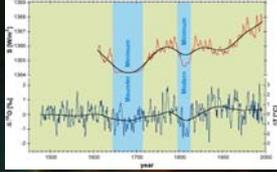
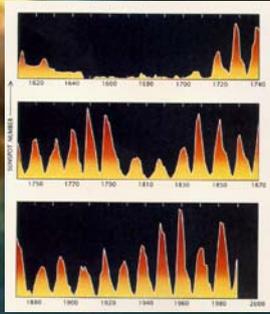


## • O Sol como uma estrela.



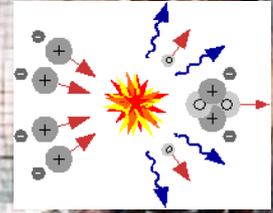
- Conhecendo-se: idade, raio, massa e luminosidade + informações de seu interior e de sua atmosfera
- Compreender as outras \*

USP



## • O Sol como um Laboratório de pesquisas.

- Energia química (mistura ideal de H e O → 34,2 Kcal/g de H) → 30.000 anos (?)
- Energia potencial (energia gravitacional de uma esfera de raio R:  
 $E\theta = \sum GM(r) dM(r)/r$   
 →  $19 \times 10^6$  anos



$$E = mc^2$$

USP

## • Algumas questões importantes

- O processo de aquecimento da Coroa!
- A natureza das erupções solares
- A origem do ciclo das manchas
- O enigma dos Neutrinos!

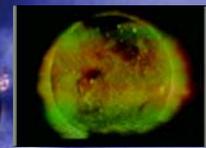
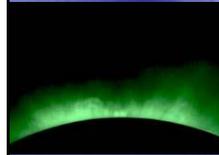
USP

## • O processo de aquecimento da Coroa!

T = 1.000.000 K

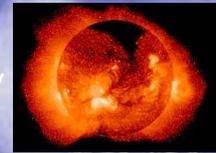
Linhas coronais

SkyLab(1973)



Raios X

→ FeX, FeXIV  
CaXV



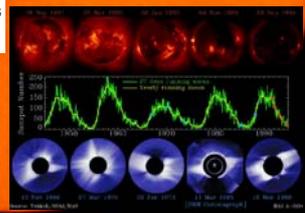
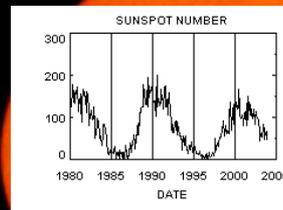
USP

## A natureza das erupções solares.

- Áreas vizinhas às manchas solares, que lançam uma grande quantidade de matéria no espaço.

USP

## A origem do ciclo das manchas



2001/01/11 17:36 UT

# O enigma dos Neutrinos!

A Neutrino Family Portrait

USP

## Ano Luz/Paralaxe

O ano luz (A.L.)

Distância que a luz atravessa, em um ano (~365,25d)

1 A.L. =  $365,25^d \times 24^h \times 60^m \times 60^s \times c$   
 $c = 300.000 \text{ km/s}$

1 A.L. =  $9,47 \times 10^{12} \text{ km}$   
 $= 63.000 D_{(\text{Terra-Sol})}$

**ESTRELA EM MOVIMENTO**  
*Em um período de 6 meses, estrelas a menos de 1.600 anos-luz de distância parecem mover-se contra o fundo das estrelas mais distantes.*

Ângulo de deslocamento

Terra em janeiro / Vista em Janeiro

Terra em junho / Vista em Junho

Sol

USP

## Paralaxe

Uma das primeiras tentativas de se obter o valor da U.A. (Unidade Astronômica), que vale a distância média da Terra ao Sol.

1UA. = 149.600.000 km

(a)

Planet

Parallax

Earth

A B

(b)

As seen from A

As seen from B

USP

## O parsec

$\text{tg } 1'' = 1\text{AU} / 1\text{pc}$

$1\text{pc} = 1\text{AU} / \text{tg } 1''$

$1\text{pc} = 149,6 \times 10^6 / \text{tg } 1''$

$1\text{pc} = 3,09 \times 10^{13} \text{ km}$   
 ou  
 $1\text{pc} = 206265 \text{ UA}$

$\text{tg } 1'' = 1'' \times \pi / 180^\circ \times 3600'' = 1/206265$

**d = 1 parsec**

$1\text{pc} = 3,26 \text{ AL.}$ , pois  $1\text{AL} = 63000 \text{ UA}$

Sole

Terra

USP

## Aspectos gerais

(características das órbitas)

### Distância da Terra ao Sol

(Aristarco, grego, 320 a.C. - 250 a.C.)

Lua Quarto Crescente

$\cos a = d / D$   
 $D = d / \cos a$

$d = 384 \times 10^3 \text{ km}$

$D = 149,6 \times 10^6 \text{ km}$

Terra

Sol

USP

Lunação = 29,5 dias

$360^\circ \xrightarrow{\quad} 29,5d$

$\beta \xrightarrow{\quad} \{[35/2]/60\text{min}/24\text{h}\}d$

$\beta = 0,148$

$\frac{x}{180^\circ} = \frac{y}{\pi}$

$y = d/D = 0,002588\text{rd}$

$d/D = 1/386$

$\beta \rightarrow 35^{\text{min}}/2$

Quarto

Nova

USP

## Aspectos gerais

(características das órbitas)

- Historicamente: Aristarco
- Lei de Kepler
- Distância (a escala foi obtida quando da aproximação de Vênus)
  - $1 \text{ U.A.} = 149,6 \times 10^6 \text{ km}$
- Estão regularmente espaçados
- Lei de Titius-Bode



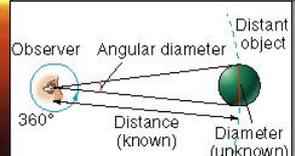
{	4	$4+(3 \times 2^0)$	$4+(3 \times 2^1)$	$4+(3 \times 2^2)$	$4+(3 \times 2^3)$	... }	/10
	0,4	0,7	1,0	1,6	2,8(?)	5,2...	
	Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	(???)	Júpiter ...	
	0,39	0,72	1,0	1,5		5,2	

USP

## Dados básicos

Características Principais

Raio	$6,96 \times 10^8 \text{ m}$
Massa	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Densidade (média)	$1410 \text{ kg/m}^3$
Rotação (período)	24,9 dias (equador) 29,8 dias (polos)
Temperatura superficial	5780 K
Luminosidade	$3,86 \times 10^{26} \text{ W}$



USP

## Massa

- 3a. Lei: O período P está relacionado com o semi-eixo maior e as massas dos dois corpos

$$P^2 / R^3 = M + m = K$$

para um sistema considerado.

Para o sistema solar, como a massa do Sol é bem maior que a dos planetas, então K em massa solares vale 1.

- Lei de Newton

$$F = GmM/R^2$$



USP

## A Constante Solar (Luminosidade)

- Quantidade de energia enviada pelo Sol para a superfície da Terra, por unidade de tempo.

$$C = L_{\odot} / 4\pi d^2 \Rightarrow C = 1370 \text{ W/m}^2$$

(medida acima da atmosfera da Terra)

- Luminosidade

$$L_{\odot} = 4\pi d^2 C \Rightarrow L_{\odot} = 4\pi (150 \times 10^9)^2 \times C$$

$$\Rightarrow L_{\odot} = 3,86 \times 10^{26} \text{ W}$$

- Temperatura

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

$$\Rightarrow T_{\odot} = 5780 \text{ K}$$



USP

## Rotação

Galileu viu as manchas solares em 1613, utilizando-se de um telescópio. Ele projetou a imagem do Sol sobre um anteparo.

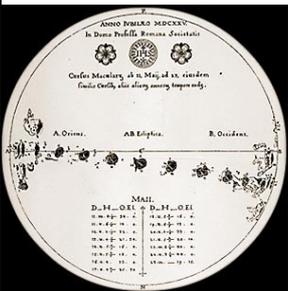
Ao contrário de que imaginava Christoph Scheiner (observador Jesuíta), de que se tratava de pequenos planetas orbitando a Terra.

Publicou suas descobertas em "Letters on Sunspots"

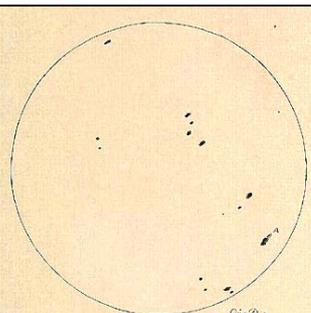


USP

## As Manchas do Sol



Stamp drawings by Christoph Scheiner from his book Rosa Ursina.



USP

### 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  $\mu(r)$

USP

### Equações básicas

- Equilíbrio hidrostático  
 $dP/dr = -GM(r)\rho(r)/r^2$
- Equação de continuidade da massa  
 $dM/dr = 4\pi r^2 \rho(r)$
- Taxa de produção de energia (Eq. Térmico)  
 $dL/dr = 4\pi r^2 \rho(r) \epsilon(r)$
- Transporte de energia  
 $dT/dr = [-3\kappa(r)\rho(r)/64\pi\sigma^2 T^3(r)] L(r)$
- Equação de estado  
 $P(r) = \kappa\rho(r)T(r)/\mu(r) m_H$

USP

### O interior do Sol

#### O transporte da energia

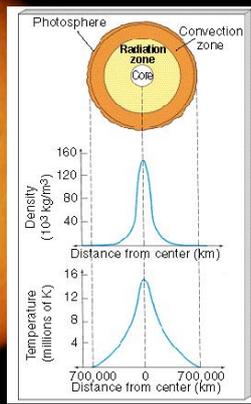


#### A granulação (convecção)



USP

#### Modelo padrão



### A geração de energia (a região central)

Fusão Nuclear (mecanismo de geração de energia no núcleo do Sol)  
(transmutação química do H  $\rightarrow$  He)

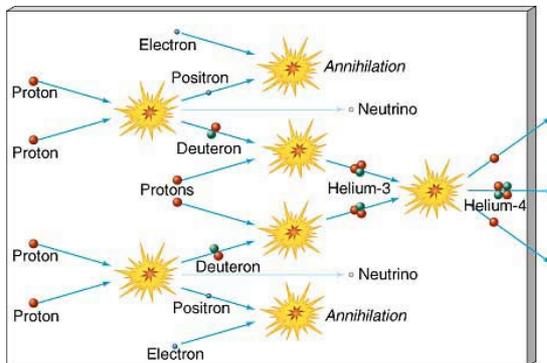
4 prótons  $\rightarrow$  hélio-4 + 2 neutrinos + energia.

$$E = mc^2$$

(Lei da conservação de energia e massa)

USP

### Cadeia PP (Próton-Próton)



USP

A fusão nuclear

### Energia gerada

#### Cadeia Próton-Próton

4 prótons  $\Rightarrow$  hélio-4 + 2 neutrinos + energia

$$4 \times 1,0078 \text{ (peso atômico)} = 4,0312$$

$$\text{Hélio (peso atômico)} = 4,0026 \Rightarrow \Delta m = 0,0286$$

$$\Delta m/m = 0,0286/4,03 = 0,0071 \text{ (perda relativa)}$$

Um grama de hidrogênio  $\Rightarrow$  hélio  $\Rightarrow$  com perda de 0,0071g

$$\Rightarrow \Delta E = (0,0071) \times (3 \times 10^{10})^2 = 6,4 \times 10^{18} \text{ ergs}$$

energia/g de H

USP

### Tempo de vida do Sol.

- Consideremos que 90% da energia seja gerada pela reação PP
- Consideremos ainda que:
  - a)  $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T^4 \Rightarrow L_{\odot} = 3,9 \times 10^{33}$  ergs/s
  - b)  $\Delta E_{\odot} = 6,4 \times 10^{18}$  ergs/g
- são queimadas por segundo:  
 $\Delta m = L_{\odot} / \Delta E_{\odot} = 6000000000$  ton de hidrogênio
- entretanto  $M_{\odot} = 1,96 \times 10^{30}$  kg

USP

### Tempo de vida do Sol I.

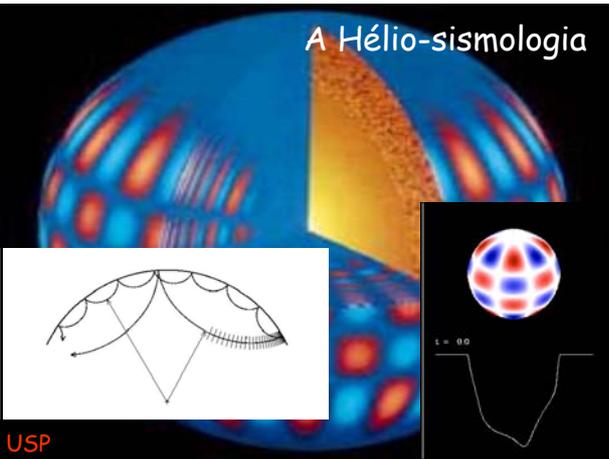
- Da massa total do Sol, 70% é hidrogênio.
- Desse total 15% esta concentrada no seu núcleo

$$\Rightarrow M \times 0,70 \times 0,15 / \text{consumo} (6 \times 10^{11} \text{ kg/s})$$

$$\approx 10^{10} \text{ anos} \Rightarrow 10 \text{ bilhões de anos}$$

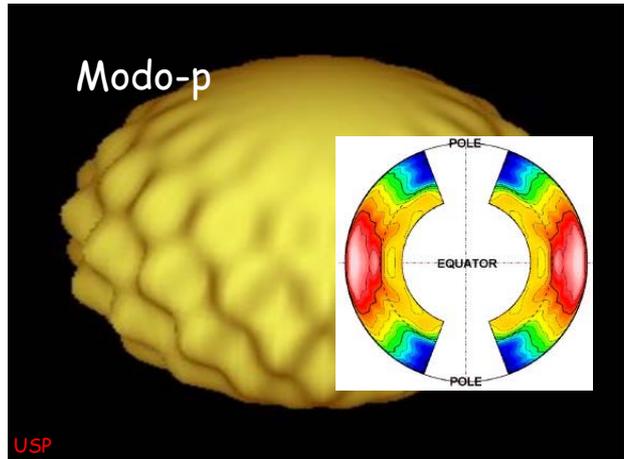
USP

### A Hélio-sismologia



USP

### Modo-p



USP