



Máximo solar

Mínimo solar

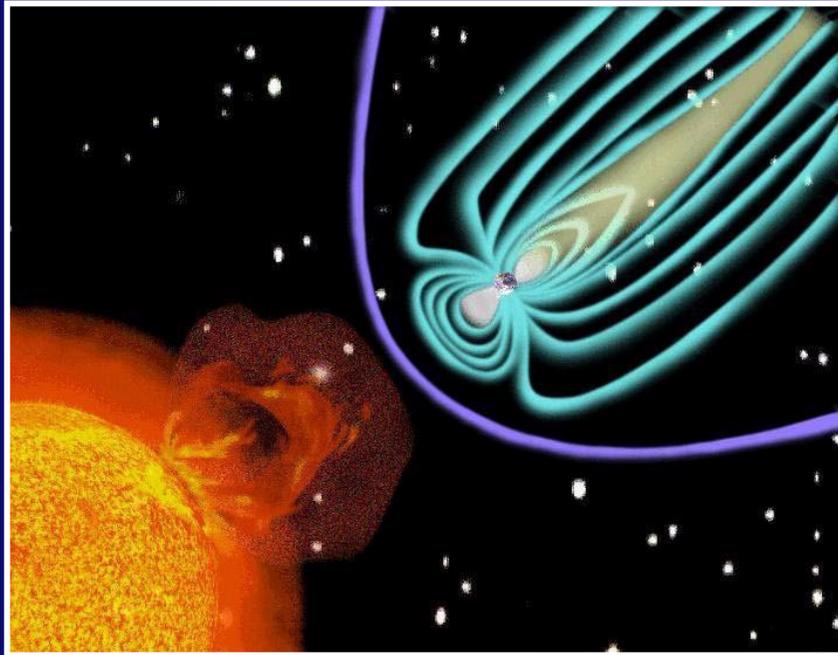
Sol

Parte II

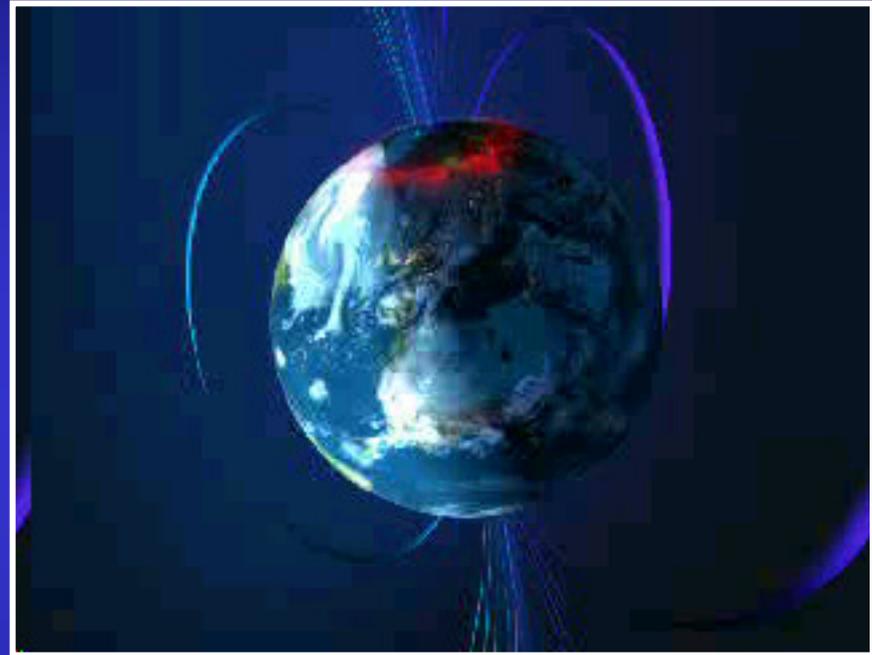
**ASTRONOMIA DO
SISTEMA SOLAR**

**Enos Picazzio
IAGUSP**

VENTO SOLAR

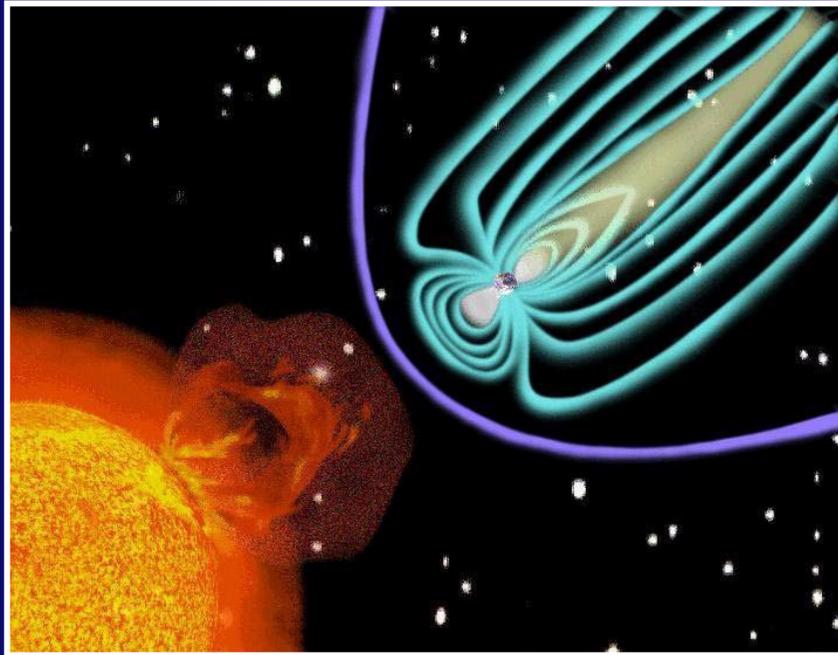


Fluxo de prótons (~96%), núcleos de hélio (~4%) e resquícios de núcleos de elementos mais pesados proveniente do Sol.

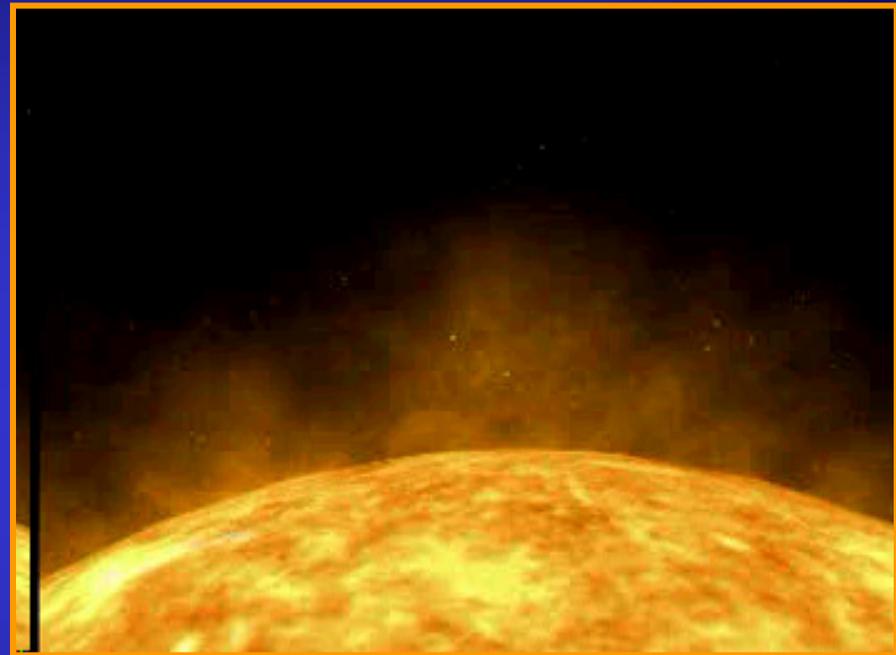


As partículas eletricamente carregadas interagem com a magnetosfera terrestre, escoam em direção dos pólos, chocam-se com a atmosfera e excitam o gás atmosférico. Ao retornar ao estado normal o gás emite luz produzindo as auroras polares.

VENTO SOLAR



Fluxo de prótons (~96%), núcleos de hélio (~4%) e resquícios de núcleos de elementos mais pesados proveniente do Sol.

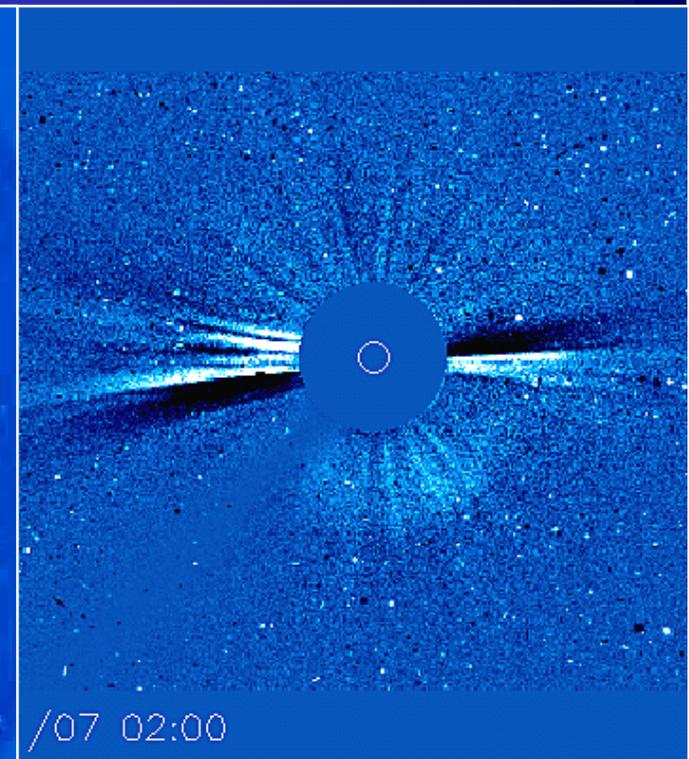
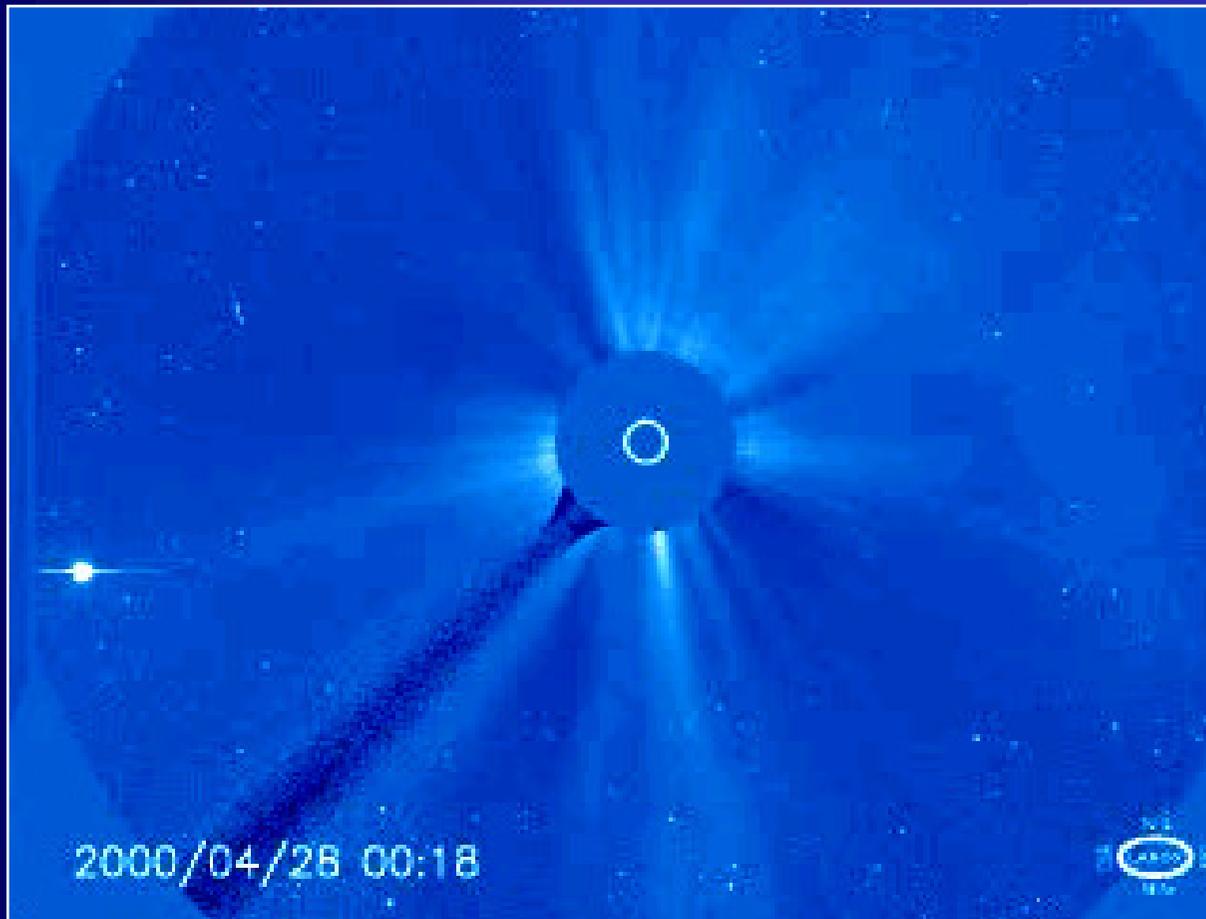


As partículas eletricamente carregadas interagem com a magnetosfera terrestre, escoam em direção dos pólos, chocam-se com a atmosfera e excitam o gás atmosférico. Ao retornar ao estado normal o gás emite luz produzindo as auroras polares.

VENTO SOLAR

Ejeção de Massa na Coroa (EMC)

EMC são grandes nuvens de gás magnetizado (alguns bilhões de toneladas) ejetadas no espaço, através de erupções violentas, com velocidades elevadas (100 a 3.000 km/s). Podem causar tempestades magnéticas e danificar satélites e centrais de energia.

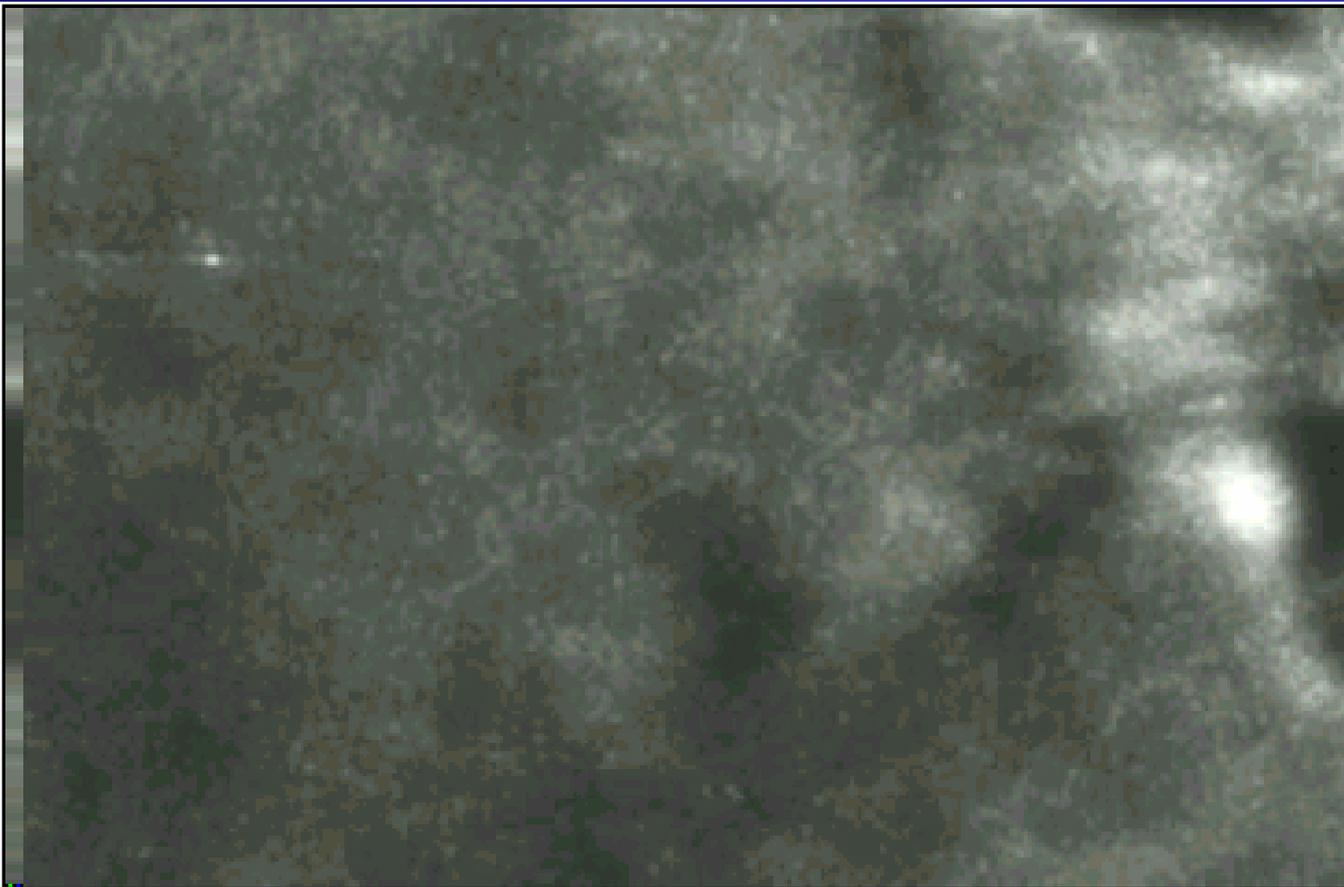


A aparência ruidosa da imagem é resultado das partículas do vento atingindo o detector do instrumento.

VENTO SOLAR

Ejeção de Massa na Coroa (EMC)

EMC são grandes nuvens de gás magnetizado (alguns bilhões de toneladas) ejetadas no espaço, através de erupções violentas, com velocidades elevadas (100 a 3.000 km/s). Podem causar tempestades magnéticas e danificar satélites e centrais de energia.



191283main_Encke_CU4.mpg

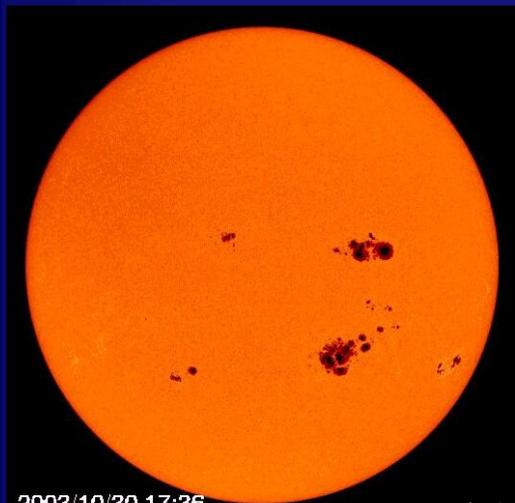
*Cometa
Encke:*

viajava internamente à órbita de Mercúrio quando foi atingido por uma EMC que desintegrou sua cauda

(NRL / STEREO / NASA)

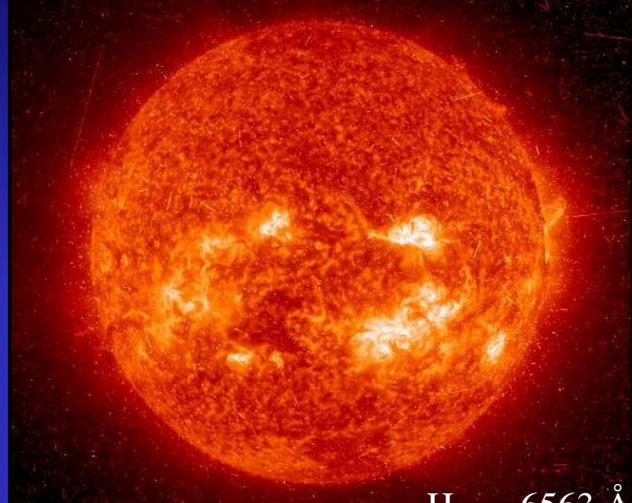
VENTO SOLAR

SOHO: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>



2003/10/30 17:36

visível



2003/10/30 16:39

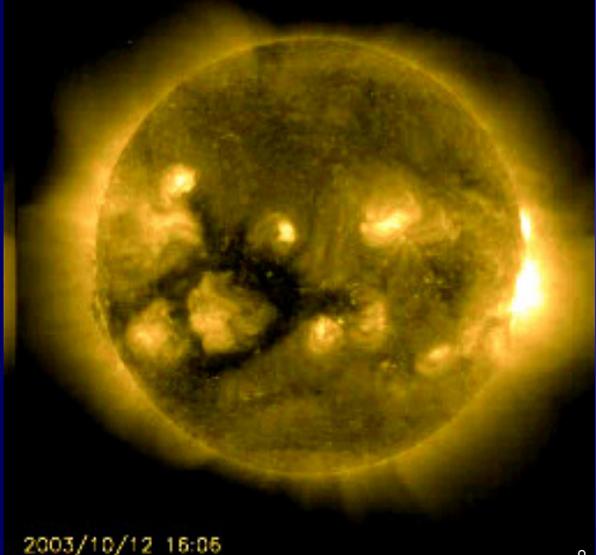
H_{alfa} - 6563 Å



2003/10/30 19:24

Fe XII - 195 Å

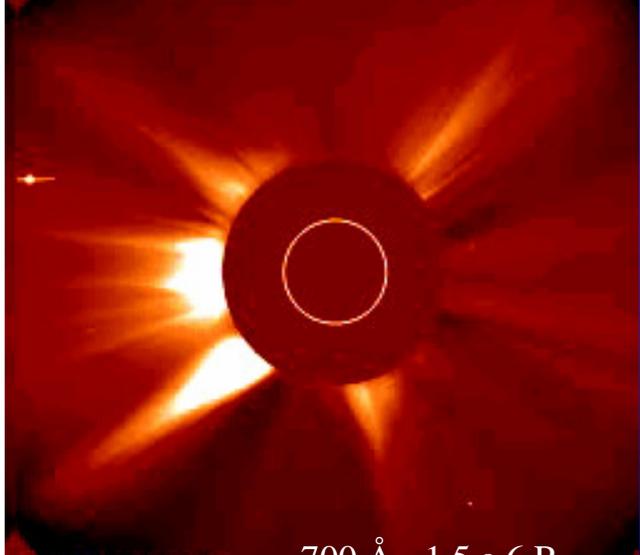
12-31/10



2003/10/12 16:06

284 Å

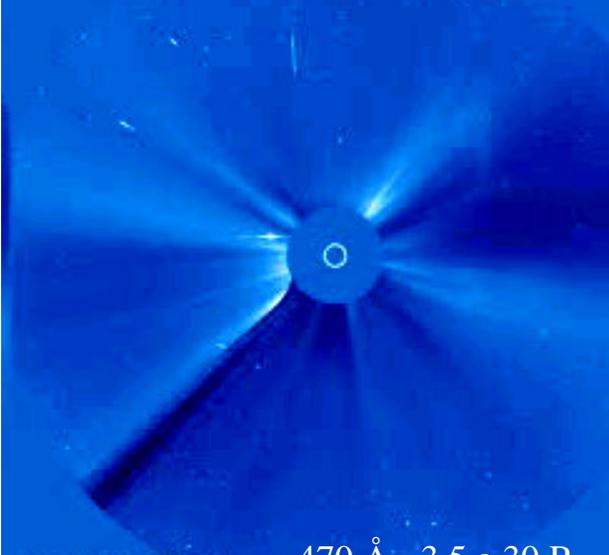
28-31/10



2003/10/28 00:54

700 Å - 1,5 a 6 R_{SOL}

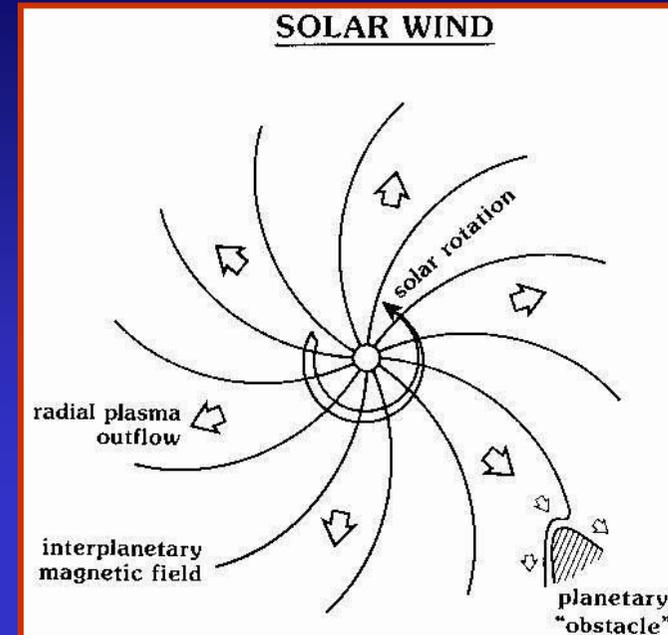
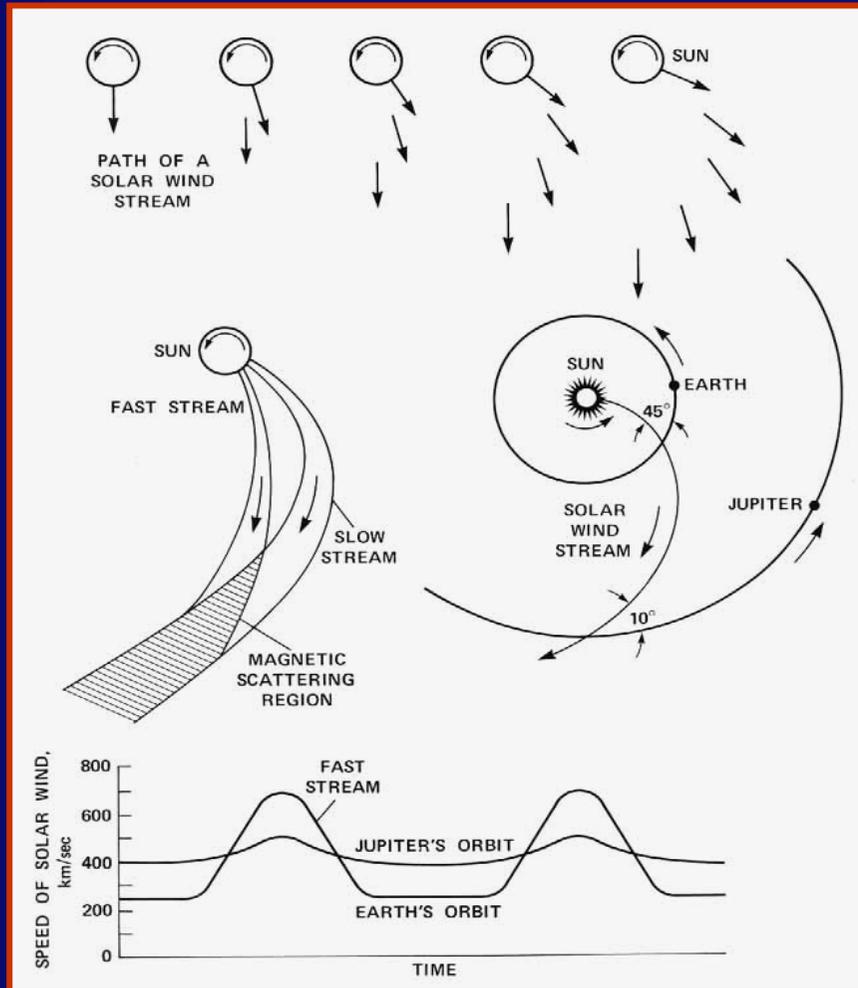
28-31/10



2003/10/28 01:42

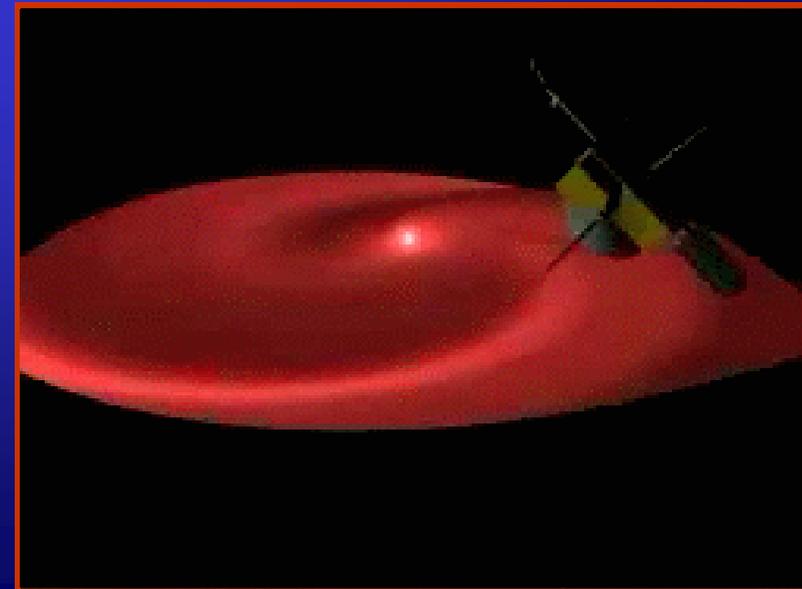
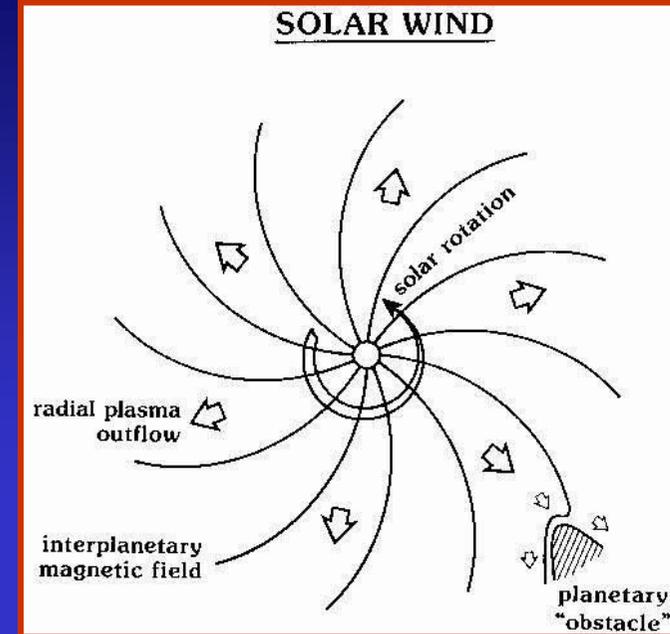
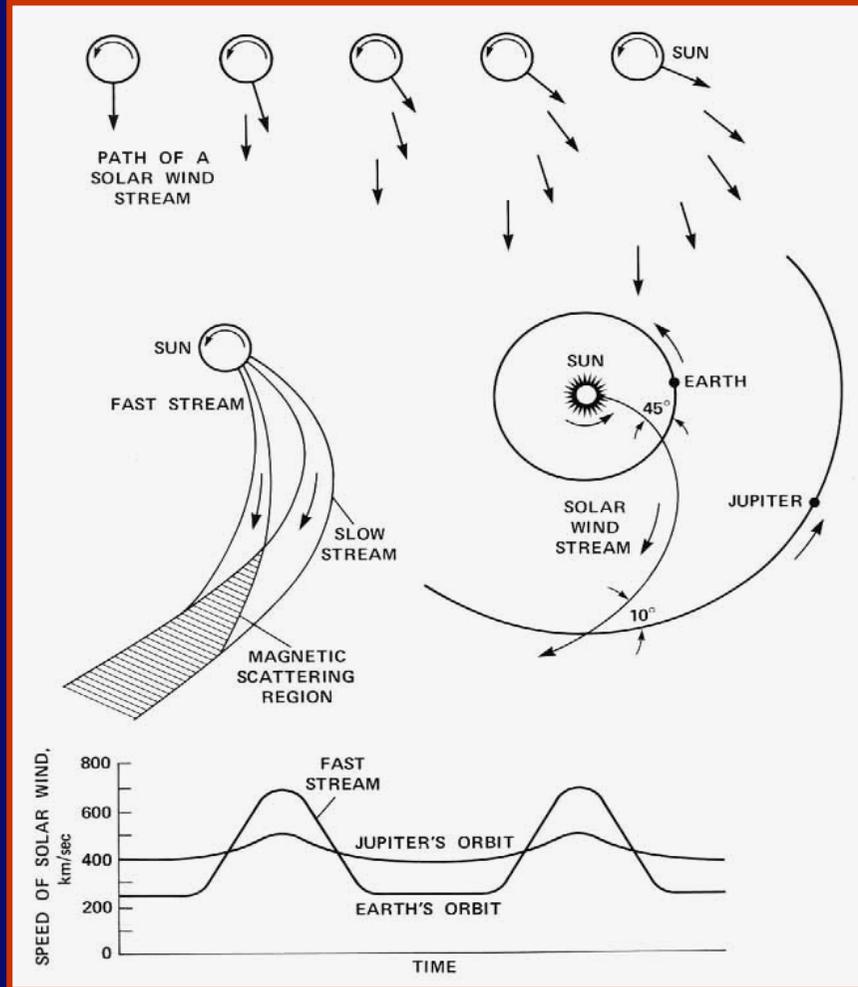
470 Å - 3,5 a 30 R_{SOL}

VENTO SOLAR



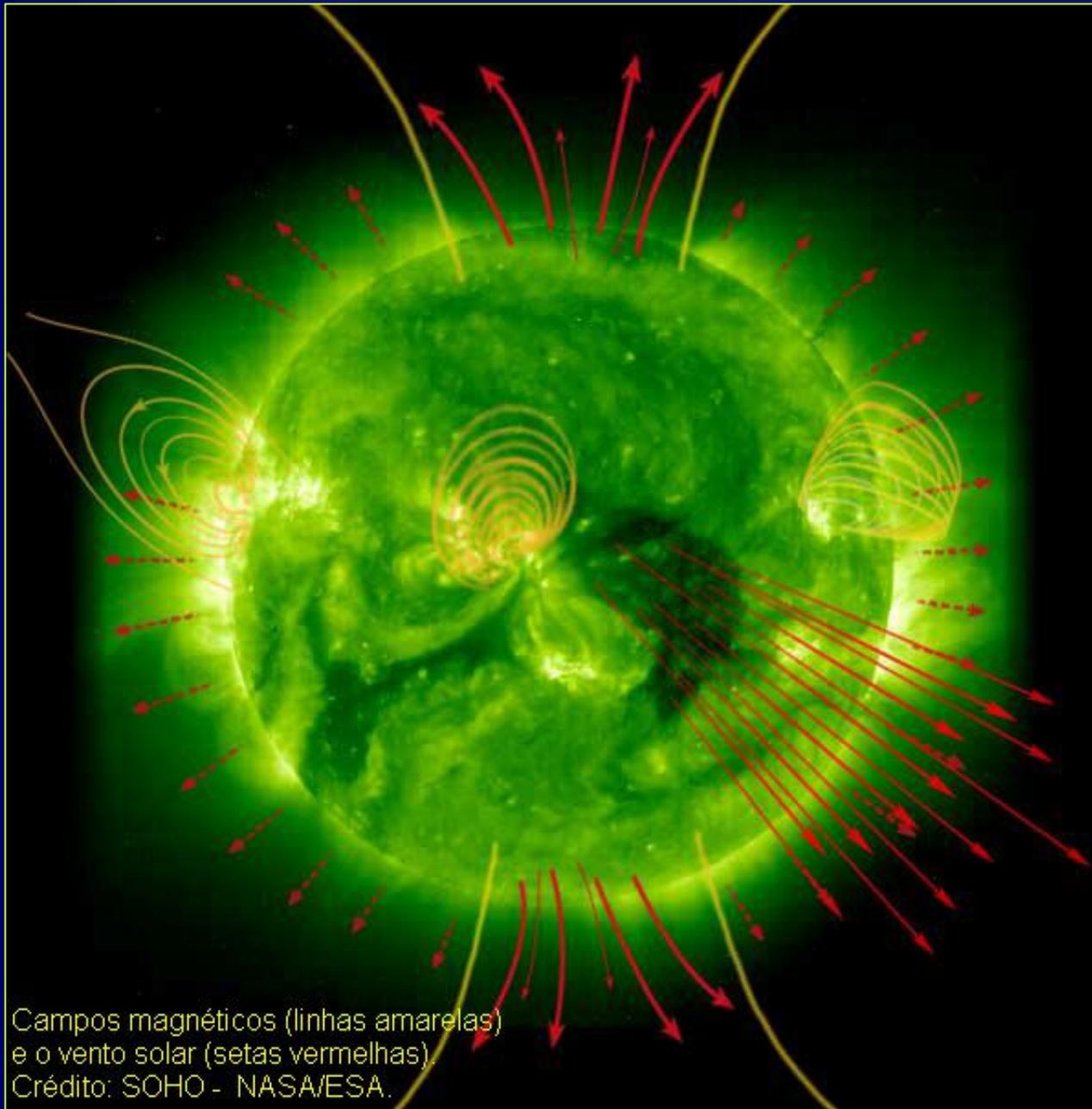
Após abandonar o Sol, o vento solar flui radialmente de forma semelhante à água do borrifador de jardim (as gotas movem-se em linha reta mas o borrifador gira, formando o padrão espiral). Qdo atinge a Terra, a espiral forma um ângulo de 45° com a direção radial, viajando a cerca de 1,6 milhões de km/h.

VENTO SOLAR



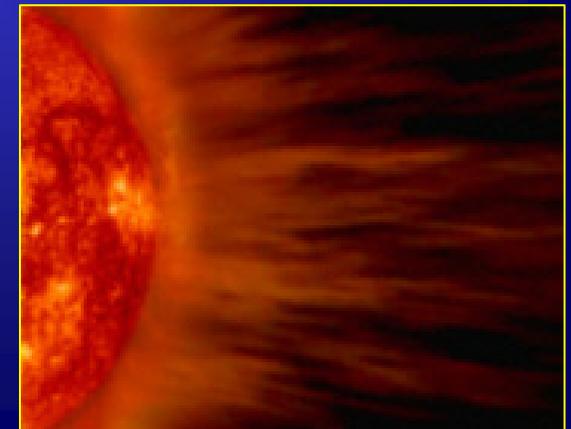
Após abandonar o Sol, o vento solar flui radialmente de forma semelhante à água do borrifador de jardim (as gotas movem-se em linha reta mas o borrifador gira, formando o padrão espiral). Qdo atinge a Terra, a espiral forma um ângulo de 45° com a direção radial, viajando a cerca de 1,6 milhões de km/h.

VENTO SOLAR

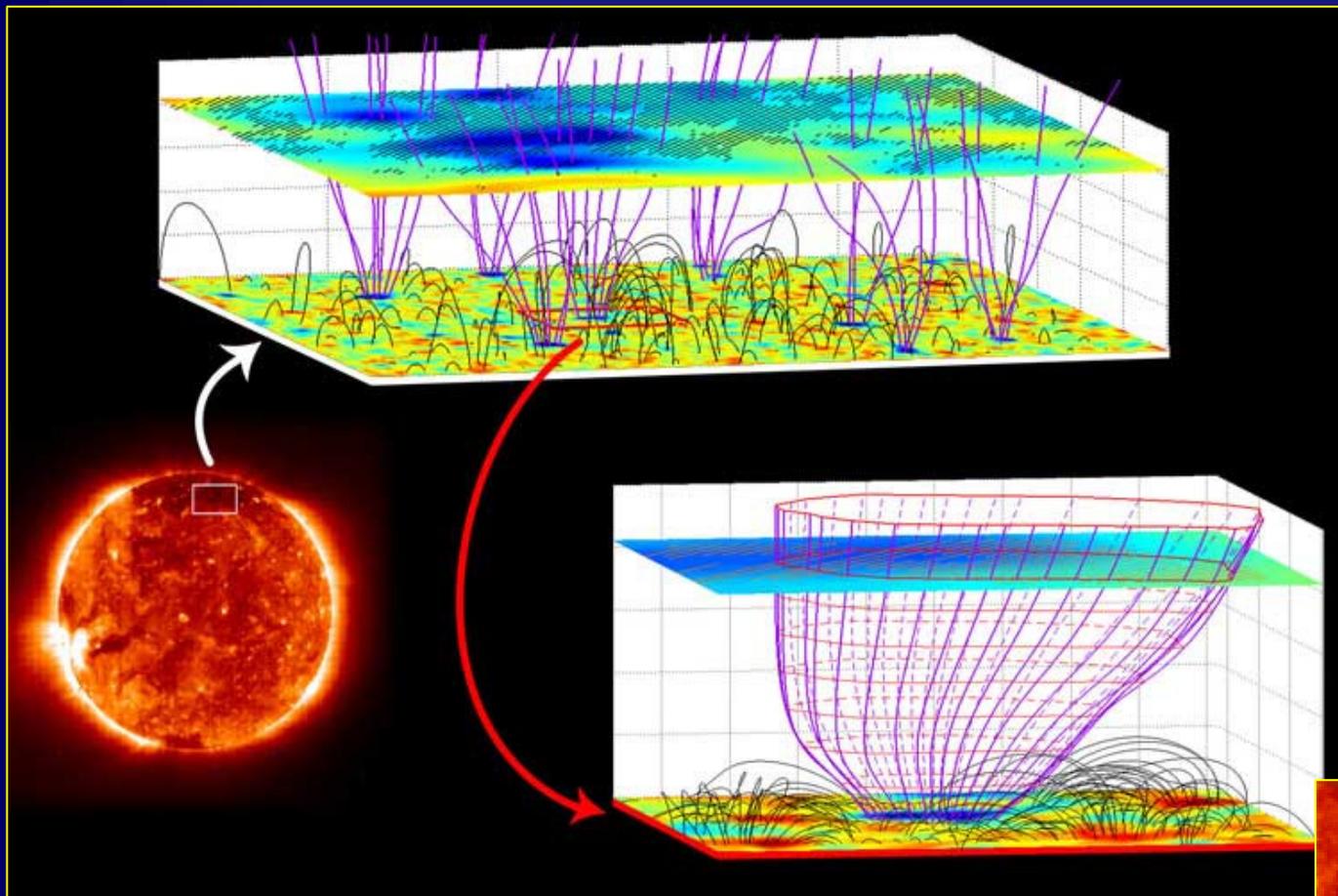


Campos magnéticos (linhas amarelas)
e o vento solar (setas vermelhas).
Crédito: SOHO - NASA/ESA.

O vento nasce nas estruturas magnéticas abertas, por onde o plasma escapa para o meio interplanetário. Por isso, essas regiões aparecem escurecidas, ao contrário das regiões com estruturas magnéticas fechadas que mantêm o plasma aquecido e emitindo radiação.



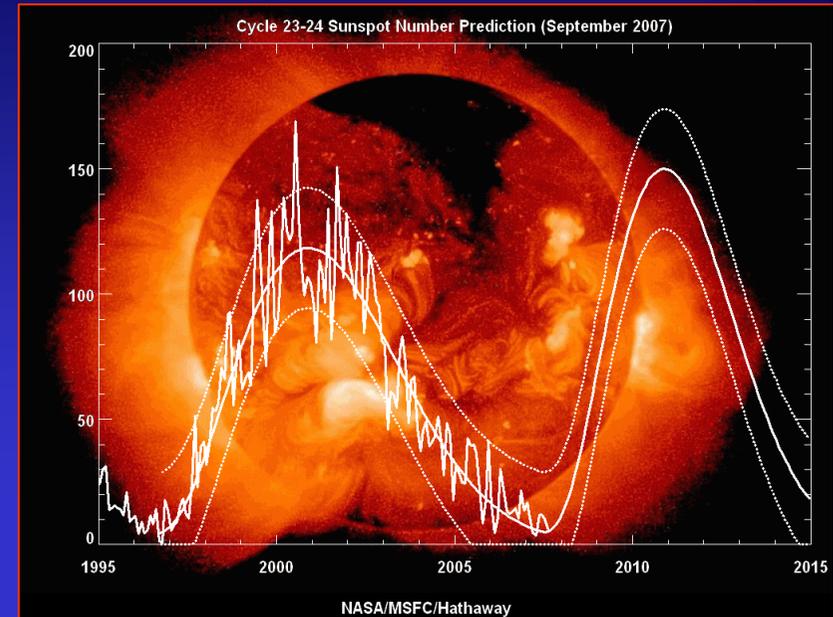
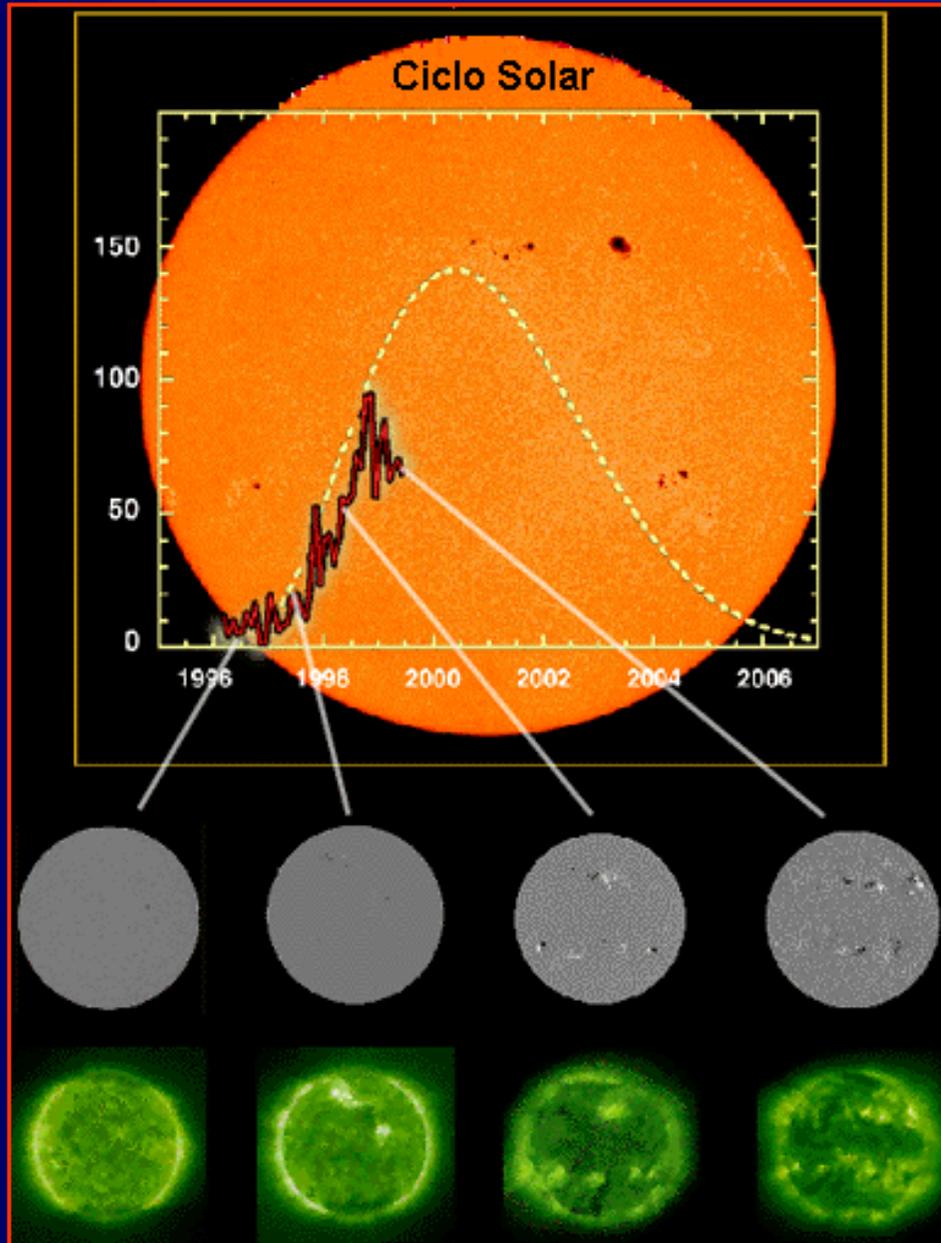
VENTO SOLAR



Estrutura de regiões magnéticas abertas



ATIVIDADE SOLAR



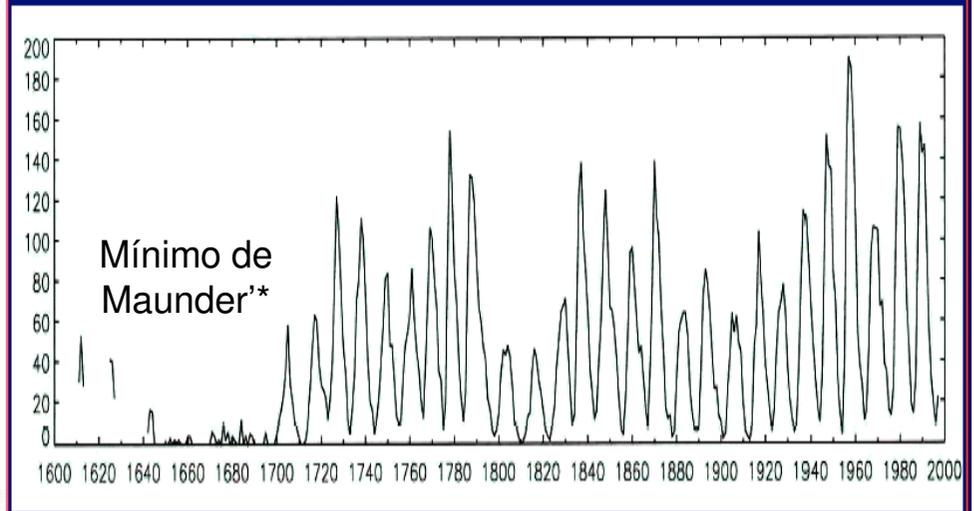
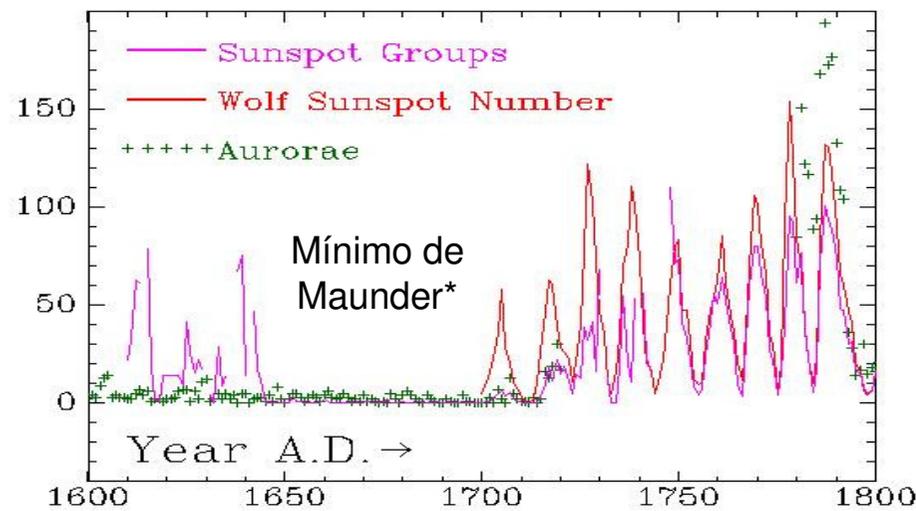
O Sol têm um **ciclo de atividade da ordem de 11 anos.**

Durante esse tempo o número de manchas solares varia, e o campo magnético global se inverte.

Portanto o **ciclo magnético tem cerca de 22 anos.**

Ciclo das manchas: 11,1 anos ;
Valores extremos: 7 e 17 anos
Ciclo de Gleissberg: ~117 anos

ATIVIDADE SOLAR



Ciclo das manchas: 11,1 anos (extremos: 7 e 17)
Ciclo de Gleissberg: ~117 anos

(*) Durante esse período o Sol esteve em atividade mínima, praticamente sem manchas.

Pequena Idade do Gelo



O clima da Terra foi fortemente afetado por esse fenômeno.

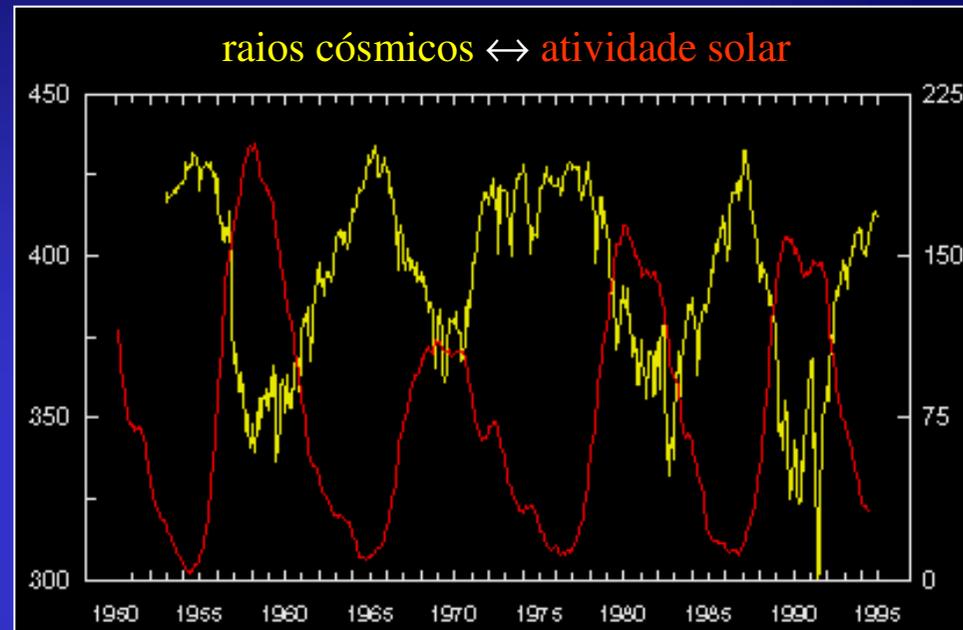


Estudo recente associa morte coletiva de baleias com atividade solar

ATIVIDADE SOLAR

DATAÇÃO ATRAVÉS DO ^{14}C

A magnetosfera terrestre fica mais carregada com partículas solares eletricamente carregadas à medida que a atividade solar aumenta. Quanto mais carregada a magnetosfera, menos raios cósmicos penetram atmosfera. Ou seja: a taxa de incidência de raios cósmicos na superfície depende da atividade solar.



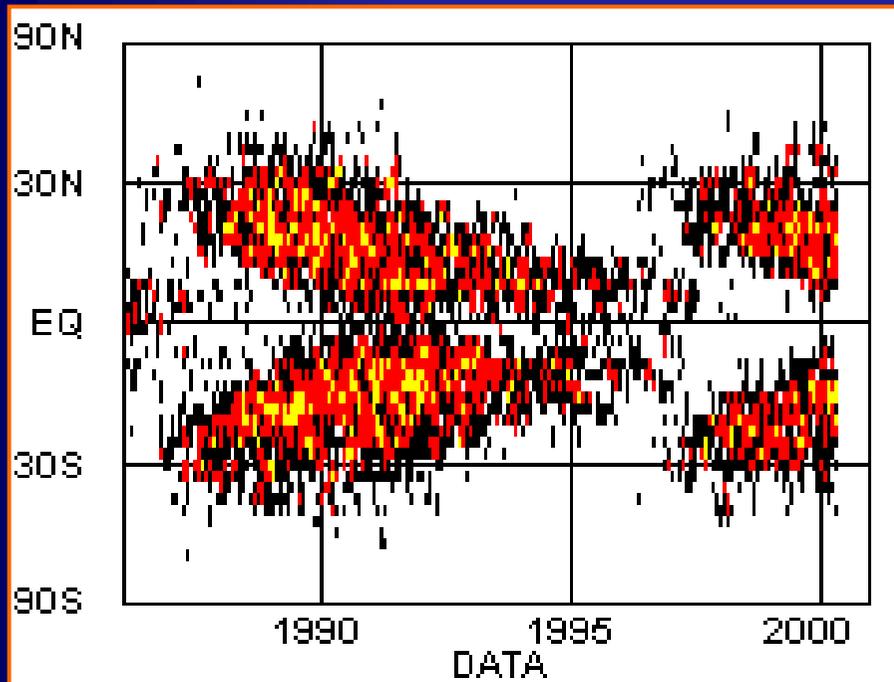
Consequência:

1. $^{14}\text{N} + \text{raio cósmico} \rightarrow ^{14}\text{C}$.
2. O ^{14}C é instável e decai novamente em ^{14}N (meia vida do ^{14}C é 5.700 anos).
3. Analisando a razão $^{14}\text{N}/^{14}\text{C}$ nos materiais (por ex.: troncos de árvores antigas), pode-se avaliar a data de ocorrência. Com a abundância relativa e a data pode-se inferir a atividade solar em diferentes épocas.

ATIVIDADE SOLAR

O CICLO DAS MANCHAS

Diagrama da borboleta



Solar Magnetic Field Evolution

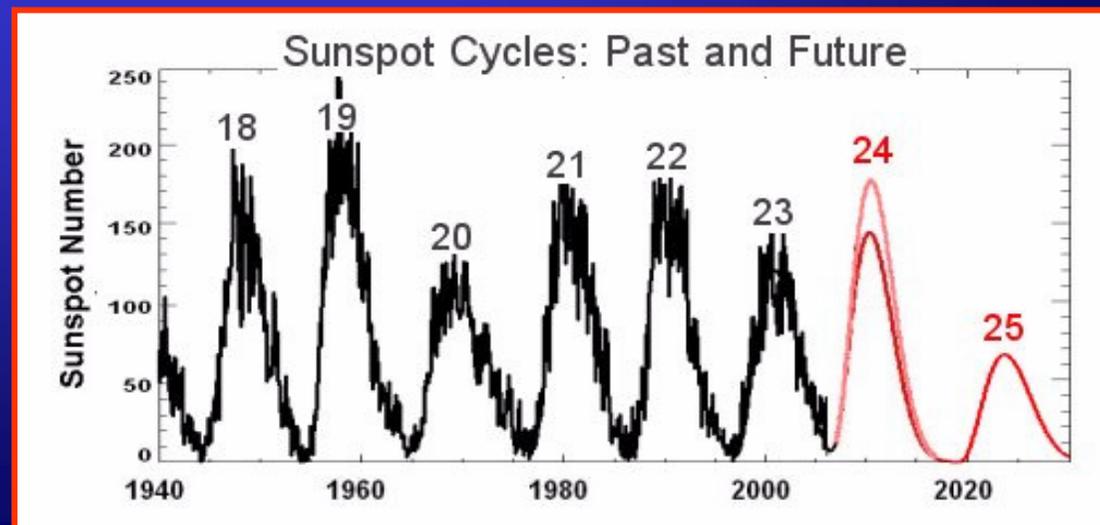
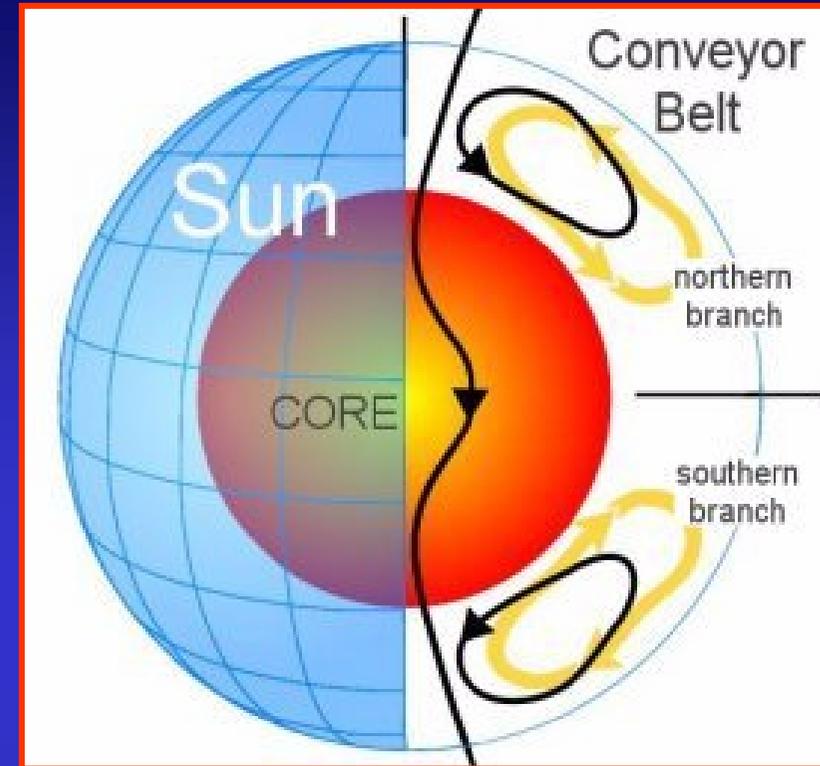
A quantidade de manchas aumenta com a atividade solar. As manchas são escassas na fase de mínima atividade e aparecem próximas às latitudes 30° norte e sul. Com a evolução do ciclo, a quantidade aumenta e elas surgem em latitudes cada vez menores, até o pico de máxima atividade. A partir daí, elas desaparecem gradativamente e começam a surgir novamente próximas às latitudes 30° .

ATIVIDADE SOLAR

· **A grande esteira:** plasma subfotosférico (200.000 km) aquecido circula em dois ramos, nos dois hemisférios, levando 40 anos para dar um ciclo completo. Acredita-se que essa circulação controla o ciclo das manchas.

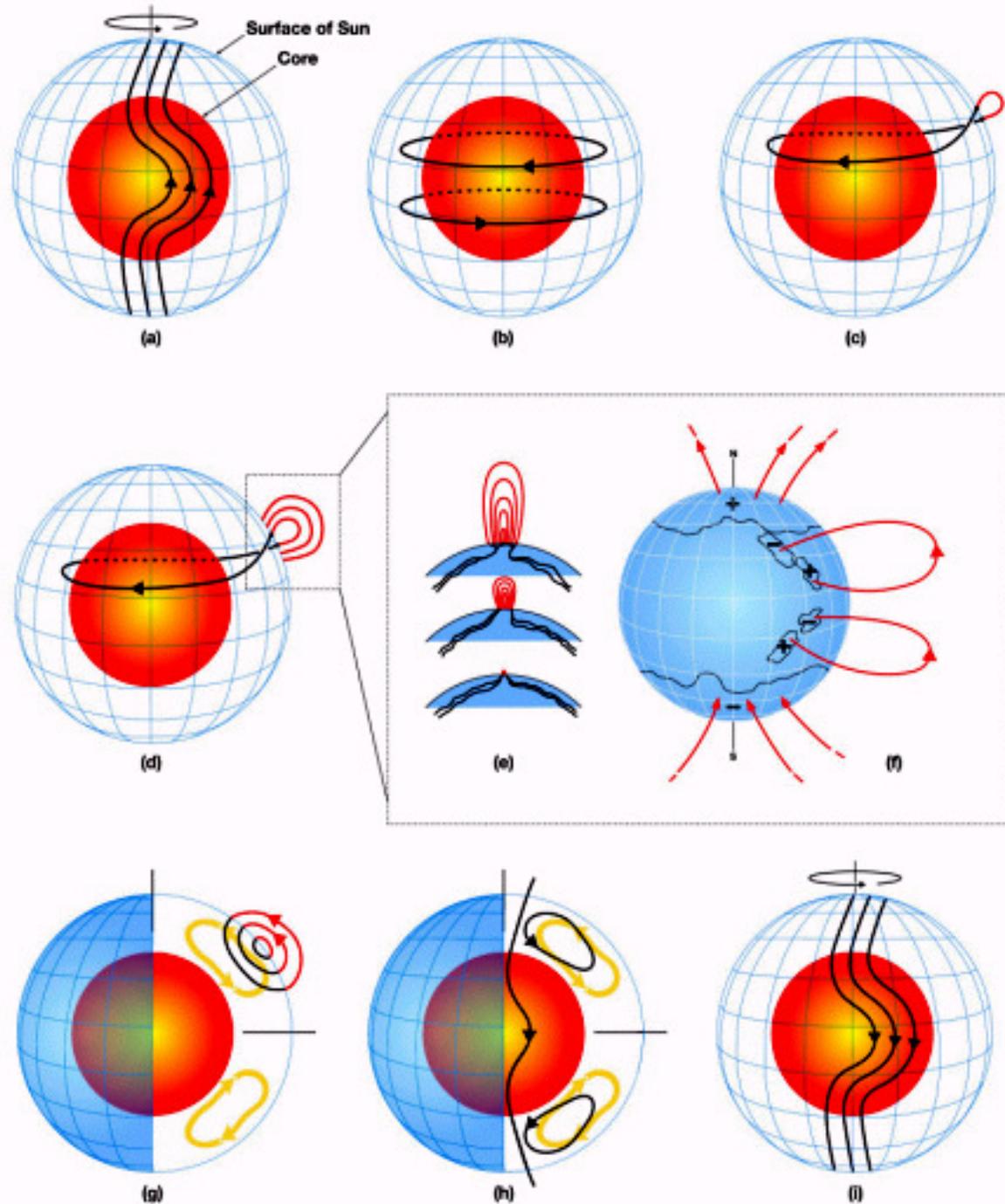
· O movimento da esteira é estudado pelo deslocamento em latitude das manchas: elas nascem em latitudes médias e deslocam-se para o equador à medida que o ciclo evolui. Esse deslocamento é causado pelo movimento da esteira: pela rapidez das manchas deduz-se a velocidade da esteira.

· Essa esteira move-se a cerca de 1 m/s, mas há indícios de deceleração, algo em torno de 0,75 m/s no norte e 0,35 m/s no sul. Isto deve implicar em diminuição de atividade solar para o ciclo 25, centrado em 2022.



O ciclo magnético

- (a) O equador gira mais rápido que os pólos, esticando as linhas de campo.
- (b) O campo toroidal resultante faz com que os sentidos das linhas sejam opostos nos dois hemisférios.
- (c) Quando o campo é intenso, loops magnéticos flutuam em direção à superfície e criam alças salientes, que retorcem pela ação da rotação solar.
- (d,e,f) Fluxos adicionais criam estruturas mais complexas. Nas bases das alças surgem manchas com polaridades opostas.
- (g) Fluxos meridionais (em amarelo) arrastam fluxo magnético da superfície em direção aos pólos, levando à reversão magnética.
- (h,i) Parte desse fluxo é transportado para o equador, gerando um toróide com polaridade oposta ao do início do ciclo (a)



Campo magnético e a rotação diferencial

Manchas, praias, flares são fenômenos associados à atividade solar, e que estão presentes em outras estrelas. O "motor" desses fenômenos é o campo magnético.

As manchas ocorrem nos locais onde as linhas do campo magnético emergem na fotosfera, e inibem a emissão de energia proveniente do interior. . Portanto, formação, evolução e movimento das manchas revelam informações físicas fotosfera estelar e a distribuição do campo magnético local e global.

Campo magnético e a rotação diferencial

O magnetismo solar apresenta comportamento cíclico. O período é de aproximadamente 11 anos e a quantidade de manchas variam entre um máximo e um mínimo.

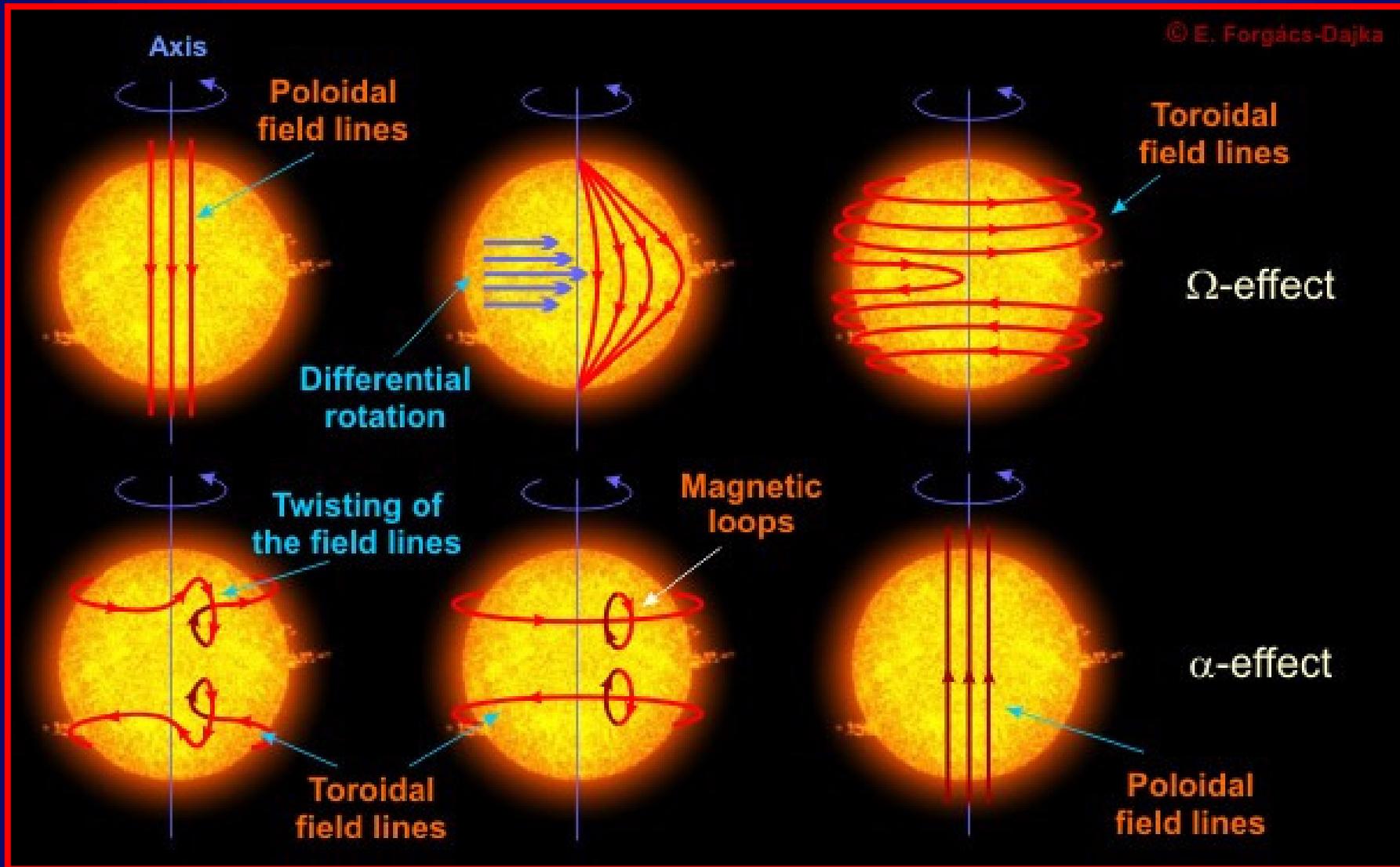
As mudanças no campo magnético são explicadas por modelos de dínamo: (1) a rotação afeta o envelope convectivo, provocando rotação diferencial (RD) em latitude; (2) com o decorrer do tempo, a RD modifica o campo poloidal em campo toroidal; (3) na base da camada convectiva, isso provoca estiramento e intensifica o campo campo toroidal; (4) em dado momento, este torna-se instável e as forças de flutuação os empurra em direção à superfície; (5) o campo toroidal confinado em vastos tubos de fluxo começa a emergir e alcança a fotosfera; (6) nesse momento, surge um arco magnético assentado em duas zonas frias e de polaridade magnética oposta.

A convecção meridional de larga escala atua de forma oposta: de alguma forma, ainda não bem esclarecida, ela regenera o campo poloidal, transportando o fluxo emergente para os pólos.

Finalmente, esse processo termina com o restabelecimento do campo poloidal primitivo, porém com polaridade oposta (os hemisférios trocam de polaridade). Novo ciclo de ~ 11 anos se inicia e ao final deste a polaridade magnética global volta a se inverter. Portanto, o ciclo magnético (22 anos) dura o dobro do ciclo de manchas (11 anos).

Campo magnético e a rotação diferencial

Ilustrando



ATIVIDADE SOLAR

Aparência da coroa e o ciclo das manchas

Máximo
11/08/99

Mínimo
24/10/95



No máximo, o percentual da área solar coberta por zonas ativas é máximo, atingindo altas latitudes. Por isso a coroa tem forma arredondada, No mínimo de atividade, ao contrário, as zonas ativas são menos abundantes e concentram-se mais nas proximidades do equador, dando à coroa uma aparência alongada.

ATIVIDADE SOLAR



Mínimo solar

No máximo, o percentual da área solar coberta por zonas ativas é máximo e atinge altas latitudes.

No mínimo as zonas ativas são menos abundantes e concentram-se mais nas proximidades do equador.

Estas imagens em raios X ilustram bem esse efeito.

Máximo solar

ATIVIDADE SOLAR

ERUPÇÃO (“FLARE”)

Instabilidades magnéticas liberam violentamente quantidades enormes de energia causando erupções de brilho.

Essas erupções podem liberar mais energia que as grandes protuberâncias .

Observações em raios X e ultravioleta mostram que as áreas mais compactas, localizadas nas regiões centrais dos “flares”, podem atingir temperaturas da ordem de 100.000.000 K.

A violência desses eventos ejeta partículas com tanta energia que o campo magnético local é incapaz de contê-las. Essa matéria é lançada ao espaço com muita violência.



Esses eventos ocorrem entre a alta cromosfera e baixa coroa.

ATIVIDADE SOLAR

Flare de classe X

Região ativa que produzindo poderoso flare de classe-X. O gás incandescente flui ao longo de arcos magnéticos relativamente estáveis acima da fotosfera, aquecido a milhões K. Esses fluxos ocorrem após eventos violentos produzidos por reconexões magnéticas e produzem os flares. (TRACE Project, NASA)

2002-Apr-21
00:43:09

ATIVIDADE SOLAR

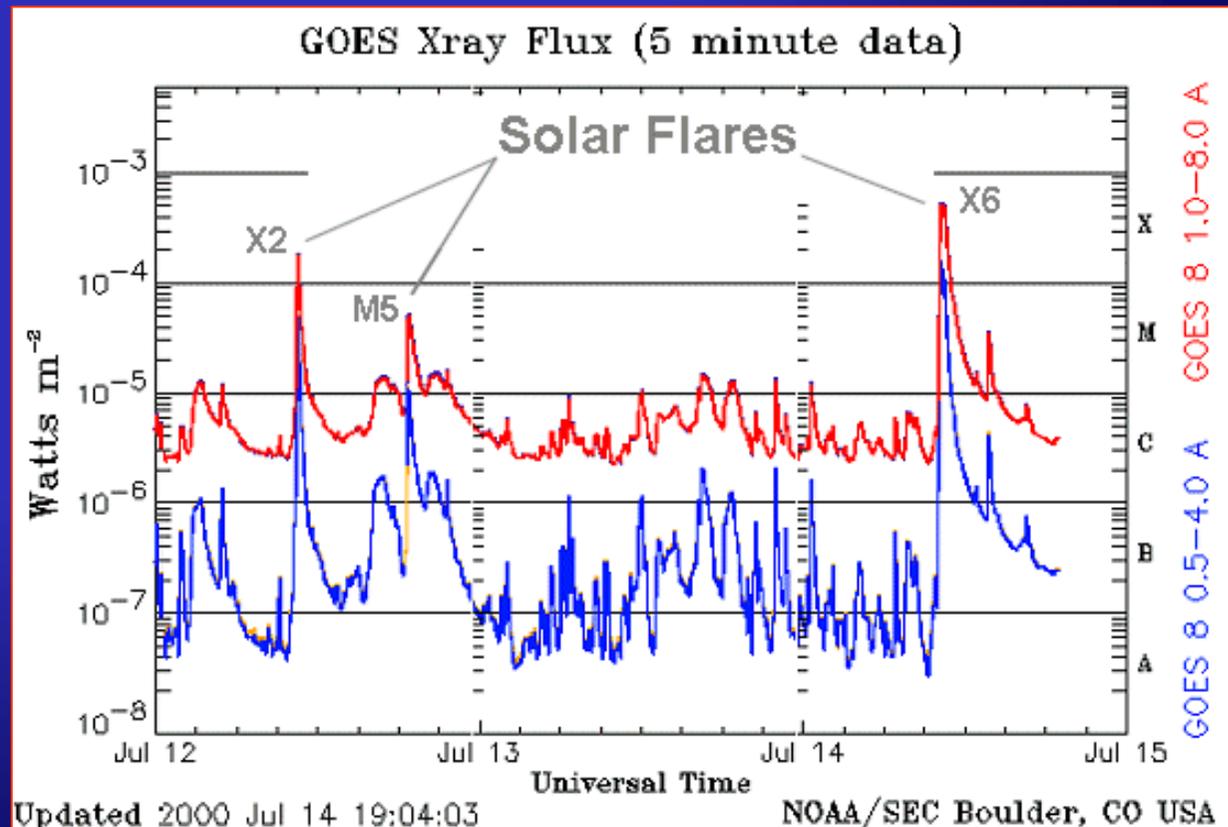
Classificação de Flares de raio X

Flares produzem surtos de radiação que abrange todo o espectro eletromagnético (da região rádio aos raios X e Gama). A classificação do flares é feita de acordo com o brilho em raio-X, entre os comprimentos de onda 1 e 8 Angstroms. Há três tipos:

Classe-X: são os grandes eventos que produzem blackouts em ondas de radio e tempestades magnéticas longas.

Class-M: são os de proporções médias, que causam breves blackouts em ondas de radio que afetam mais as regiões polares da Terra.

Class-C: flares são os eventos menos violentos, quase imperceptíveis na Terra.



INFLUÊNCIAS DAS PRESSÕES MAGNÉTICA E GASOS

Plasma e campo magnético coexistem: o campo magnético confina o plasma, e este arrasta consigo o campo magnético quando se expande.

A pressão do campo magnético é transversal à sua direção; matematicamente representa-se a relação entre pressão e campo por:

$$P_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

B - intensidade do campo magnético em Tesla

μ_0 - permeabilidade magnética do meio

Conclusão

a pressão magnética aumenta com o quadrado da intensidade do campo magnético; portanto, campos magnéticos intensos exercem forte contenção sobre o plasma.

INFLUÊNCIAS DAS PRESSÕES MAGNÉTICA E GASOS

De outra parte a pressão do plasma é proporcional à energia cinética dos seus constituintes, e matematicamente representada por:

$$P_G = NkT$$

N - densidade numérica de partículas,

k = $1,38 \times 10^{-23}$ Joule/K (cte. de Boltzmann)

T - temperatura.

Conclusões

- (a) partículas mais quentes movem-se mais rapidamente, logo exercem maior pressão;
- (b) o aumento da densidade aumenta a pressão do plasma.

INFLUÊNCIAS DAS PRESSÕES MAGNÉTICA E GASOS

As pressões magnética e gasosa concorrem:

$$P_B ; P_G$$

Quando se igualam, a intensidade do campo magnético é:

$$B = \sqrt{(2\mu_0 k)NT} = \sqrt{3,46 \times 10^{-29} NT} \quad \text{Tesla .}$$

Se um arco coronal contém plasma quente e denso é porque o campo magnético associado é intenso.

Exemplo

Considerando $N = 10^{17}$ elétrons/ m^3 e $T = 1$ milhão K para a coroa, vê-se que o campo magnético é, no mínimo, $B = 0,002$ Tesla (20 Gauss). Portanto, os arcos coronais vistos sobre regiões ativas (onde o plasma é mais quente) têm campos magnéticos muito intensos.

Influências das pressões magnética e de gás

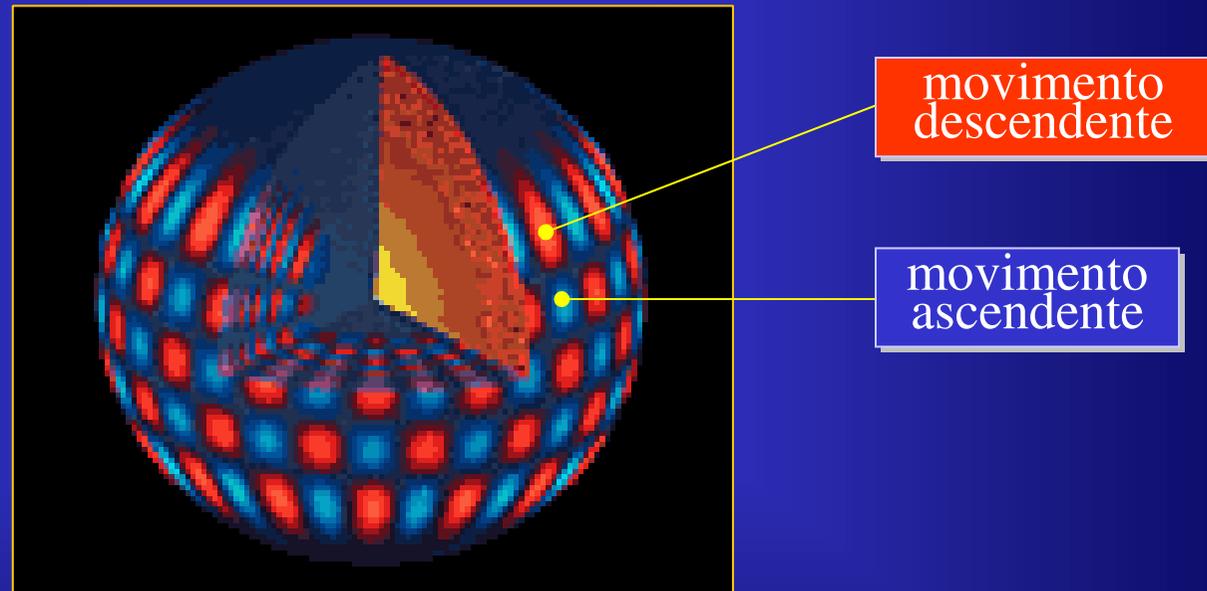
O campo magnético é mais intenso próximo à fotosfera, logo os arcos coronais são mais comuns nesta região.

Como a intensidade do campo magnético diminui com a altura, a pressão do gás passa a competir com a pressão magnética, podendo ocorrer a expansão ou mesmo rompimento do arco!

Havendo o rompimento, o plasma flui para o meio interplanetário, carregando matéria e campo magnético. Nesse vento solar a pressão de gás de elétrons e prótons é aproximadamente igual à pressão magnética do campo interplanetário.

HÉLIO-SISMOLOGIA

Aproveita os sismos solares para estudar o interior do Sol, de forma semelhante ao que se faz para a Terra.



Um modelo para as oscilações de 5 minutos de período.

Modos de Oscilação

Há espécies diferentes de ondas mensuráveis:

- * Acústica – modo ressonante **p**
- * Gavidade – modo ressonante **g**
- * Gravidade na superfície – modo ressonante **f**

Cada modo de oscilação representa diferentes partes do interior solar.

O espectro de oscilações detectado provém de modos com:

- (a) **períodos variando entre, aproximadamente, 1,5 minutos e 20 minutos e**
- (b) **comprimento de onda horizontal entre poucos milhares de km e o tamanho do globo solar.**

HÉLIO-SISMOLOGIA

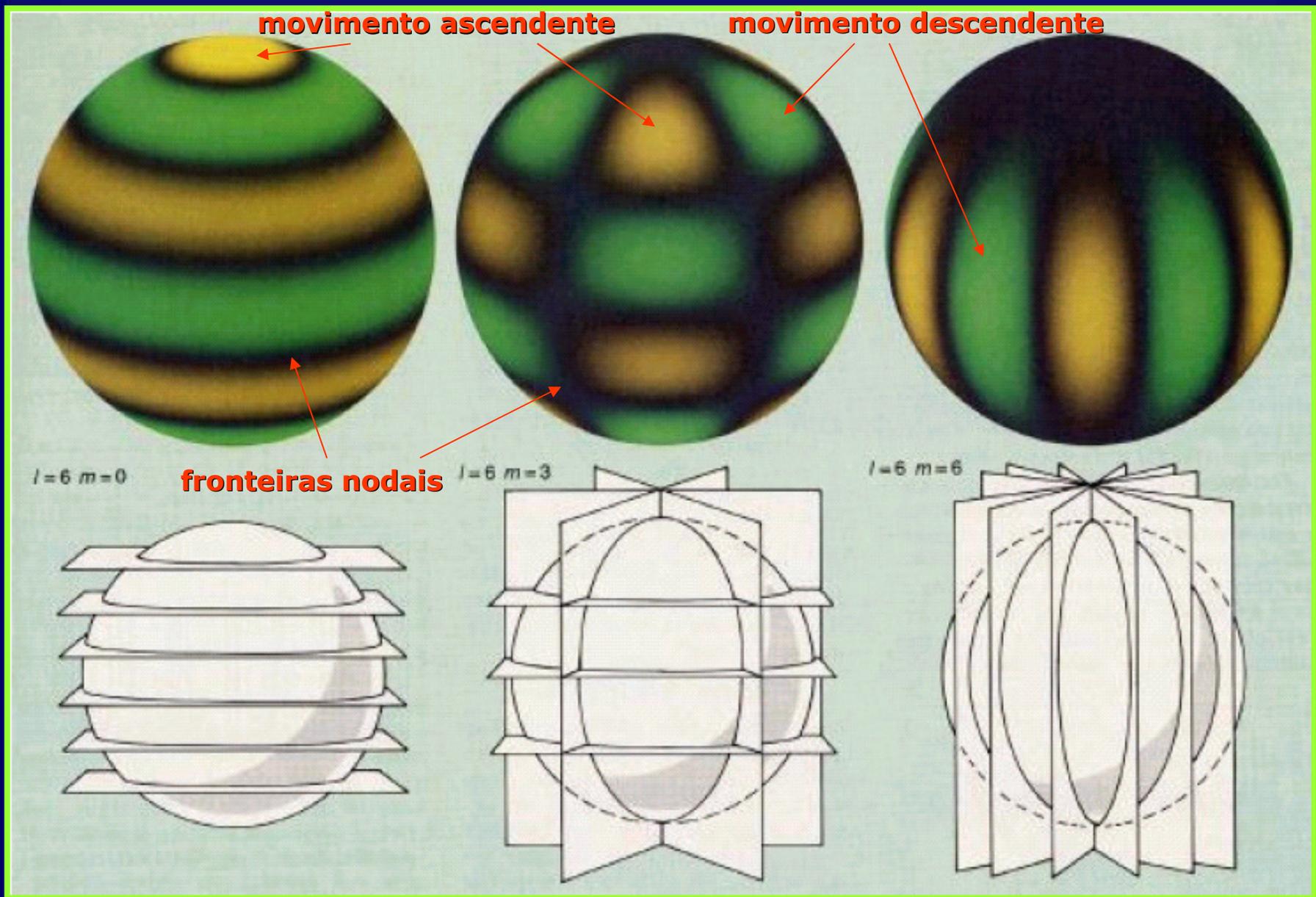
Por que o Sol atua como uma caixa ressonante?

Ondas acústicas tornam-se aprisionadas em regiões delimitadas superiormente pela queda acentuada de densidade próximo à superfície, e inferiormente pelo aumento da velocidade do som que refrata a onda de volta à superfície. Com isso, uma onda estacionária é criada. → [clips\swr43.mov](#)

Os modos de oscilação são tratados física e matematicamente por hamônicos esféricos: l , m e n . Tas funções hamônicas esféricas fornecem os nodos dos padrões de ondas estacionárias.

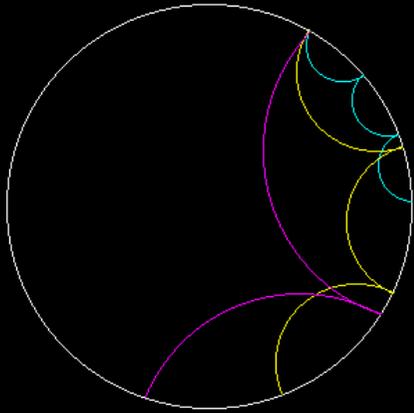
- **ordem n** : é o número de nodos na direção radial
- **grau harmônico l** : indica o número de linhas de nodos na superfície (que é igual ao número total de planos que cortam o Sol)
- **número azimutal m** : representa o número de planos de corte do Sol em longitude.

HÉLIO-SISMOLOGIA



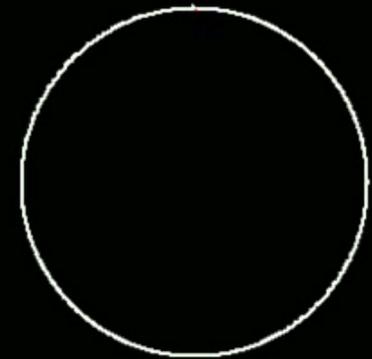
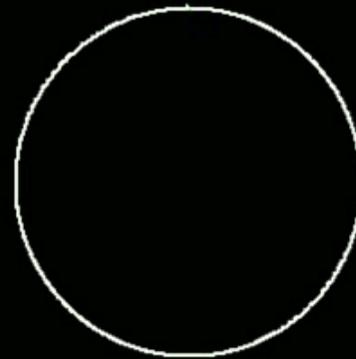
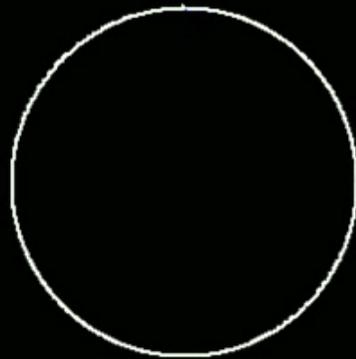
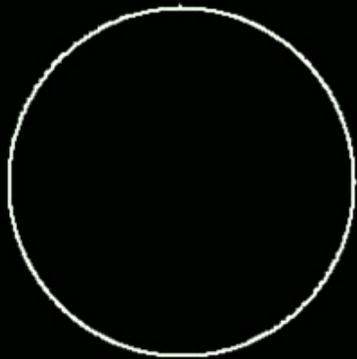
Figuras produzidas com harmônicos esféricos $l = 6$ e $m = 0, 3$ e 6 .

HÉLIO-SISMOLOGIA



Os sismos de maior frequência ocorrem próximos à superfície.

Como a propagação depende das condições locais, as observações permitem construir modelos teóricos do interior solar



Frequência



HÉLIO-SISMOLOGIA

Os modos de oscilação são sensíveis às condições físicas do meio onde se propagam as ondas. Portanto, o objetivo fundamental da hélio-sismologia é identificar os modos de oscilação.

Para tanto, é necessário dispor de imagens de velocidade do Sol (ou de regiões), através do movimento Doppler das linhas espectrais. Uma sequência dessas imagens permitem identificar os modos de oscilação.

A decomposição de imagens de deslocamentos Doppler em harmônicos esféricos permite determinar os valores dos modos de oscilação. Os coeficientes de cada harmônico esférico, que são funções de tempo, são analisados com transformadas de Fourier para se obter um espectro de potência dependente de três variáveis: ν , a frequência, l o grau do harmônico esférico, e m , a ordem azimutal.

HÉLIO-SISMOLOGIA

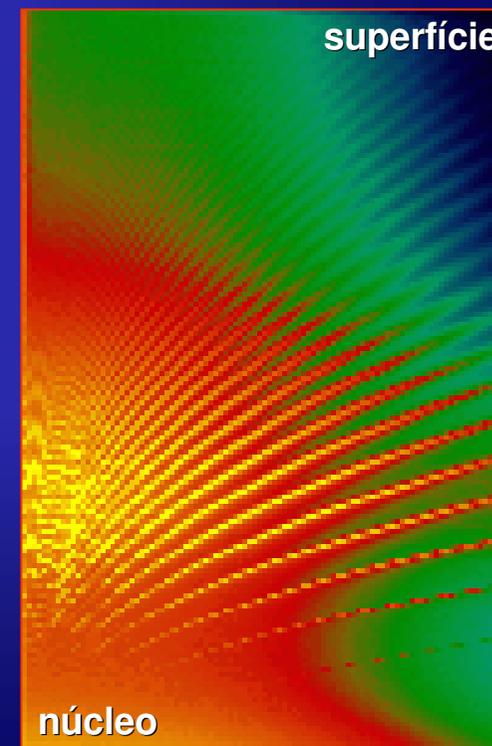
A escala espacial dos modos é indicada pelo grau angular, l , e revela quantas linhas de nodos há no padrão na superfície solar.

$l = 0$ representa a oscilação global do Sol (toda a superfície movendo-se para dentro e para fora, como uma “respiração”). Modos de ordem maior dividem a superfície em padrões com quadrados adjacentes movendo-se em diferentes direções num dado momento. Quanto maior o grau, menor a escala espacial.

Um modo particular, l , na superfície pode estar associado a ressonâncias com qualquer número de nodos na direção radial dentro do Sol. O número de nodos radiais é chamado *ordem*.

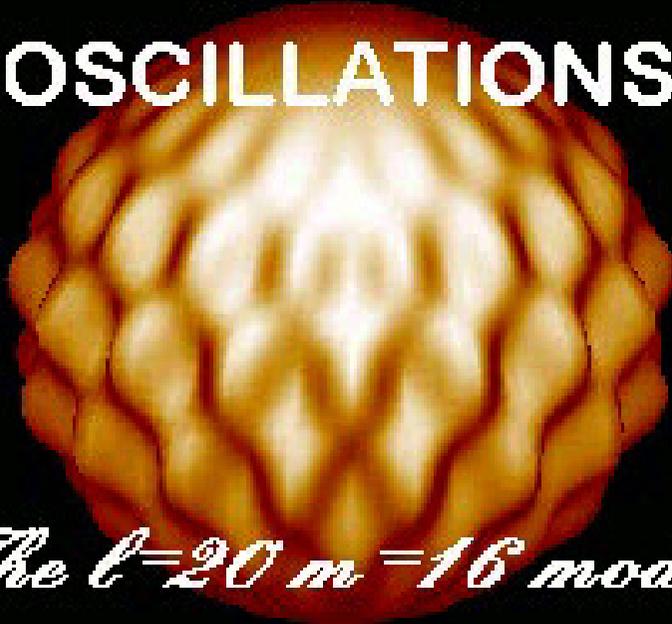
As linhas da figura ao lado esytão asociadas com diferentes ordens radiais. Para uma dada ordem (linha) a frequência diminui com o aumento do grau espacial. Para um dado grau. A frequência aumenta com a ordem.

O canto inferior esquerdo revela o que ocorre no região do núcleo solar, enquanto o canto superior direito revela o que se passa próximo à superfície.

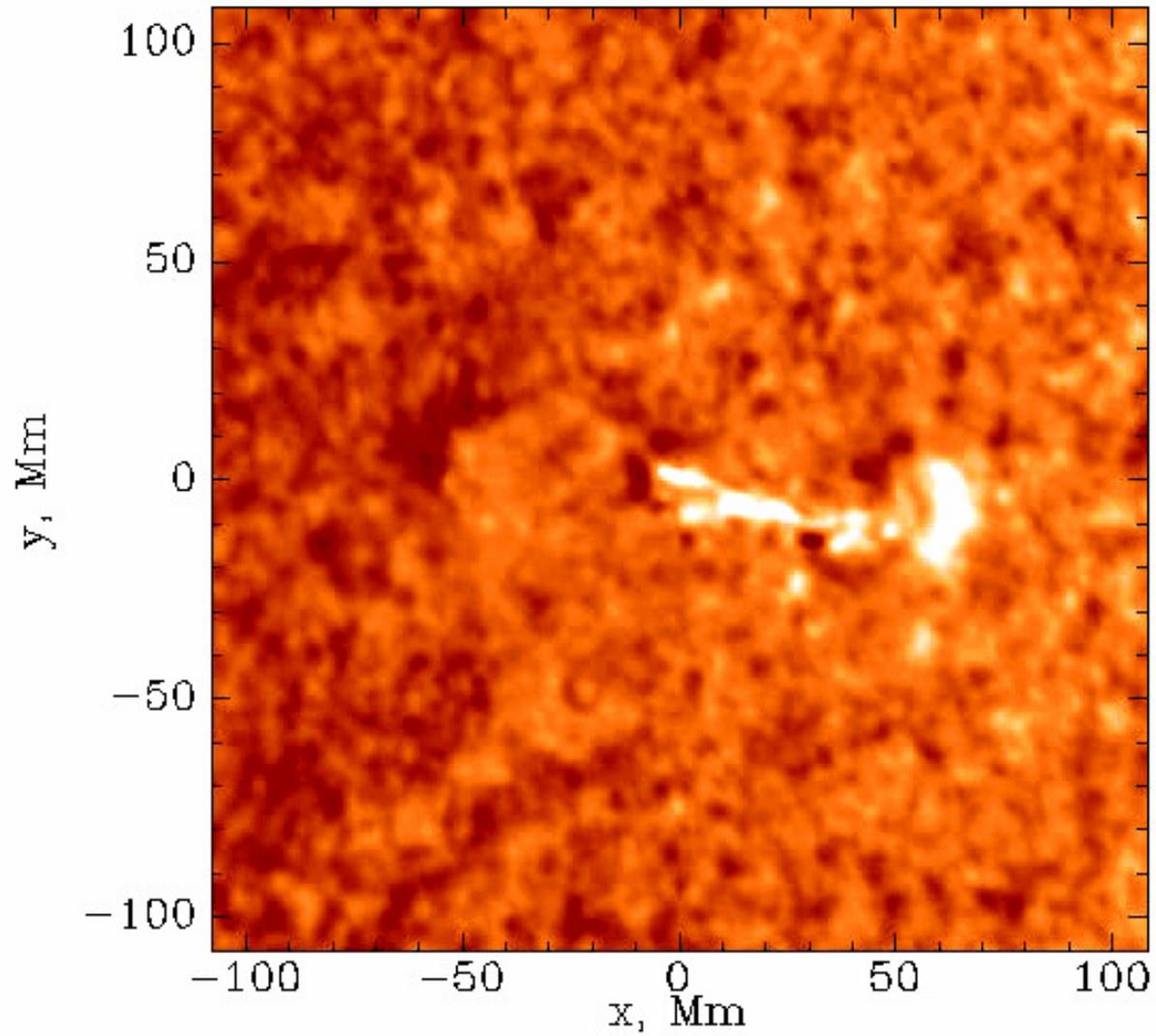


SOLAR
OSCILLATIONS

The $l=20$ $m=16$ mode



HÉLIO-SISMOLOGIA



CRÉDITOS, REFERÊNCIAS E SUGESTÕES

SOHO (Solar & Heliospheric Observatory)
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Transition Region and Coronal Explorer
<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>

Yohkoh Public Outreach Project
<http://www.lmsal.com/YPOP/homepage.html>

GOES Solar X-ray Imager
<http://sxi.ngdc.noaa.gov/>

Stanford Solar Center: highlight and contents
<http://solar-center.stanford.edu/roadmap.html>

Marshall Solar Physics
<http://science.nasa.gov/ssl/PAD/SOLAR/default.htm>

The Virtual Solar Observatory
http://vso.nso.edu/vsow_files/frame.htm

NSO National Solar Observatory
<http://www.nso.edu/>

CRÉDITOS, REFERÊNCIAS E SUGESTÕES

Current Solar Data

<http://www.maj.com/sun/index.html>

HASTA Search Facility (imagens e filmes)

<http://www2.plasma.mpe-garching.mpg.de/hasta/hastasearch.html>

Helio- and Asteroseismology

http://bigcat.obs.aau.dk/helio_outreach/english/enrays.html

Estrutura

<http://solar.physics.montana.edu/YPOP/Spotlight/SunInfo/Structure.html>

Solar Activity Monitor

<http://www.maj.com/sun/status.html>

Astronomy Today

<http://www.prenhall.com/chaisson/>