

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DE UMA ESTRELA DA MASSA DO SOL

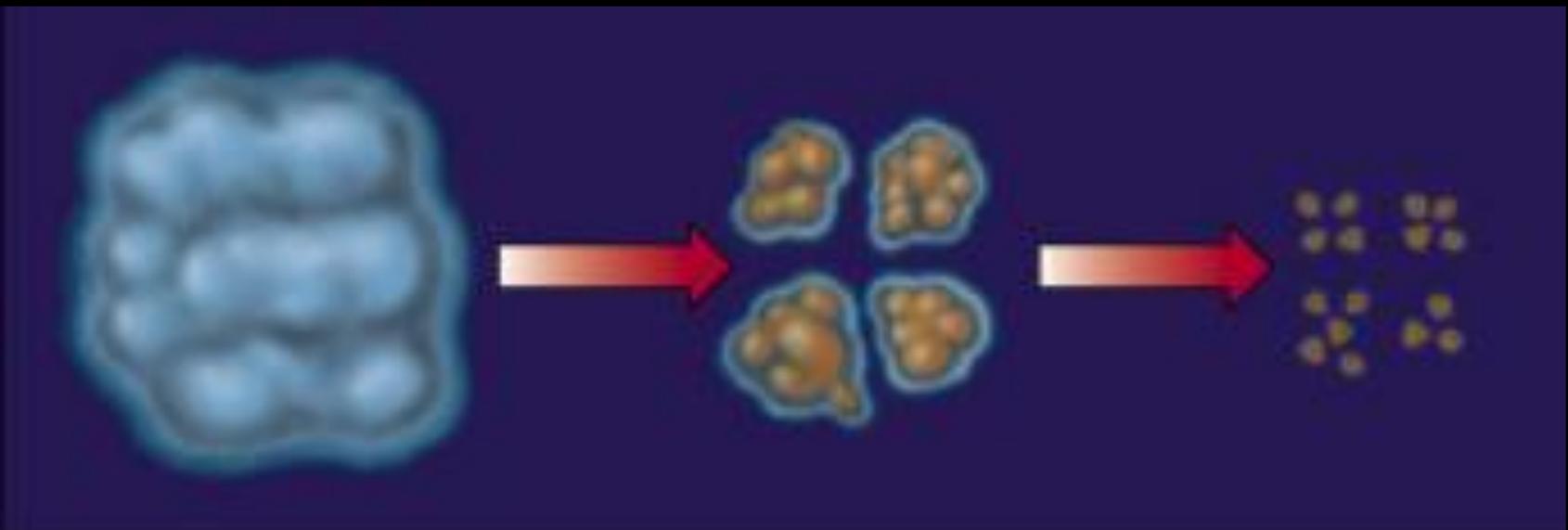
ESTÁGIO 1 : NUVEM INTERESTELAR

As condições melhores para se formar estrelas são encontradas nos **centros de nuvens escuras de poeira ou moleculares**.

Estas nuvens são bastante grandes ($\sim 10^{15}$ km), possuem temperaturas da ordem de **10 K** e densidades de **10^9 partículas/m³**.

ESTÁGIO 1

1. Uma massa grande da nuvem começa a se contrair
2. Devido a instabilidades gravitacionais, esta massa grande pode se fragmentar em pedaços menores
3. Cada um dos fragmentos podem colapsar e continuar a fragmentar, e eventualmente formar dezenas ou centenas de estrelas
4. ESTE ESTÁGIO LEVA UNS POUCOS MILHÕES DE ANOS



Todas as estrelas formam-se em grupo.

Quando se encontram isoladas como o Sol por exemplo, provavelmente escaparam de seu grupo por um desvio na sua órbita por algum encontro com um objeto maior.

ESTÁGIO 2 : O COLAPSO DE UM FRAGMENTO ISOLADO

Neste estágio um fragmento, que está para formar uma estrela como o Sol, possui as seguintes características:

1. um tamanho de ~ 100 vezes o sistema solar.
2. densidade central é da ordem de 10^{12} partículas/m³
3. temperatura central de 100 K.
(colapso isotérmico)

A temperatura na borda do fragmento não difere da nuvem original (10 K).

O fragmento que colapsa ainda tem a possibilidade de se dividir em mais fragmentos

O ESTÁGIO LEVA UNS **30.000 ANOS**



ESTÁGIO 3 : FRAGMENTAÇÃO CESSA

O processo de divisão pára quando o colapso se torna adiabático = densidade central do fragmento é grande o suficiente para que a radiação produzida pelo calor em seu interior não escape livremente = aumento adiabático da T.

As características do fragmento agora são:

1. um tamanho de ~ o sistema solar.
2. Interior opaco à radiação eleva a T central=10.000 K
3. Densidade central de 10^{18} partículas/m³ (ainda 10^{-9} kg/m³)

4. Nuvem rotante produz um disco : colapso ocorre mais facilmente paralelo ao eixo de rotação



ESTÁGIO 3 : FRAGMENTAÇÃO CESSA

ESTÁGIO LEVA UNS **100.000 ANOS**

A região central é chamada de PROTO-ESTRELA

Formação do disco permite a acreção de matéria na região central e a continuidade do colapso



ESTÁGIO 4 : PROTO-ESTRELA

Dá para distinguir a fotosfera da proto-estrela e a parte central mais densa.

1. O tamanho é ~ o da órbita de Mercúrio
2. Temperatura central = 10^6 K (ainda menor do que a necessária para ocorrer a fusão do H).
3. A proto-estrela continua se contraindo e a T da fotosfera aumenta até uns 3000 K.

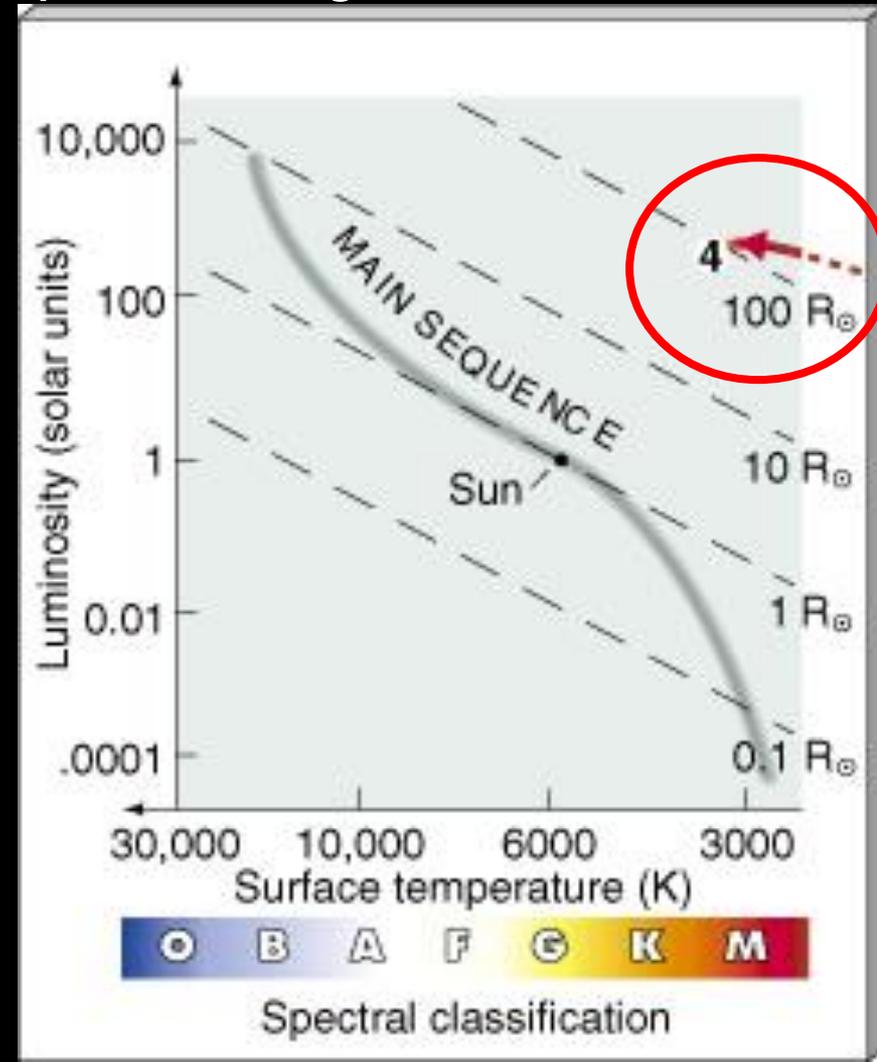


ESTÁGIO 4 : PROTO-ESTRELA

Sabendo o raio e a temperatura superficial da proto-estrela, dá para determinar sua luminosidade e por no diagrama HR

O tamanho e a luminosidade da proto-estrela são bem maiores do que a estrela que ela formará (Sol).

**DURAÇÃO DA FASE 4
É DE 1 MILHÃO DE ANOS.**

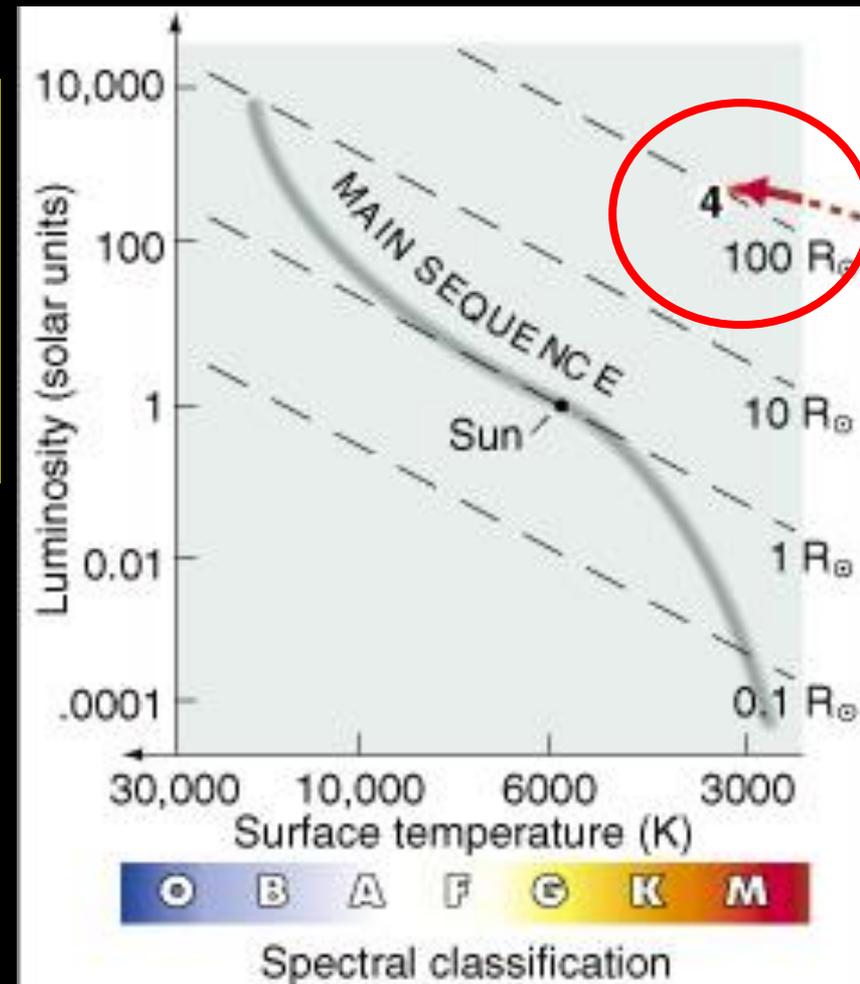


ESTÁGIO 4 : PROTO-ESTRELA

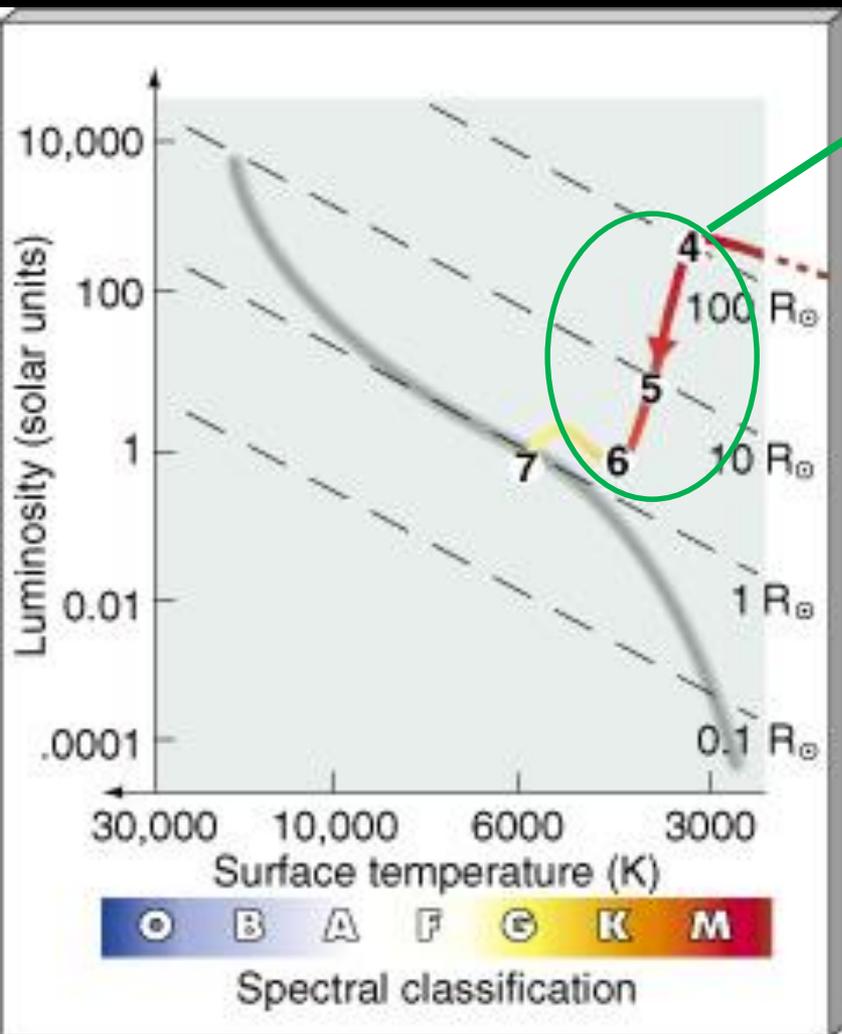
A luminosidade da proto-estrela é dominada pela transformação da energia gravitacional de colapso em energia térmica a medida que a proto-estrela se contrai \Rightarrow luminosidade de colapso

A trajetória vermelha no diagrama HR é o caminho seguido pelo fragmento de nuvem desde o estágio 3 (fragmentação cessa) até o 4. Esta fase é chamada de **contração de Kelvin-Helmholtz**.

Mesmo com a alta T do centro a $P_{\text{gás}}$ não consegue conter o colapso gravitacional, e a proto-estrela continua a se contrair.



ESTÁGIO 5 : EVOLUÇÃO DA PROTO-ESTRELA



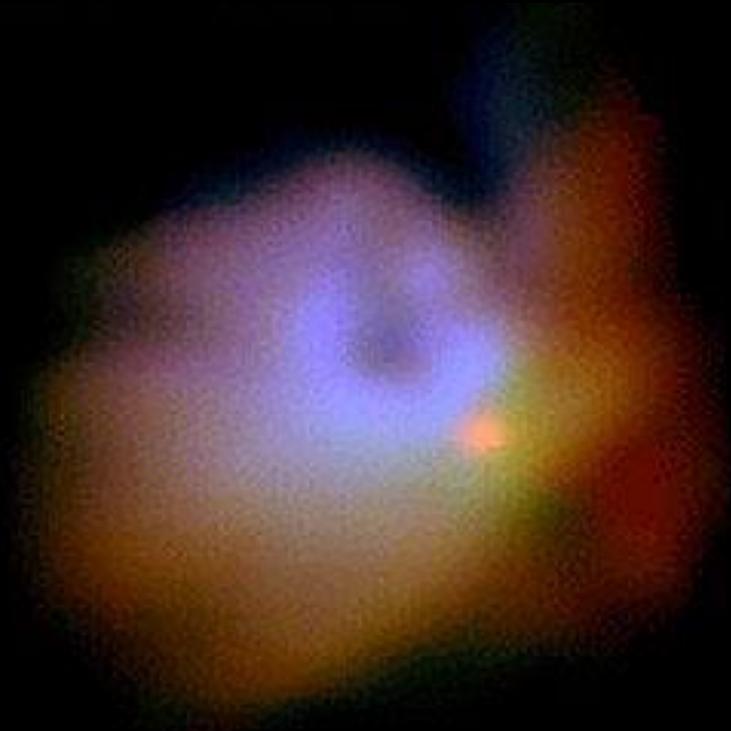
A proto-estrela segue de 4 a 6 diminuindo de tamanho, com uma T superficial \sim constante e se torna menos luminosa a medida que contrai (mais opaca).

ESTE CAMINHO EVOLUTIVO É CHAMADO DE **TRAJETÓRIA DE HAYASHI**.

Em 5 a T central atinge 5 milhões de K \Rightarrow contração começa a ser freada aos poucos.

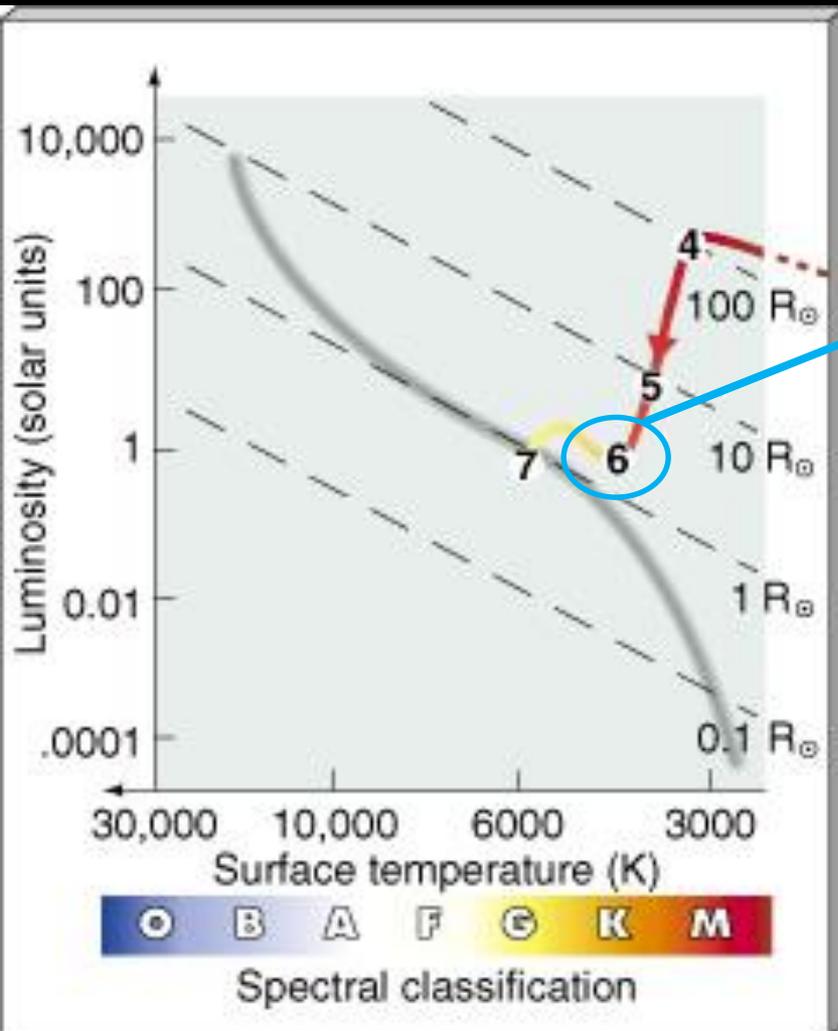
DURAÇÃO DA FASE 5 É DE 10 MILHÕES DE ANOS.

Fase de Proto-estrela T Tauri : exibem atividades violentas em sua superfície que resultam em densos e fortes ventos proto-estelares (bem maiores do que os ventos solares).



Proto-estrelas T Tauri são encontradas somente em nebulosas ou aglomerados bem jovens de estrelas.

ESTÁGIO 6 : NASCE UMA ESTRELA

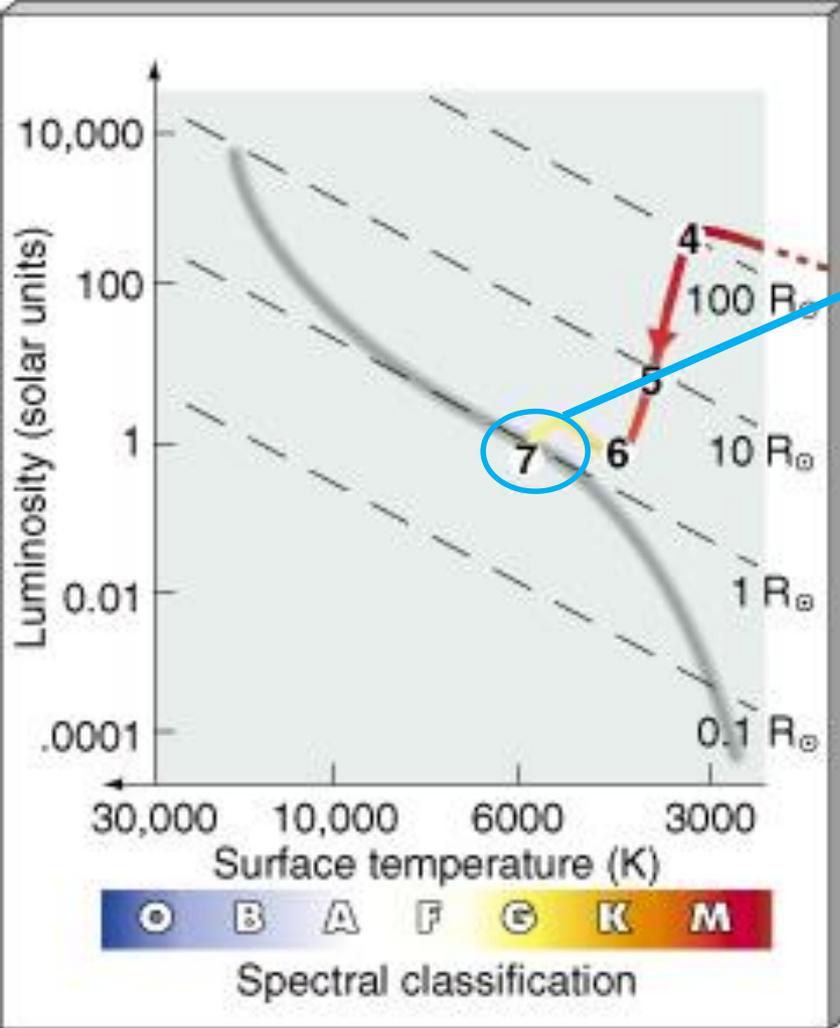


A T CENTRAL ATINGE OS 10 MILHÕES DE K \Rightarrow AS REAÇÕES DE FUSÃO NUCLEAR (CADEIA P-P) COMEÇAM A DOMINAR A LUMINOSIDADE.

A CONTRAÇÃO DIMINUI BASTANTE MAS NÃO PÁRA TOTALMENTE.

DURAÇÃO DA FASE 6 É DE 30 MILHÕES DE ANOS.

ESTÁGIO 7 : O COMEÇO DA EVOLUÇÃO NA SEQUÊNCIA PRINCIPAL (SP)



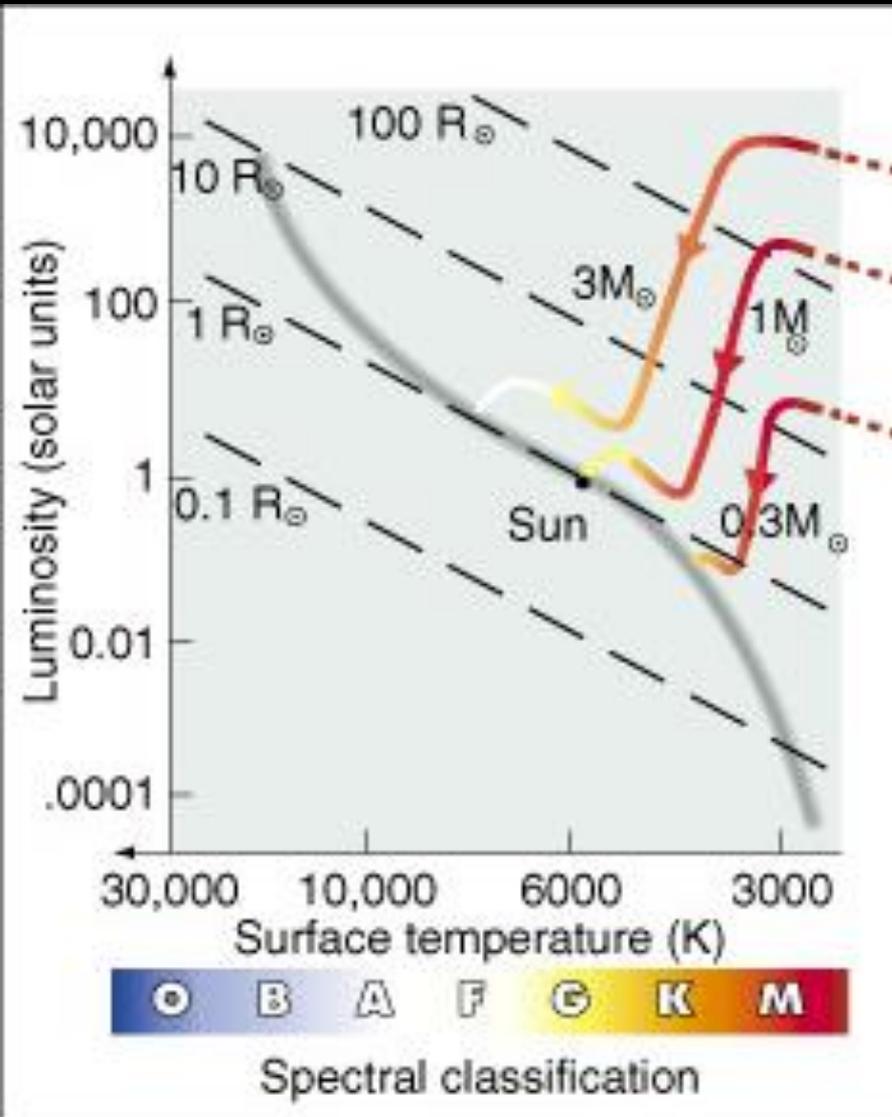
A T CENTRAL ATINGE OS 15 MILHÕES DE K ⇒ AS REAÇÕES DE FUSÃO NUCLEAR SÃO ESTÁVEIS NO NÚCLEO, E A CONTRAÇÃO FINALMENTE PÁRA.

GRAVIDADE E PRESSÃO DE RADIAÇÃO ESTÃO AGORA EM EQUILÍBRIO.

RESUMO DA EVOLUÇÃO PRÉ-ESTELAR DE UMA ESTRELA DO TIPO DO SOL

ESTÁGIO	TEMPO ATÉ O PRÓXIMO ESTÁGIO (ANOS)	T CENTRAL (K)	T SUPERF. (K)	DENSIDADE CENTRAL (PARTÍCULAS/M ³)	DIÂMETRO (KM)	OBJETO
1	2×10^6	10	10	10^9	10^{14}	NUVEM INTERESTELAR
2	3×10^4	100	10	10^{12}	10^{12}	FRAG. DE NUVEM
3	10^5	10.000	100	10^{18}	10^{10}	FRAG. DE NUVEM
4	10^6	10^6	3000	10^{24}	10^8	PROTO-ESTRELA
5	10^7	5×10^6	4000	10^{28}	10^7	PROTO-ESTRELA
6	3×10^7	10×10^6	4500	10^{31}	2×10^6	ESTRELA
7	10^{10}	15×10^6	6000	10^{32} (10^5 kg/m^3)	1.5×10^6	ESTRELA DE SP

ESTRELAS DE OUTRAS MASSAS

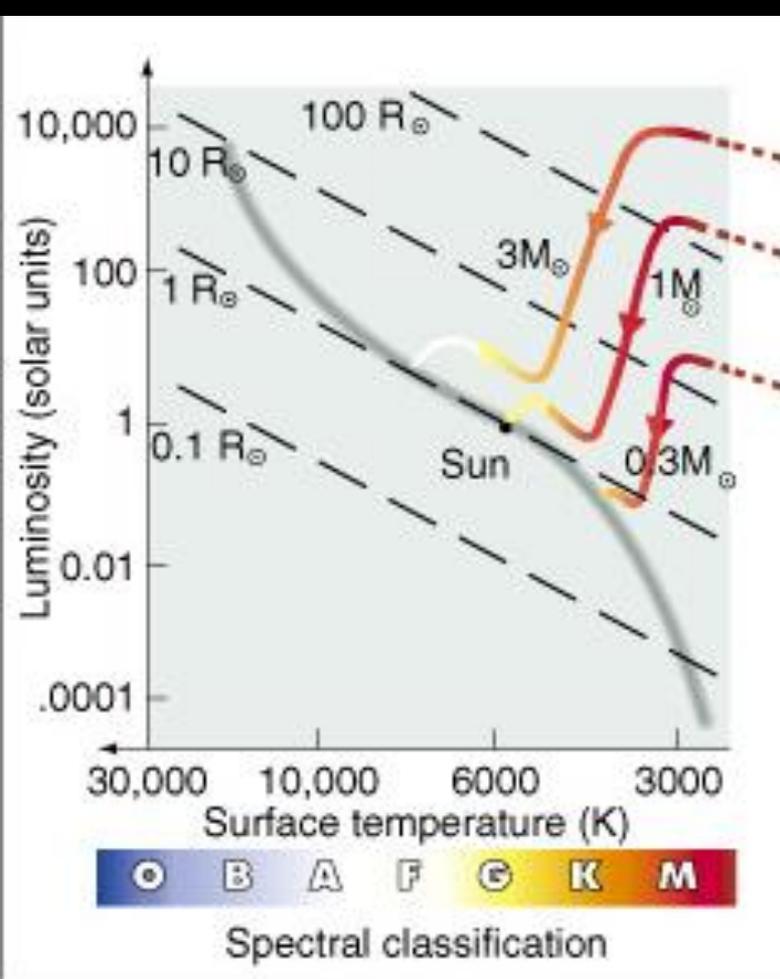


~ 1 milhão de anos

~ 40 milhões de anos

~ 1 bilhão de anos

Quanto maior a massa da estrela a ser formada, mais rápido ela evolui da fase proto-estrela até estrela de sequência principal.



A SEQUENCIA PRINCIPAL é o ponto na qual a estrela passa a maior parte da vida dela, transformando hidrogênio em hélio no seu núcleo (CADEIA P-P ou ciclo CNO).

Cada diferente ponto da sequência principal significa uma diferente massa

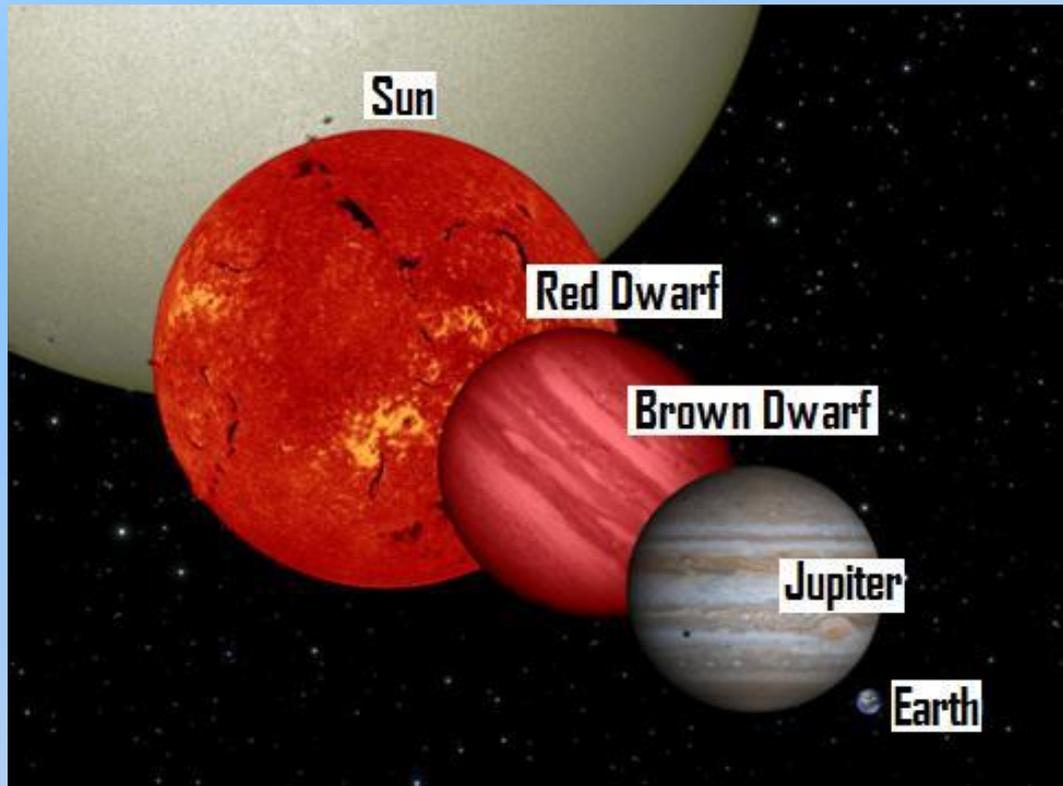
A MASSA É A PRINCIPAL QUANTIDADE QUE DETERMINA SE ESTRELAS SERÃO FORMADAS OU NÃO, E CASO SEJAM FORMADAS, QUAL O SEU TEMPO DE EVOLUÇÃO

FAILED STARS

QUANDO A MASSA DE UM FRAGMENTO DE NUVEM É MUITO PEQUENA: TEMPERATURAS INTERNAS NÃO ATINGEM O VALOR NECESSÁRIO PARA INICIAR A CADEIA P-P.



ANÃS MARRONS E JÚPITERES

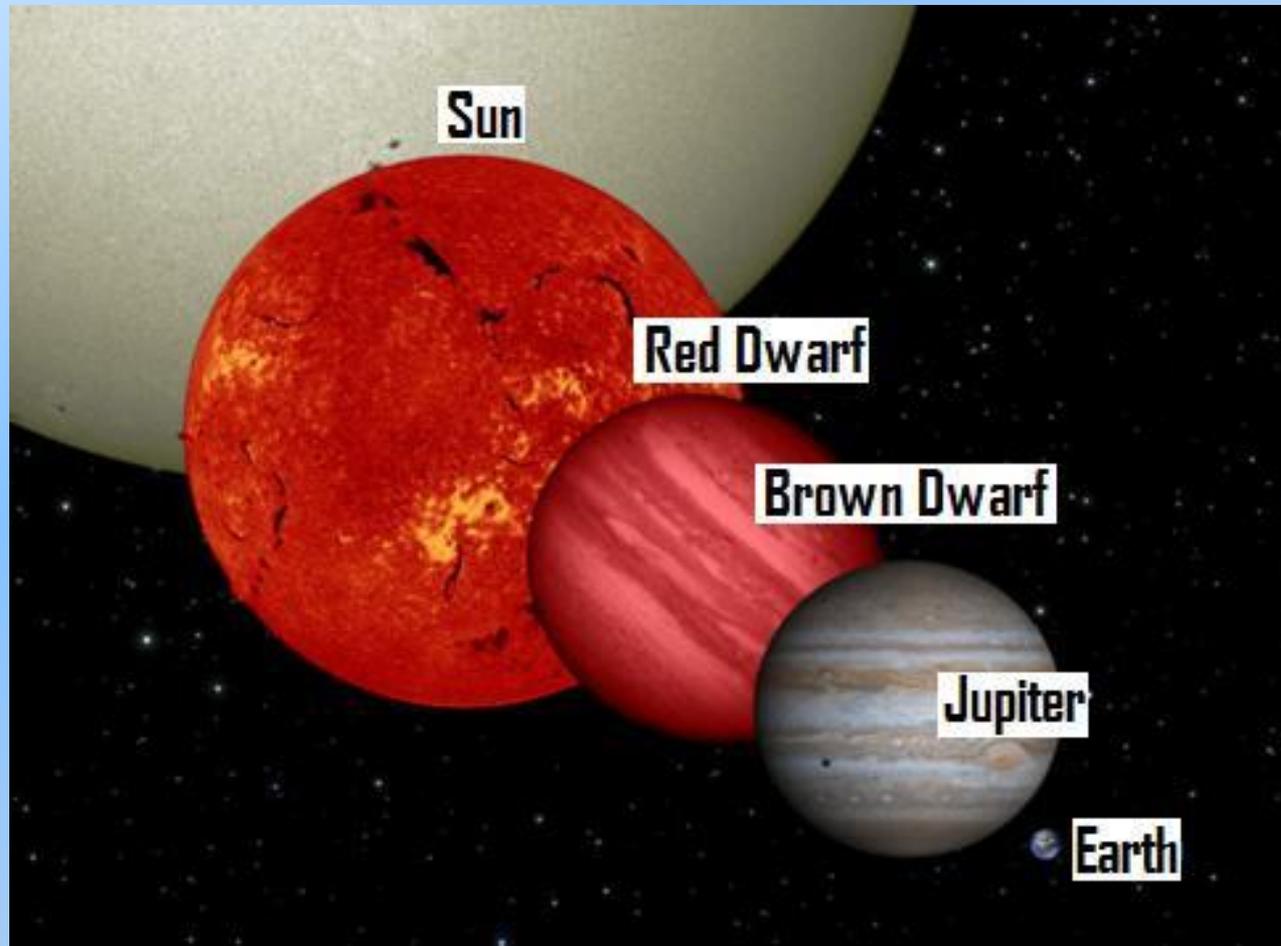


EXEMPLO: O PLANETA JÚPITER

- SEU CALOR É AINDA DETECTÁVEL

Transf. de energia de
colapso em energia
térmica

- SEU EQUILÍBRIO É ALCANÇADO POR CALOR E ROTAÇÃO ANTES QUE AS TEMPERATURAS INTERNAS ATINJAM VALORES PARA A IGNIÇÃO DAS REAÇÕES DE FUSÃO.



Anãs marrons: $13 M_{\text{júpiter}} < m < 80 M_{\text{júpiter}}$

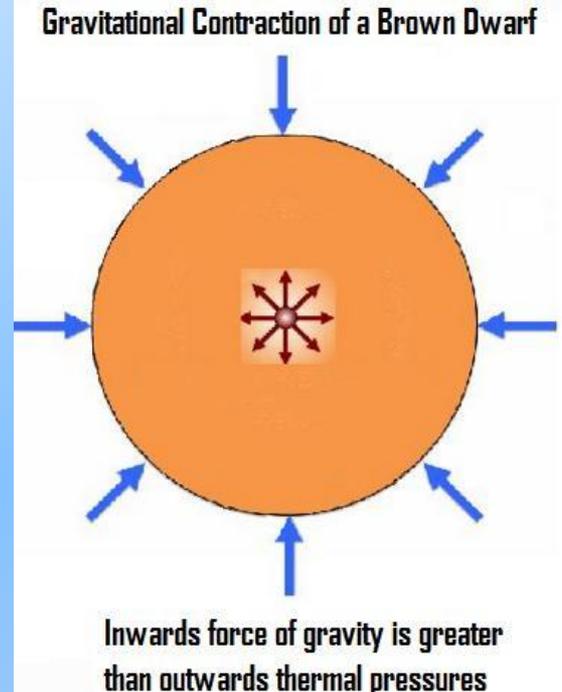
Não atingem T suficiente para a cadeia p-p

EXPERIMENTAM UMA FASE BREVE DE FUSÃO DE DEUTÉRIO E AS DE MAIS ALTA MASSA EVENTUALMENTE APRESENTAM FUSÃO DE LÍTIO.

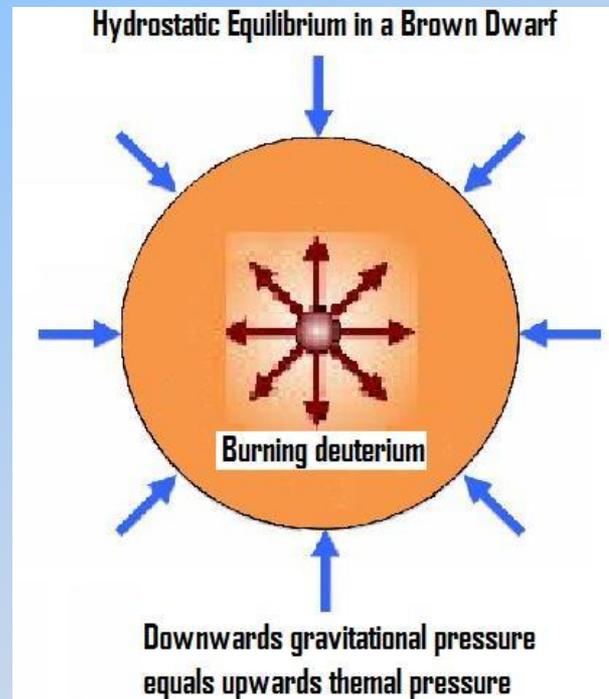
Até $80 M_{\text{júpiter}}$: não atinge T para fusão do H

Limite de $13 M_{\text{júpiter}}$: atinge T para fusão do ^2H

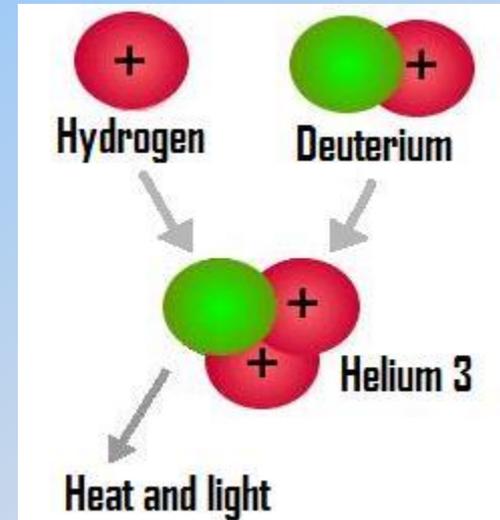
**A contração segue até a
T central atingir $\sim 10^6$ K**



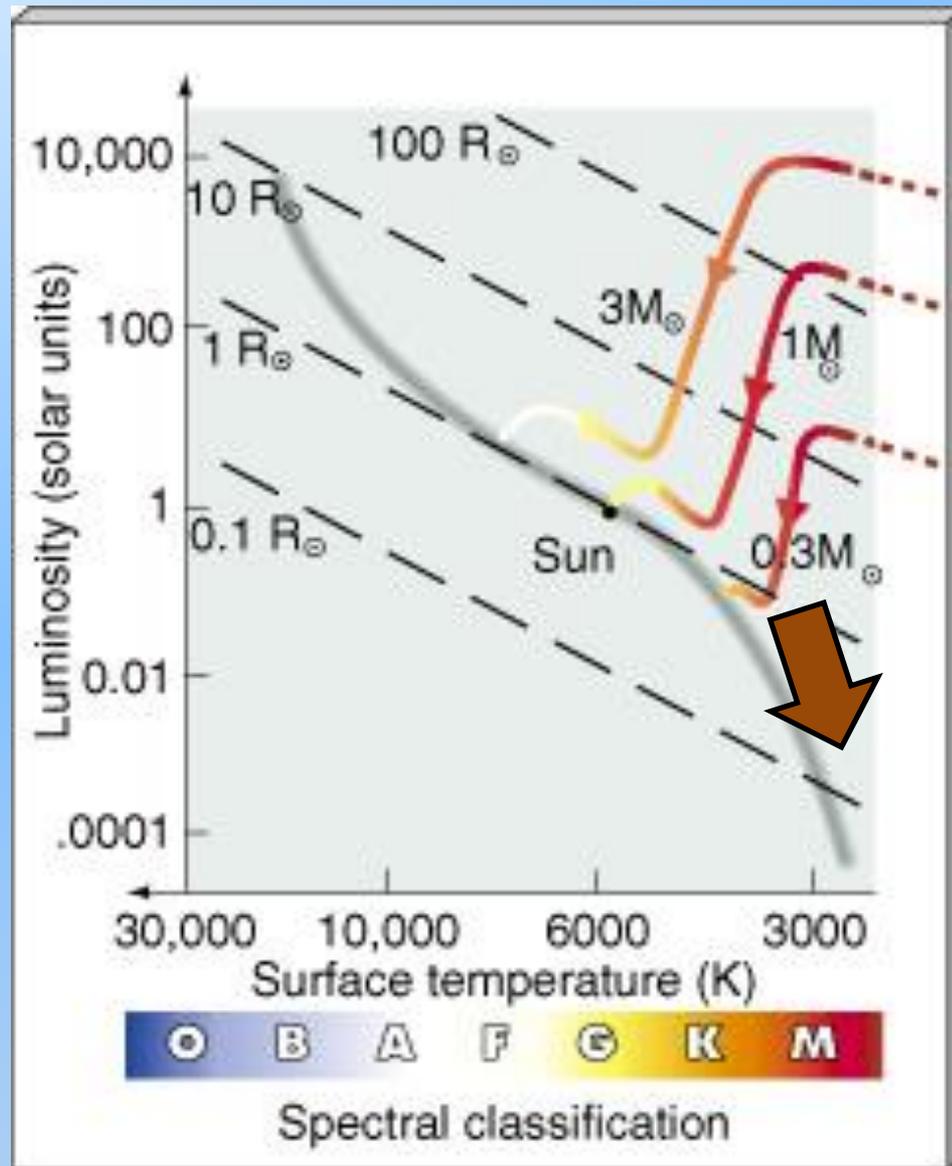
**A fusão do ^2H pára a
contração \Rightarrow anã
marrom brilha.**



Anã marrom de classe M
 $T_{\text{eff}} \sim 2100\text{K}$ a 3500K



Anã marrom de 60 M_J : $T_{\text{eff}} \sim 2800 \text{ K}$, $L \sim 10^{-3} L_{\odot}$



A fusão de Deutério ocorre durante ~ 10 milhões de anos

Quando acabam as reações de fusão do ^2H ou ^7Li



a contração da anã marrom recomeça



supercompressão da matéria no núcleo



**Comportamento de gás
degenerado**

Princípio da exclusão de Pauli e da incerteza dominam o comportamento de um gás degenerado:

- a) Dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico (mesma velocidade, mesma posição e mesmo spin) no mesmo volume.
- b) O produto da incerteza na posição e no momentum linear de um elétron não pode ser inferior a constante de Planck : $\Delta p \times \Delta x \geq h$

Elétrons são comprimidos em um volume pequeno

⇒ **baixa incerteza em suas posições : Δx**

⇒ **alta incerteza no momentum linear: Δp**

Mesmo um gás a T baixa mas altamente comprimido: os elétrons podem se mover a velocidades médias muito altas, ocupando níveis de energia mais altos (níveis mais baixos preenchidos totalmente)

comportamento do gás ⇒ INDEPENDENTE DE T

A pressão de degenerescência depende somente do estado de energia dos elétrons degenerados, não da temperatura do gás!

Elétrons de alta energia ocupam níveis eletrônicos mais altos.

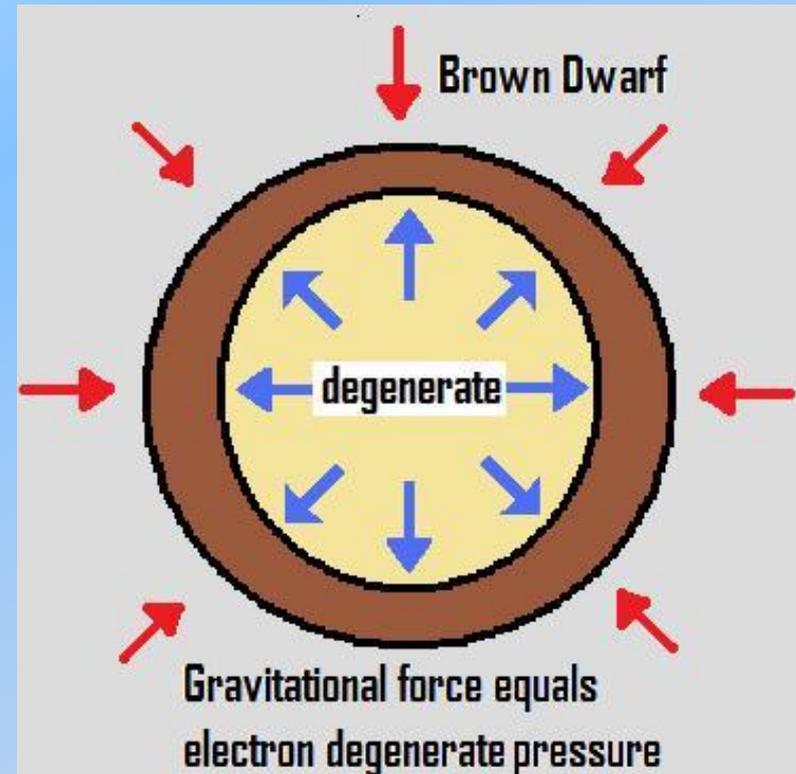


PRESSÃO DE DEGENERESCÊNCIA DE ELÉTRONS



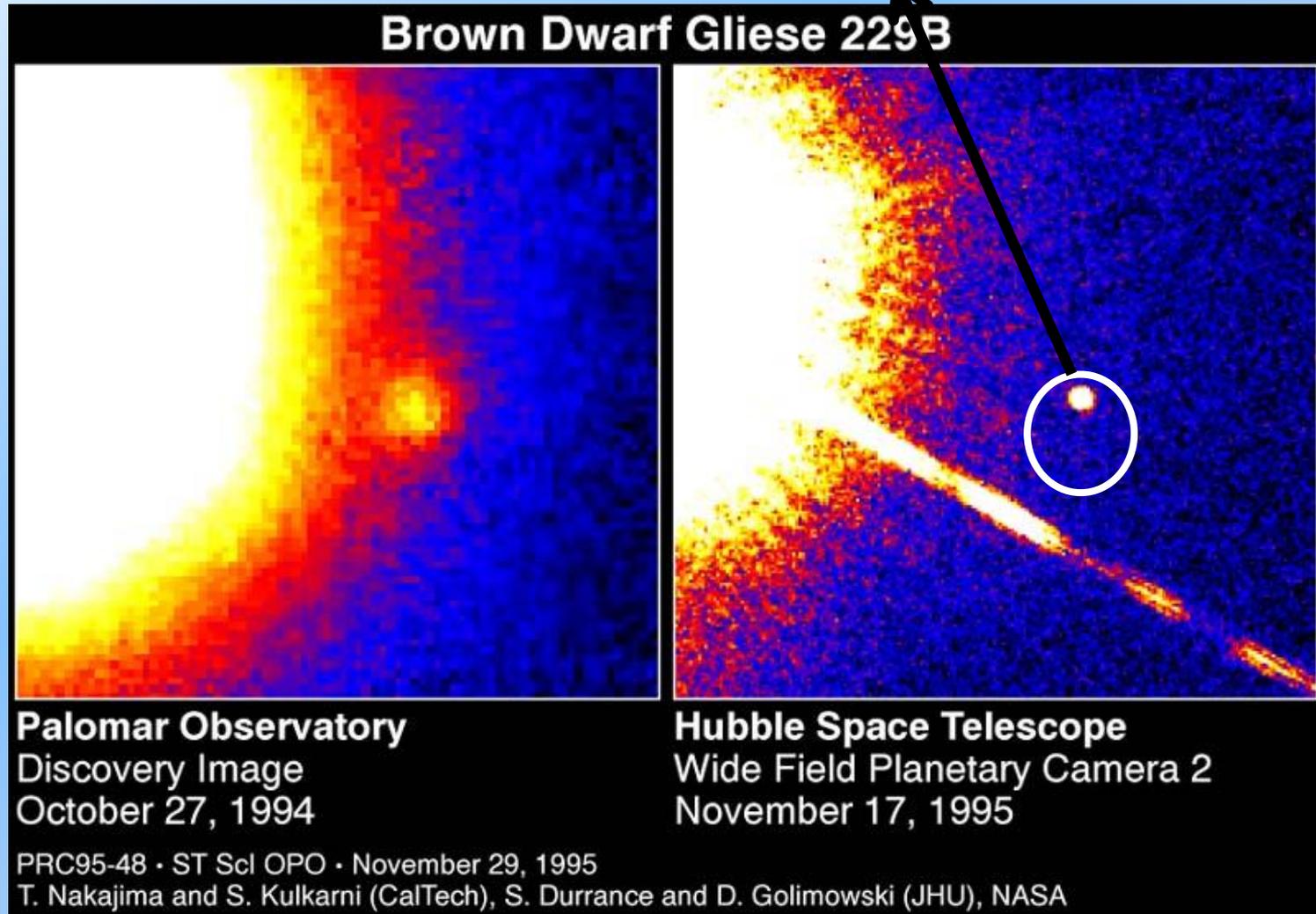
**a contração vai diminuindo
a luminosidade gerada pela contração gravitacional
diminui gradativamente.**

Contração pára quando a pressão de elétrons degenerados contrabalança a pressão gravitacional do colapso



Anã marrom é mantida por pressão de elétrons degenerados

Gliese 229
anã marron de cerca de 50 × massa de Júpiter



Estrela maior = estrela tipo M