

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia



Sol-Terra

Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep. Astronomia
<http://www.astro.iag.usp.br/~leister/>

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

Descobrimo o Sol



✓ Como uma estrela, o Sol é a fonte de energia que sustenta toda a vida no planeta Terra. O movimento aparente do Sol rege a passagem do tempo e, neste percurso, cada posição solar determina o que conhecemos como as estações do ano, as quais ajudaram nossos ancestrais a definir os períodos de plantação e de colheita, além de decidir até mesmo o ritmo do dia-a-dia dos habitantes do planeta.

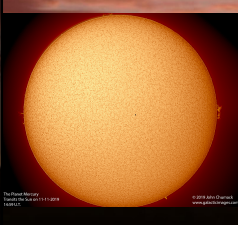
✓ Ainda que o Sol seja apenas uma entre as **cem bilhões** de estrelas da nossa galáxia e que o Universo contém aproximadamente **cem bilhões** de galáxias, cada uma repleta de estrelas, é compreensivo imaginarmos que dificilmente o Sol seja um corpo celeste especial. Entretanto, para nós, ele é um objeto ímpar no Universo, pois é o mantenedor de nossas vidas.

Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep. Astronomia
<http://www.astro.iag.usp.br/~leister/>

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

Descobrimo o Sol



✓ O Sol - nossa estrela mais próxima - é feito de gás ionizado super quente chamado plasma. A superfície e a atmosfera do Sol mudam constantemente, impulsionadas pelas **ondas magnéticas** geradas por este plasma agitado.

✓ Por um lado, a influência do Sol na habitabilidade da Terra é incrivelmente complexa. Ele fornece radiação que, dependendo da quantidade, pode ser um benefício ou um perigo para o desenvolvimento da vida.

✓ A NASA observa o Sol 24-7 com uma frota de observatórios solares, estudando tudo, desde a tênue atmosfera externa do Sol, até sua superfície agitada, e até mesmo o **lado da serra**, usando instrumentos magnéticos e heliosísmicos.

Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep. Astronomia
<http://www.astro.iag.usp.br/~leister/>

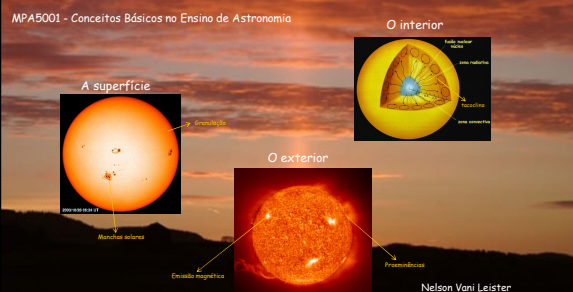
USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

O interior

A superfície

O exterior



Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep. Astronomia

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

O Sol: uma breve visão

Diâmetro (fotosfera)	1.391.980 km	Temperatura superficial	5.800 K
Massa	1.99×10^{30} kg	Tipo espectral	G2V
Densidade média	1.41 g/cm^3	Magnitude visual aparente	-26,7
Luminosidade	$3,83 \times 10^{26}$ W	Magnitude visual absoluta	+4,8
Período de rotação	25 dias (equador) 30 dias (pólos)	Distância média da Terra	149.597.892 km

Composição química

Elemento	Porcentagem (%)	Massa (%)
Hidrogênio	91,200	71,00
Hélio	8,700	27,80
Carbono	0,004	0,40
Nitrogênio	0,009	0,10
Oxigênio	0,080	0,97

Cecilia Helena Payne
- 1923 Inglesa que imigrou para USA
- 1925 - tese(*) no Redcliffe College (orientador Harlow Shapley)
- Mestre que no Sol e nas estrelas o elemento preponderante é o Hidrogênio.

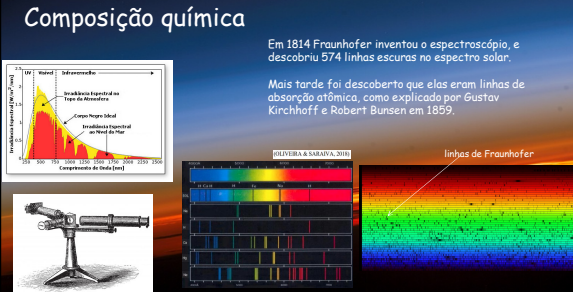
(*) Atmosferas estelares: Uma contribuição para o estudo observacional de altas temperaturas nas camadas inversoras das estrelas
Struve & Zebergers
Russell

USP - MPA5001

Composição química

Em 1814 Fraunhofer inventou o espectroscópio, e descobriu 574 linhas escuras no espectro solar.

Mais tarde foi descoberto que elas eram linhas de absorção atômica, como explicado por Gustav Kirchhoff e Robert Bunsen em 1859.



linhas de Fraunhofer

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

Diagram labels: fusão nuclear núcleo, zona radiativa, Tachocline, zona convectiva.

Região	R/R_s	Temperatura (K)	Densidade (g/cm^3)	Índice de refração
Núcleo	0,0 - 0,25	~ 15.000.000 - 8.000.000	~ 150 - 10	Radiação
Radiação	~ 0,25 - 0,80	~ 8.000.000 - 500.000	~ 10 - 0,10	Radiação
Convecção	~ 0,80 - 1,00	~ 500.000 - 10.000	< 0,01	Convecção

Plano de Polarização e Espalhamento por Partículas

Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep. Astronomia

USP - MPA5001

Princípios básicos da estrutura estelar

- Princípios físicos
 - a) equilíbrio hidrostático
 - b) equação do gás perfeito
 - c) transporte de energia
 - d) fontes gravitacional e termonuclear de energia.
- Parâmetros
 - a) temperatura $T(r)$
 - b) massa $M(r)$
 - c) densidade $\rho(r)$
 - d) pressão $P(r)$
 - e) luminosidade $L(r)$
 - f) taxa de produção de energia $\epsilon(r)$
 - g) composição química $\mu(r)$

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Equações básicas

- Equilíbrio hidrostático
 $dP/dr = -GM\rho/r^2$
- Equação de continuidade da massa
 $dM/dr = 4\pi r^2 \rho$
- Transporte de energia
 $dL/dr = -\nabla T/P dP/dr$
- Taxa de produção de energia (Eq. Térmico)
 $dL/dr = 4\pi r^2 [\rho \epsilon - \rho d(\mu/\rho)/dt + P/\rho dp/dt]$

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Energy Flux: $L(r)/L_\odot$

Rotation: Ω (rad/s)

Temperature: $-\text{Log}(T/T_c)$

Density: $-\text{Log}(\rho/\rho_c)$

Composition: μ

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Equações básicas (Os modelos)

O sucesso da modelagem depende dos parâmetros:

1. Abundância inicial de Hélio (M_{He})
2. Luminosidade inicial
3. Neutrinos solares

Sagan & Mullen, 1972

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

Interior do Sol (Algumas indicações)

Fusion Core, Radiative Zone, Convective Zone.

A interface "tachocline" (efeito dínamo)

Temperature (millions of K) vs. Distance from center (km)

Density (g/cm³) vs. Distance from center (km)

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

Interior do Sol

-A fonte geradora de energia do Sol permaneceu um mistério até o início dos anos 1930, quando a sua natureza foi enfim revelada.

Mecanismo de reposição de energia
[Luminosidade do Sol = $3,8 \times 10^{26}$ W (J/s)]

1. Queima de carvão!
 - A combustão completa do carvão ocorre quando existe oxigênio suficiente para consumi-lo totalmente:

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$$
 - 1 mol de carvão sólido = 12g de C. Em massa solar = $5,45 \times 10^{23}$ kg
 - 1 mol de O_2 gasoso a 32g. Em massa solar = $14,54 \times 10^{23}$ kg
 - $E = 5,45 \times 10^{23} \text{g} \times 32,8 \times 10^3 \text{ J/g} = 17,876 \times 10^{26} \text{ J}$
($32,8 \times 10^3 \text{ J/g}$ é o calor de combustão do carvão)
 - $T = 17,876 \times 10^{26} \text{ J} / 3,8 \times 10^{26} \text{ J/s} = 4,58 \times 10^{19} \text{ s} = 1.450 \text{ anos}$
 - O Sol todo de Carvão/núvem de oxigênio 5.300 anos.

A interface "tachocline" (efeito dinâmico)

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

Interior do Sol

-A fonte geradora de energia do Sol permaneceu um mistério até o início dos anos 1930, quando a sua natureza foi enfim revelada.

Mecanismo de reposição de energia
[Luminosidade do Sol = $3,8 \times 10^{26}$ W (J/s)]

1. Queima de carvão!
 - Tempo estimado de vida 1.450 anos
 - Queda de corpos (meteoróides) no Sol (Teoria de Mayer - 1848)
 - Uma massa da Terra/séc. de corpos Modificaria o tempo de translação!
3. Contração gravitacional (Helmholtz)
 - Energia produzida = $2,5 \times 10^{27}$ J
 - Tempo estimado 10⁷ anos
4. A mudança de paradigma
 - No final do século XIX, a radioatividade foi descoberta.

A interface "tachocline" (efeito dinâmico)

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

Fusão Nuclear

A fusão nuclear é um processo em que dois núcleos (prótons) se combinam para formar um único núcleo de Hélio.

A natureza da fonte geradora de energia do Sol é a reação de fusão processada no núcleo estelar.

1938 - Hans Bethe & Friedrich Weizsäcker

- A teoria da Relatividade previa a aniquilação da matéria nesse processo:
 $E = mc^2$

Eddington mostrou que essa teoria poderia explicar que parte da matéria seria responsável pela produção da energia no Sol.

a) Cadeia pp (próton-próton)

$$4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He} + e^+ + \nu$$

$$\text{}^3\text{H} + \text{}^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He} + \gamma$$

$$\text{}^3\text{He} + \text{}^3\text{He} \rightarrow \text{}^4\text{He} + 2 \text{}^1\text{H}$$

Nelson Vani Leister
IAG-USP Dep Astronomia
<http://www.astro.iag.usp.br/~leister/>

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia

Produção de energia

Key:
● próton
○ nêutron
○ positrão
○ neutrino
~~~~~ γ fóton

$$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,42 \text{ MeV}$$

$$^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,42 \text{ MeV}$$

$$^3\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$$

$$^3\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$$

$$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2 \text{}^1\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$$

$$4 \text{}^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \dots$$

+2,04 MeV de dois positrons que se aniquilam  
Energia produzida = 26,72 MeV =  $4,3 \times 10^{-12}$  J

Valor devido a massa de um núcleo de hélio ser ao redor de 0,007 (0,7%) da soma das massas de quatro prótons.

Nelson Vani Leister  
IAG-USP Dep Astronomia  
<http://www.astro.iag.usp.br/~leister/>

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

### Produção de energia

$4 \times 1,00784$   
(4,03136)

$\rightarrow$

$1 \times 4,002602 + \Delta m$   
(4,002602)

$\Delta m/m = 0,0287/4,0314 = 0,007$

\* Um grama de H transmuta-se em He, com perda de 0,007g

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

$E = mc^2$

$E = 0,007 \times (3 \times 10^8)^2 \rightarrow E = 6,3 \times 10^{11}$  ergs (por grama)

Sendo  $L = 3,8 \times 10^{33}$  ergs/s

Então:  $L/E \rightarrow 3,8 \times 10^{33} / 6,3 \times 10^{11} = 600.000.000$  toneladas/segundo massa transformada por seg.

$M_{\text{sol}} = 2 \times 10^{33}$  ton (70% de H)

$T_{\text{vida}} = \text{Massa (disponível)} / \text{Consumo}$

$T_{\text{vida}} = 2 \times 10^{33} \times 0,70 / 600 \times 10^6$

$T_{\text{vida}} = 2,4 \times 10^{18}$  seg  $\rightarrow 10^8$  anos

O Sol como uma estrela.

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

Chandrasekar & Mário Schenberg (1942)

**Duração de vida do Sol**

$M_{sol} = 2 \times 10^{27} \text{ ton}$  (eficiência 10%)

$T_{vida} = \text{Massa(disponível)} / \text{Consumo}$

$T_{vida} = 2 \times 10^{27} \times 0,70 \times 0,10 / 600 \times 10^6$

$T_{vida} = 2,4 \times 10^{17} \text{ seg} \rightarrow 10^{10} \text{ anos}$

USP - MPA5001 O Sol como uma estrela.

Por que estudar o Sol?

**Zona Radiativa** (Regiões de transferência de energia)

A zona radiativa é caracterizada pelo método de transporte energético - radiação. A energia gerada no núcleo é transportada pela luz (fótons) que salta de partícula para partícula através da zona radiativa.

A densidade cai de  $20 \text{ g/cm}^3$  (cerca da densidade de ouro) para apenas  $0,2 \text{ g/cm}^3$  (menos que a densidade da água) da parte inferior até o topo da zona radiativa.

A temperatura cai de  $7.000.000^\circ \text{C}$  para cerca de  $2.000.000^\circ \text{C}$  na mesma distância.

USP - MPA5001 O Sol como uma estrela.

Por que estudar o Sol?

**Zona Radiativa - Regiões de transferência de energia**  
 $7 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{C} - 2 \times 10^8 \text{ } ^\circ\text{C}$

- o Espalhamento Compton  
O fóton troca energia e momento com um elétron livre (raios-X e  $\gamma$ ).
- o Bremsstrahlung  
Desaceleração brusca de um elétron quando da passagem nas proximidades de um núcleo atômico.
- o Fotoionização e recombinação eletrônica  
Processo físico em que um íon é formado pela interação de um fóton com um átomo ou molécula (ligado-livre).
- o Linhas atômicas em emissão e absorção  
Em regimes de baixas temperaturas, a radiação interage com os átomos forçando os elétrons ligados a mudar de órbita dentro dos átomos (ligado-ligado).

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

**A camada de interface (Tachocline)**

- Região de transição entre o interior radiativo e a zona convectiva externa em rotação diferencial. Acredita-se agora que o campo magnético do Sol seja gerado por um **dinamo magnético** nesta camada.

- As mudanças nas velocidades de fluxo de fluidos através da camada (fluxos de cisalhamento) podem esticar as linhas de força do campo magnético e torná-las mais fortes.

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

**A região da convecção**

- o A zona de convecção é a camada mais externa do interior solar. Estende-se a profundidade de aproximados 200.000 km desde a superfície do Sol (fotosfera).
- o Na base a temperatura é de cerca de  $2.000.000^\circ \text{C}$ . Esta é fria o suficiente para que os íons mais pesados (tais como carbono, azoto, oxigênio, de cálcio, de ferro) prendam alguns elétrons.
- o Isso faz com que o material fique mais "opaco", de modo que seja mais difícil para a radiação passar. Isto prende o calor fazendo com que o fluido instável comece a "fervor" (convecção).

USP - MPA5001

Por que estudar o Sol?

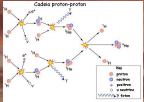
**A região da convecção**

- o A convecção ocorre quando o gradiente de temperatura (a taxa da variação da temperatura com altura ou raio) fica maior do que o gradiente adiabático (a taxa em que a temperatura cairia se um volume de material fosse movido para o alto sem troca de calor).
- o Onde isso ocorrer, um volume de material movido para cima será mais quente do que seus arredores continuando, portanto a subir.
- o O fluido se expande e esfria à medida que sobe. Na superfície visível, a temperatura caiu para  $5700 \text{ K}$  e a densidade é de apenas  $0,0000002 \text{ g/cm}^3$  (cerca de  $1/10.000$  a densidade do ar no nível do mar).
- o Os movimentos convectivos em si são visíveis na superfície (fotosfera) como grânulos e supergrânulos.

USP - MPA5001



MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia Os neutrinos



- O processo de fusão de hidrogênio para formar hélio produz por intermédio das reações nucleares partículas elementares chamadas neutrinos.
- Estas partículas subatômicas são liberadas por reações nucleares no núcleo do Sol.
- Eles passam diretamente pelo Sol e pelo espaço. O Sol deve produzir mais que o dobro de neutrinos do que são observados.

Partículas beta são partículas carregadas negativamente (elétrons) emitidas pelo núcleo.

1930 Pauli descobriu Fermi denominou

Um detector do tamanho de uma piscina era uma espécie de "telescópio de neutrinos", enterrado no subsolo de uma mina de ouro da Dakota do Sul. Continha 400.000 litros de fluido de limpeza a seco, um produto químico contendo cloro ( $C_2Cl_4$ ).

Cerca de uma vez a cada dois dias, um dos átomos de cloro no tanque era convertido em **argônio** pela interação com um neutrino do Sol. Este experimento em particular, que operou de 1968 até 1993, detectou cerca de 1/3 do número de neutrinos previstos pela teoria.

Raymond Davis (1914 - 2006)

Detectar neutrinos é difícil

Os vários experimentos independentes resultaram na determinação de apenas um terço dos números esperados.

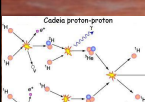
Astrónomos solares tentaram alterar seus modelos do Sol e sua evolução nos últimos 4,5 bilhões de anos para fazer um modelo do Sol que produzisse menos neutrinos. Essas tentativas foram mal sucedidas.

Super-Kamiokande

Um observatório de neutrinos. Consiste em um tanque cilíndrico de aço inoxidável de cerca de 40 m de altura e diâmetro com 55.000 toneladas de água "ultrapura ( $D_2O$ )".

USP - MPA5001

MPA5001 - Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia Os neutrinos



- O processo de fusão de hidrogênio para formar hélio produz por intermédio das reações nucleares partículas elementares chamadas neutrinos.
- Estas partículas subatômicas são liberadas por reações nucleares no núcleo do Sol.
- Eles passam diretamente pelo Sol e para o espaço. O Sol deve produzir mais que o dobro de neutrinos do que são observados.

Partículas beta são partículas carregadas negativamente (elétrons) emitidas pelo núcleo.

1930 Pauli descobriu Fermi denominou

Um detector do tamanho de uma piscina era uma espécie de "telescópio de neutrinos", enterrado no subsolo de uma mina de ouro da Dakota do Sul. Continha 400.000 litros de fluido de limpeza a seco, um produto químico contendo cloro ( $C_2Cl_4$ ).

Cerca de uma vez a cada dois dias, um dos átomos de cloro no tanque era convertido em **argônio** pela interação com um neutrino do Sol. Este experimento em particular, que operou de 1968 até 1993, detectou cerca de 1/3 do número de neutrinos previstos pela teoria.

Raymond Davis (1914 - 2006)

Detectar neutrinos é difícil

Os vários experimentos independentes resultaram na determinação de apenas um terço dos números esperados.

Astrónomos solares tentaram alterar seus modelos do Sol e sua evolução nos últimos 4,5 bilhões de anos para fazer um modelo do Sol que produzisse menos neutrinos. Essas tentativas foram mal sucedidas.

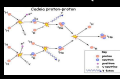
Super-Kamiokande

Um observatório de neutrinos. Consiste em um tanque cilíndrico de aço inoxidável de cerca de 40 m de altura e diâmetro com 55.000 toneladas de água "ultrapura ( $D_2O$ )".

USP - MPA5001

A produção de energia

Os neutrinos (Davis & Bahcall)



A fim de testar a temperatura central do núcleo solar, onde são produzidas as reações nucleares, foram idealizados vários coletores de neutrinos.

Os números de Davis eram consistentemente e muito próximos de um terço dos cálculos de Bahcall.

Davis premio Nobel 2002 - Neutrinos cósmicos

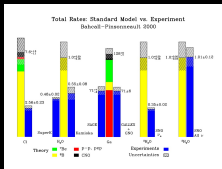
Produção = 66 bilhões/ $cm^2 \cdot s$  [Bahcall]

Deteção = 17 bilhões/ $cm^2 \cdot s$  [Davis]

Neutrinos são instáveis, migram para famílias: tipos de neutrinos: do elétron, do múon e do tau.

Implicaria terem massas não nula!

Total Bales: Standard Model vs. Experiment Bahcall - Experimento 2000



USP - MPA5001