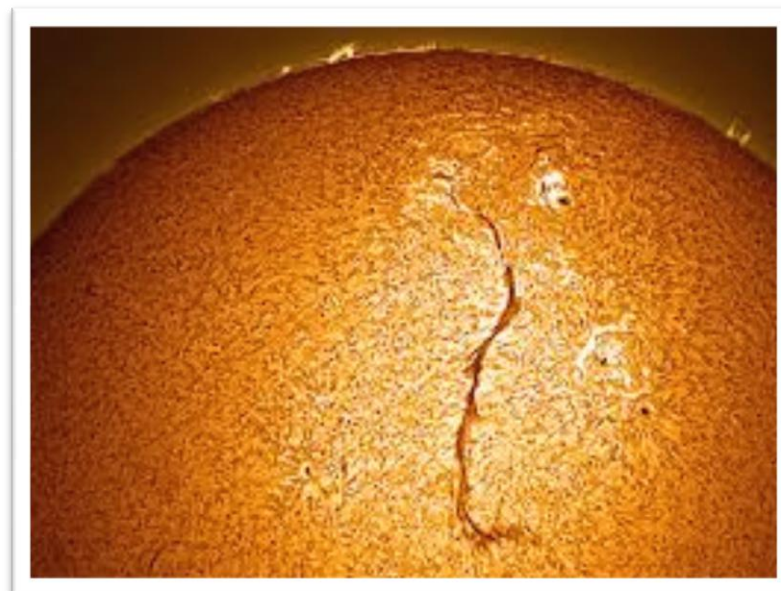
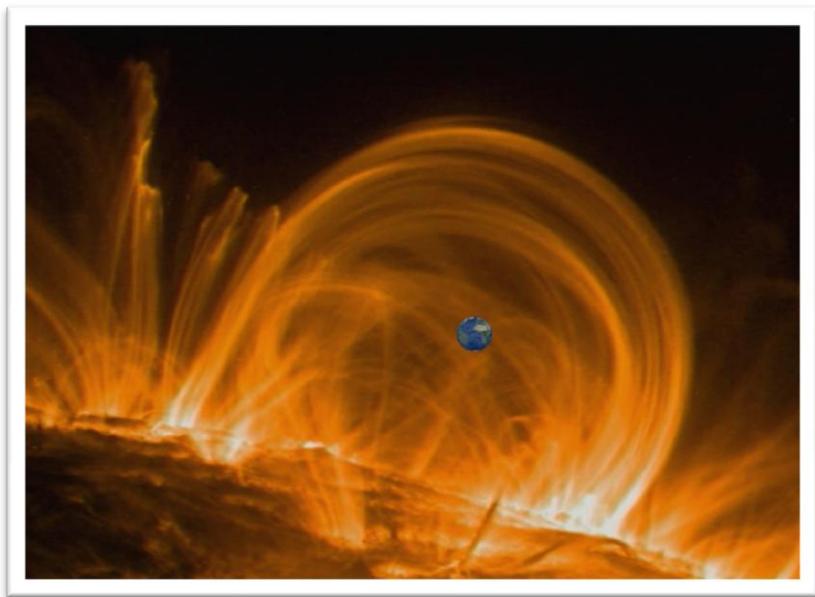
Manchas solares





As manchas solares têm campos magnéticos muito fortes e temperaturas mais baixas ~ 3000 K

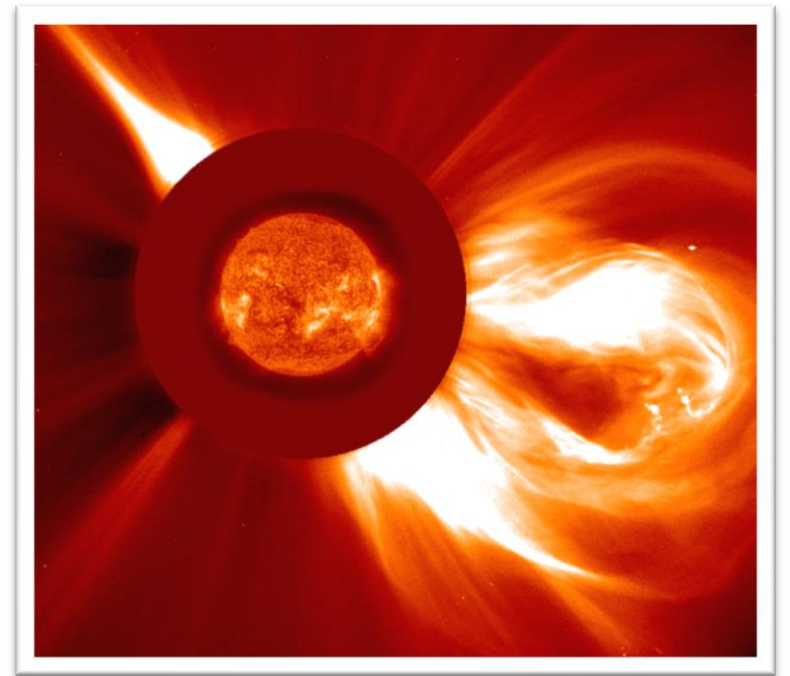
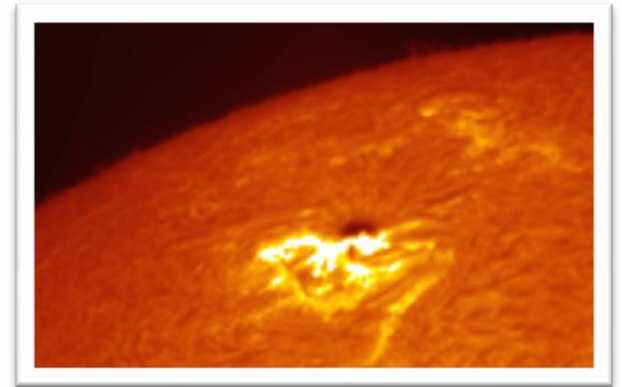
Arcadas, Proeminências e Filamentos

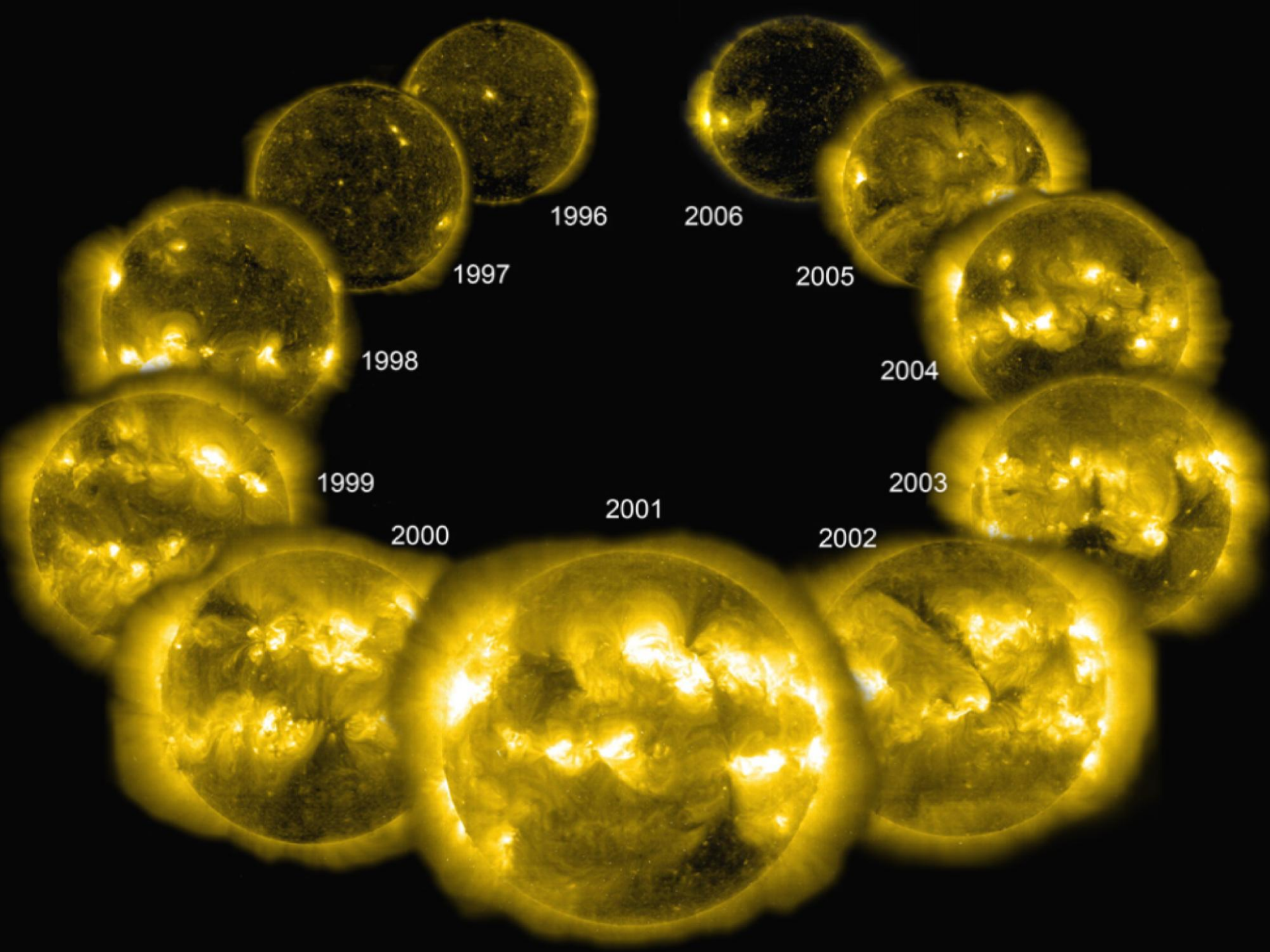


Flares e Ejeções de massa coronal (CME)

Erupção solar: “Explosão magnética”
na superfície do Sol

CME: Expulsão de uma nuvem de
plasma solar





1996

2006

1997

2005

1998

2004

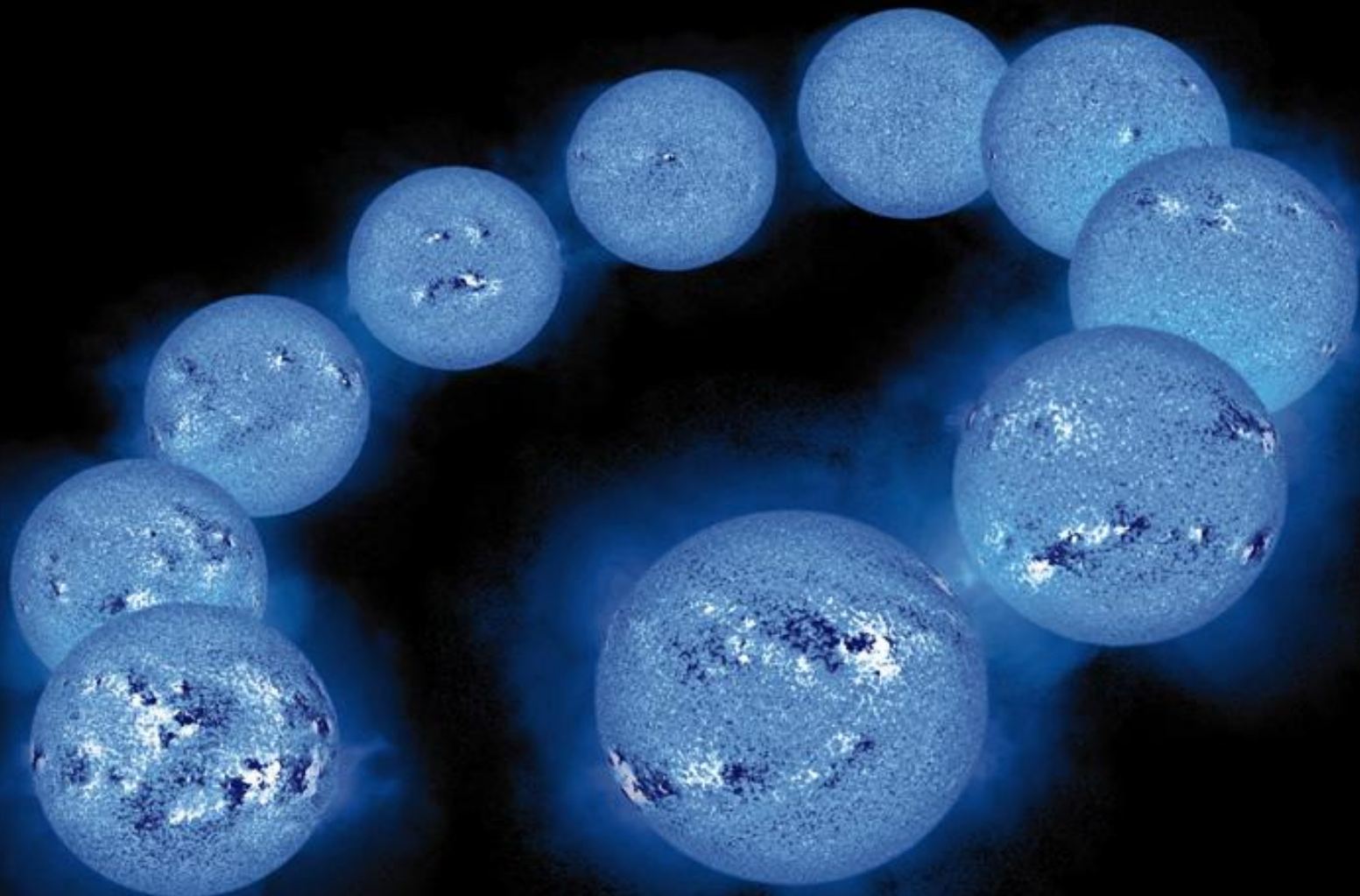
1999

2003

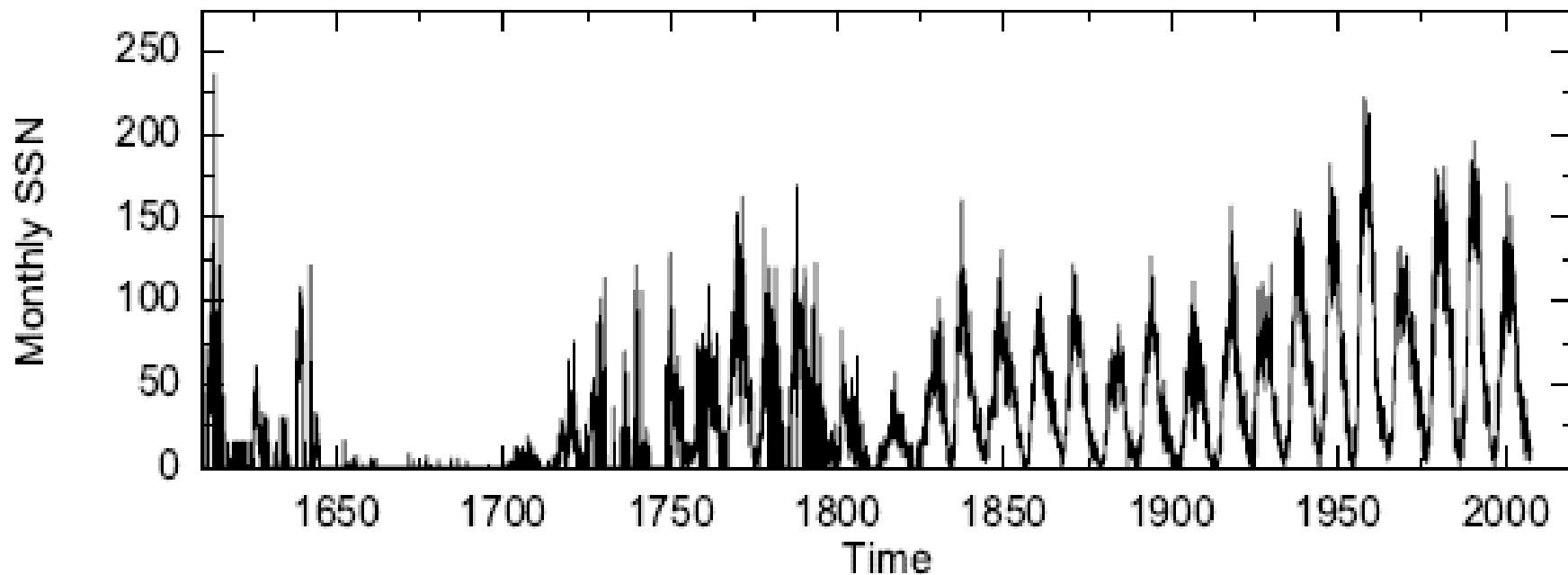
2000

2001

2002



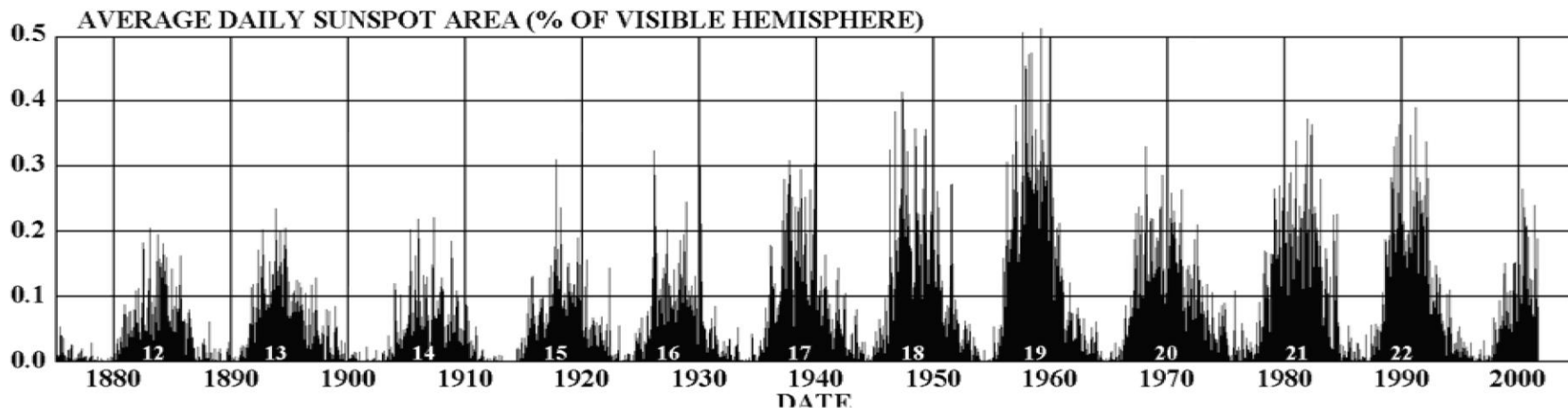
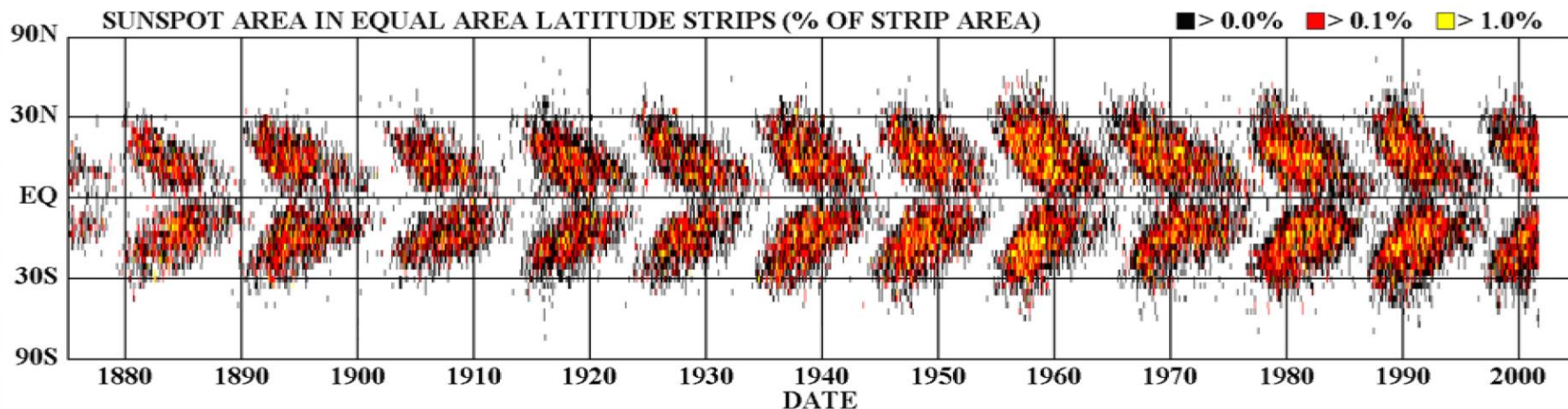
O ciclo solar



Periodicidade do **campo magnético de larga escala** ~ 11 anos

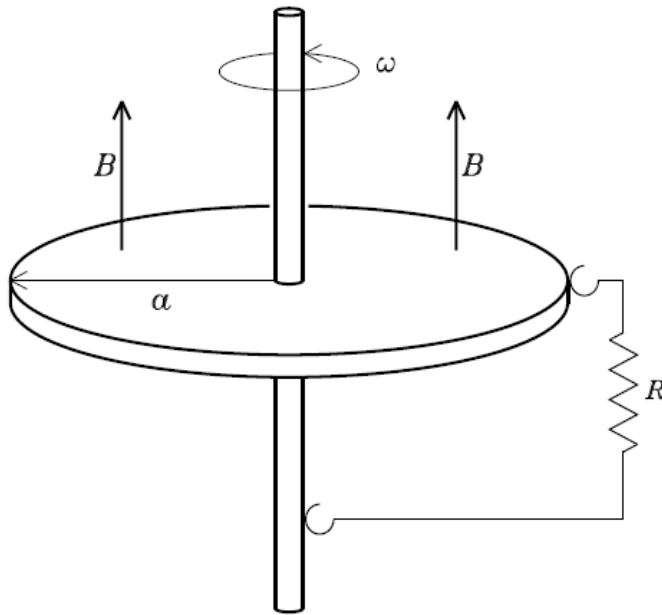
Amplitude variável !!

Distribuição das manchas solares

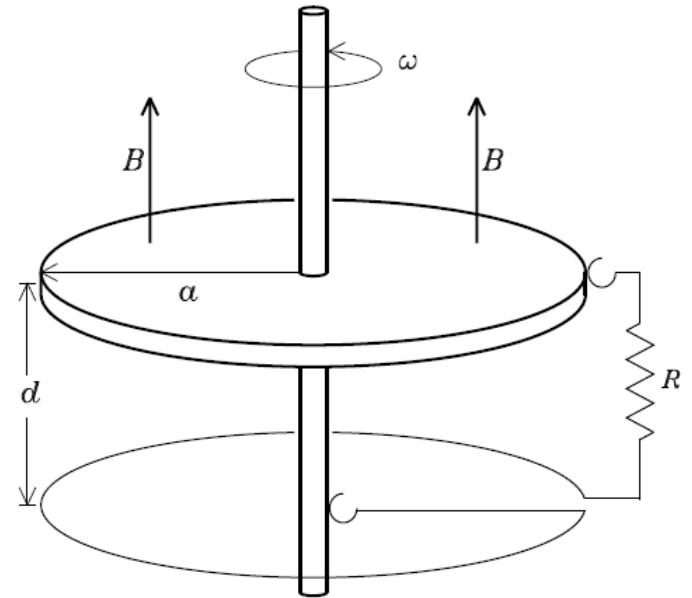


Porquê “Dínamo solar”?

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B})$$



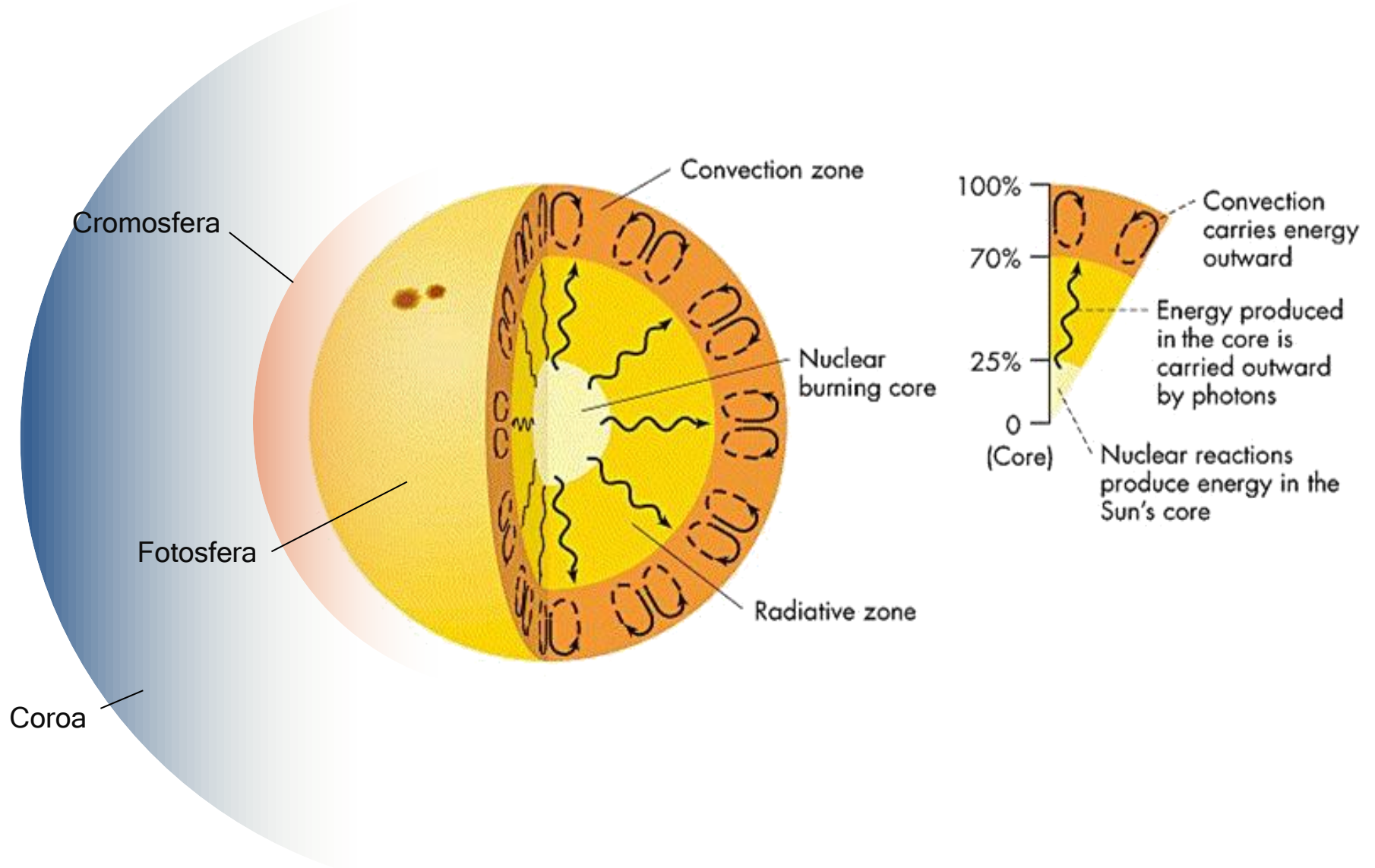
Gerador homopolar



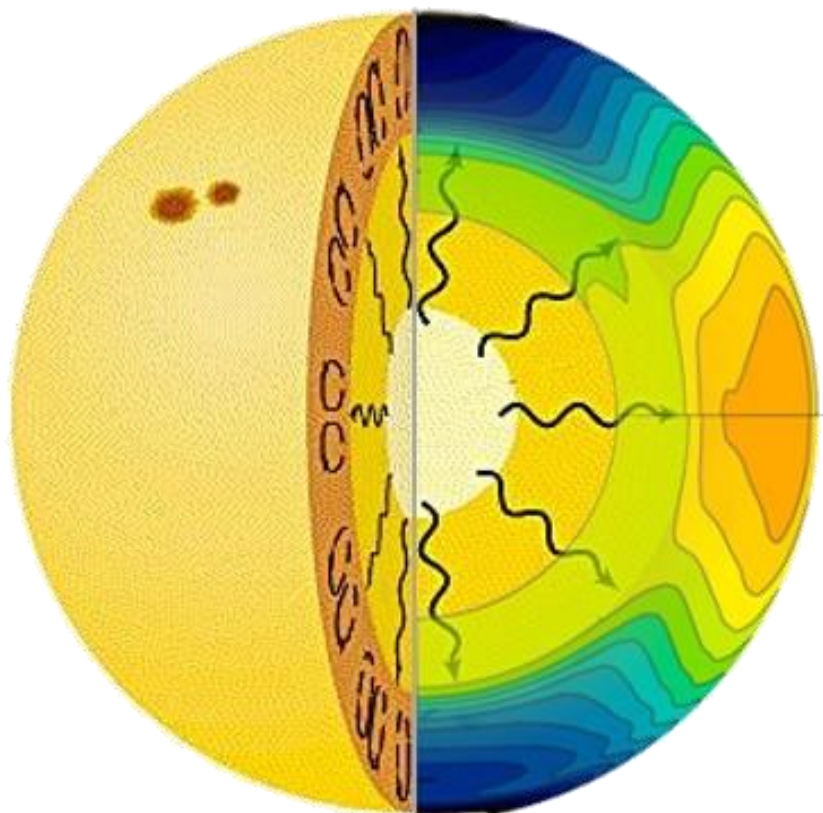
Dínamo homopolar

Objetivo: crescimento sustentável do campo magnético

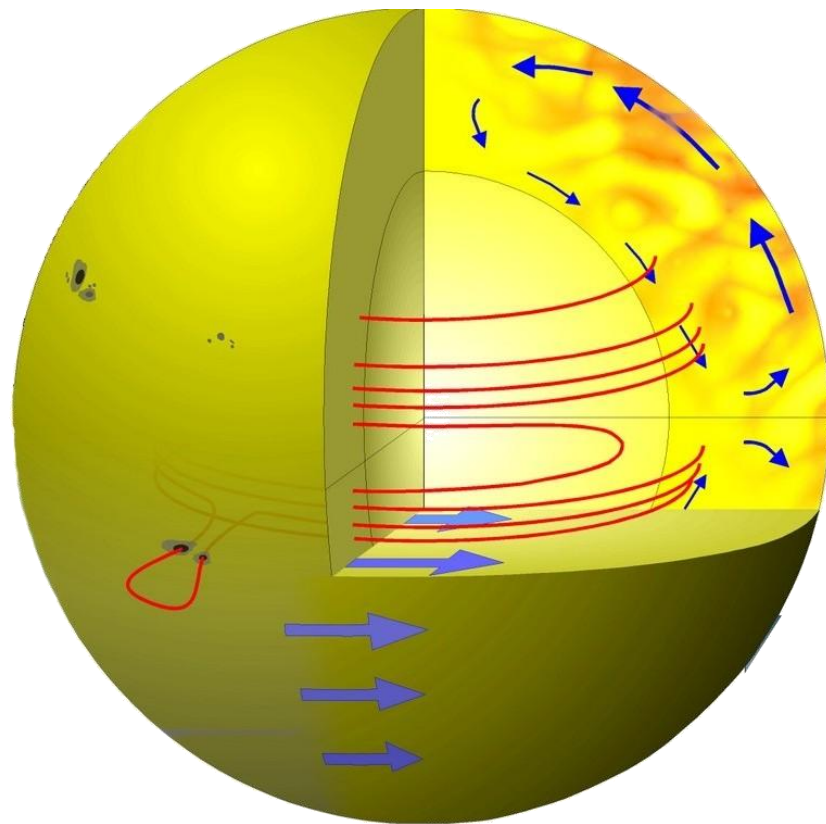
Anatomia Solar



Movimentos de larga escala no Sol



Rotação Diferencial



Circulação Meridional

Electrodinâmica de campo médio

Separação de escalas

Separamos os campos magnéticos e de velocidades em grandes escalas (escoamentos laminares, "bem comportados") e pequenas escalas (turbulência).

$$\mathbf{U} = \langle \mathbf{U} \rangle + \mathbf{u} \quad \mathbf{B} = \langle \mathbf{B} \rangle + \mathbf{b}$$

Com esta separação de escala é possível definir um operador de "médias" tal que:

$$\langle A \rangle = \frac{1}{\lambda^3} \int_V A \, d\mathbf{x}$$

$$\langle \mathbf{u} \rangle = \langle \mathbf{b} \rangle = 0.$$

Substituímos na equação MHD de indução, aplicamos o operador de médias e temos que:

$$\frac{\partial \langle \mathbf{B} \rangle}{\partial t} = \nabla \times (\langle \mathbf{U} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle) + \nabla \times \boldsymbol{\mathcal{E}} + \eta \nabla^2 \langle \mathbf{B} \rangle$$

com : $\boldsymbol{\mathcal{E}} = \langle \mathbf{u} \times \mathbf{b} \rangle$ FORÇA ELECTROMOTRIZ TURBULENTA

O objectivo é não ter que lidar com as pequenas escalas ligadas à turbulência. Podem usar-se propriedades estatísticas e globais da turbulência para definir $\boldsymbol{\mathcal{E}} = \langle \mathbf{u} \times \mathbf{b} \rangle$

Aproximações: Simetria esférica e regime cinemático

$$\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B}_\phi + \mathbf{B}_p$$

$$\mathbf{B}_p = \nabla \times (A_p \hat{e}_\phi)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\Omega}{r \sin(\theta)} \hat{e}_\phi + v_p \hat{e}_p$$

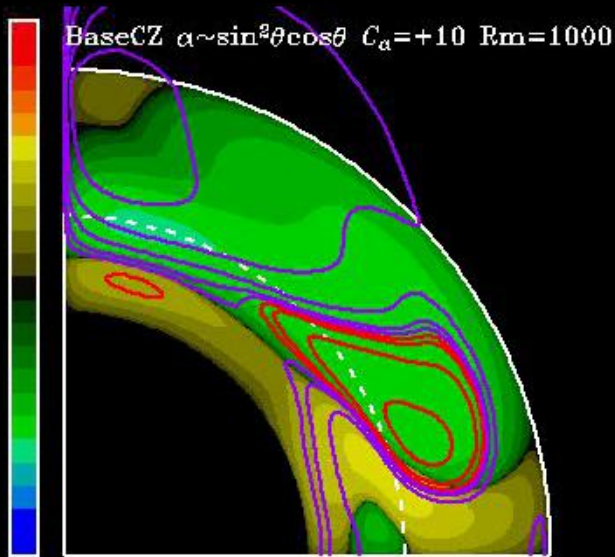
Campo Toroidal (direcção ϕ)
 Campo Poloidal (plano r, θ)

Rotação Diferencial (direcção ϕ)
 Circulação Merdional (plano r, θ)

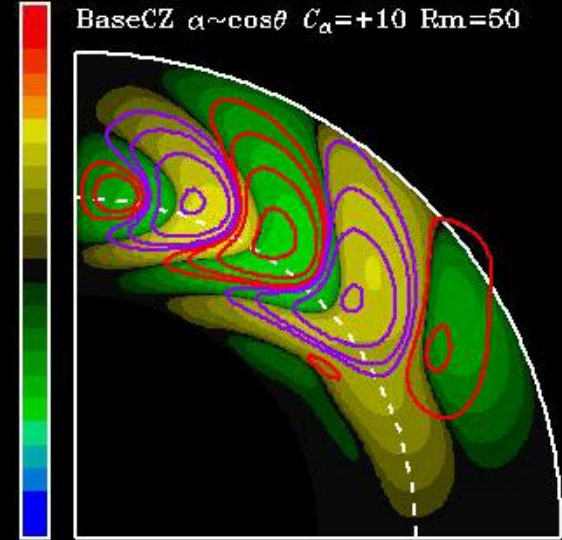
$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = \underbrace{\eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{\bar{r}^2} \right) B_\phi}_{\text{Difusão}} - \underbrace{\bar{r} v_p \cdot \nabla \left(\frac{B_\phi}{\bar{r}} \right)}_{\text{Advecção}} + \underbrace{\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial(\bar{r} B_\phi)}{\partial r} \frac{\partial \eta}{\partial r}}_{\text{Transporte Diamagnético}} - \underbrace{B_\phi \nabla \cdot v_p}_{\text{Compressão}} + \underbrace{\bar{r} [\nabla \times (A_p \hat{e}_\phi)] \cdot \nabla \Omega}_{\text{Cisalhamento}}$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial t} = \eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{\bar{r}} \right) A_p - \frac{v_p}{\bar{r}} \cdot \nabla (\bar{r} A_p) + \alpha B_\phi \quad \text{Termo fonte}$$

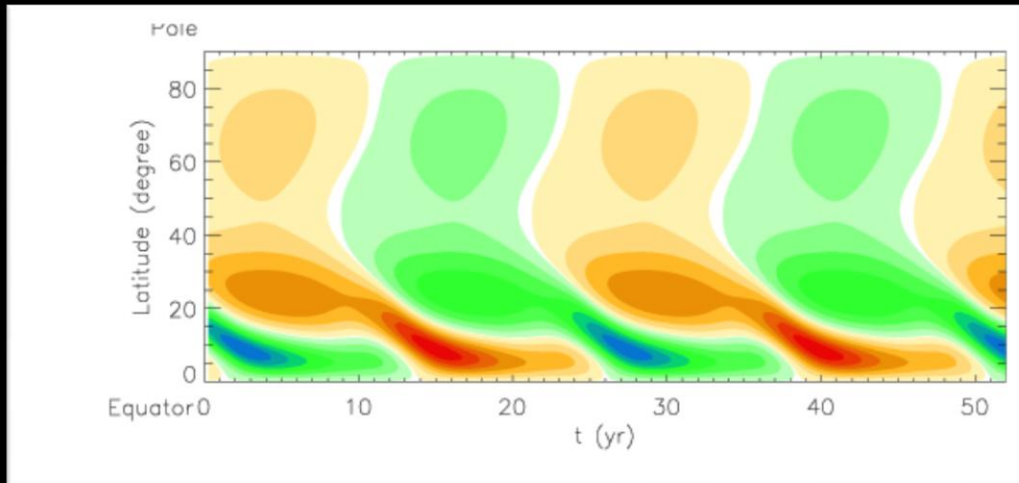
Resultados das simulações: exemplos



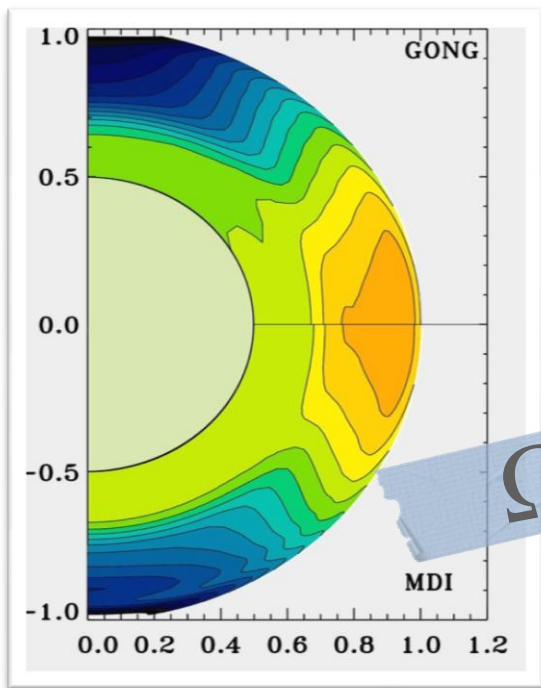
$t/\tau = 0.3750$



$t/\tau = 0.3750$



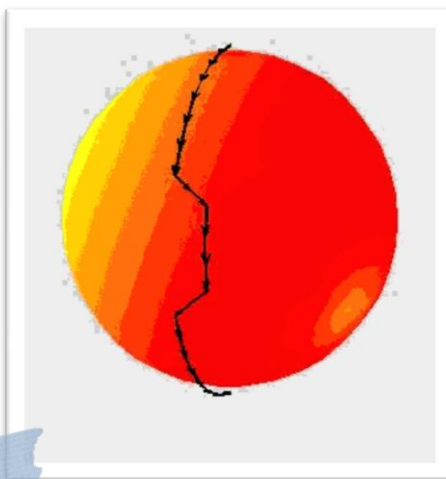
Charbonneau, P., Dynamo Models of the Solar Cycle, Living Reviews in Solar Physics



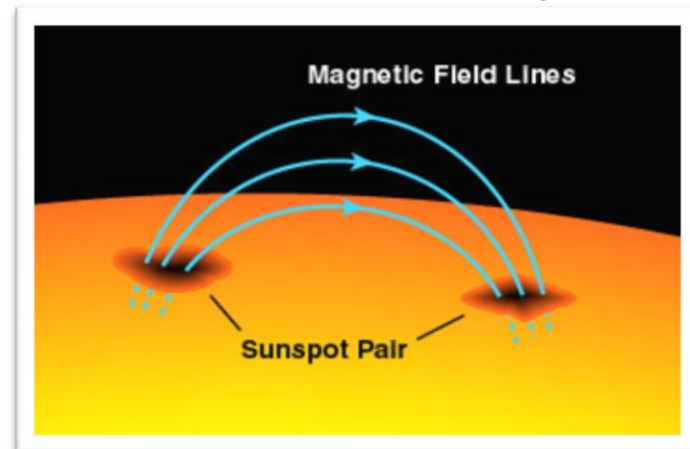
Rotação diferencial

Ω

Formação do campo toroidal B_ϕ

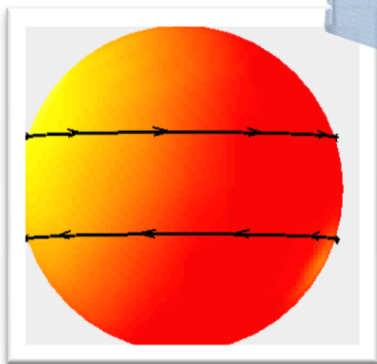


Flutuabilidade de tubos de fluxo magnético

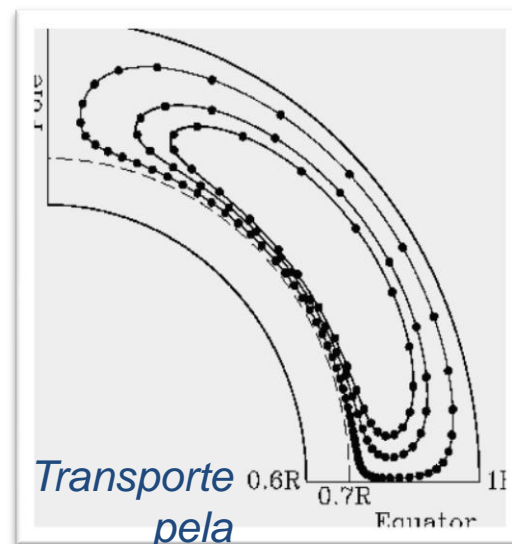
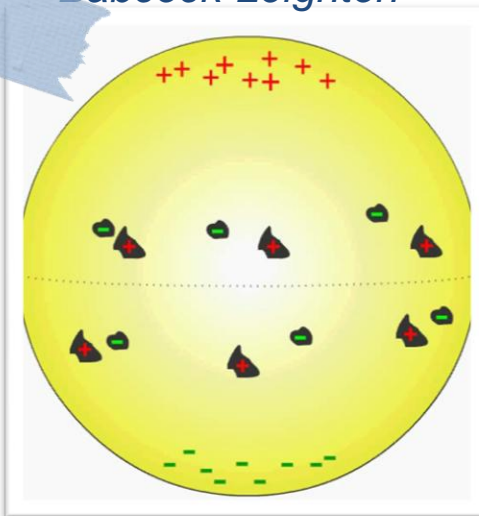


α

Mecanismo de Babcock-Leighton



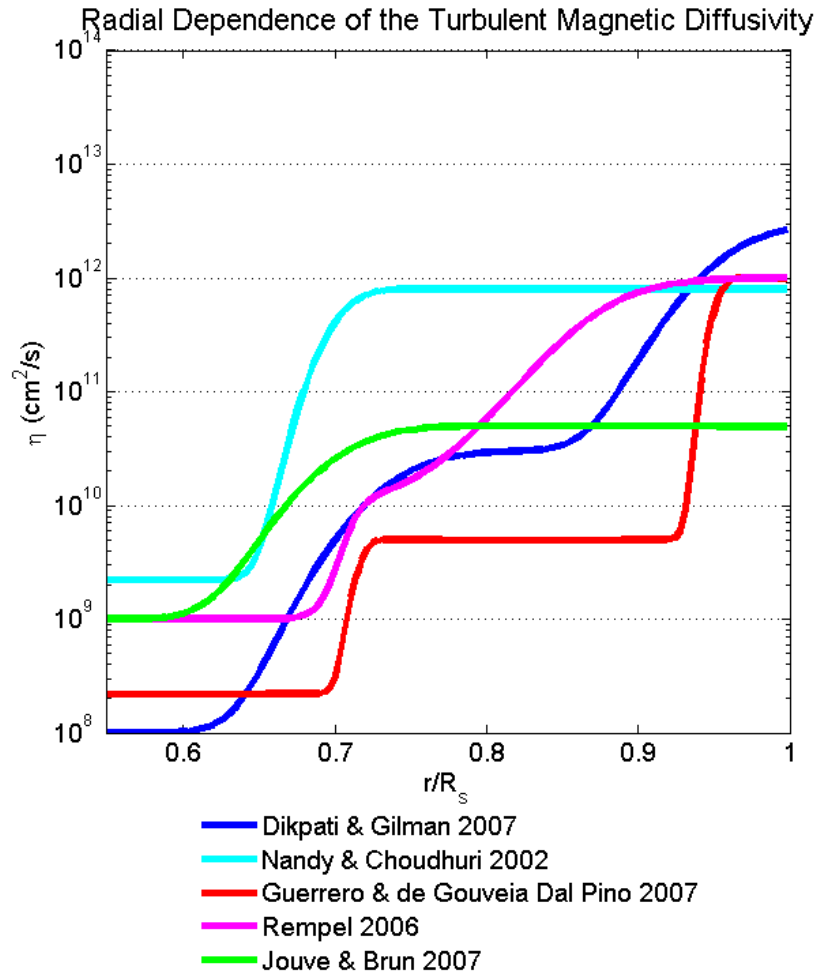
Formação do campo Poloidal, A_p



Transporte pela Circulação Meridional

Vários modelos de dínamo solar

α - Ω , Babcock-Leighton, Transporte de Fluxo, Dínamos de interface,...



Diferentes parametrizações das quantidades que intervêm no processo de dínamo, induzem a diferentes modelos.

Problemas:

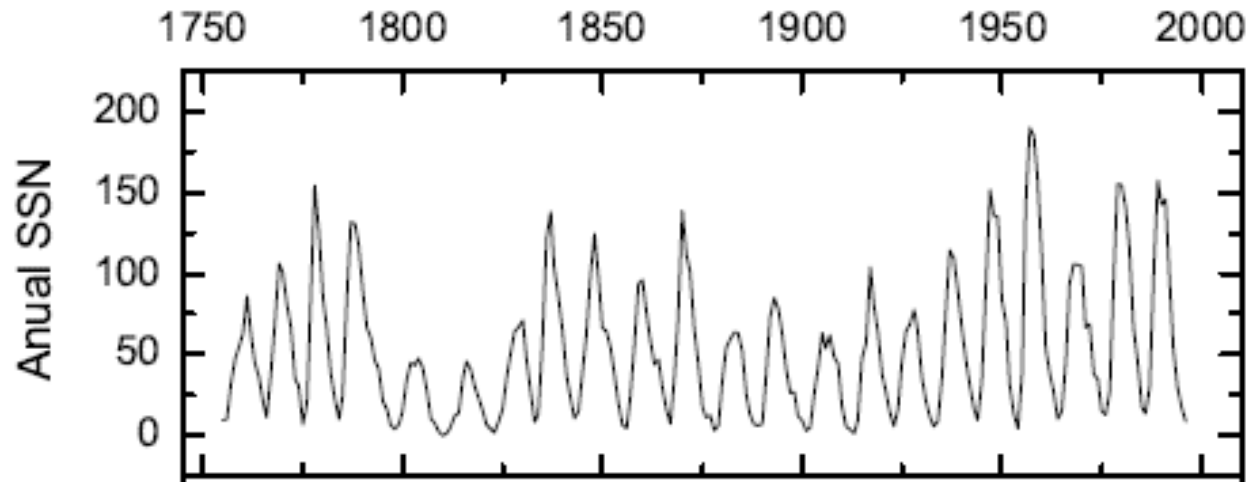
Liberdade na escolha das parametrizações pois não há dados observacionais que as restrinjam (ex: variação da difusividade magnética em função do raio, perfil da circulação meridional, efeitos alpha, etc.)

Figura de:

Andrés Muñoz-Jaramillo,

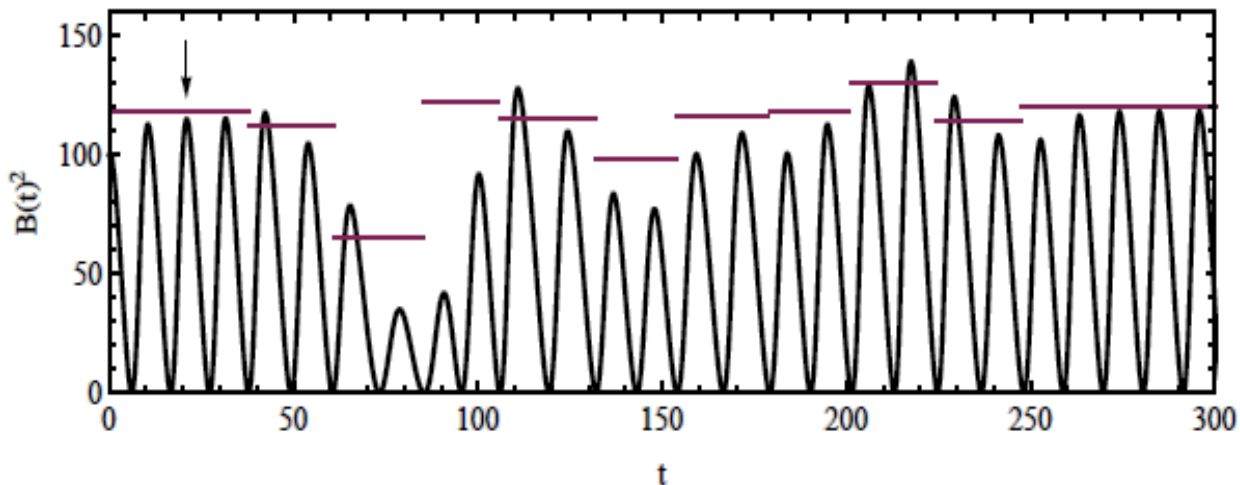
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Variabilidade Solar



Exemplo: Variações na circulação meridional (*uma possível parametrização abaixo*)

$$\psi r \sin \theta = \psi_0 (r - R_p) \sin \left[\frac{\pi (r - R_p)}{(R_\odot - R_p)} \right] \{1 - e^{-\beta_1 \theta^\epsilon}\} \{1 - e^{\beta_2 (\theta - \pi/2)}\} e^{-((r-r_0)/\Gamma)^2}$$



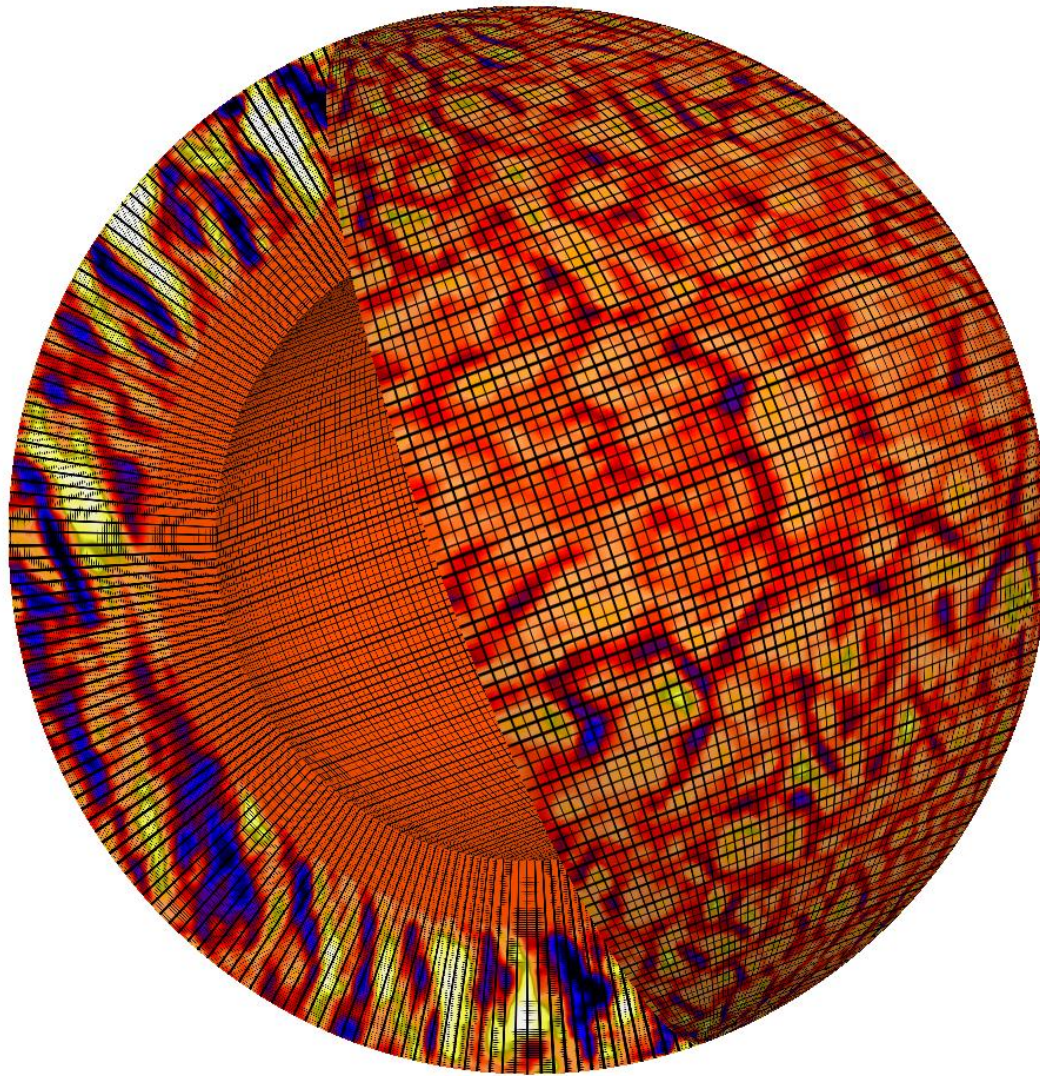
Simulações 3D MHD

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 ,$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \frac{1}{\mu_0 \rho} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} ,$$

$$\frac{De}{Dt} + (\gamma - 1)e \nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \left[\nabla \cdot \left((\chi + \chi_r) \nabla T \right) + \phi_\nu + \phi_B \right] ,$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B}) .$$



Domínio computacional $0.65R$ e $0.96R$

Simulação da zona convectiva

Regimes turbulentos altos

Aparecimento de grandes estruturas de campo magnético

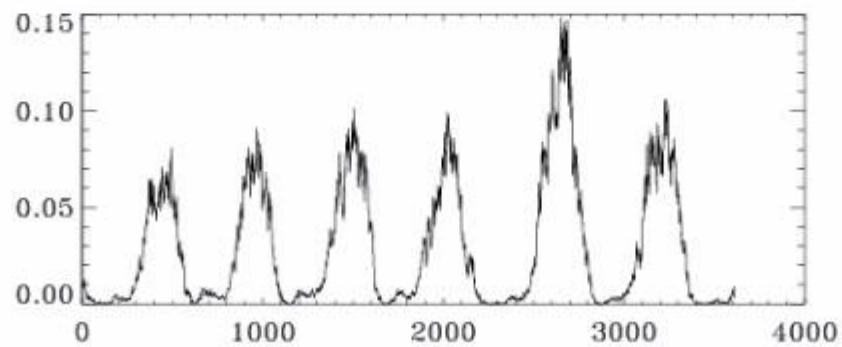
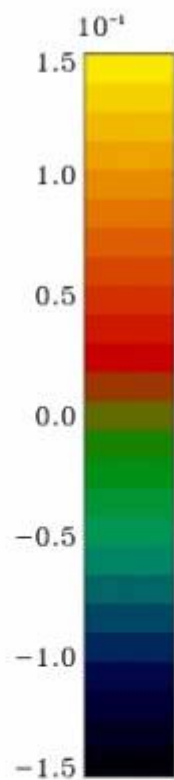
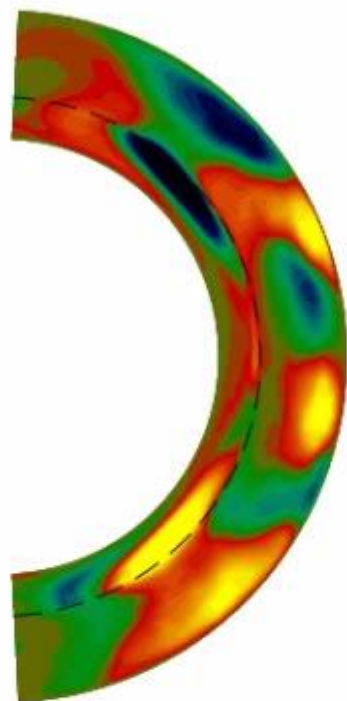
Desenvolvimento de rotação diferencial tipo Sol (mas não igual)

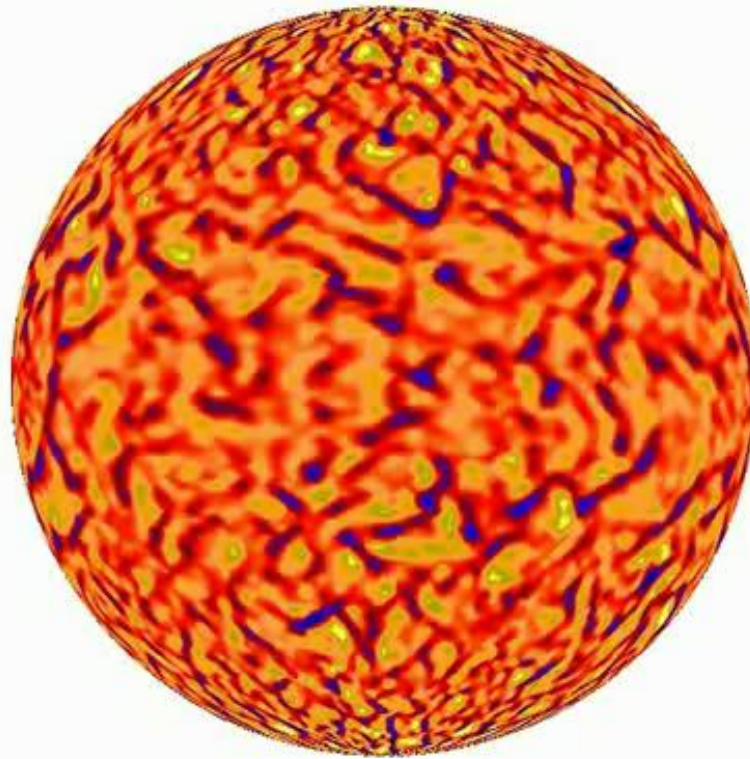
Desenvolvimento de Circulação Meridional

Inversão cíclica do campo magnético de grande escala

Muito por fazer e perceber!!!

bxmoy at t= 1





Espera-se que a análise a estas simulações possam dar novas pistas sobre como melhor parametrizar o interior do Sol.

Há muitas esperanças que a Heliosismologia e a nova geração de satélites contribua para esta parametrização.

Um dia poder-se-á (talvez) prever a actividade solar...

Página de investigação em Física Solar do CENTRA

<http://centra.ist.utl.pt/sspg/>

Contacto

dariopassos@ist.utl.pt

