

# **Evolução Estelar: Nascimento, vida e morte das estrelas**

*John R. Percy*

*União Astronómica Internacional  
Universidade de Toronto, Canadá*



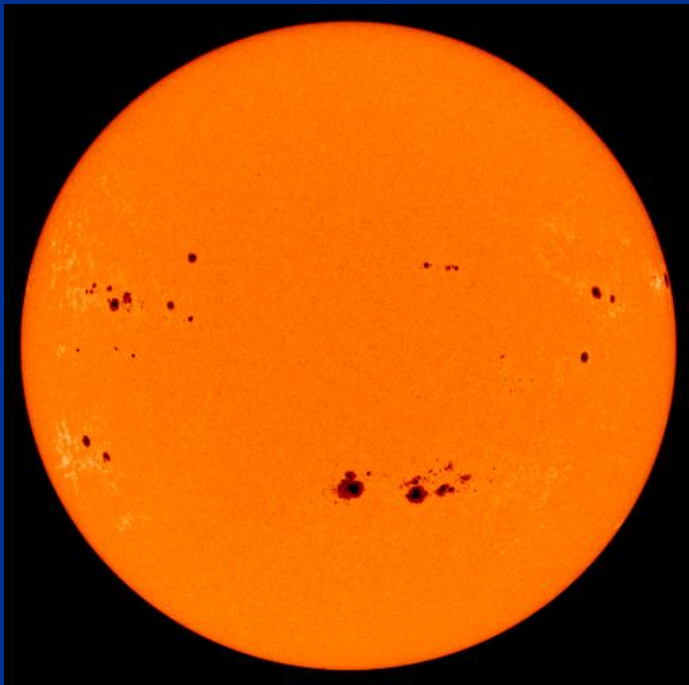
# Evolução das estrelas

- A evolução estelar refere-se às mudanças que ocorrem nas estrelas quando estas consomem o seu combustível, desde o seu nascimento até à sua morte.
- Compreender a evolução das estrelas ajudará a perceber:
  - A natureza e o destino do Sol.
  - A origem do nosso Sistema Solar.
  - A relação entre o Sistema Solar e outros sistemas planetários.
  - A possível existência de vida noutros lugares do Universo.



Nebulosa do Anel, uma estrela moribunda. Fonte: NASA.

# Propriedades do Sol: a estrela mais próxima e como os astrónomos as determinam - importante!



O Sol.  
Fonte: NASA, Satélite SOHO.

- **Distância:**  $1,5 \times 10^{11}$  m, refletindo ondas de radar desde Mercúrio e Vénus.
- **Massa:**  $2 \times 10^{30}$  kg, medindo o movimento dos planetas que orbitam à volta do Sol.
- **Diâmetro:**  $1,4 \times 10^9$  m, a partir do diâmetro aparente (angular) do Sol e a sua distância.
- **Potência:**  $4 \times 10^{26}$  W, a partir da distância e da potência medida na Terra.
- **Composição química:** 98% H e He, estudando o seu espetro.

# Propriedades de estrelas – Sóis distantes e como os astrónomos as determinam - Importante!



Constelação de Oriente.

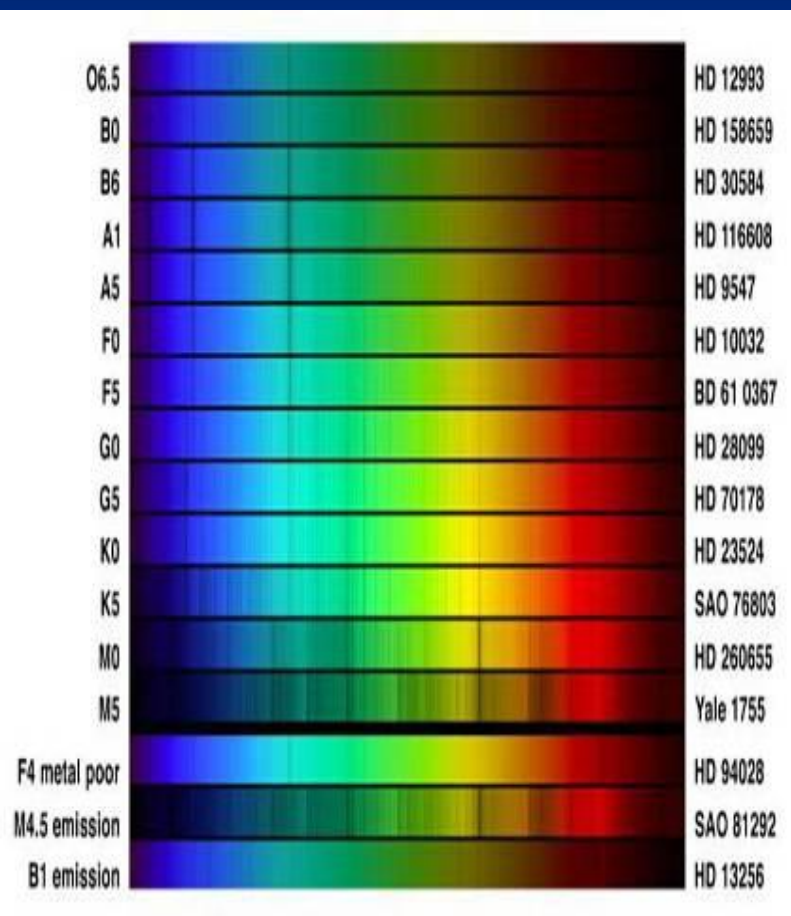
Fonte: Hubble, ESA, Akira Fujii.

- **Distância:** da paralaxe, ou do brilho aparente, se a potência for conhecida.
- **Potência:** distância e brilho aparente.
- **A temperatura da superfície:** a cor ou o espectro.
- **Rádio:** a potência e a temperatura da superfície.
- **Massa:** nas estrelas binárias.
- **Composição química:** o espectro.



# Os espectros das estrelas

luz da estrela, decomposta nos seus componentes



- Os astrónomos aprendem sobre os objetos astronómicos através da luz que estes emitem.
- O espectro dá informações sobre: composição, temperatura, velocidades e outras propriedades das estrelas.
- À esquerda: os 13 primeiros espectros são de estrelas de diferentes temperaturas (as mais elevadas na parte superior). Os 3 espectros do fundo são de estrelas com propriedades anormais.

Espectros estelares.

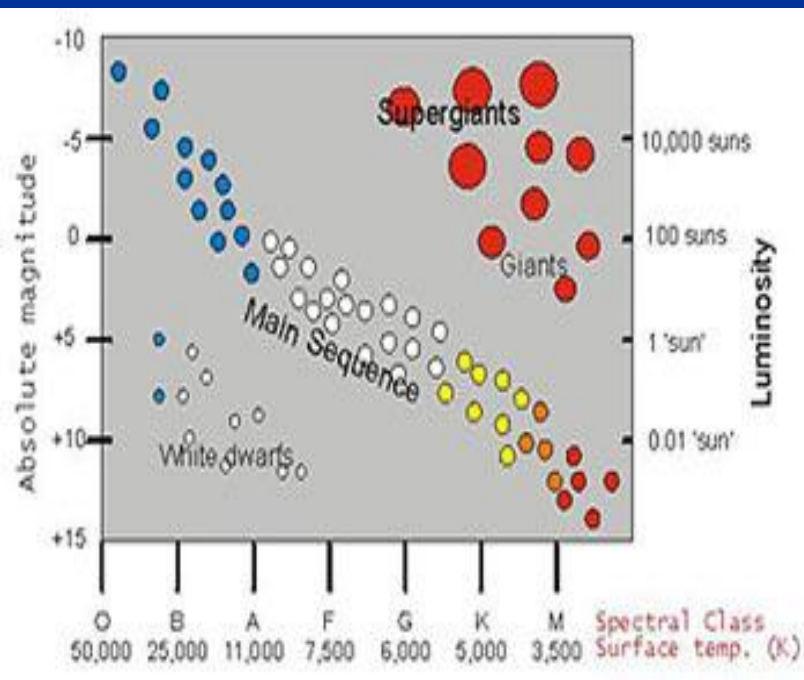
Fonte: Obs. US National Optical Astronomy.



# O diagrama Hertzsprung-Russell

Há ordem nas propriedades das estrelas!

- O diagrama HR é um gráfico da temperatura de superfície (classe espectral) e a “magnitude absoluta”, que é uma medida logarítmica da potência.



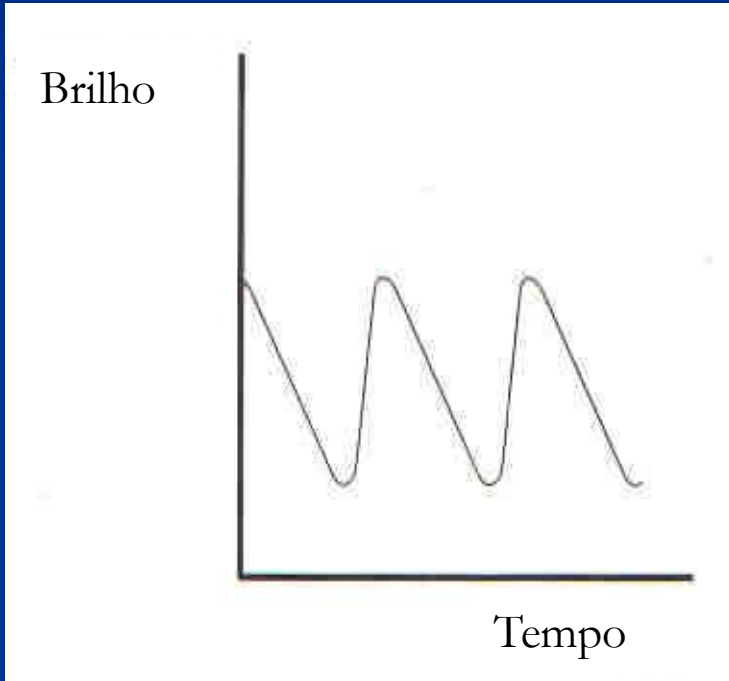
- A maioria das estrelas estão na sequência principal: estrelas de elevada massa são estrelas quentes e com alta potência (em cima à esquerda), as de menor massa são frias e tem baixa potência (em baixo à direita).
- As estrelas gigantes estão em cima à direita, e as estrelas brancas em baixo, à esquerda.

Diagrama HR.  
Fonte: NASA.



# Estrelas variáveis

- São estrelas que apresentam variação no seu brilho.

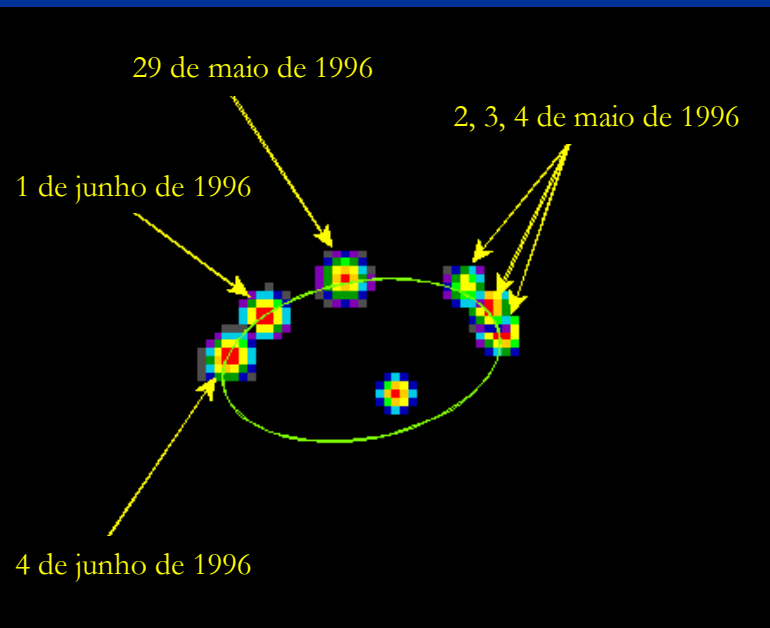


Curva de luz: um gráfico de luminosidade *versus* tempo.

- A maioria das estrelas são variáveis: podem variar, porque pulsam, fulguram, entram em erupção ou explodem, ou são eclipsadas por uma estrela companheira ou um planeta.
- As estrelas variáveis fornecem informação sobre a natureza e a evolução estelar.

# Estrelas binárias (duplas) e múltiplas

- São pares de estrelas que estão juntas devido à gravidade, e orbitam em torno umas das outras.
  - Podem ser observadas diretamente (figura à esquerda), ou detetadas pelos seus espectros, ou por eclipse de uma estrela pela outra.
  - São a ferramenta mais importante para medir massas estelares.
  - Estrelas múltiplas são três ou mais estrelas unidas pela gravidade.



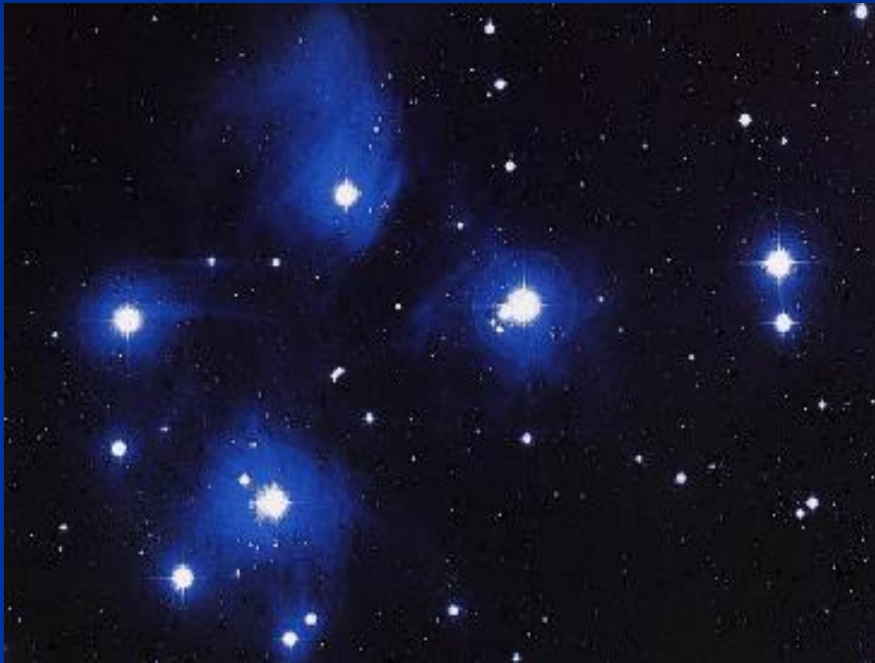
Movimento orbital de Mizar na Ursa Maior.  
Fonte: Grupo NPOI, USNO, NRL.





# Enxames de estrelas

## “As experiências da natureza”



O enxame aberto das Plêiades.  
Fonte: Observatório Monte Wilson.

- São grupos de estrelas que estão juntas devido à gravidade, e movem-se em conjunto através do espaço.
- Formaram-se ao mesmo tempo (têm a mesma idade), no mesmo lugar, do mesmo material, e estão à mesma distância de nós, só diferem na massa.

# De que feito o Sol e as estrelas



As proporções dos elementos do Cosmos: a alpista H (90%), o arroz He (8%), feijão C, N e O e vestígios de tudo o resto (2%).

- Com o uso da espectroscopia e de outras técnicas, podemos identificar as “matérias-primas” de que são feitas as estrelas.
- Hidrogénio e hélio são os mais abundantes. Foram criados na formação do Universo.
- Os elementos mais pesados são milhões ou milhares de milhão de vezes menos abundantes. Foram criados pelas reações nucleares nas estrelas.



1 H																	2 He																	
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne													
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar													
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																	
55 Cs	56 Ba															72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra															104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo				
																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
																		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

- Elementos criados nos primeiros minutos do Big Bang
- Elementos produzidos por nucleosínteses no interior das estrelas
- Elementos produzidos nas supernovas

# As leis da estrutura de uma estrela

- No interior das estrelas a pressão aumenta devido ao peso das camadas superiores.
- De acordo com as leis dos gases, a temperatura e a densidade aumentam quando a pressão aumenta.
- O fluxo de energia faz-se da zona mais quente do interior para a zona exterior mais fria, por radiação (fotões), convecção (grânulos) ou condução (iões e eletrões).
- Se a energia sair da estrela, esta arrefece - a menos que se crie mais energia no interior.
- *As estrelas regem-se por estas leis simples e universais da física.*



# Exemplo: Por que é que o Sol não colapsa ou contrai?



- Encha um balão como o da esquerda.
- O balão é “comprimido” para dentro pela pressão atmosférica. Não encolhe porque a pressão do gás está a “empurrá-lo” para fora.
- No Sol, a gravidade (que comprime, para dentro) é equilibrada pela pressão de radiação (para fora).

# A fonte de energia do Sol e das estrelas

- Combustão química de gás, petróleo ou carvão?

O processo é tão pouco eficiente que só daria energia ao Sol durante alguns milhares de anos.

- Contração gravitacional lenta?

Poderia fornecer energia ao Sol durante cem milhões de anos, mas o Sol tem milhares de milhões de anos de idade.

- Radioatividade (fissão nuclear)?

Os isótopos radioativos são quase inexistentes no Sol e nas estrelas.

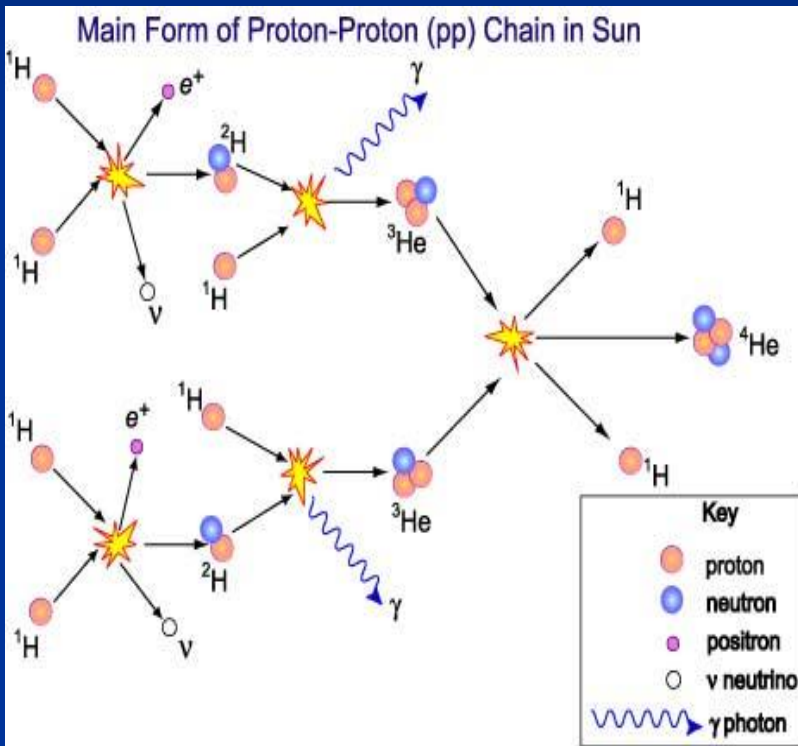
- Fusão nuclear de elementos mais leves em outros mais pesados?

**Sim! Este é um processo muito eficiente, e os elementos leves, como o hidrogénio e o hélio, representam 98% do Sol e das estrelas.**



# A Cadeia Protão-Protão

## o principal processo de fusão no Sol



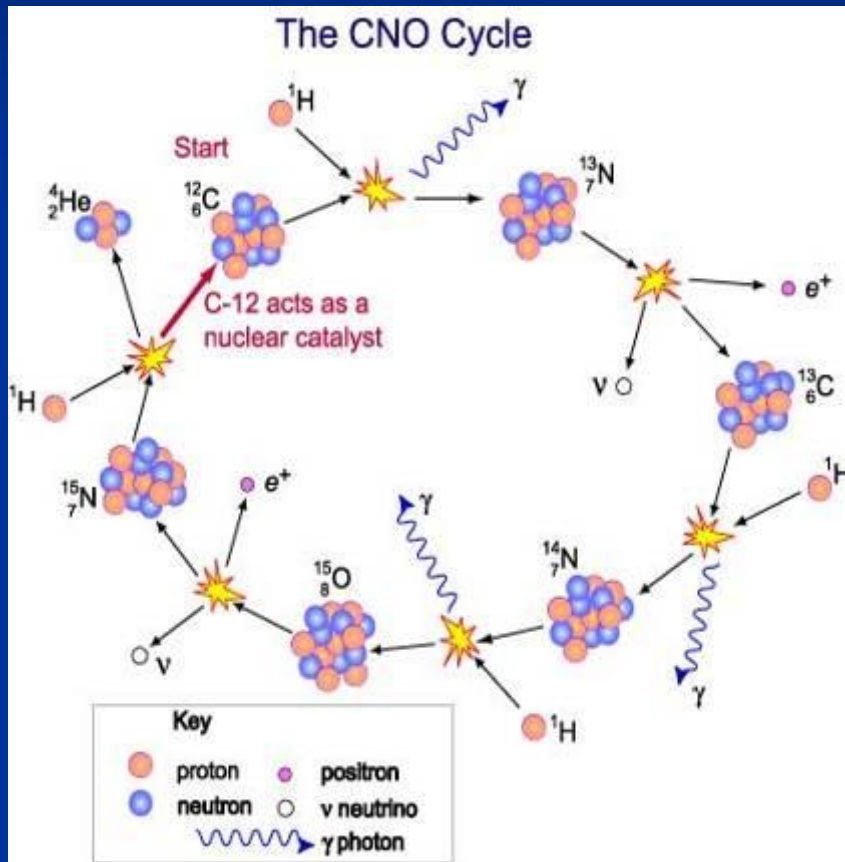
Ciclo protão-protão.

Fonte: Australia Nacional Telescope Facility.

- Em estrelas como o Sol, com elevada temperatura e densidade, os protões (a vermelho) vencem a repulsão eletrostática entre eles e juntam-se para formar  $^2\text{H}$  (deutério) e um neutrino ( $\nu$ ).
- Depois, outro protão junta-se ao deutério para formar o  $^3\text{He}$ .
- Depois, o núcleo de  $^3\text{He}$  recebe outro protão para formar o hélio ( $^4\text{He}$ ).
- Resultado: 4 protões juntam-se para formar hélio e energia - raios gama e energia cinética.



# O ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio



- Em estrelas de grande massa, com núcleos muito quentes, os prótons (a vermelho) juntam-se ao núcleo  $^{12}\text{C}$  (carbono) (em cima à esquerda).
- Começa uma sequência circular de reações, em que quatro prótons se fundem para formar um núcleo de Hélio (em cima à esquerda).
- Recupera-se um núcleo de  $^{12}\text{C}$ , de modo que o  $^{12}\text{C}$  não é criado nem destruído, atuando como um catalisador nuclear.

Ciclo CNO.

Fonte: Australia National Telescope Facility.





# Fazer “modelos” estelares

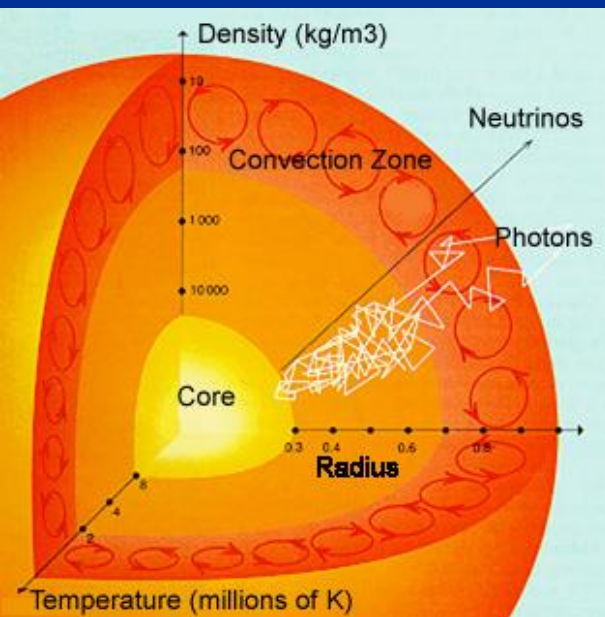
- As leis da estrutura de estrelas são expressas em equações e resolvem-se com modelos informáticos.
- O computador calcula a temperatura, a densidade, a pressão e a potência em cada ponto do Sol ou da estrela.
- Assim, nós sabemos que no centro do Sol a densidade é 150 vezes a densidade da água e a temperatura é 15 000 000 K!



# No interior do Sol

Com base num “modelo” do Sol feito com computador

- No núcleo quente, as reações nucleares produzem energia através da fusão de H para formar He.
- Na zona de radiação, por cima do núcleo, a energia transmite-se para fora pelo processo de radiação.
- Na zona de convecção, entre a zona de radiação e a superfície, a energia transmite-se para fora por convecção.
- A fotosfera, na superfície, é a camada onde a estrela se torna transparente.



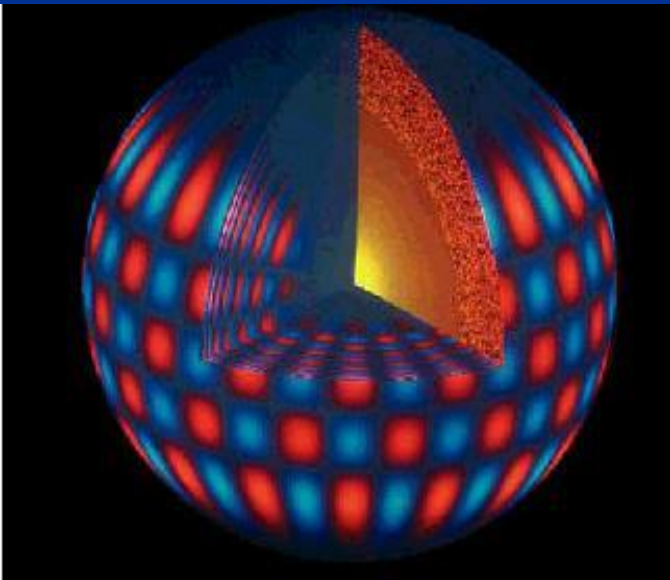
Modelo Solar.

Fonte: Instituto de Física Teórica,  
Universidade de Oslo.



# Teste do modelo: heliosismologia

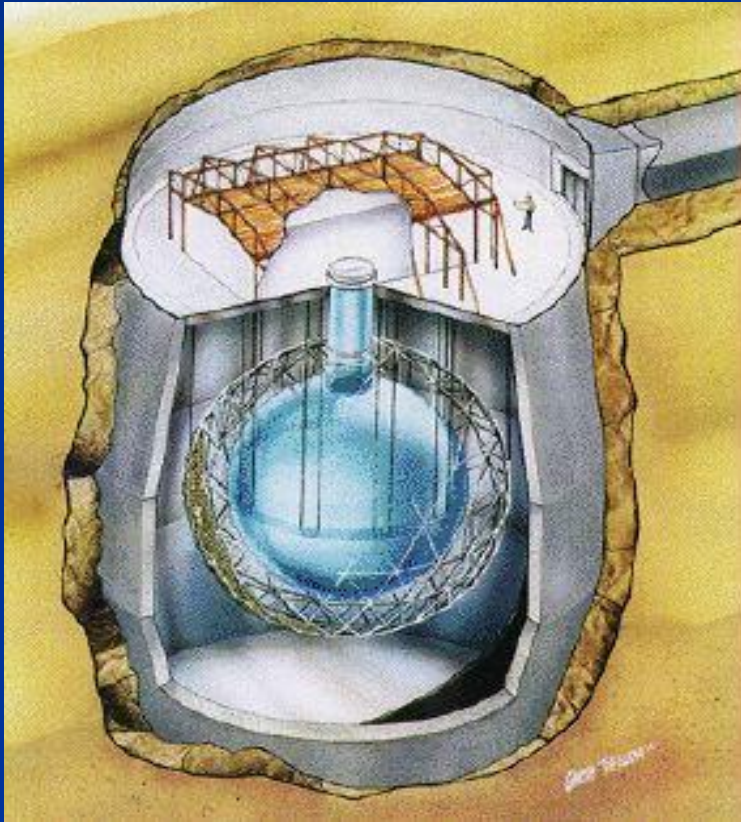
- O Sol oscila suavemente em milhares de modos (padrões) (um deles pode ver-se na figura à esquerda).
- Podem ser observados e esta informação é usada para inferir a estrutura interna do Sol, e assim, avaliar os modelos. O processo é chamado de heliosismologia.
- Oscilações semelhantes podem ser observadas noutras estrelas: astrosismologia.



Visão de Artista da oscilação solar.  
Fonte: US National Optical Astronomy  
Observatory.

# Teste do modelo: Neutrinos solares

- As reações de fusão nuclear produzem partículas elementares chamadas neutrinos.
- Apenas têm massa, e raramente interagem com a matéria.
- Só foram detetados e medidos graças a observatórios especiais, como o Observatório de Neutrinos de Sudbury (à esquerda). Os resultados estão de acordo com as previsões dos modelos.



Observatório de Neutrinos, Sudbury.  
Fonte: Sudbury Neutrino Observatory.

# O tempo de vida das estrelas

O tempo de vida de uma estrela depende da quantidade de combustível nuclear (massa) e da rapidez com que o consome (potência).



- As estrelas menos massivas que o Sol são mais comuns. Têm menos combustível e potências muito menores, portanto têm vidas mais longas.
- As estrelas mais massivas que o Sol são raras. Têm mais combustível, mas potências muito maiores e, portanto, vidas mais curtas.

# Como aprendem os astrónomos sobre a evolução das estrelas

- Observando as estrelas em vários estágios das suas vidas, colocando-as numa sequência de evolução lógica.
- Fazendo modelos, usando as leis da física, e a quantificação das alterações na composição das estrelas que ocorrem por causa da fusão nuclear.
- Estudando enxames de estrelas e/ou grupos de estrelas com massas diferentes, mas com a mesma idade.
- Observando as fases rápidas e estranhas da evolução estelar (como as supernovas).
- Estudando estrelas variáveis pulsantes, medindo as alterações lentas no período de pulsação, por causa da sua evolução.



# A evolução de uma estrela como o Sol

- A estrela fica estável durante 90% da sua vida, enquanto gasta o seu combustível: H. É uma estrela da sequência principal.



- Quando o combustível se esgota, expande-se e transforma-se numa estrela gigante vermelha.
- O núcleo aquece o suficiente para rapidamente produzir energia através da fusão de hélio em carbono.
- Quando o seu combustível de He se esgota, expande novamente formando uma estrela gigante vermelha maior, centenas de vezes maior do que o Sol.

Comparação de tamanhos:  
Sol - gigante vermelha.  
Fonte: Australia Nacional  
Telescope Facility.



# A morte de uma estrela como o Sol

- Quando a estrela se transforma numa gigante vermelha, começa a pulsar (vibrar). É a chamada estrela Mira.
- A pulsação provoca a separação das camadas exteriores da estrela, dando origem a uma bonita nebulosa planetária.
- O núcleo da estrela é uma anã densa, branca e pequena, sem combustível (anã branca).

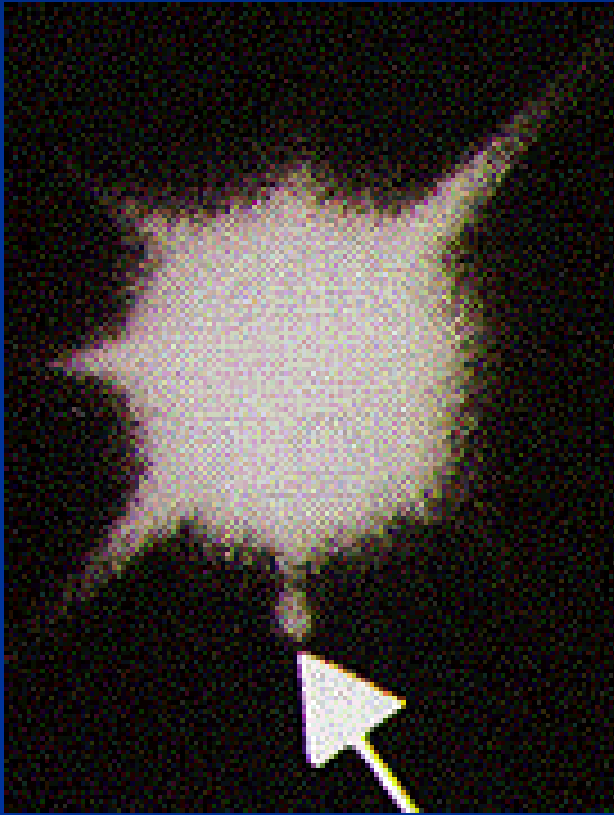


Nebulosa planetária da Hélice.  
Fonte: NASA.



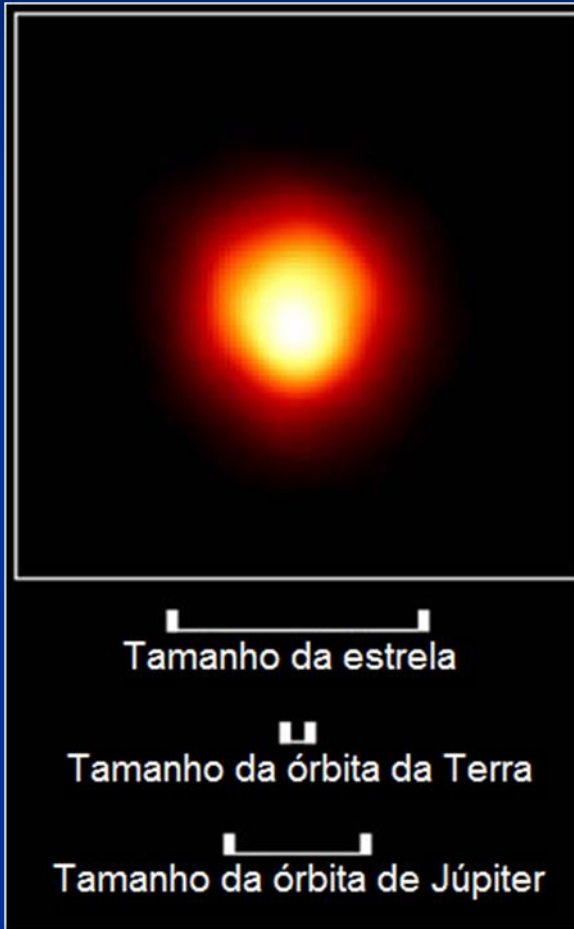
# Anãs brancas

- Uma anã branca é o núcleo de uma estrela como o Sol que morreu.
- Tem uma massa semelhante à do Sol, um volume quase igual ao da Terra e é um milhão de vezes mais densa do que a água.
- A força centrípeta da gravidade é equilibrada pela pressão de degeneração eletrônica dentro dela.
- Muitas estrelas próximas, p.e. Sírio (à esquerda), têm anãs brancas como companheiras.



A companheira anã branca de Sírio (por baixo).  
Fonte: NASA.

# A evolução de uma estrela massiva



- Estrelas massivas são raras, consomem o seu combustível muito rapidamente, duram poucos milhões de anos.
- Enquanto gastam o seu combustível, expandem e tornam-se estrelas supergigantes vermelhas.
- Os seus núcleos são muito quentes, o suficiente para fundir elementos mais pesados, até ao ferro.
- Betelgeuse (à esquerda), em Orionte, é uma supergigante vermelha brilhante. Tem uma dimensão maior do que a órbita da Terra.

Betelgeuse.

Fonte: NASA/ESA/HST.



# A morte de uma estrela massiva

- Quando o núcleo de uma estrela massiva decai no ferro, não tem mais combustível nuclear e não consegue manter a temperatura.
  - A gravidade esmaga o núcleo formando uma estrela de nêutrons, liberando enormes quantidades de energia gravitacional, e levando a estrela à explosão de uma supernova (esquerda).
  - As supernovas produzem os elementos químicos mais pesados do que o ferro (como ouro e prata), ejetando esses elementos para o espaço, onde se tornam parte de novas estrelas, planetas e vida.



A Nebulosa do Caranguejo, o remanescente da explosão de uma supernova observada em 1054 d.C. Fonte: NASA.



# Estrelas de neutrões

- Os núcleos estelares com massas entre cerca de 1,5 e 3 vezes a massa do Sol colapsam para se transformarem em estrelas de neutrões no final da vida.
- Têm diâmetros de cerca de 10 km e densidades triliões de vezes maiores que a da água.
- São feitos de neutrões e partículas exóticas.
- As estrelas de neutrões jovens giram rapidamente e emitem pulsos regulares de radiação de rádio, e chamam-se pulsares.

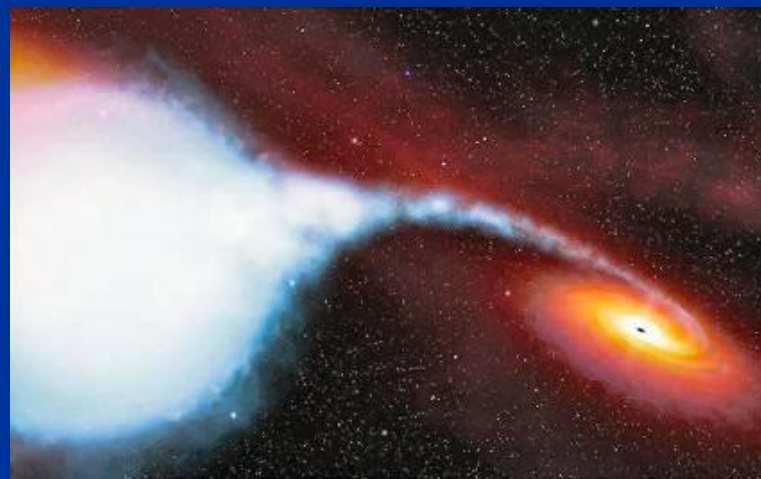


Pulsar, estrela de neutrões no coração da Nebulosa do Caranguejo.  
A energia de rotação que emite excita o gás da nebulosa.  
Fonte: NASA/ESA/Hubble.



# Buracos negros

- Um buraco negro é um objeto astronómico cuja gravidade é tão grande que nada consegue escapar, nem mesmo a luz.
- Os núcleos das raras estrelas massivas (mais de 30 vezes a massa do Sol) transformam-se em buracos negros quando ficam sem combustível.
- Buracos negros podem ser detetados e “pesados” se uma estrela visível orbitar à sua volta (à esquerda).



Visão artística de Cygnus X-1, uma estrela visível (à esquerda) com um buraco negro (à direita) num disco de acreção.

Fonte: NASA.

# Estrelas variáveis cataclísmicas

- Muitos remanescentes estelares - anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros - têm uma estrela normal visível, orbitando em seu redor.
- Se o gás da estrela normal, cai para o remanescente estelar, forma-se um disco de acreção em torno dela (à esquerda).
- Quando o gás cai no remanescente estelar, este pode entrar em erupção ou explodir, formando uma estrela variável cataclísmica.



A estrela variável cataclísmica com uma estrela normal (à esquerda) e uma anã branca (à direita) num disco de acreção.

Fonte: NASA.



# O nascimento das estrelas

- As estrelas têm origem em nebulosas, nuvens de gás e poeira.
- O gás e poeira interestelar constitui cerca de 10% da matéria na nossa galáxia.
- As estrelas mais jovens estão geralmente perto da nebulosa da qual nasceram.
- O exemplo mais próximo e perfeito de um “berçário estelar” é a Nebulosa de Oriente (à esquerda), a cerca de 1 500 anos-luz.



A nebulosa de Oriente.  
Fonte: NASA.



# Gás interestelar



A nebulosa de Oriente. O gás é excitado pela luz ultravioleta das estrelas na nebulosa. Fonte: NASA.

- O gás interestelar (átomos ou moléculas) pode ser excitado por luz ultravioleta de uma estrela quente próxima, produzindo uma nebulosa de emissão (à esquerda).
- O gás frio, entre as estrelas, emite no rádio que pode ser detetado por radiotelescópios.
- 98% do gás interestelar é hidrogénio e hélio.



# Poeira interestelar

- A poeira interestelar perto de estrelas brilhantes pode ser detectada na região do visível.
- A poeira pode bloquear, por trás dela, a luz das estrelas e do gás (à esquerda). As estrelas formam-se dentro dessas nuvens.
- Apenas 1% da matéria entre as estrelas é poeira. As partículas de poeira têm tamanho poucas centenas de nanômetros, e são, em sua maioria, constituídas por grafite ou silicatos.



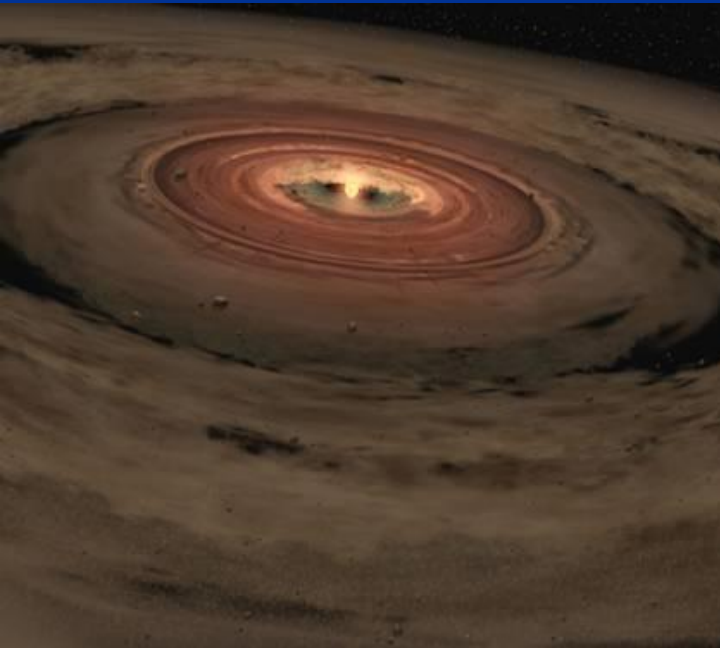
Gaseous Pillars · M16 HST · WFPC2  
PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

M16, a Nebulosa da Águia.  
Fonte: NASA/ESA/Hubble.



# Formação de estrelas

- As estrelas têm origem em zonas das nebulosas chamados glóbulos que são densas ou comprimidas.
- A gravidade faz contrair esses glóbulos.
- A conservação do momento angular aumenta a rotação dos glóbulos, que achatam até se transformarem em discos.
- As estrelas formam-se nos centros dos discos. Os planetas formam-se nas zonas exteriores, mais frias, do disco.



Visão de artista de um sistema planetário no seu processo de formação. Fonte: NASA.



# Discos protoplanetários: *Proplyds*

## Os sistemas planetários no processo de formação



*Proplyds* na nebulosa de Oriente.  
Fonte: NASA/ESA/Hubble.

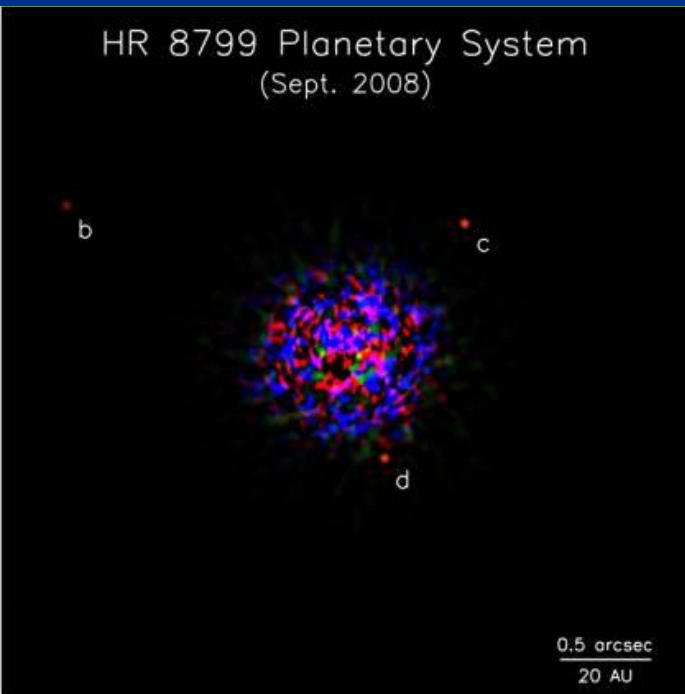
- Os discos protoplanetários foram observados na Nebulosa de Oriente (à esquerda).
- A estrela apenas pode ser visível no centro do disco.
- Os discos de poeira tapam a luz que está atrás.
- Estas e outras observações fornecem evidências diretas da formação de sistemas planetários.



# Exoplanetas = Planetas extrassolares

## Os planetas em torno de outras estrelas

- Exoplanetas são geralmente descobertos e estudados pelo seu efeito gravitacional sobre a estrela, ou pela leve diminuição do brilho da estrela se passarem em frente dela (trânsito).
- Muito poucos foram observados diretamente (à esquerda).
- Ao contrário dos planetas do nosso sistema solar, muitos exoplanetas são enormes e muito perto de sua estrela. Isto força os astrónomos a modificar as suas teorias de formação de sistemas planetários.



Sistema exoplanetário HR 8799.  
Fonte: C. Marois et al., NRC Canadá.



# Considerações Finais

- “A gravidade leva à formação, vida e morte das estrelas” [Professor R.L. Bishop]
- O nascimento de uma estrela explica a origem do nosso Sistema Solar e de outros sistemas planetários.
- A vida das estrelas, explica a fonte de energia que torna possível a vida na Terra.
- A vida e a morte das estrelas produzem elementos químicos mais pesados que o hidrogênio, que constituem as estrelas, os planetas e a vida.
- Com a morte de uma estrela, a gravidade produz alguns dos objetos mais estranhos no Universo: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros.



Muito obrigado  
pela sua atenção!

