

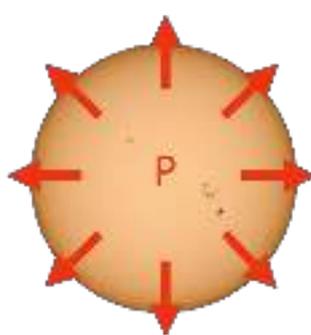
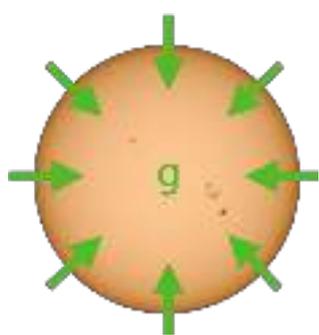
# O Universo no meu bolso



## A vida das estrelas



Sylvia Ekström  
Universidade de  
Genebra



A gravidade ( $g$ ) faz com que a estrela se contraia. O gás aquece e gera uma pressão ( $P$ ) que contraria a força gravitacional: esta é a fase de 'equilíbrio hidrostático'.

A cor das estrelas indica a temperatura da sua superfície. As estrelas mais quentes são azuis, as mais frias são vermelhas.

QUENTE

FRIO



25 000 K  
Rigel



10 000 K  
Sirius



6 000 K  
Sol



4 000 K  
Aldebaran



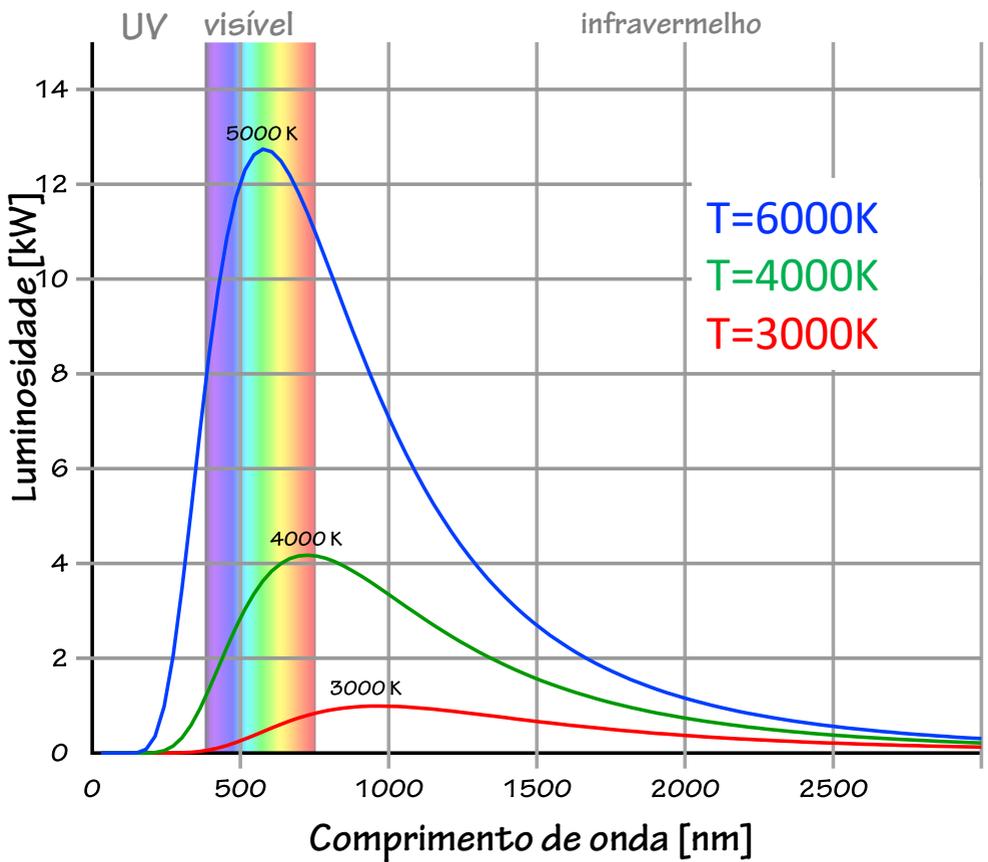
3 000 K  
Antares

# O que é uma estrela?

É uma grande bola de gás quente.

Como é tão massiva, a gravidade faz com que ela se contraia sobre si mesma e essa compressão do gás a aquece: o gás reage agitando os átomos da estrela, produzindo uma pressão que contraria a gravidade. Quanto mais massiva a estrela, mais forte a gravidade e mais quente e brilhante a estrela.

Visualmente, uma estrela mais quente é azulada, como a estrela Rigel na constelação de Orion, enquanto uma estrela mais fria é avermelhada, como Betelgeuse, também em Orion. Nossa estrela, o Sol, a quase  $6000^{\circ}\text{K}$ , é amarela.



Este diagrama mostra a luminosidade de um corpo em função do comprimento de onda. Quanto mais frio o corpo, mais o pico de luminosidade se move para comprimentos de onda mais longos.



Foto de um gato tirada com uma câmera térmica, sensível no infravermelho. Como o nariz é mais frio, ele aparece menos luminoso.

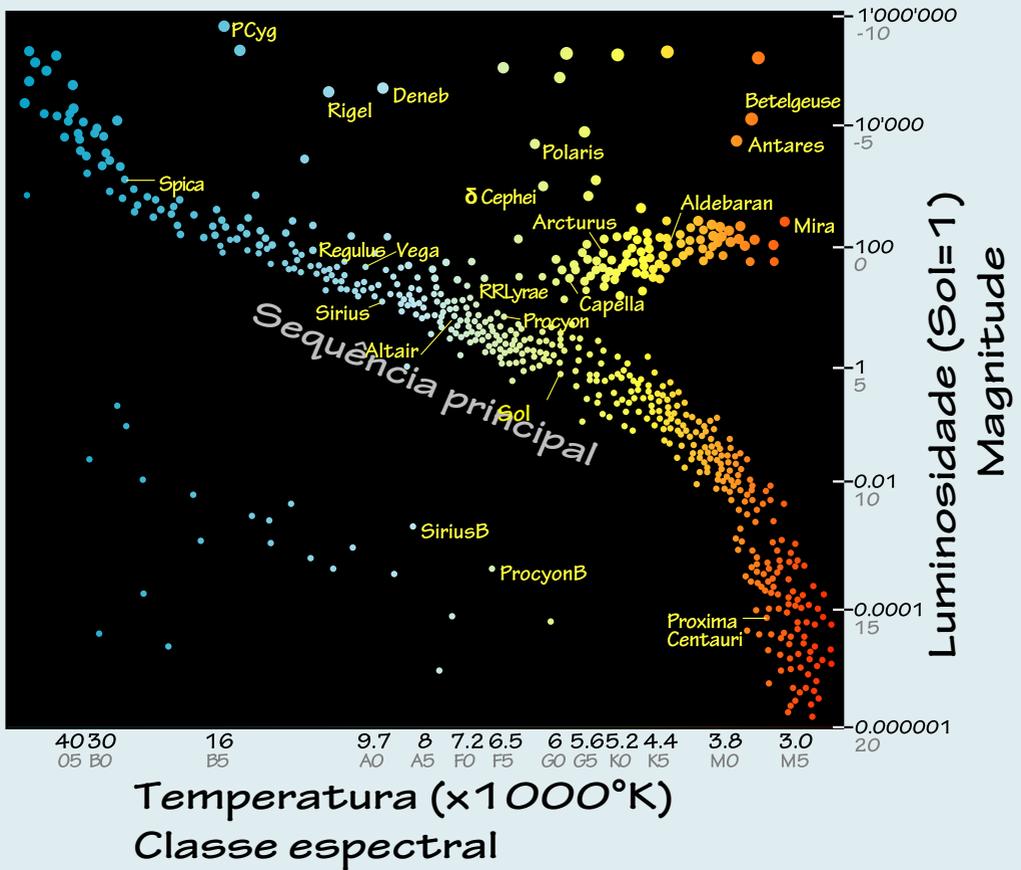
# Por quê as estrelas brilham

Há muito tempo nos perguntamos o que faz o Sol brilhar. Ele queima carvão? Ele passa por reações químicas? Finalmente percebemos que o Sol brilha porque é feito de gás muito quente, que é luminoso na luz visível.

Dependendo de sua temperatura, os corpos atingem o pico de luminosidade em diferentes comprimentos de onda. O diagrama ao lado mostra a luminosidade em função do comprimento de onda. As estrelas brilham mais na luz visível.

Os seres vivos também são luminosos, mas no infravermelho. Se compararmos a energia que um gato emite por unidade de massa, ela é 5.000 vezes maior do que a emitida pelo Sol por unidade de massa, pois as reações químicas (nosso metabolismo) são mais eficientes na produção de calor.

# Diagrama de luminosidade versus temperatura de estrelas na vizinhança do Sol.



Durante sua vida útil, as estrelas se movem neste diagrama. A sequência principal é onde elas permanecem por mais tempo.

Tipo espectral	Temperatura (°K)	% de estrelas
O	>30 000	0.05
B	9 700-30 000	0.13
A	7 200-9 700	0.6
F	6 000-7 200	3
G	5 200-6 000	7.6
K	3 800-5 200	12.1
M	2 500-3 800	76.5

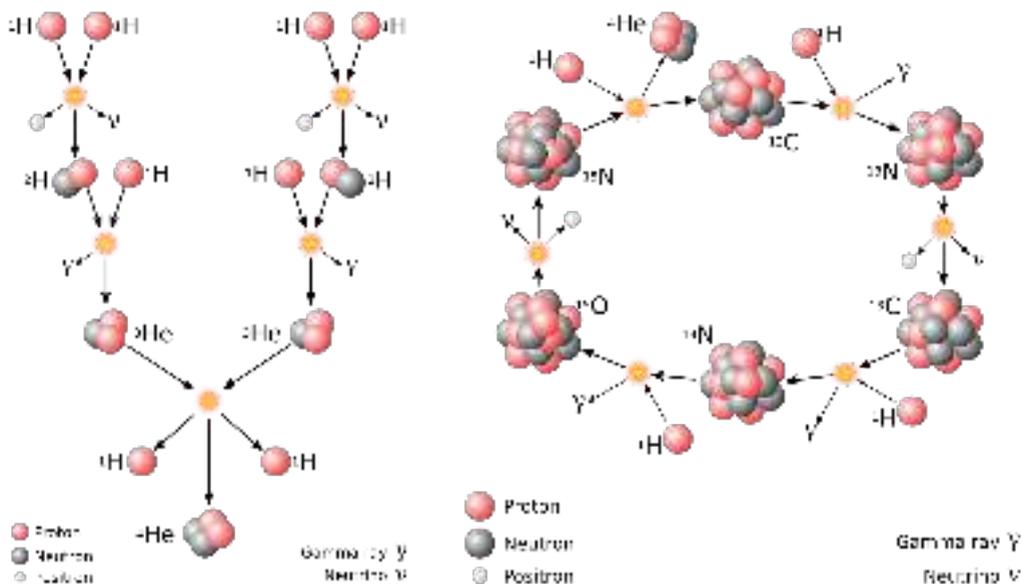
## A sequência principal

Quando plotamos as estrelas em um diagrama de luminosidade versus temperatura, vemos que 90% delas estão em uma grande linha diagonal chamada Sequência Principal. Isso mostra que, para a maioria das estrelas, existe uma ligação entre luminosidade e temperatura: as estrelas mais luminosas também são as mais quentes.

As estrelas são classificadas de acordo com seu tipo espectral, definido pela presença e intensidade de suas linhas espectrais (ver TUIMP 30), que são uma função de sua temperatura superficial (e, portanto, sua cor): O, B, A, F, G, K, M, do mais quente ao mais frio. Cada classe vai de O a 9. As estrelas O e B são as mais raras. Na verdade, essas estrelas de mais de 8 massas solares representam apenas 0,18% de todas as estrelas.

O Sol é da classe G2.

# Formação de hélio por cadeias próton-próton ou o ciclo CNO

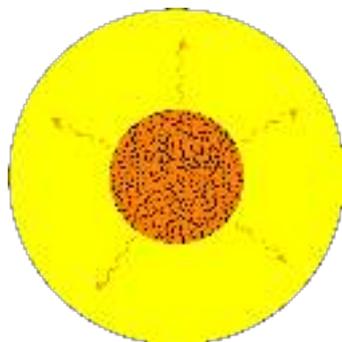


Quando a radiação não é mais um meio eficiente de transportar energia, a matéria se move, como a água fervendo em uma panela: isso é convecção.



Estrela de baixa massa  
( $< 1,3 M_{sol}$ )

Estrela de alta massa  
( $> 1,3 M_{sol}$ )



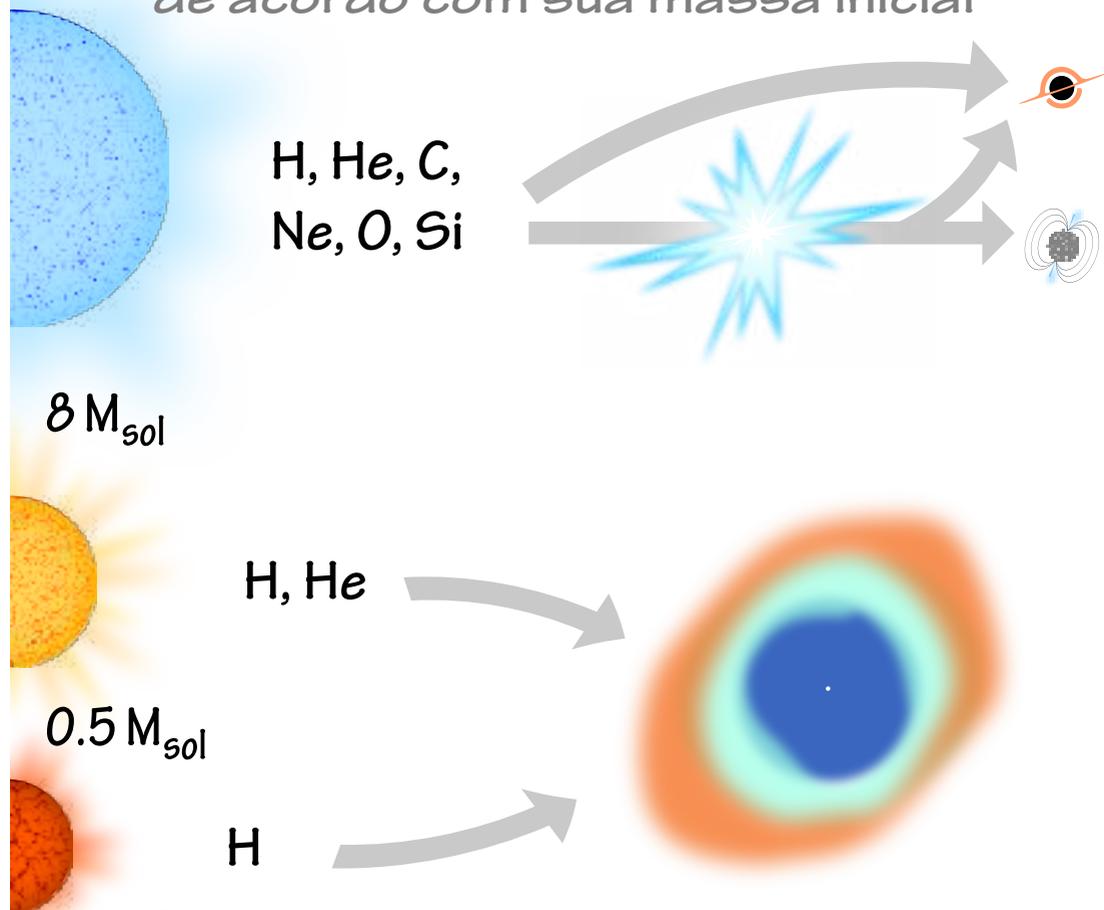
Como as intensidades de suas reações nucleares são muito diferentes, as estrelas de baixa massa têm núcleo radiativo e envelope convectivo, enquanto as de alta massa têm núcleo convectivo e envelope radiativo.

# Tudo acontece no núcleo

Observamos a superfície das estrelas, mas tudo o que determina sua evolução ocorre em seu núcleo. Este é aquecido a vários milhões de graus pela contração gravitacional, o que é quente o suficiente para desencadear reações nucleares.

Essas reações sustentam a estrela porque a energia que geram produz uma pressão que contraria a gravidade. As reações nucleares que transformam hidrogênio em hélio (ver TUIMP 14) sustentam a estrela por 90% de sua vida. Estrelas de menor massa fundem prótons para formar hélio (cadeias próton-próton). Estrelas de maior massa usam os núcleos de carbono, nitrogênio e oxigênio como catalisadores (ciclo CNO), o que lhes permite gerar muito mais energia, mas com uma vida útil muito mais curta.

# Gráfico da evolução das estrelas de acordo com sua massa inicial



Estrelas pouco massivas terminam suas vidas como anãs brancas cercadas por uma nebulosa planetária. As com menos de  $0,5 M_{sol}$  queimam apenas hidrogênio, enquanto aquelas com massa entre  $0,5$  e  $8 M_{sol}$  também queimam hélio.

Estrelas com mais de  $8$  massas solares fundem átomos ainda maiores, como C, Ne, O e Si. Elas eventualmente explodem como supernovas ou colapsam diretamente em um buraco negro.

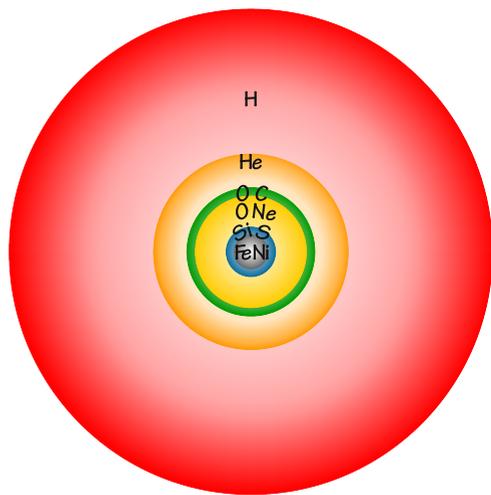
# Como as estrelas evoluem

Quando o hidrogênio no núcleo se esgota, este se contrai, aumentando a temperatura até iniciar a fusão do hélio. Essa contração libera energia gravitacional, fazendo com que o envelope se expanda e a estrela se torne uma gigante vermelha. Quando o hélio acaba, o núcleo volta a contrair.

Para estrelas com menos de 8 massas solares, este é o fim da evolução. Seu núcleo se torna uma anã branca e não evolui mais. Ele esfria lentamente, enquanto a atmosfera se torna uma nebulosa planetária (ver TUIMP 36).

Estrelas massivas, por outro lado, atingem temperaturas muito altas em seus núcleos e passam por uma série de fases de fusão, intercaladas com fases de contração. A evolução de estrelas massivas termina em explosões de supernova ou colapso direto em um buraco negro.

As reações nucleares de fases sucessivas ocorrem cada vez mais profundamente nos núcleos de estrelas massivas. No final de sua evolução, as estrelas têm uma estrutura em forma de cebola, com múltiplas camadas.



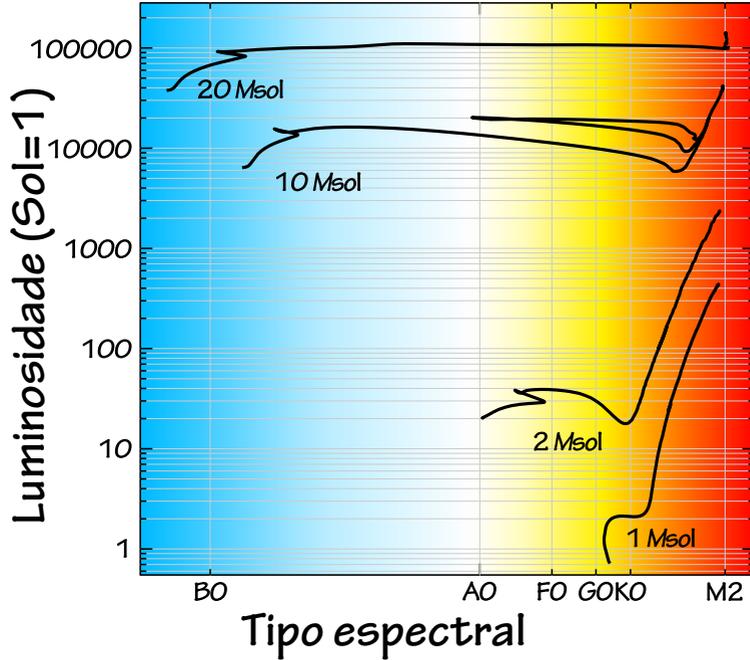
Todos os elementos pesados são produzidos em estrelas. Esta tabela mostra em qual tipo de estrela (após C. Kobayashi 2020).

1 H		Big Bang 										Espalação 						2 He																			
3 Li		4 Be		Supernova e estrelas de nêutrons 										Estrelas massivas 						5 B		6 C		7 N		8 O		9 F		10 Ne							
11 Na		12 Mg		Estrelas de pequena massa 										Explosão de anãs brancas 						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	-71	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	89 -92																	
		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																																

## As estrelas: fábricas de elementos

Depois de queimar hidrogênio e hélio em seus núcleos, as estrelas mais massivas usam carbono, neônio, oxigênio e silício como combustível, formando elementos cada vez mais pesados e mais no centro de seus núcleos. A evolução acelera à medida que a estrela produz mais e mais neutrinos, que carregam a energia gerada no núcleo sem aquecer a estrela. O carbono se esgota em alguns milhares de anos, enquanto o silício pode sustentar a estrela por apenas alguns dias!

Alguns dos elementos produzidos nos núcleos estelares são ejetados no meio interestelar por nebulosas planetárias ou supernovas. Outros permanecem para sempre aprisionados em anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros e não participam da evolução química do Universo.

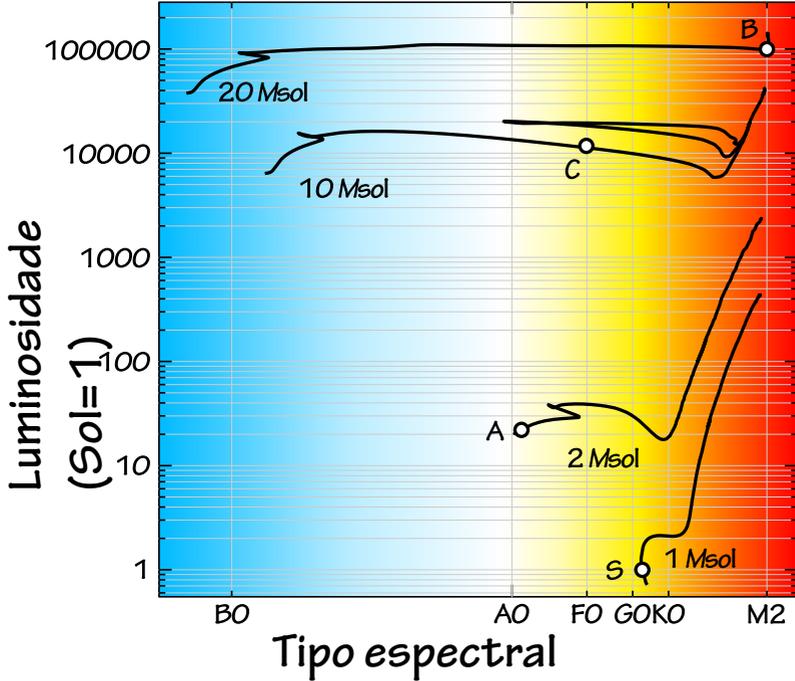


# Quiz

Este diagrama mostra a evolução de estrelas de 1, 2, 10 e 20 massas solares. Coloque as seguintes estrelas nele:

	Luminosidade	Tipo espectral
Sol	1	G2
Sirius A	25	A1
Canopus	13600	F0
Betelgeuse	105000	M2

- 1) Qual é a mais fria dessas estrelas? A mais quente?
- 2) Quais são as massas dessas estrelas?
- 3) Quais não terminaram de queimar todo o hidrogênio em seu núcleo?
- 4) Quais estrelas se tornarão supernovas?
- 5) Qual estrela viverá mais?



## Respostas

No diagrama, as posições do Sol, Sirius A, Betelgeuse e Canopus são representadas pelas letras S, A, B e C.

Respostas às perguntas:

- 1) Betelgeuse. Sirius A.
- 2) 1, 2, 10, 20 massas solares.
- 3) O Sol e Sirius A.
- 4) Betelgeuse e Canopus.
- 5) O Sol.

## O Universo no meu bolso No. 29

Sylvia Ekström, do Observatório de Genebra, é a autora deste livrinho, escrito em 2025. O livrinho foi revisado por Grażyna Stasińska do Observatório de Paris e Stan Kurtz do IRyA (Morelia, México).

Imagem da capa: Um vislumbre do interior do Sol. O núcleo superaquecido gera energia através de reações nucleares. O envelope é agitado por convecção como água em uma panela. Todas as imagens neste livreto são de Sylvia Ekström, exceto pelas cadeias de reação na página 8 (Wikimedia Commons) e a foto do gato.



Para saber mais sobre esta série e os assuntos abordados neste livrinho, visite <http://www.tuimp.org>.

Tradução: Fábio Herpich  
TUIMP Creative Commons

