#### ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR (AGA292)



NOTAS DE AULA - NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.

Enos Picazzio IAGUSP





Nuvens de hidrogênio atômico

Nuvens moleculares

> Ciclo de formação estelar

Formação de estrelas Supernova e ventos estelares

Bolhas



Bolhas quentes



Fusão e formação de elementos pesados





Copyright @ 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

# De onde vêm a energia das estrelas?

# A energia das estrelas vêm da fusão nuclear: átomos de menor massa são fundidos em outros de maior massa.

É a transmutação nuclear.





Elementos químicos até o peso do ferro são manufaturados nas estrelas.

Elementos químicos mais pesados que o ferro são formados na explosão de uma supernova.

# De que são formadas as estrelas?



# Fusão nuclear: a síntese dos elementos químicos

Abundância cósmica dos elementos			
Elementos	Qde. de partículas no núcleo	Abundância em número (%)	
Hidrogênio	1	90	
Hélio	4	9	
Grupo do Lítio	7-12	0,000001	
Grupo do Carbono	12-20	0,2	
Grupo do Silício	23-48	0,01	
Grupo do Ferro	50-62	0,01	
Grupo de peso médio	63-100	0,00000001	
Grupo dos mais pesados	mais que 100	0,000000001	

Fonte: Chaisson & McMillan, Astronomy Today

# Do nascimento à Sequência Principal

De início, a proto-estrela é imensa, brilhante, com temperatura superficial baixa e cor avermelhada.

Gradativamente ela se contrai, sua luminosidade diminui, sua temperatura aumentado e sua cor torna-se mais clara.





No Diagrama HR, esse comportamento se manifesta através de uma trajetória quase vertical.

# Do nascimento à Sequência Principal

#### No centro da proto-estrela:

- densidade, temperatura e pressão aumentam gradativamente
- quando temperatura central atinge cerca de 10.000 K  $\rightarrow$  H torna-se ionizado

#### - posteriormente também o He

 - com a contração, os núcleos de H vão sendo comprimidos uns contra os outros, as colisões mútuas se intensificam e a temperatura aumenta ainda mais.

- quando a temperatura central ultrapassar 10 milhões  $K \rightarrow$  as colisões tornam-se violentas  $\rightarrow$  núcleos de H fundem-se: é a fusão nuclear.



- a proto-estrela tornou-se uma estrela e entra na fase duradoura  $\rightarrow$  a fase da *Seqüência Principal (SP*), onde passará a maior parte de sua vida.

# Do nascimento à Sequência Principal

O tempo que uma estrela leva desde o nascimento até a fase em que começa a gerar energia (e entra na Seqüência Principal) depende da massa.

Massa [M <sub>sol</sub> ]	Tipo espectral	Tempo para chegar à SP [anos]
30	O6	30.000
10	B3	300.000
4	<b>B</b> 8	1.000.000
2	A4	8.000.000
ol 1	G2	30.000.000
0.5	K8	100.000.000
0.2	M5	1.000.000.000

#### Tempo de vida de uma estrela

# Depende essencialmente do equilíbrio entre a produção e a emissão de energia.

 Maior massa → maior disponibilidade de matéria para gerar energia → <u>vida mais longa</u>
 Maior luminosidade (energia emitida por unidade de tempo) → <u>vida mais curta</u>
 <u>maior massa</u> → <u>maior luminosidade</u> → <u>vida mais curta</u>

Massa	Tempo de vida na SP	
$60 M_{SOL}$	2 milhões anos	
30	5 milhões	
10	25 milhões	$T \approx 10^{10} / M^2$ anos
3	350 milhões	
1,5	1,6 bilhão	em unidade de
1	9 bilhões	massa solar
0,1	Trilhões	

# Classificação espectral das estrelas



#### Classificação espectral das estrelas Diagrama Hertzprung-Russel



#### Enos Picazzio - 2006

# Evolução do Sol



Densidade na Gigante Vermelha: núcleo: ~100 kg/cc (Sol ~ 150 g/cc) superfície: ~ 10<sup>-6</sup> g/cc



# Como funciona uma estrela ?

A estrela é uma estrutura mantida em equilíbrio por duas forças formidáveis: no seu núcleo ocorre a fusão nuclear e a síntese dos elementos químicos, o que produz uma grande pressão de dentro para fora.



Enquanto isto, a gravidade produz uma força de sentido contrário. Num estado estacionário de "queima" de material nuclear, o equilíbrio Pressão de Radiação X Gravidade em toda a estrutura interna garante a sua estabilidade.

Roberto Costa: http://www.iag.usp.br/agua/

# Produção de energia na Sequência Principal

A origem da energia solar foi um mistério por longo tempo.

Cálculos mostravam que a conversão de energia gravitacional em calor era insuficiente para manter o Sol brilhando até hoje

Sir Arthur Eddington (início de 1920): o Sol é composto basicamente de H  $\rightarrow$  condições físicas no interior provoca fusão nuclear  $\rightarrow$  a fonte da energia solar.

Década de 1930: processo de fusão nuclear foi esclarecido em detalhes, com os trabalhos de George Gamov, Hans Bethe (Nobel) e Carl Friedrich von Weizsäker.



Eddington







Bethe

# Produção de energia na Sequência Principal



• Albert Einstein: matéria e energia são duas manifestações distintas de uma coisa única, ou seja, uma se converte na outra através da  $E = mc^2$ 

4H ⇒ He + energia

Hélio

energia = massa  $\times$  (velocidade da luz)<sup>2</sup>

- $c^2$  é um número muito grande (9 × 10<sup>20</sup> cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)
- conclusão: mesmo uma massa tão diminuta gera uma quantidade enorme de energia
- mecanismo capaz de manter o Sol brilhando na mesma taxa que a atual por um período equivalente à sua idade (4,6 bilhões de anos).

# Produção de energia no interior da estrela



Ao interagir com a a matéria o neutrino produz várias particulas identificadas por traços luminosos Detector OPERA (Gran Sasso Laboratory, INFN)



Os neutrinos são as partículas mais abundantes, depois dos fótons. São produzidos nas reações nucleares no interior das estrelas.

Cada cm<sup>2</sup> de nosso corpo é atavessado por 60 bilhões de neutrinos a cada segundo.

# Produção de energia na Sequência Principal

# Qual o balanço energético desta reação?

- A massa do núcleo de hidrogênio:  $H^1$ : 1,007852 ; 4  $H^1$  = 4,031408 u.m.a.
- A massa do núcleo de hélio resultante: He<sup>4</sup>: 4,002603 u.m.a.
  A diferença: 0,028805 (0,7 % da massa). Usando E=mc<sup>2</sup> = 26,73 MeV
- Isto pode ser usado, por exemplo, para estimar o tempo de vida do Sol:
  a luminosidade pode ser medida da Terra: 4×10<sup>33</sup> erg/s
  - a massa total pode ser estimada pelas leis de Kepler: o Sol tem 2×10<sup>33</sup>
    g , o que corresponde a 1,8×10<sup>54</sup> ergs
  - admitindo que 0,7 % da massa podem ser convertidas em energia:  $1,8 \times 10^{54} \times 0,007 = 1,52 \times 10^{52} \text{ ergs}$
  - logo, o tempo de vida do Sol pode ser estimado:  $1,52 \times 10^{52}$  ergs /  $4 \times 10^{33}$  s =  $3,5 \times 10^{18}$  s ~  $10^{11}$  anos

# A fabricação dos elementos químicos:

Do hélio até o ferro, os elementos químicos são fabricados por fusão nuclear nos núcleos das estrelas, no processo de produção de energia. As reações nucleares ocorrem pelo seguinte esquema:

- Queima de Hidrogênio produz Hélio
- Queima de Hélio produz Carbono, Oxigênio e Neônio
- Queima de Carbono, Oxigênio e Neônio produz todos os elementos até o Silício
- Queima de Silício produz todos os elementos até o Ferro

#### A fabricação dos elementos químicos:

Cadeia proton-proton

ppl  $^{1}H + ^{1}H \rightarrow ^{2}H + e^{+} + \gamma$   $^{2}H + ^{1}H \rightarrow ^{3}He + \gamma$  $^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + 2 ^{1}H$ 

> ppII <sup>3</sup>He + <sup>4</sup>He  $\rightarrow$  <sup>7</sup>Be +  $\gamma$ <sup>7</sup>Be + e  $\rightarrow$  <sup>7</sup>Li+  $v_e$  +  $\gamma$ <sup>7</sup>Li + <sup>1</sup>H  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + <sup>4</sup>He

ppIII <sup>3</sup>He + <sup>4</sup>He  $\rightarrow$  <sup>7</sup>Be +  $\gamma$ <sup>7</sup>Be + <sup>1</sup>H  $\rightarrow$  <sup>8</sup>B +  $\gamma$ <sup>8</sup>B + <sup>1</sup>H  $\rightarrow$  <sup>8</sup>Be + e<sup>+</sup> + v<sub>e</sub> <sup>8</sup>Be  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + <sup>4</sup>He

Luminosidade solar: ppl (69%); ppll (9%) Produção de neutrinos: ppl (2%), ppll (4%), pplll (47%) Ciclo do carbono  $^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$  $^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + v_e$ 

 ${}^{13}\text{C} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$   ${}^{14}\text{N} + {}^{1}\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$   ${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^{+} + \nu_{e}$ 

 $^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$ 

 $\frac{1}{\epsilon_{CNO}} \propto T^{16}$ Importante qdo M > 3M<sub>sol</sub>

Reação triplo-alfa

<sup>4</sup>He + <sup>4</sup>He ↔ <sup>8</sup>Be <sup>8</sup>Be + <sup>4</sup>He → <sup>12</sup>C + γ

Reação alfa <sup>12</sup>C + <sup>4</sup>He  $\rightarrow$  <sup>16</sup>O +  $\gamma$ <sup>16</sup>O + <sup>4</sup>He  $\rightarrow$  <sup>20</sup>Ne +  $\gamma$ <sup>20</sup>Ne + <sup>4</sup>He  $\rightarrow$  <sup>24</sup>Mg +  $\gamma$  Fusão do carbono

 ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$   ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + p$   ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$   ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Mg + n$   ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}Ne + 2 {}^{4}He$ 

Fusão do oxigênio  ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{32}S + \gamma$   ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{31}P + p$   ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^{4}He$   ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{31}S + n$   ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{24}Mg + 2 {}^{4}He$ Fusão do silício

<sup>28</sup>Si + <sup>28</sup>Si  $\rightarrow$  <sup>56</sup>Ni +  $\gamma$ <sup>56</sup>Ni  $\rightarrow$  <sup>56</sup>Fe + 2e<sup>+</sup> + 2  $\nu_e$ 

#### Fabricando os elementos além do Fe :

Estes elementos são produzidos por captura de nêutrons durante a explosão de uma supernova. Veja o exemplo abaixo em que diferentes isótopos de ferro, cobalto e níquel são produzidos pela captura sucessiva de nêutrons:

> ${}^{56}Fe + n = {}^{57}Fe$  ${}^{57}Fe + n = {}^{58}Fe$  ${}^{58}Fe + n = {}^{59}Fe = {}^{59}Co$  ${}^{59}Co + n = {}^{60}Co = {}^{60}Ni$

É importante notar que a nucleossíntese é um ciclo contínuo e progressivo: na formação do universo foram produzidos o hidrogênio e parte do hélio; formaramse então as primeiras estrelas, que num dado momento concluíram seu ciclo evolutivo e ejetaram para o meio interestelar os elementos químicos que produziram, por perda de massa ou por explosão de supernova. Este material fez parte da geração seguinte de estrelas, que em seu ciclo de vida produziu material ainda mais enriquecido em elementos pesados, e assim sucessivamente.



#### $4H \rightarrow He + energia$









SOL -	Fusão do hidrogênio	15
	Fusão do hélio	170
	Fusão do carbono	700
	Fusão do neônio	1.400
	Fusão do oxigênio	1.900
	Fusão do silício	3.300

# Fonte de energia

Temperatura (milhões K)

### A anã branca

uma estrela com a massa do Sol e tamanho da Terra





Quando uma anã branca esfria, os átomos de carbono cristalizam num diamante.



Um diamante de 300.000 massas terrestres.



#### Onde estará a zona habitável?

Região em torno de uma estrela em que um planeta com atmosfera pode sustentar água líquida em sua superfície.

Vênus está próximo do limite interno e Marte, do limite externo.

Atualmente o Sol brilha 30% que no passado e deverá brilhar ainda mais no futuro. Portanto, sua zona habitável, que já esteve mais próxima dele, deverá se deslocar para as regiões mais afastadas. A Terra estará fora dela. 3000 K

6000 K Sistema Solar

9000 K

Água líquida pode ainda existir fora da zona habitável, desde que haja mecanismo de aquecimento. Decaimento radioativo no núcleo e dissipação de energia por maré em Europa (satélite de Júpiter) liquefazem a água da superfície e sua capa congelada dificulta a perda de calor.

#### Posição do Sol na Via Láctea

50.000 A.L.

Visão artística da Via Láctea, baseada nas observações do telescópio espacial Spitzer (NASA)

> Existem, pelo menos, 100 bilhões de estrelas de diferentes cores, tamanhos e idades. O Sol é apenas uma delas; uma estrela anã, de cor amarela, tipo espectral G2 e de Sequência Principal

NASA/JPL-Caltech/R

#### As estrelas não são iguais, nem imutáveis



Apesar de tratarmos o Sol como uma estrela padrão, há muitos tipos de estrelas e suas características mudam durante suas vidas.

O Sol é o laboratório estelar mais próximo, e isto o difere ainda mais das demais estrelas.

# As várias faces do Sol



#### Propriedades físicas do Sol (uma estrela da Sequência Principal)

Diâmetro :	1.390.000 km (109,3 D <sub>terra</sub> )
Massa:	1,99×10 <sup>27</sup> t (333.000 M <sub>terra</sub> )
Composição:	H ≈ 73,46%, He ≈ 24,86%
	$\mathbf{O} \approx 0,77\%,  \mathbf{C} \approx 0,29\%$
	$Fe + Ne + N + Si + Mg + S \approx 0,59\%$
	Demais ≈ 0,11%
Densidade:	núcleo = 160 g/cc média = 1,41 g/cc superfície = 1 bilionésimo g/cc
Período de rotação: equador = 26,8 d	
	pólos = 34,4 d

Enos Picazzio - 2006

# Quatro boas razões para se estudar o Sol



# **Interior solar**



### **Interior solar**



# **Interior solar**

0.2

Q.4

0.6-0.8

Zona radiativa

energia transportada através de absorção e reemissão

Núcleo (15.000.000 °C) Fusão nuclear  $4H \rightarrow He + 2v + energia$ 

Enos Picazzio IAGUSP/2006
### **Interior solar**

02 0.4 0.6 0.8

### Zona convectiva

energia transportada por convecção

### Zona radiativa

energia transportada através de absorção e reemissão

Núcleo (15.000.000 °C) Fusão nuclear  $4H \rightarrow He + 2v + energia$ 

Enos Picazzio IAGUSP/2006

# Interface Interior solar

02

0.4 0.6-0.8

Fina camada que separa a calma zona radiativa da movimentada zona convectiva. Observações hélio-sismológicas sugerem que o campo magnético solar é gerado nessa região por um dínamo magnético.

Mudanças de velocidade do fluído dessa camada podem provocar o estiramento das linhas de força do campo magnético tornando-o mais intenso. Há ainda indícios de que a composição química varia ao longo da camada.

### Zona convectiva

energia transportada por convecção

### Zona radiativa

energia transportada através de absorção e reemissão

Núcleo (15.000.000 °C) Fusão nuclear  $4H \rightarrow He + 2v + energia$ 

A luz pode demorar até 1,5 milhão de anos para chegar à superfície !

Enos Picazzio IAGUSP/2010

### **Interior solar**



Palavra de origem grega que significa esfera de luz.

Espessura ~500 km Temp ~5800 K Muito rarefeita

### Características principais:

### Obscurecimento do limbo.

Na luz branca o brilho é máximo no centro do disco solar, caindo para cerca de 20% nos bordos. No centro do disco vemos as camadas mais profundas, por isso mais quentes. Nos bordos vemos as camadas mais superficiais mais frias, por isso menos brilhante.





### Características principais:

### Obscurecimento do limbo.

Na luz branca o brilho é máximo no centro do disco solar, caindo para cerca de 20% nos bordos. No centro do disco vemos as camadas mais profundas, por isso mais quentes. Nos bordos vemos as camadas mais superficiais mais frias, por isso menos brilhante.



Espessura ~500 km Temp ~5800 K Muito rarefeita Características principais:

#### Textura granulada.

Cada granulação representa uma célula convectiva O centro é mais brilhante porque é o topo da coluna ascendente de gás aquecido. os bordos são escuros porque é por ai que o gás frio imerge novamente para as camadas mais profundas.



Grânulos tamanho: ~700 km, vida: 10-20 minutos veloc. de convecção: ~7 km/s



Formação



A mancha é mais fria que a fotosfera, por isso parece mais escura. Ela está associada a campos magnéticos intensos.



#### Movimento



A mancha circunda o Sol com a velocidade de rotação solar típica da latitude em que se encontra. Umbra -

Simulação de campos magnéticos verticais: polaridades negativa (preto) e positiva (branco) valores limites: 3.5 kGauss (preto) and 3.5 kGauss (branco).



#### Cores claras e brilhantes indicam campos intensos (saturação em 8k Gauss) Tempo em minutos e comprimento em milhares de km

(©UCAR, animation courtesy Matthias Rempel, NCAR. News media terms of use\*)

#### Simulação em 3D da transição entre umbra (direita) e pennumbra (esquerda).

Campo magnético vertical:

ascendente (branco) descendente (preto)

#### Fluxo Radial

ascendente (azul) descentende (vermelho)



Inclinação do campo:

horizontal (branco)

vertical (preto)

#### Fluxo vertical:

ascendente (azul)

descendente (vermelho)

Tempo em minuto , comprimento em milhares de km ©UCAR, animation courtesy Matthias Rempel, NCAR.



H-alfa, a linha de Balmer mais forte

### Linhas de Fraunhofer: figuras típicas da fotosfera

(K. Gleason, Sommers Bausch Observatory, University of Colorado)

Características principais:

Linhas de absorção (ou de Fraunhofer).

Porção do espectro solar, mostrando linhas escuras, catalogadas pioneiramente por Josef Fraunhofer.



- Wollaton (1802) descobriu as linhas no espectro solar.
- Fraunhofer (1817) as redescobriu, catalogou-as e notou que existiam menos linhas em algumas estrelas e mais em outras.
- Brewster (1836) notou que as linhas alteravam com a elevação do Sol.

Elas surgem em decorrência da absorção de radiação por elementos químicos da fotosfera.

### Linhas de Fraunhofer: figuras típicas da fotosfera



Linha	Elemento	lambda (ang)
A - (band)	02 *	7594 - 7621
B - (band)	02	6867 - 6884
C	H	6563
a - (band)	$\circ_2$	6276 - 6287
D - 1, 2	+ Na	5896 & 5890
E	Fe	5270
b - 1, 2	. Mg	5184 & 5173
С	Fe	4958

Linha	Elemento	lambda (ang)
. F	H.	4861
+ d	Fe	4668
е	• Fe	4384
_ f +	H *	4340
Ģ	Fe & Ca	4308
8	Ca	4227
h	H.	4102
Ť.	+ Ca	3968 + .
K	Ca	3934

### Desdobramento de linhas espectrais

Os níveis de energia atômicos, e os correspondentes comprimentos de onda, são calculados sem a presença de campo magnético. Quando presente, o campo magnético desdobra os níveis atômicos em outros níveis, aumentando o número de linhas espectrais. Este desdobramento é conhecido por Efeito Zeeman. Na presença de campo elétrico há fenômeno semelhante (Efeito Stark).







Enos Picazzio - 2006

# Polaridade magnética das manchas. A ordem é invertida nos hemisférios.



### Campo magnético e a rotação diferencial

Como no equador a velocidade de rotação é maior que nos pólos, as linhas do campo magnético " se enrolam" com a rotação, e as direções tornam-se opostas nos hemisférios.

Por esta razão, os arcos magnéticos associados às manchas apresentam polaridades invertidas nos hemisférios.



#### Enos Picazzio - 2006

## Campo magnético e a rotação diferencial



Em grego, significa "esfera colorida". É situada logo acima da fotosfera.



Imagem filtrada em 656,3 nm

**Cor:** provém da emissão do átomo de hidrogênio em H<sub>alfa</sub> (1a. linha da série de Balmer, 656,3 nm). Observada também em UV nas linhas H (393,3 nm) e K (396,8 nm) do CaII.

Espessura: ~ 2.000 km;

**Temperatura:** cresce com a altura até ~ 25.000 K

**Aquecimento:** provém da dissipação de energia de ondas de natureza magnética.



Espessura: ~2000 km Temperatura: 5.000 a 25.000K

(luz emitida pelo íon H<sup>-</sup>)

Imagem filtrada em 6563 angstrons

(luz emitida pelo CaII)

Enos Picazzio IAGUSP/2006



### Praias

Regiões mais ativas e mais quentes, por isso brilham mais.

Elas estão acima das fáculas (regiões fotosféricas ativas que circundam as manchas).

São vistas na linha H\_alfa, nas linhas H e K do CaII (1 vez ionizado), no ultravioleta e em microondas.

Apresenta estruturas altamente complexas e magnetizadas (supergranulação). O gás aquecido sobe pelo centro da supergranulação, flui horizontalmente para os bordos, e imerge novamente.



Possui um padrão celular semelhante ao fotosférico. Mas as dimensões e o tempo de vida das células cromosféricas são bem maiores.



**Espículos** 



Os bordos são contornados por estruturas finas, alongadas, escuras e quase verticais (espículos}, com ~ 700 km de diâmetro e ~ 7.000 km de altura. Por eles matéria ascendente e descendente fluem com velocidade de até 100 km/s

### Cromosfera: a baixa atmosfera Espículos

Concentrações de campos magnéticos inclinados em relação à vertical criam ambiente para que ondas sonoras aprisionadas se propaguem para regiões mais altas.







### **Protuberâncias:**

arcadas magnéticas vistas no limbo. Por elas circulam o plasma cromosférico

**Filamentos:** topos de arcadas vistos contra o disco solar, são mais frios e brilham menos

1. A configuração de uma protuberância é muito complexa.

2. Suas bases estão apoiadas sobre regiões com polaridades magnéticas opostas, formando um arco magnético por onde circula a matéria cromosférica.



3. As dimensões podem ser enormes, e a duração pode atingir horas.

4. Essas figuras cromosféricas permeiam a coroa solar, que é muito mais quente.



Enos Picazzio - 2006

### Coroa: a alta atmosfera

# 



### Coroa na luz branca

Na luz branca a coroa brilha tanto quanto a Lua Cheia mas, ainda assim, é cerca de 1 milhão de vezes mais fraca que a fotosfera. Por isso só é vista quando se bloqueia o disco solar (eclipse e coronógrafo). Como sua temperatura é elevada (milhões K), ela pode ser vista diretamente em linhas espectrais.

É a luz fotosférica espalhada apenas pelos elétrons, confinados no campo magnético (espalhamento Thomson)

Como os elétrons interagem com o campo magnético, a configuração da coroa é a do campo magnético global.

NAME OF A DESCRIPTION O

protuberância

### Coroa: imagens simultâneas



Fe IX (171 Å)





Fe XII (195 Å)



### Coroa E (de emissão)

A temperatura elevada da coroa excita os átomos dos elementos químicos presentes, que passam a emitir luz em comprimentos de onda característicos do nível de excitação.

O brilho aumenta com a temperatura local.

Estes são apenas alguns exemplos das inúmeras coroas de emissão.

Fe XV (284 Å)

He II (304 Å)

significa 14 vezes ionizado (perdeu 14 elétrons)

### Coroa: imagens simultâneas

Imagem composta da coroa solar durante o eclipse de 2008, incluindo a luz branca (espalhamento por elétrons) e luz do ferro altamente ionizado:



# Coroa E (de emissão)

Esta imagem representa um mapa bidimensional da distribuição da temperatura coronal de elétrons e o estado de carga dos íons. Crédito: Habbal, et al.

Vermelho - Fe XI (789,2 nm), Azul - Fe XIII (1074,7 nm), Verde - Fe XIV (530,3 nm).

### Coroa: imagens simultâneas



A temperatura elevada da coroa excita os átomos dos elementos químicos presentes, que passam a emitir luz em comprimentos de onda característicos do nível de excitação.

O brilho aumenta com a temperatura local.

Estes são apenas alguns exemplos das inúmeras coroas de emissão.

2005 Jan 15 00:00:00

### Coroa em raio X





Regiões de campo magnético fechado, por onde o plasma quente circula

Buracos coronais, regiões de campo magnético aberto; plasma flui para o espaço interplanetário

Estas regiões giram com a rotação típica da latitude solar em que se encontram. As temperaturas locais podem ultrapassar 2.000.000 K.

### **Plumas coronais**

### vistas nas proximidades dos pólos

Raios brilhantes vistos nos buracos coronais (BC). Essencialmente, são figuras magnéticas enraizadas em concentrações magnéticas de fluxo na fotosfera, expandindose radialmente acima dos buracos coronais por até 15 raios solares, provavelmente seguindo as linhas abertas do campo.



A formação parece ser devida reconecção de linhas do campo magnético, fato que parece explicar os valores extremamente baixos da razão de abundância Ne/Mg.

### **Arcos coronais**

Uma visão detalhada revela configuração complexa, diversificada e mostra que eles são formados por inúmeros arcos mais finos.

Esta é uma configuração instantânea.



### CARPETE MAGNÉTICO E O AQUECIMENTO CORONAL

A energia magnética liberada nas interações entre inúmeras regiões pequenas de polaridades magnéticas opostas pode explicar o aquecimento coronal





# Associação entre fenômenos coronais e cromosféricos

As imagens mostram que as zonas ativas cromosféricas estão associadas às zonas ativas coronais.





### Fenômenos associados às manchas solares

Imagem composta de diferentes camadas do Sol mostram a relação de fenômenos associados às manchas solares. Essas regiões estão permeadas por campo magnético.



Região coronal situada a 1,5 milhão de km acima da fotosfera e aquecida a mais de 1 milhão K.

> Sol na luz emitida pelo hidrogênio

Camada cromosférica, situada a 6.500 km acima da fotosfera

Fotosfera (~5.800 K)
Enos Picazzio - 2006

## Eclipse de 21/06/2001

(S. Koutchmy, Angola)

Previsão teórica da estrutura magnética coronal, feita a partir de medidas do campo magnético fotosférico e expansão pelo vento solar



**Observação em solo,** mostrando a estrutura magnética real



Enos Picazzio - 2006

# Eclipse de 21/06/2001

(S. Koutchmy, Angola)



#### MONTAGEM DE IMAGENS

SOLO & ESPACIAL (coronógrafo C2/LASCO)



# Coroa solar de 8/5/92, em raio-X, realçada.

Buraco coronal

Arcos coronais



Yohkoh mission of ISAS, Japan. The x-ray telescope was prepared by the Lockheed Palo Alto Research Laboratory, the National Astronomical Observatory of Japan, and the University of Tokyo with the support of NASA and ISAS.

### cromosfera

cavidade escura denuncia presença de matéria mais fria absorvendo luz coroa

estrutura em absorção

Enos Picazzio - 2006

Eclipse de 21/06/2001

Fe XII, 195 A

(S. Koutchmy, Angola)

raia D3 do Hélio

protuberância

filamentos associados