

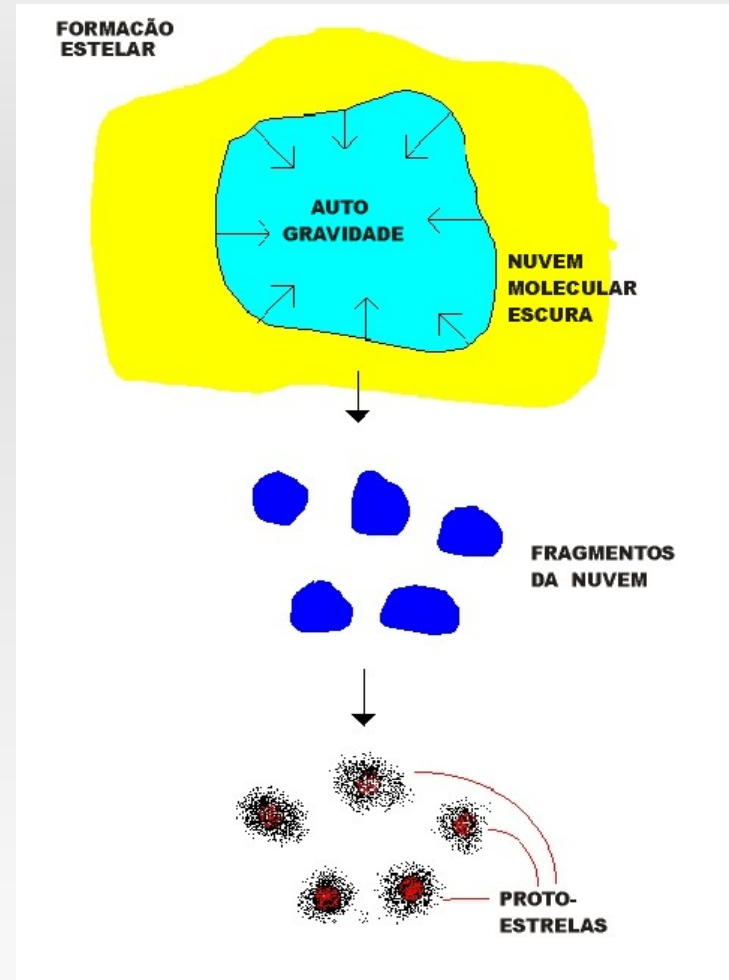
Introdução à Astronomia

Evolução Estelar e A Via-Láctea

Rogério Riffel

Formação estelar

- Estrelas se formam dentro de concentrações relativamente densas de gás e poeira interestelar (nuvens moleculares).
- Temperatura 10-20 K (favorece a aglomeração e formação de CO e H₂);
- A massa destas regiões é da ordem de 10⁵ Massas Solares;
- A densidade é de 10⁻²⁴g/m⁻³;
- A formação estelar inicia quando as regiões mais densas colapsam devido a auto-gravidade;
- O colapso é Isotérmico;



Formação estelar: Critério de Jeans

- O tempo de colapso é da ordem de 100 milhões de anos;

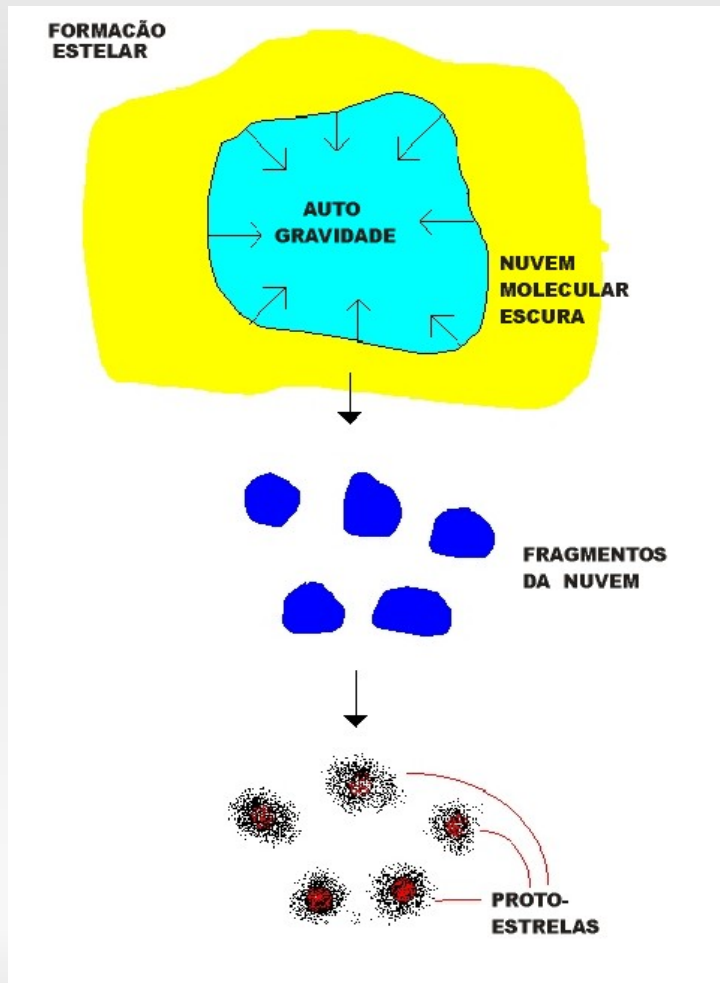
$$M_J = 1,2 \times 10^5 M_{\odot} \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\rho}{10^{-24} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{3}{2}}$$

Peso molecular médio ~1

- É uma equação pesada para valores típicos.
- Por que não são formadas 100 000 estrelas de uma única região?

Formação estelar: Proto-estrela

R: Ocorre a fragmentação da nuvem



Uma vez que um fragmento se destaca das outras partes da região de formação estelar, podemos considerá-lo como um objeto bem definido, com identidade própria e campo gravitacional destacado do restante da nuvem.

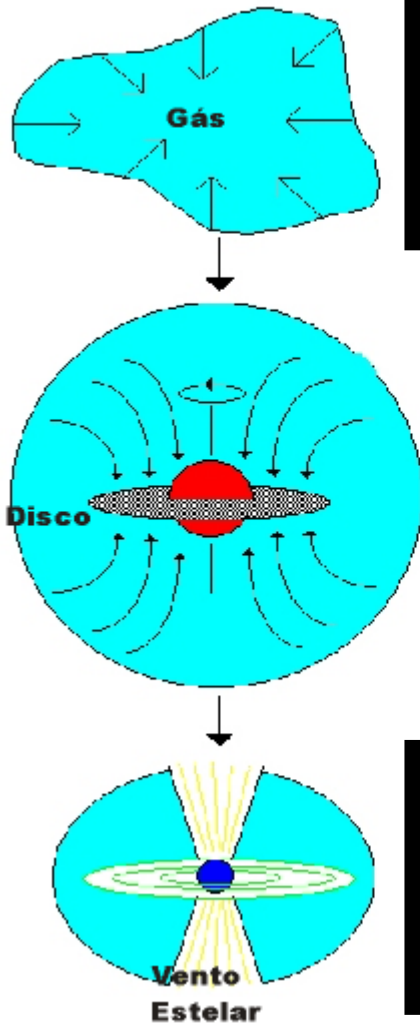
- Proto-estrela;

Leia mais em:

http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/formation/form_st.htm

Formação estelar: Proto-estrela

FORMAÇÃO DE UMA PROTO-ESTRELA



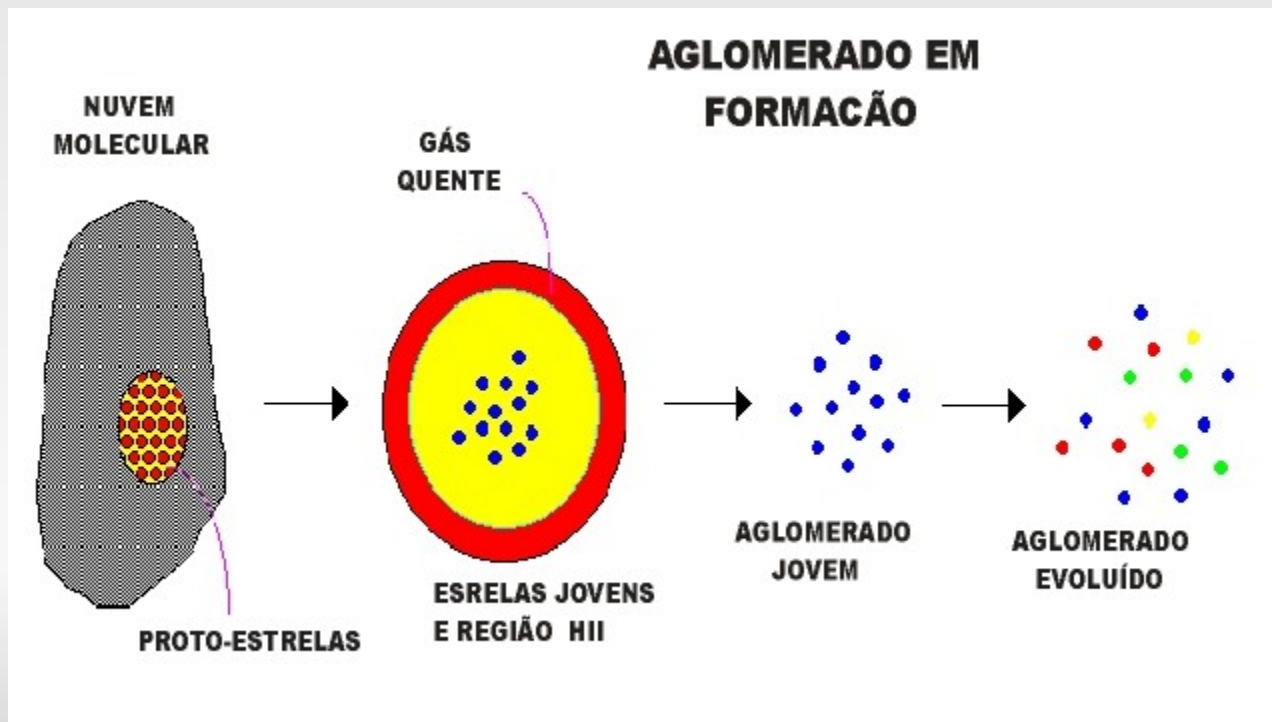
Uma parte mais densa da nuvem molecular colapsa gravitacionalmente, destacando-se da nuvem. A conservação do momento angular lhe dará a forma de um disco em rotação;

A região central é mais densa e quente e forma a proto-estrela. O disco em rotação evolui mais lentamente e forma um sistema planetário. A matéria continua a cair em direção à proto-estrela aumentando (muito) seu tamanho. A protoestrela, inicialmente, tem ~1% de sua massa final

A queda de matéria em direção ao centro é interrompida quando iniciam-se as reações de fusão nuclear no centro da proto-estrela. O que produz um forte centro de radiação e partículas a partir da mesma.

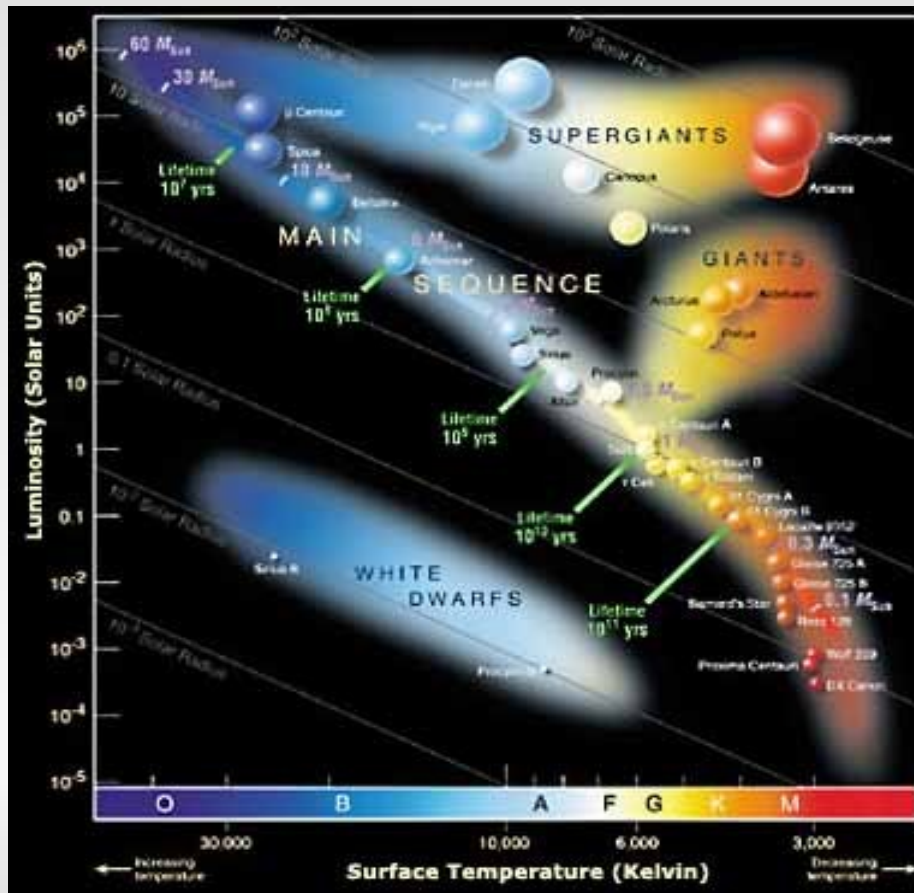
Formação estelar: Proto-estrelas

- Estrelas jovens evoluem a partir de um aglomerado de proto-estrelas mergulhadas nas regiões centrais de uma nuvem molecular e se tornam um aglomerado de estrelas T-Tauri;
- A superfície quente e ventos estelares fortes aquecem o gás à sua volta e formam uma região HII.
- Posteriormente, o aglomerado se quebra, o gás é expelido.



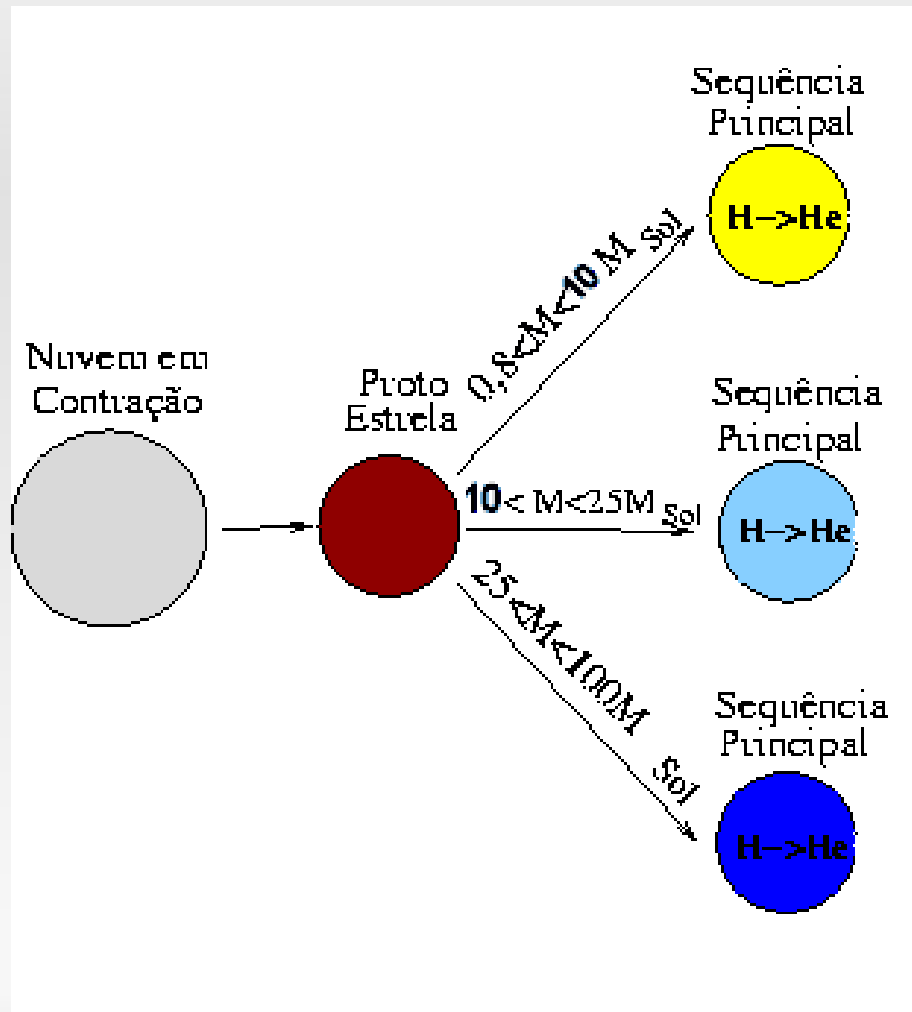
Formação estelar: A seqüência principal

Uma vez começada a queima do hidrogênio no centro de uma proto-estrela, ela evolui rapidamente, passa pela fase de T-Tauri (alguns milhões de anos) e se torna uma estrela da Seqüência principal;



- A estrela passa a Maior parte de sua vida na seqüência principal;
- A estrela não anda na SP;
- A posição dela na SP do HR depende da massa inicial;

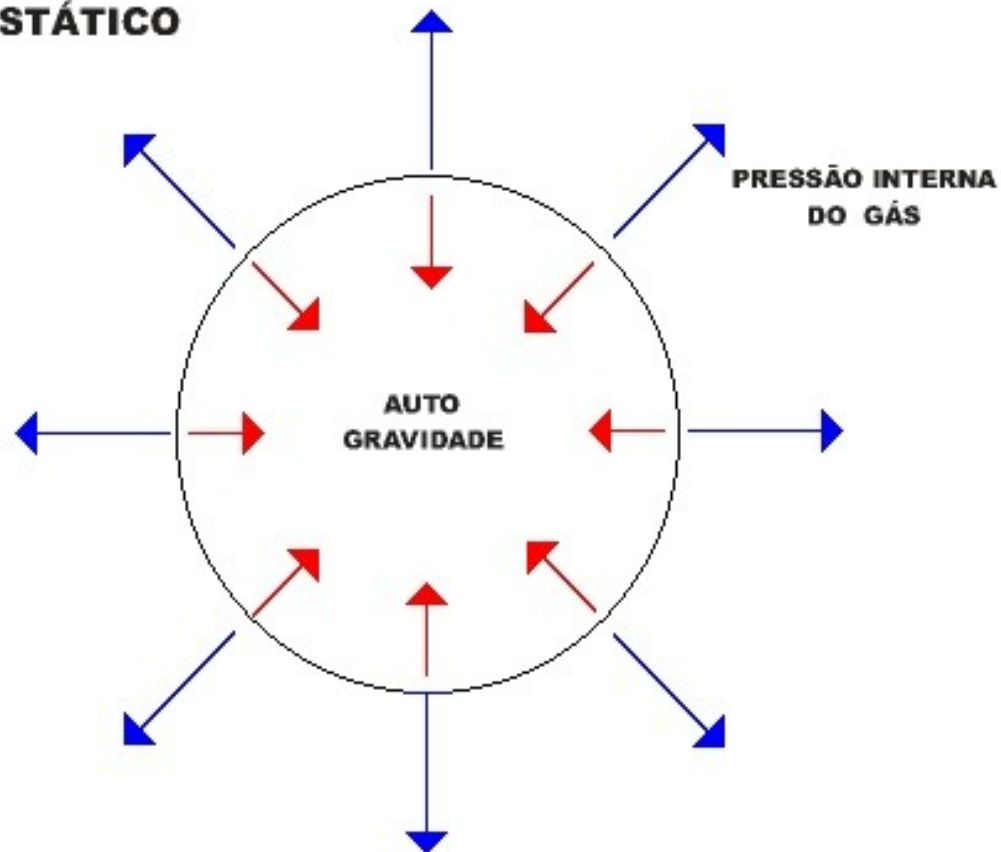
Formação estelar: A seqüência principal



- Durante a SP a estrela converte H em He no seu núcleo;
- O tempo de vida de uma estrela na SP depende de sua massa;
- Se a estrela tiver menos de 0.8 Massas Solares o tempo de vida do Universo não é suficiente para ela ter saído da SP;

Equilíbrio Hidrostático

EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO



O Sol não se expande nem se contrai, ou seja está em equilíbrio. A força gravitacional em cada ponto em seu interior é contrabalancada pela pressão interna do gás.

Evolução Final das Estrelas

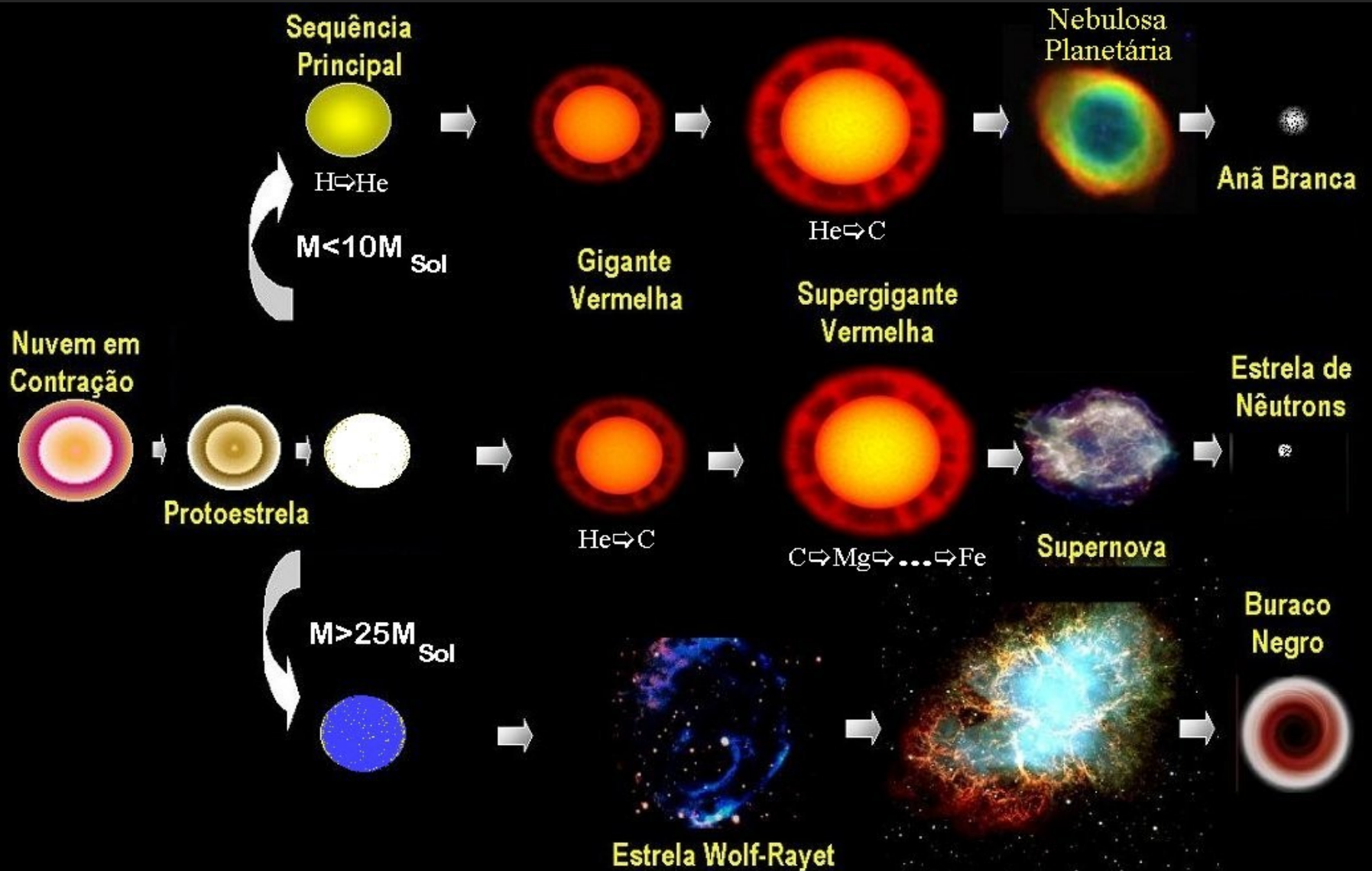
O destino final das estrelas, depois de consumir todo o seu combustível nuclear, depende de duas coisas:

1) Se a estrela é simples ou se faz parte de um sistema múltiplo (~60 % faz parte);

- Neste caso sua evolução depende tanto da massa quanto da separação entre as estrelas, que determinará quando na evolução as estrelas interagirão.

2) Da massa inicial da estrela;

Evolução Final das Estrelas



Aproximadamente 98% de todas as estrelas tornam-se anãs brancas.

Evolução Final das Estrelas

A evolução de 98% das estrelas para Anãs Brancas vem da Função Inicial de Massa

$$\text{IMF} = n(M) \sim M^{-2.35}$$

- nascem 300 estrelas de 1 MSol para cada uma estrela de 10MSol ($1^{-2.35}/10^{-2.35}$);
- 300 estrelas de 10 MSol para cada uma estrela de 100MSol.

Como acontece a geração de energia nuclear?

- Fusão Nuclear

(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fusion.htm>)

- Na Sequência Principal H em He

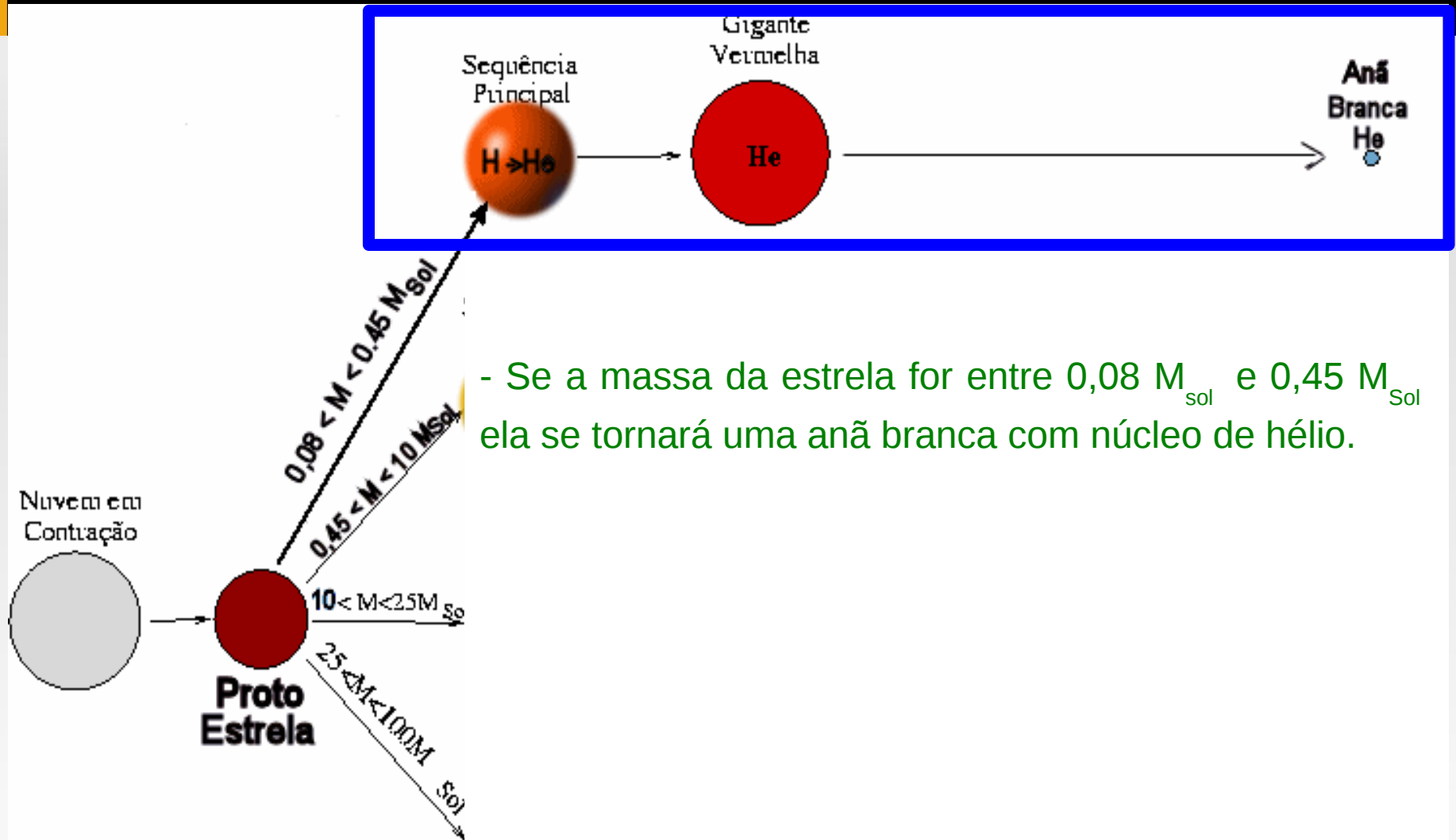


- Deficiência de Massa

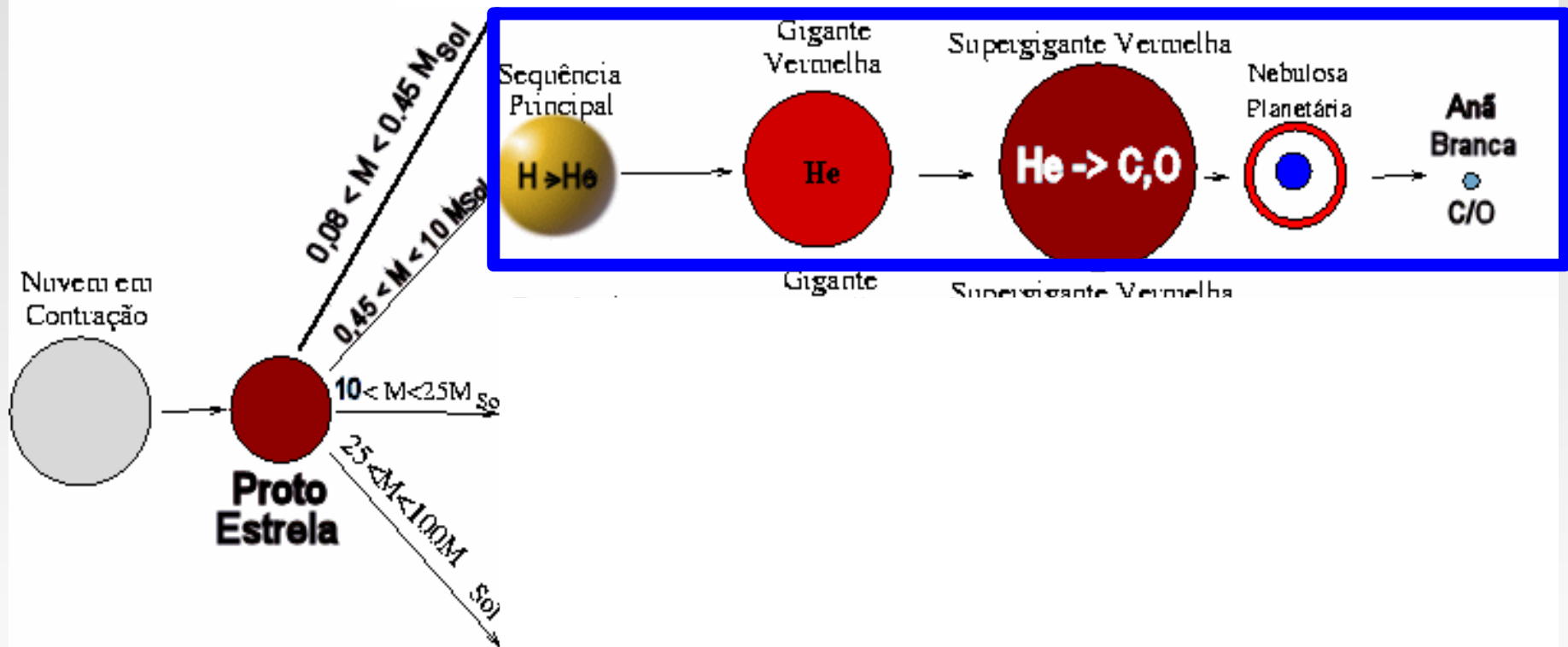
- Tunelamento quântico

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/coubar.html>

Evolução estelar para diferentes massas



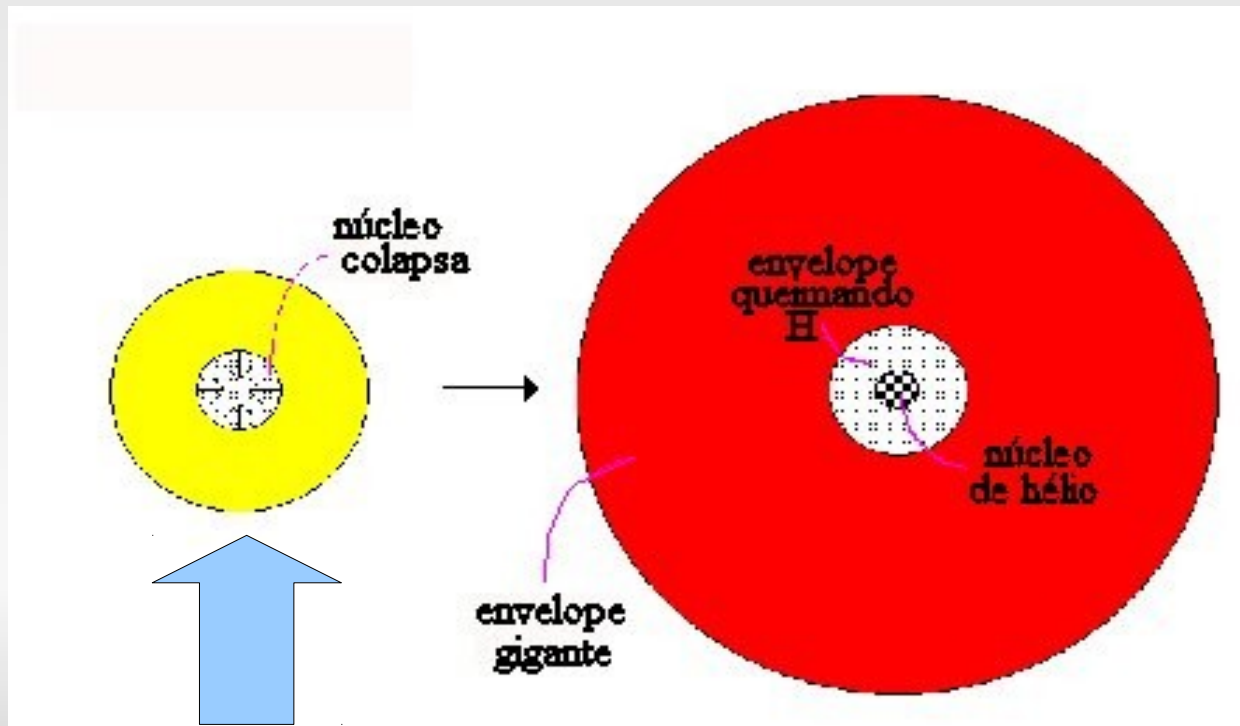
Evolução estelar para: 1-10 Massas solares



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

A vida do Sol na sequência principal está estimada em 10 à 11 bilhões de anos.

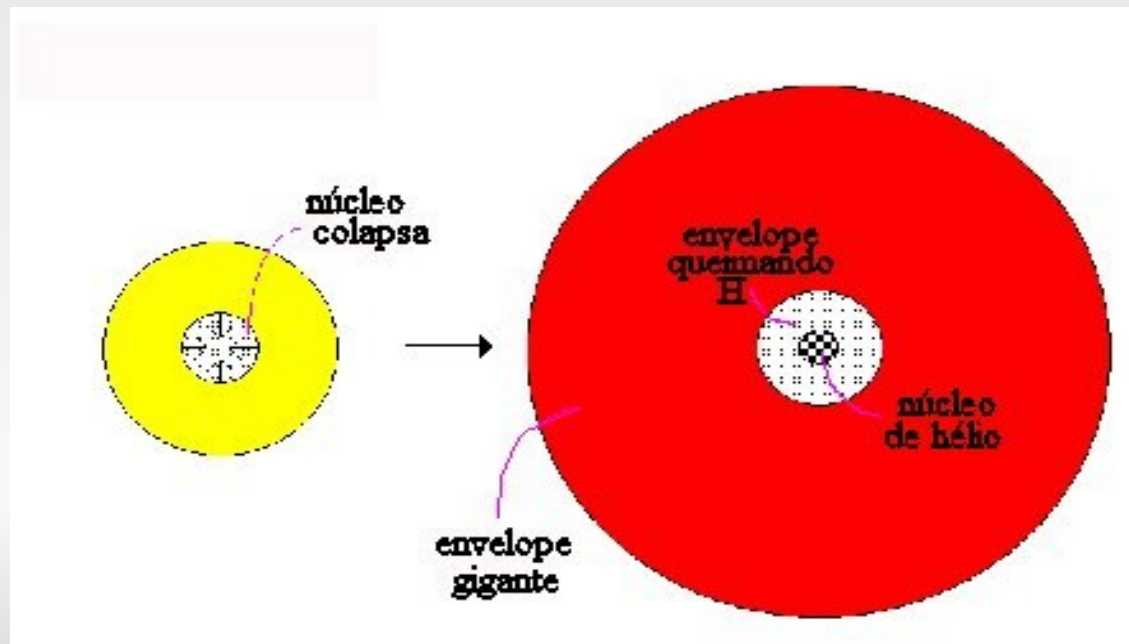
Quando as estrelas consomem o hidrogênio no núcleo, que corresponde a aproximadamente 10% da sua massa total (50 000 km no Sol), elas saem da sequência principal.



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

Como nenhuma energia nuclear é gerada no núcleo nesta fase, ele se contrai rapidamente, e a luminosidade da estrela aumenta um pouco.

A geração de energia nuclear passa a se dar em uma camada externa a este núcleo, com aproximadamente 2 000 km de espessura, onde a temperatura e a densidade são suficientes para manter as reações nucleares.



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

- As camadas externas se reajustam ao aumento de luminosidade expandindo-se, e como a área superficial aumenta, sua temperatura diminui.
- A luminosidade aumenta e a estrela torna-se mais vermelha, aproximando-se do ramo das gigantes no diagrama HR.
- Quando o Sol atingir esta fase, daqui há 6,5 bilhões de anos, a radiação solar atingindo a Terra será tão intensa que a temperatura na superfície da Terra atingirá 700 C, os oceanos ferverão, deixando a Terra seca.
- A atmosfera se esvairá, pois os átomos e moléculas estarão se movendo a velocidades tão altas que escaparão da Terra.

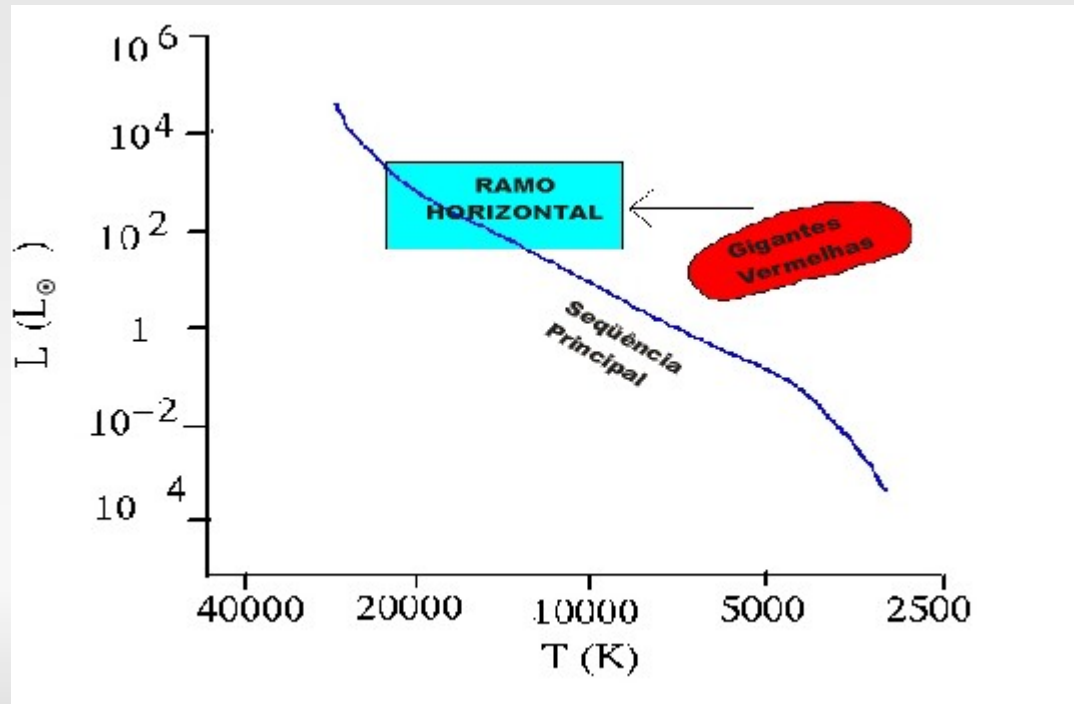
No centro do Sol, a temperatura atingirá 100 milhões de Kelvin, e a reação triplo- α , (Salpeter), iniciará, combinando três núcleos de hélio (partículas α) em um núcleo de carbono.

Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

- O Sol será então uma gigante vermelha, transformando hélio em carbono no núcleo, e hidrogênio em hélio em uma fina camada mais externa.

OBS: A massa do Sol não é suficiente para que a temperatura do núcleo alcance um bilhão de K, necessária para queimar o carbono

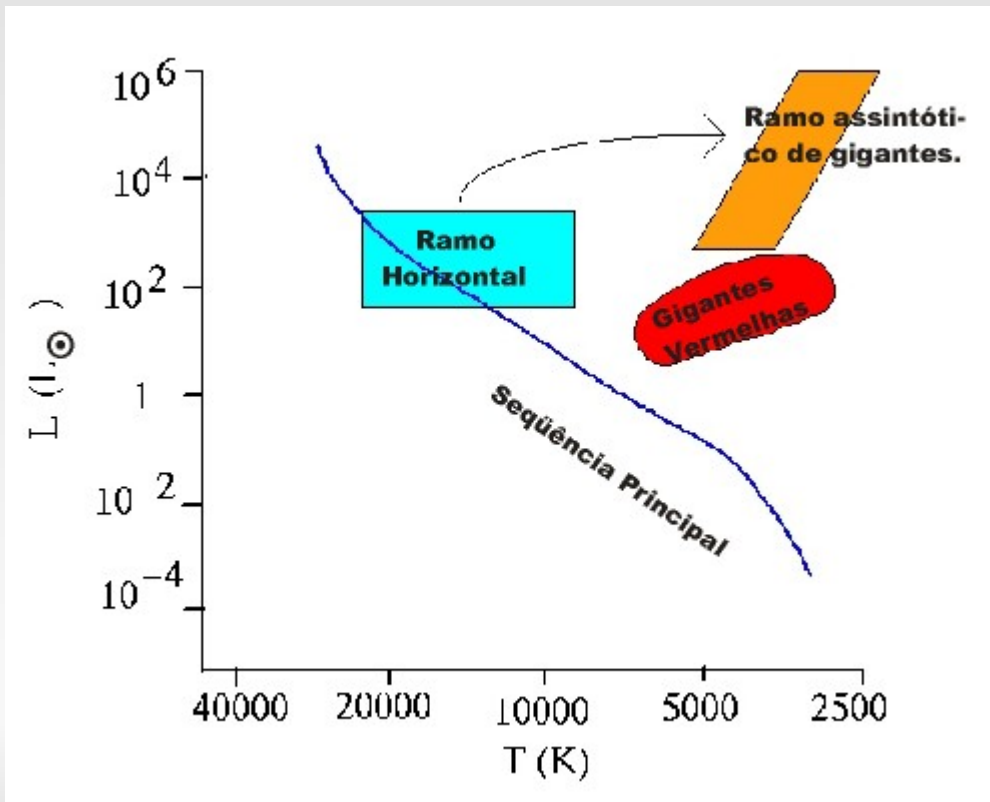
- Quando estas estrelas transformam o hélio nuclear em carbono, elas saem do ramo das gigantes e passam para o ramo horizontal.



Leia Mais em: http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/rgb/rgb_evol.htm

Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

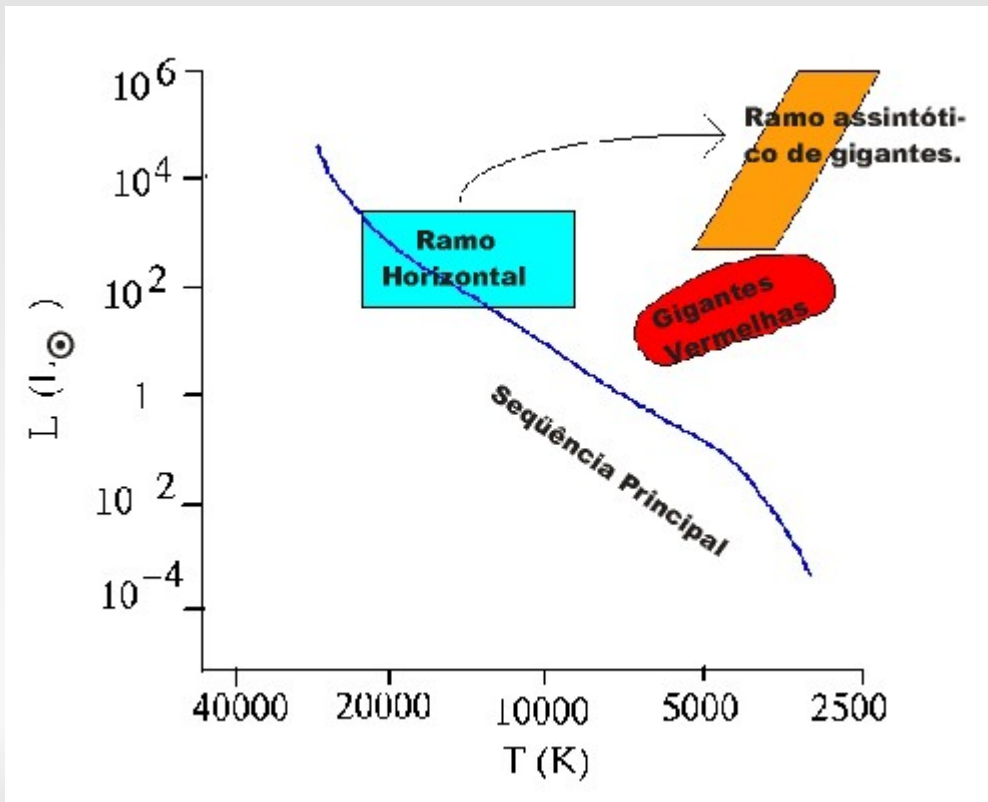
Quando o hélio nuclear foi todo transformado em carbono, e parte em oxigênio, as estrelas entram no ramo das **supergigantes**, chamado também de Ramo Assintótico das Gigantes (AGB).



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

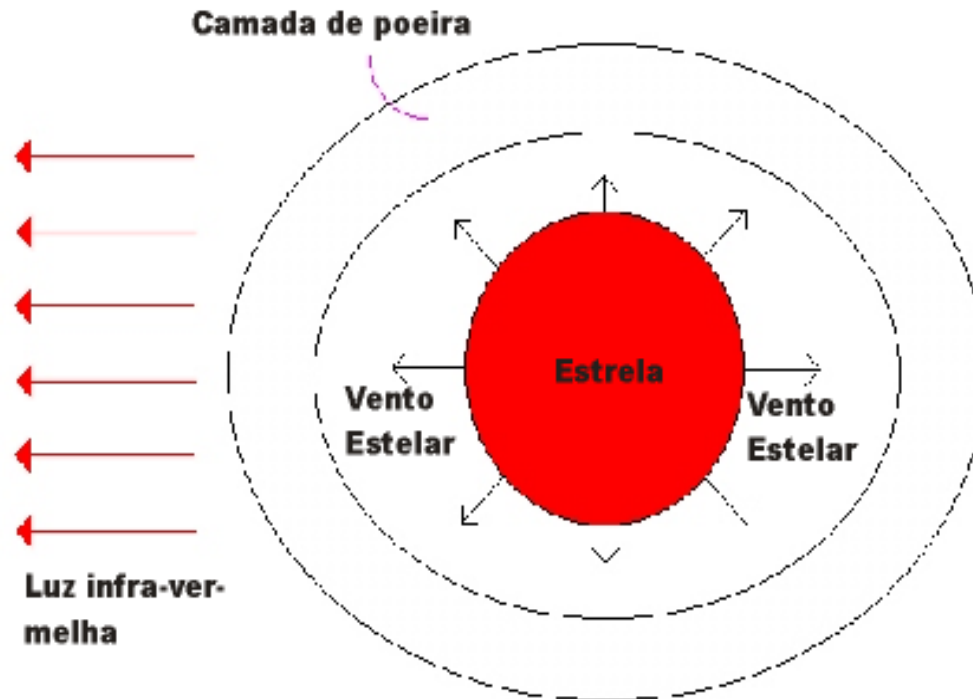
Inicialmente, a maior parte da energia é produzida na camada rica em hidrogênio (externa), sendo a camada de hélio relativamente pequena.

- À medida em que a camada de hidrogênio deposita mais hélio, aumenta a produção de energia via fusão de hélio, levando a um evento explosivo chamado de pulso térmico.



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

- Nesta fase aumenta de tamanho e luminosidade.
- A estrela começa a produzir um vento de partículas carregadas que dela se perdem. Há portanto perda de massa pela estrela, que se desfaz de grande parte de suas regiões mais externas



Estrelas do ramo assintótico estão envoltas em uma camada de poeira produzida pela seu próprio vento estelar. Esta camada bloqueia a luz visível, mas emite luz no infra-vermelho.

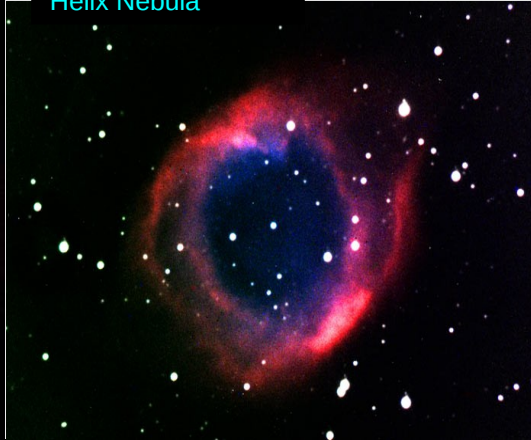
Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

- Após passar outras centenas de milhares de anos no ponto superior direito deste diagrama, chamado de ramo gigante assintótico (AGB), a estrela ejetará uma **nebulosa planetária**, e o núcleo remanescente será uma estrela **anã branca**.

Clownface Nebula



Helix Nebula



IC 418



NGC3132



NGC 6543

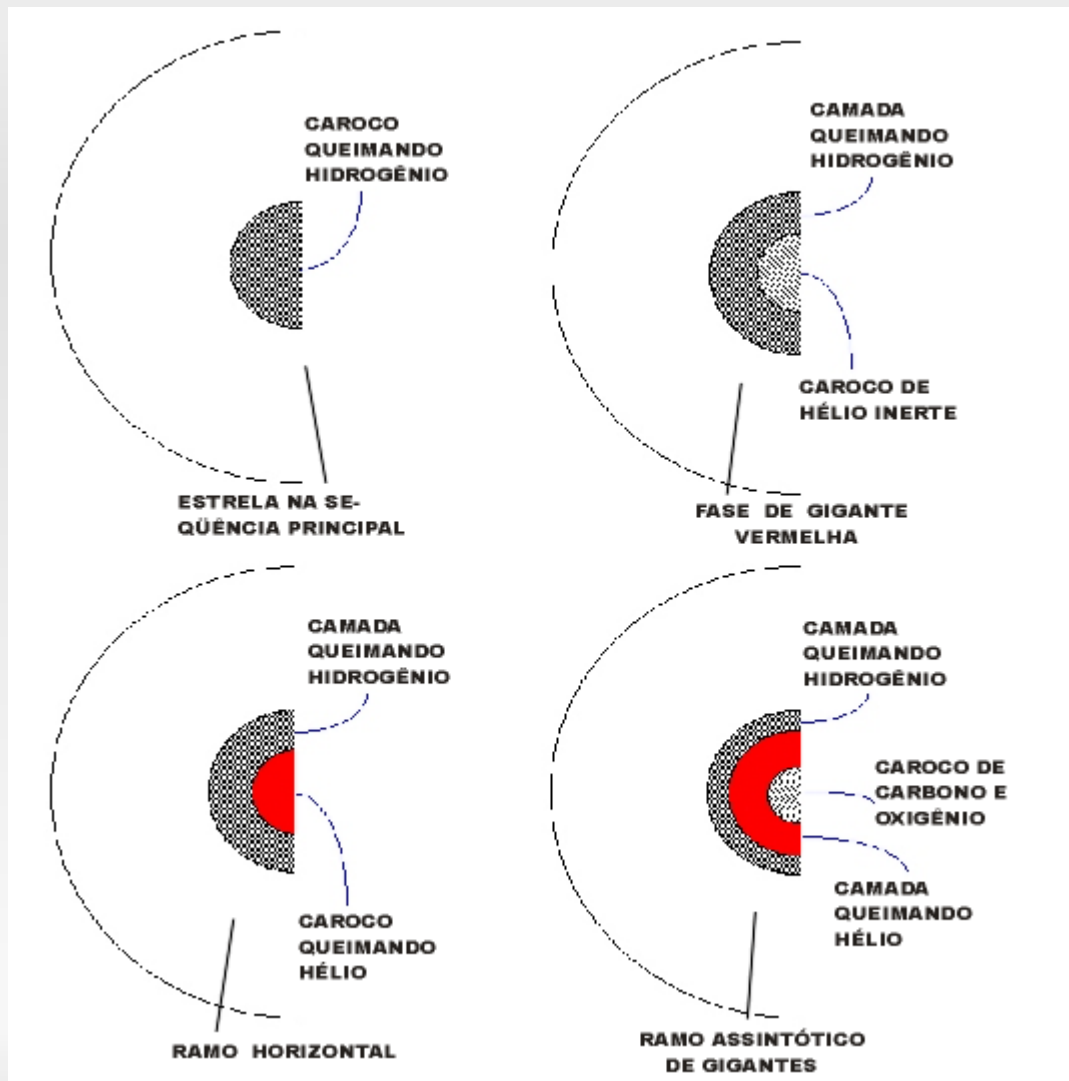


NGC 2440



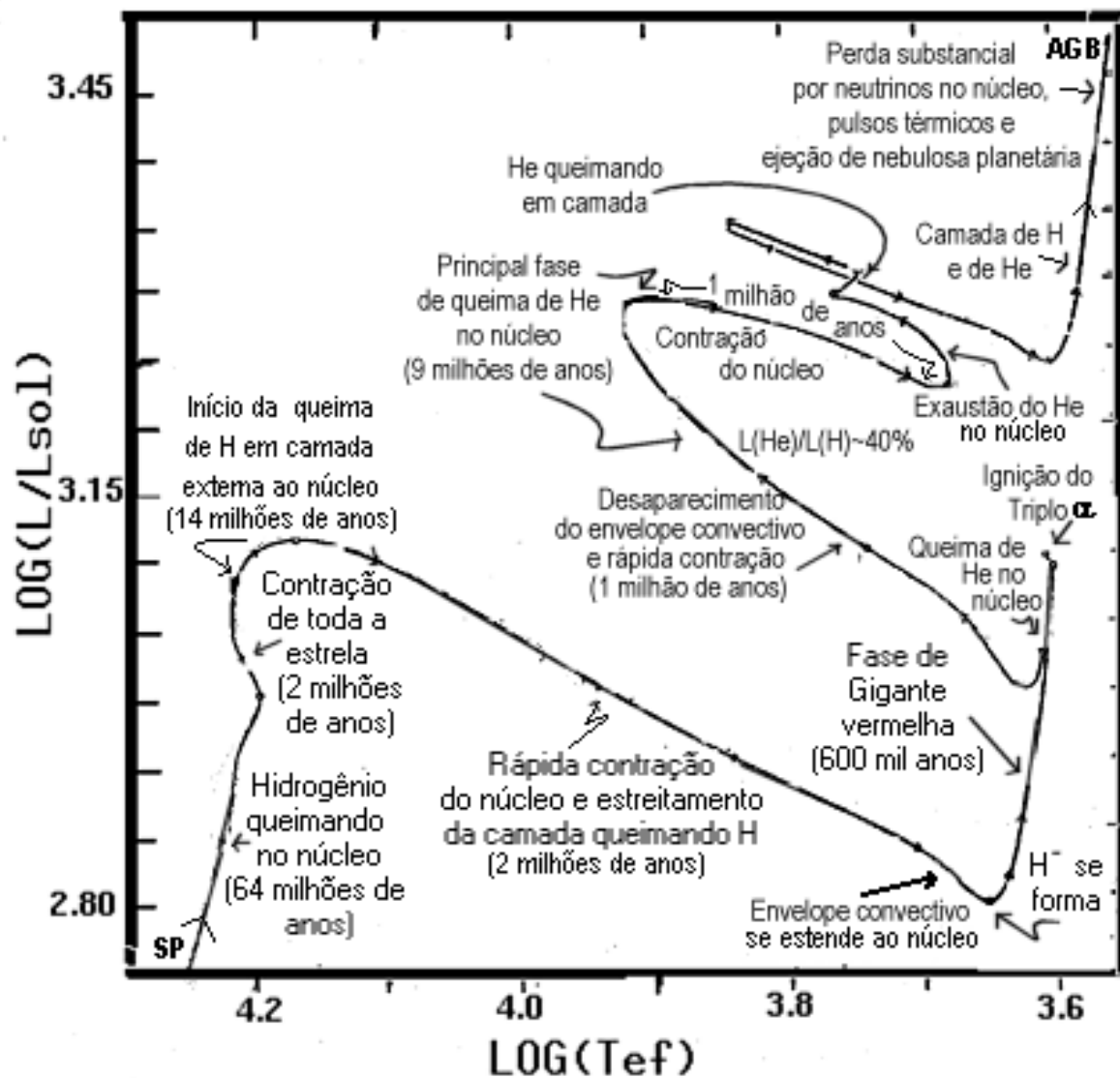
Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

Resumo



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

Resumo



Evolução estelar para: 1-10 Massas solares

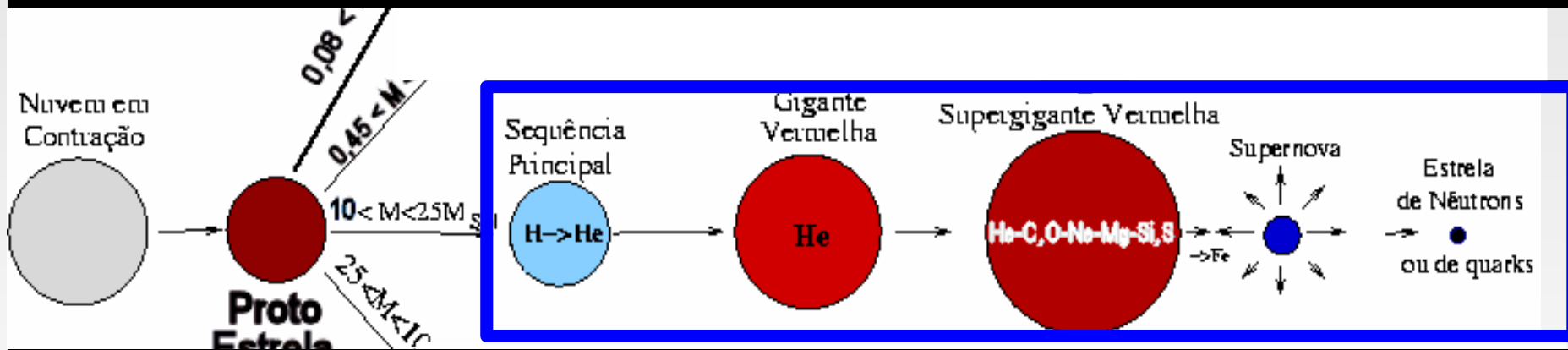
Resumo

Estágio	Duração	Temperatura	Temperatura	Raio
$1 M_{\text{Sol}}$	(anos)	Central (10^6K)	Efetiva (K)	(700 000km)
Seqüência Principal	10 bilhões	15	5400	1
Subgigante	100 milhões	50	4000	3
Flash de hélio	100 mil	100	4000	100
Ramo Horizontal	50 milhões	200	5000	10
Supergigante	10 mil	250	4000	500
Nebulosa Planetária	10 mil	300	100 000(3000 nebula)	0,01(1000 nebula)
Anã Branca	11 bilhões	100	100 000 a 3000	0,01
Anã Preta	10^{15} a 10^{37}	5K	5	0,01

Evolução estelar para: 10-25 Massas solares

Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 10 e 25 MSol, após a fase de supergigante ela ejetará a maior parte de sua massa em uma explosão de supernova, e terminará sua vida como uma estrela de nêutrons, com uma temperatura superficial acima de 1 milhão de graus K, massa de cerca de 1,4 MSol, e raio de cerca de 20 km.

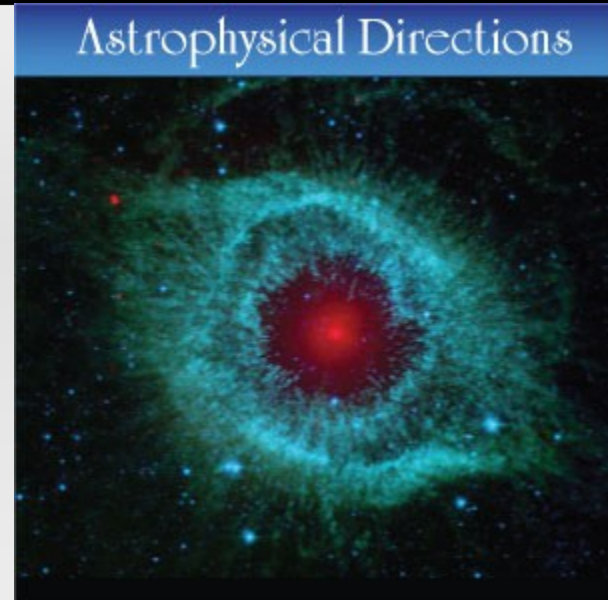
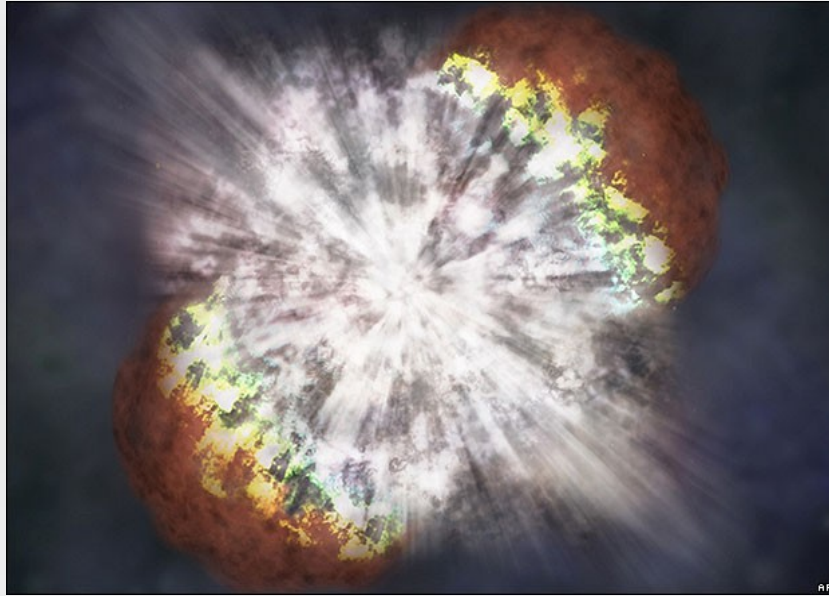
Se esta estrela possuir campo magnético forte, ela emitirá luz direcionada em um cone em volta dos polos magnéticos, como um farol, e será um pulsar.



Quanto maior a massa das estrelas mais rápido elas evoluem: uma estrela de 10 massas solares sai da seqüência principal em 100 milhões de anos.

$$\tau_{SP} = \frac{1}{(M/M_{\odot})^2} 10^{10} \text{anos}$$

Evolução estelar para: 10-25 Massas solares



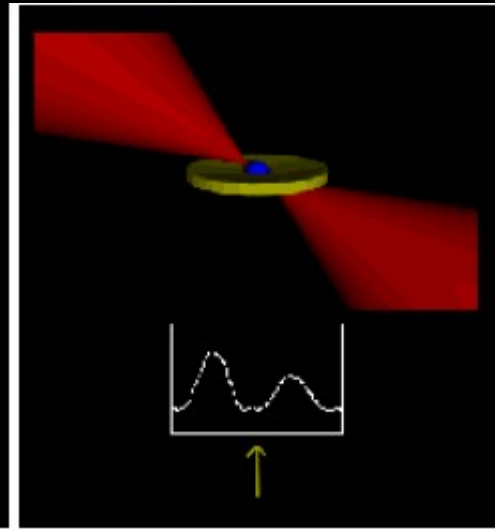
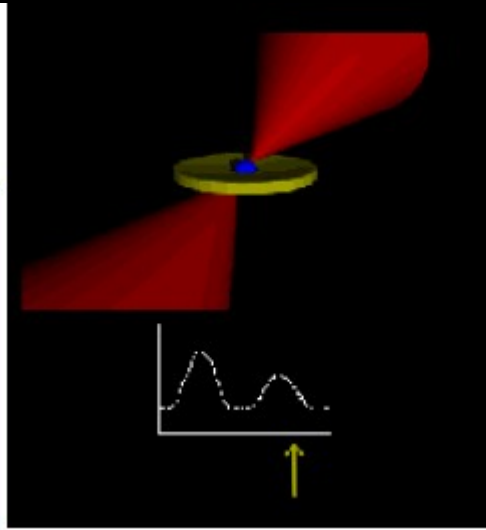
Evolução estelar para:10-25 Massas solares

A explosão de supernova ocorre porque, após a formação do núcleo de ferro, o núcleo colapsa violentamente em alguns segundos, sob o peso de sua própria atração gravitacional, sem ter outro combustível para liberar energia nuclear.

As camadas superiores, contendo aproximadamente 90% da massa colapsam então sobre este núcleo, e após o comprimirem até o limite das leis físicas, são empurradas para fora com velocidades de milhares de quilômetros por segundo.

Tanta energia é liberada em um colapso de supernova que ela brilha com a luminosidade de uma galáxia de 200 bilhões de estrelas.

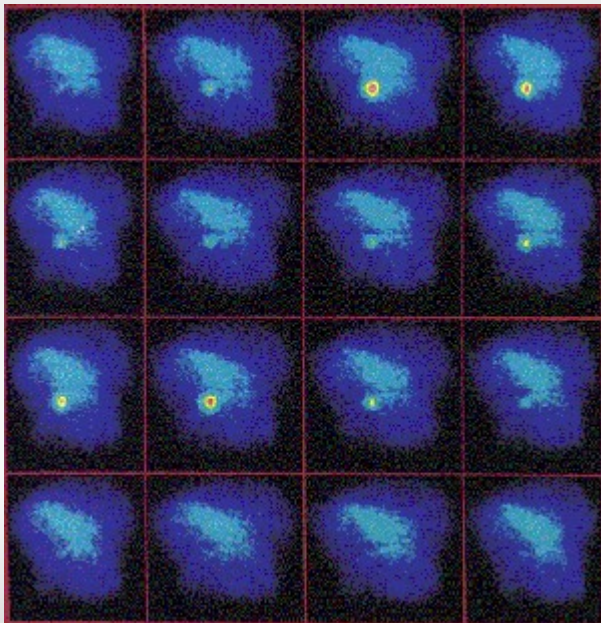
Evolução estelar para: 10-25 Massas solares



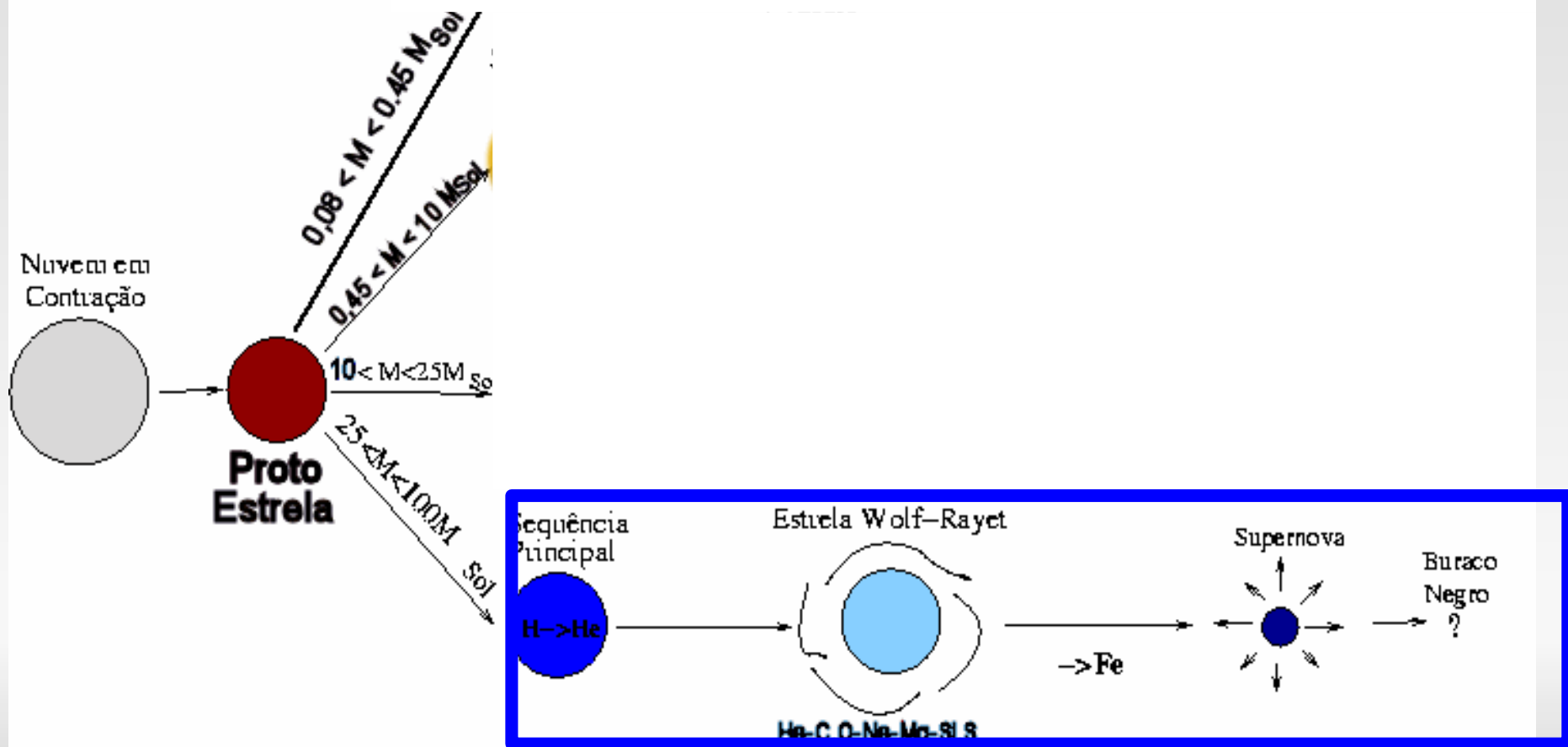
Simulação da aproximação a um pulsar, mostrando o feixe de luz orientado com os pólos magnéticos.

A detecção de pulsares é estatística

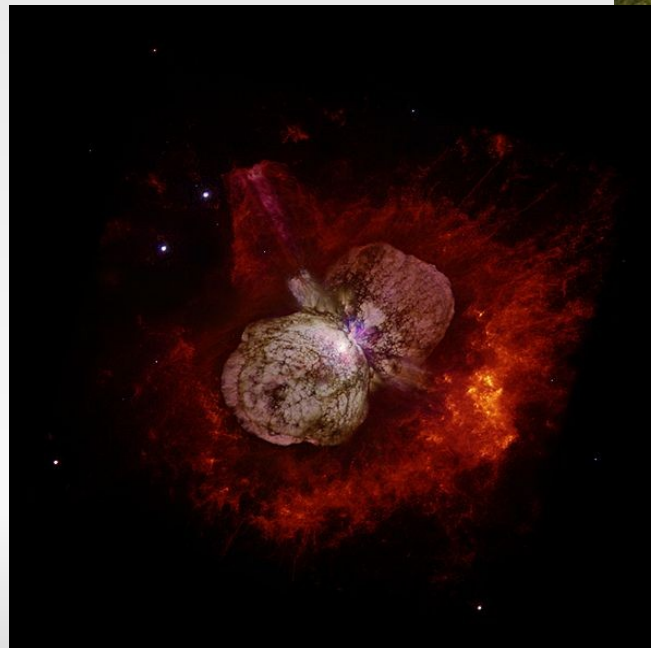
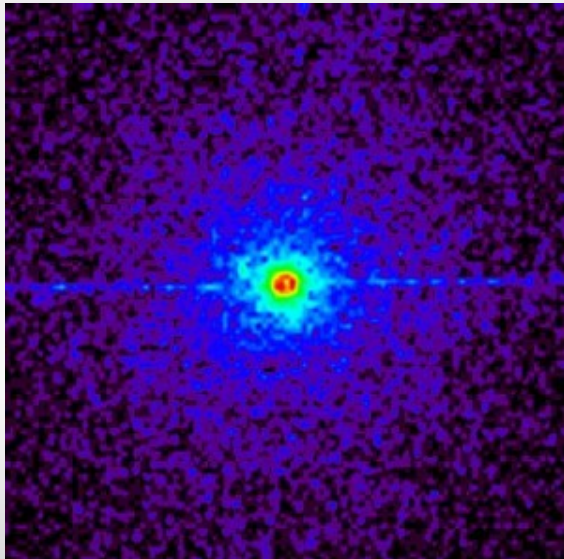
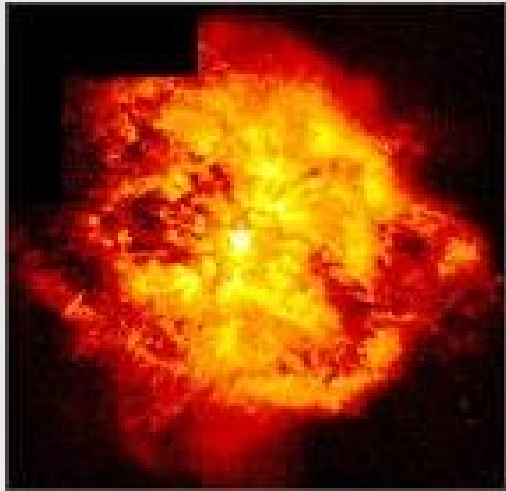
Seqüência de fotos do pulsar da Nebulosa do Caranguejo, com período de 33 ms.



Evolução estelar para: > 25 Massas solares



Evolução estelar para: > 25 Massas solares



Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 25 e 100 M_{Sol} , após a fase de supernova restará um buraco negro, com massa da ordem de 6 M_{Sol} , e raio do horizonte de 18 km.

O raio do horizonte, ou raio de Schwarzschild é a distância ao buraco negro dentro da qual nem a luz escapa:

$$R_{\text{sch}} = 2GM/c^2$$

Não há, ainda, evidências claras da detecção de buracos negros estelares.

Para algumas estrelas massivas, os modelos de deflagração da explosão de supernova preveem dispersão total da matéria.

A Via-Láctea



Breve histórico

Via Láctea: Caminho esbranquiçado como Leite (Gregos);

Galileo (Sec. XVII): multitude de estrelas;

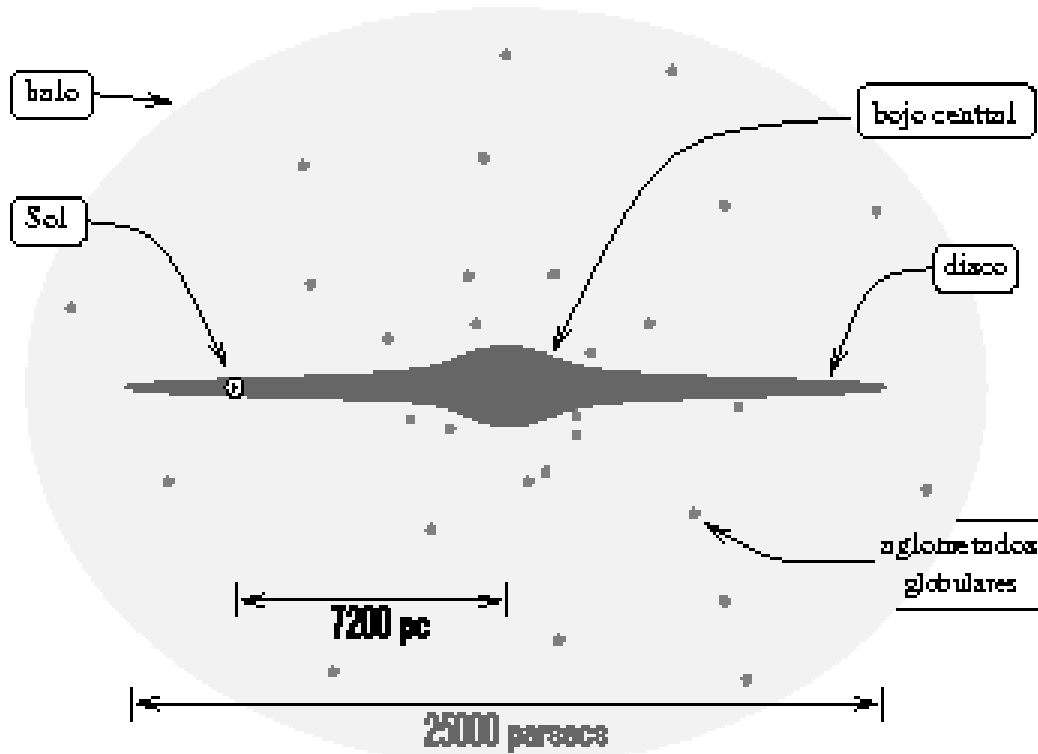
Herschel (XVIII): Sistema achatado (Sol ocupava a posição central da galáxia);

Kapteyn (XX): Primeira estimativa de tamanho;

Shapley (1917): Estudando a distribuição de aglomerados globulares, determinou o verdadeiro tamanho da Via Láctea e a posição periférica do Sol.

Distribuição de aglomerados

Vista lateral da Via Láctea

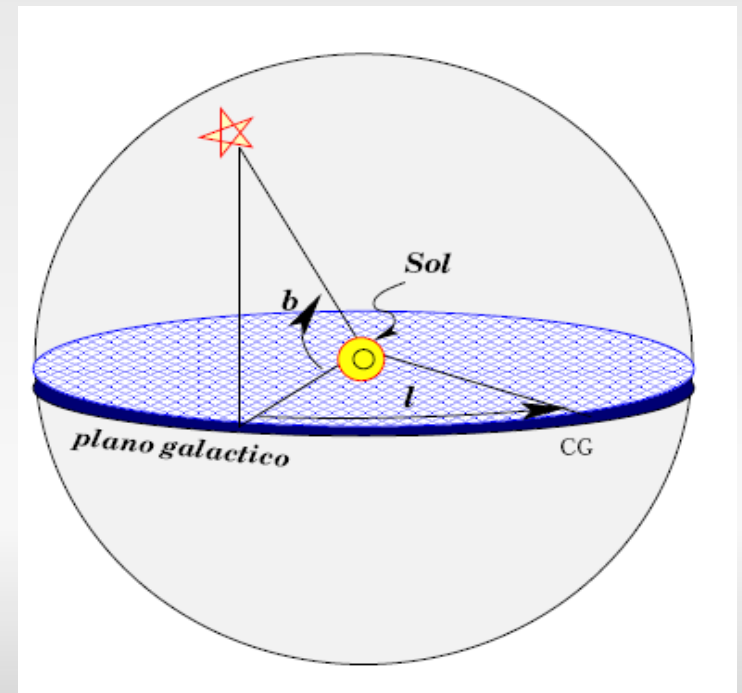


Assumindo que o **centro do halo** formado pelos aglomerados globulares coincide com o **centro de nossa Galáxia**, Shapley deduziu que **estamos a 30 mil anos-luz do centro da Via Láctea**, que está na direção da constelação de Sargitário.

Sistemas de coordenadas galácticas

O sistema de coordenadas galácticas tem como plano fundamental o plano galáctico, que é o círculo máximo que contém o centro galáctico e as partes mais densas da Via Láctea. É inclinado 60° em relação ao Equador Celeste.

Latitude galáctica (b): distância angular medida ao longo do plano galáctico, variando de 0° a 90° para o norte e de 0° a -90° para o sul.

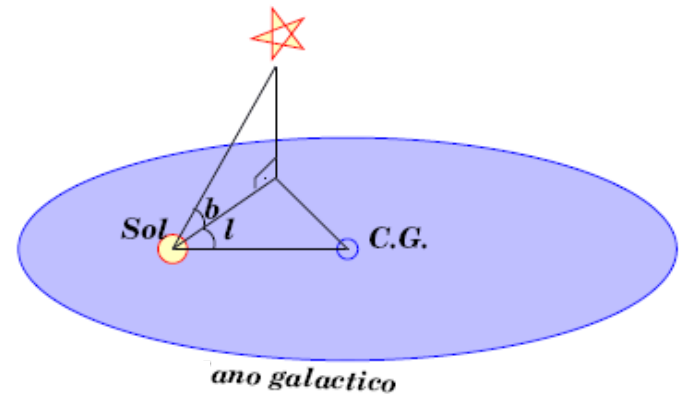


Sistemas de coordenadas galácticas

Longitude galáctica (l): distância angular medida ao longo do plano galáctico, variando de 0° a 360° para leste, a partir da direção do centro galáctico.

O **ano galáctico**, definido como o tempo que o Sol leva para dar uma volta completa em torno do centro galáctico, tem duração de **220 milhões de anos**.

$$P_{\odot} = \frac{2\pi r_{\odot}}{v_{\odot}} = \frac{2\pi \cdot 7,2 \text{ kpc}}{220 \text{ km/s}} = 202 \text{ milhões de anos}$$



As coordenadas do centro galáctico são:

- no sistema galáctico: $l = 0$, $b = 0$;
- no sistema equatorial celeste: $\alpha = 17\text{h } 42\text{min}$, $\delta = -28^\circ 55'$.

Distâncias dentro da galáxia

Radar: Planetas Internos e outros objetos próximos da Terra;

Paralaxe heliocêntrica: Planetas externos e estrelas próximas (até 500 pc);

Paralaxe espectroscópica: Estrelas a distâncias de até 10 000 pc.

Tamanho da galáxia: ~25 000 pc

Como medir distâncias maiores do que 10 000 pc?

R: Relação Período-Luminosidade de estrelas variáveis pulsantes.

Distâncias dentro da galáxia

Estrelas variáveis pulsantes radiais são estrelas cuja luminosidade varia com o tempo, devido a variações no seu tamanho.

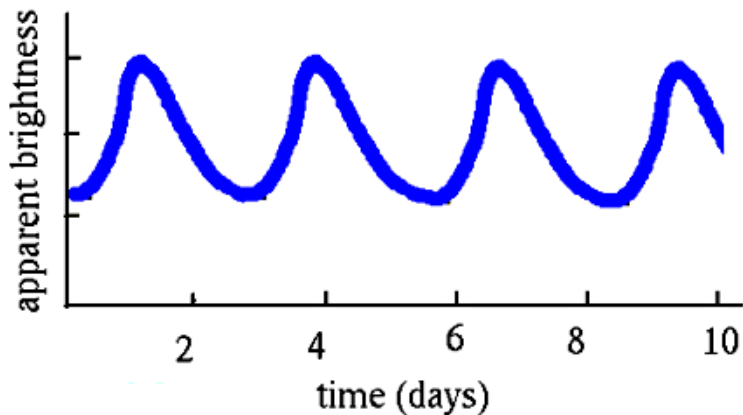
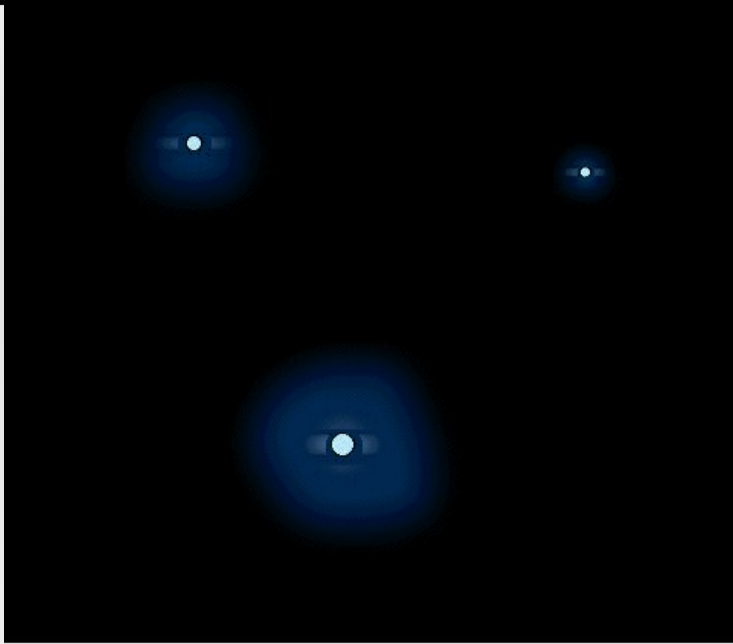
RR Lyrae: São estrelas evoluídas que estão começando a queimar hélio no núcleo. Seus períodos de pulsação são pequenos, entre 0,5 e 1 dia, com variação de magnitude menores do que uma magnitude.

Cefeidas: São supergigantes com períodos de pulsação entre 1 e 100 dias, com amplitudes de pulsação entre 0,3 e 3,5 magnitudes.

$$M_{\text{bol}} = -3,125 \log P - 1,525$$

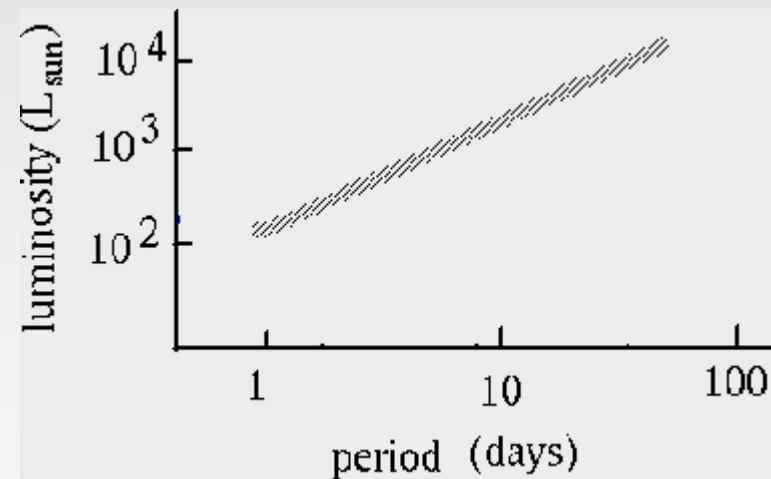
As variáveis Cefeidas são usadas para determinar distâncias de estrelas longínquas da nossa Galáxia, e distâncias de outras Galáxias.

Estrelas Cefeidas



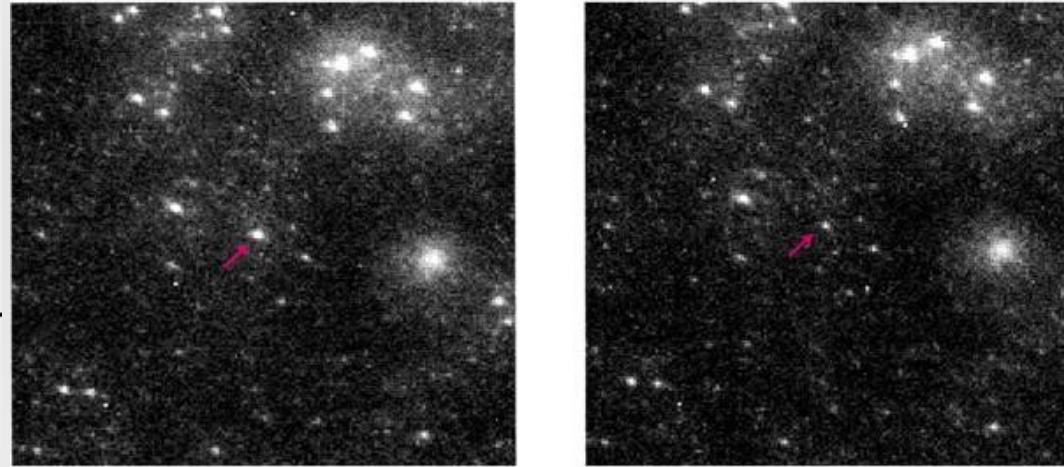
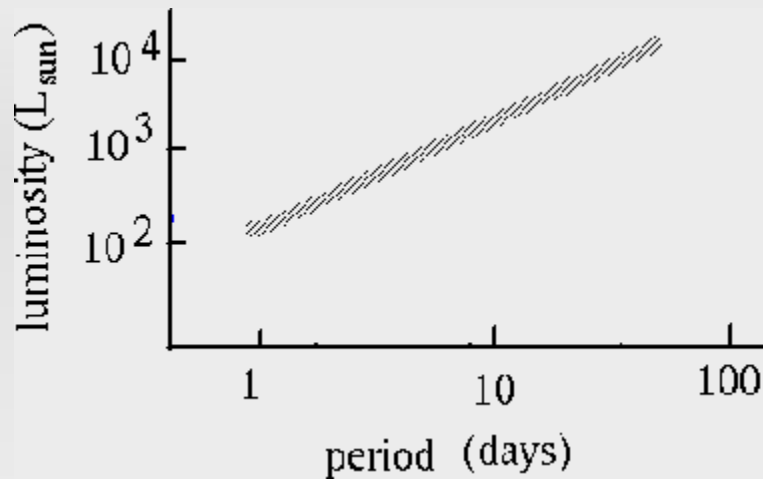
Curva de luz

São estrelas que expandem e contraem **periodicamente** as camadas mais externas de sua atmosfera o que produz variações de emissão de luz.



As estrelas mais luminosas têm maior período de variação de luz

Como calcular a distância de uma galáxia, com a observação de uma estrela Cefeida - 4 passos



- 1) Observamos com o telescópio o período de variação da luz e a luminosidade (I) de uma estrela Cefeida, em uma galáxia distante (d);
- 2) Determinamos a luminosidade intrínseca (L) que tem a estrela, com a ajuda da relação período luminosidade das Cefeidas observadas na Via Láctea (figura)
- 3) A luminosidade observada $I \sim L/d^2$
- 4) A distância $d \sim (L / I)^{1/2}$

Distâncias dentro da galáxia

RESUMO

Distância de Alcance

1 UA

500 pc

10 000 pc

4 Mpc

Método

radar

paralaxe heliocêntrica

paralaxe espectroscópica

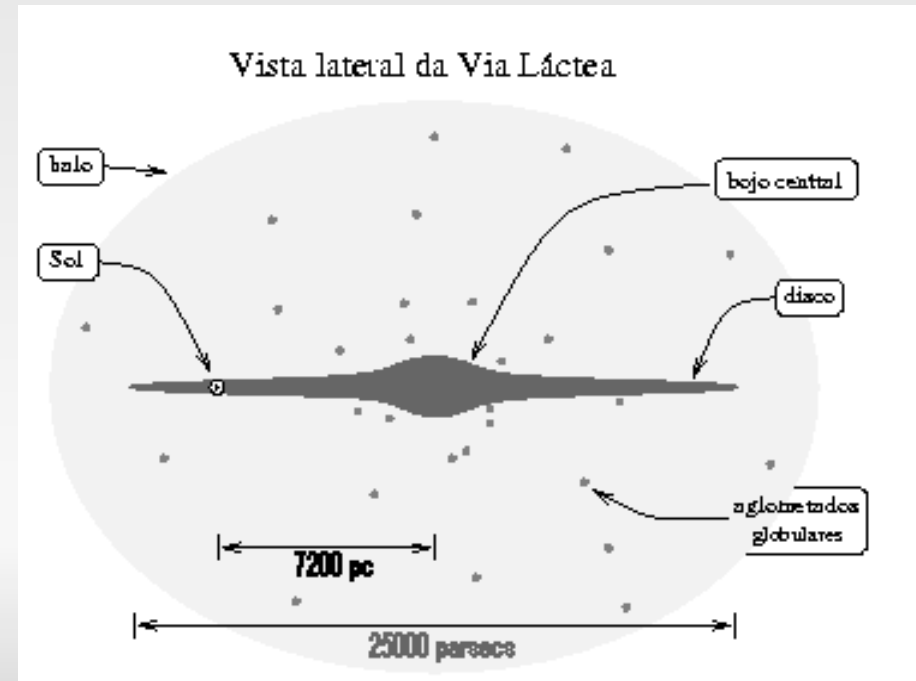
estrelas variáveis

Forma e tamanho da Via Láctea

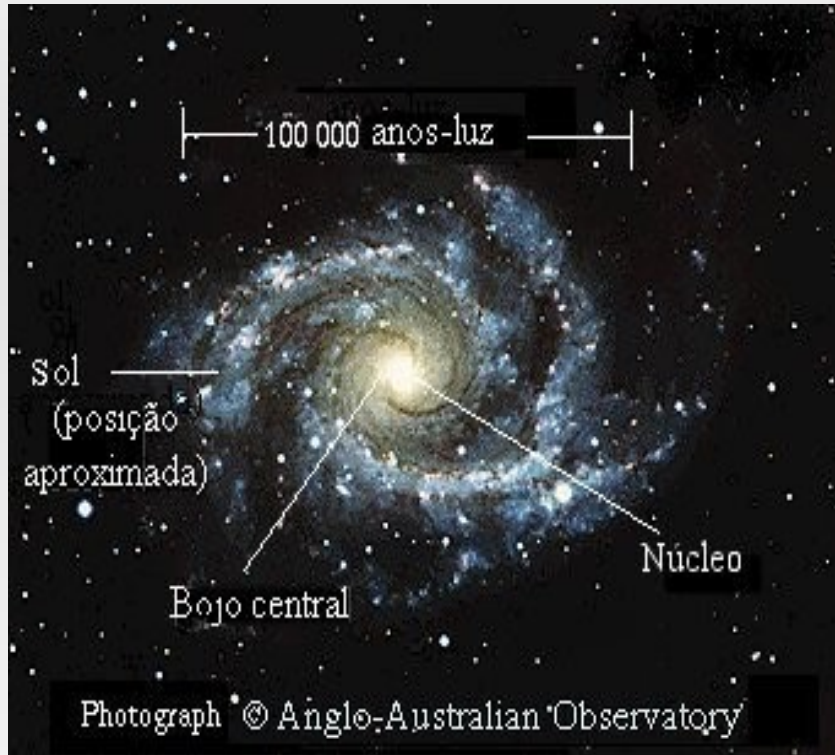
Nossa Galáxia tem a forma de um disco circular, com diâmetro de cerca de 25 000 pc (100 000 anos-luz) e espessura de 300 pc aproximadamente.

O disco está embebido em um halo esférico formado pelos aglomerados globulares e provavelmente grande quantidade de matéria não luminosa, que se estende por no mínimo 100 000 pc.

O bojo, que contém o núcleo, é uma região esférica de 2 000 pc de raio, envolvendo o núcleo.



Forma e tamanho da Via Láctea



NGC2997 como uma representação da Via Láctea.

O Sol está localizado em um dos braços espirais, e orbita o centro da galáxia a uma distância de aproximadamente 7200 pc.

Resumindo

A Via Láctea tem duas componentes morfológicas principais: uma componente esferoidal (halo+bojo) e uma componente achatada (disco + braços espirais).

massa do disco: 2 a 13%

massa do bojo: 1 a 6%

massa do halo: 81 a 97%

Forma e tamanho da Via Láctea

O disco da galáxia contém, além das estrelas, a matéria interestelar, formada por gás e poeira, que constituem o material do qual as estrelas se formam.

O gás interestelar é constituído na maior parte por hidrogênio neutro, que é não luminoso.

Mas perto de estrelas muito quentes e massivas, o hidrogênio é ionizado pela radiação ultravioleta provinda das estrelas, e brilha por fluorescência.



Nebulosa de Órion

Estrutura espiral



Andrômeda (M31)



NGC4314

Em outras galáxias: Nebulosas gasosas geralmente se encontram distribuídas em uma estrutura espiral.

É razoável supor que nossa Galáxia também tem uma estrutura espiral.

É difícil visualizar a estrutura espiral pois estamos dentro do disco galáctico, e cercados de poeira interestelar, que bloqueia a luz.

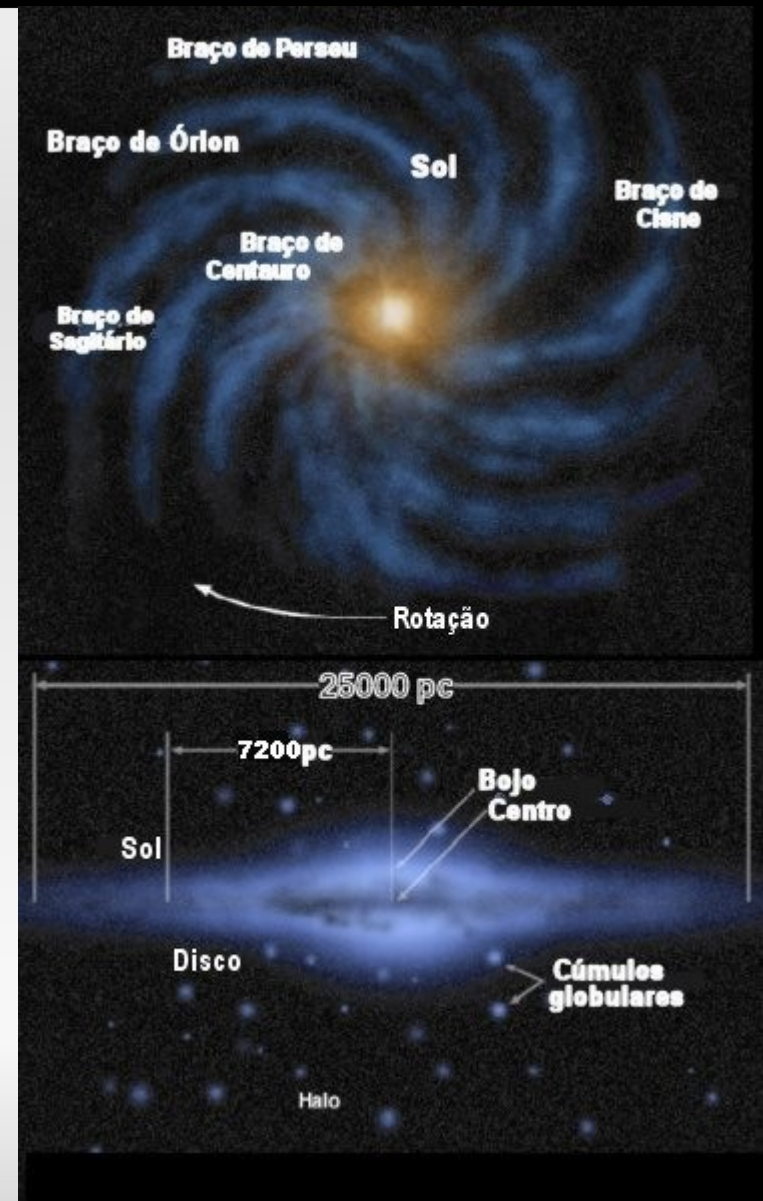
Estrutura espiral

Mapeadores da estrutura espiral:

Óticos: objetos brilhantes como estrelas OB, regiões HII e estrelas cefeidas variáveis.

Rádio: O principal traçador em rádio é a linha de 21cm do hidrogênio neutro. Como o hidrogênio neutro existe em grande abundância na Galáxia, essa linha é observada em todas as direções.

O número de braços espirais ainda é não é bem conhecido. Observações de 2008 são consistentes com a presença de apenas 2 braços espirais.

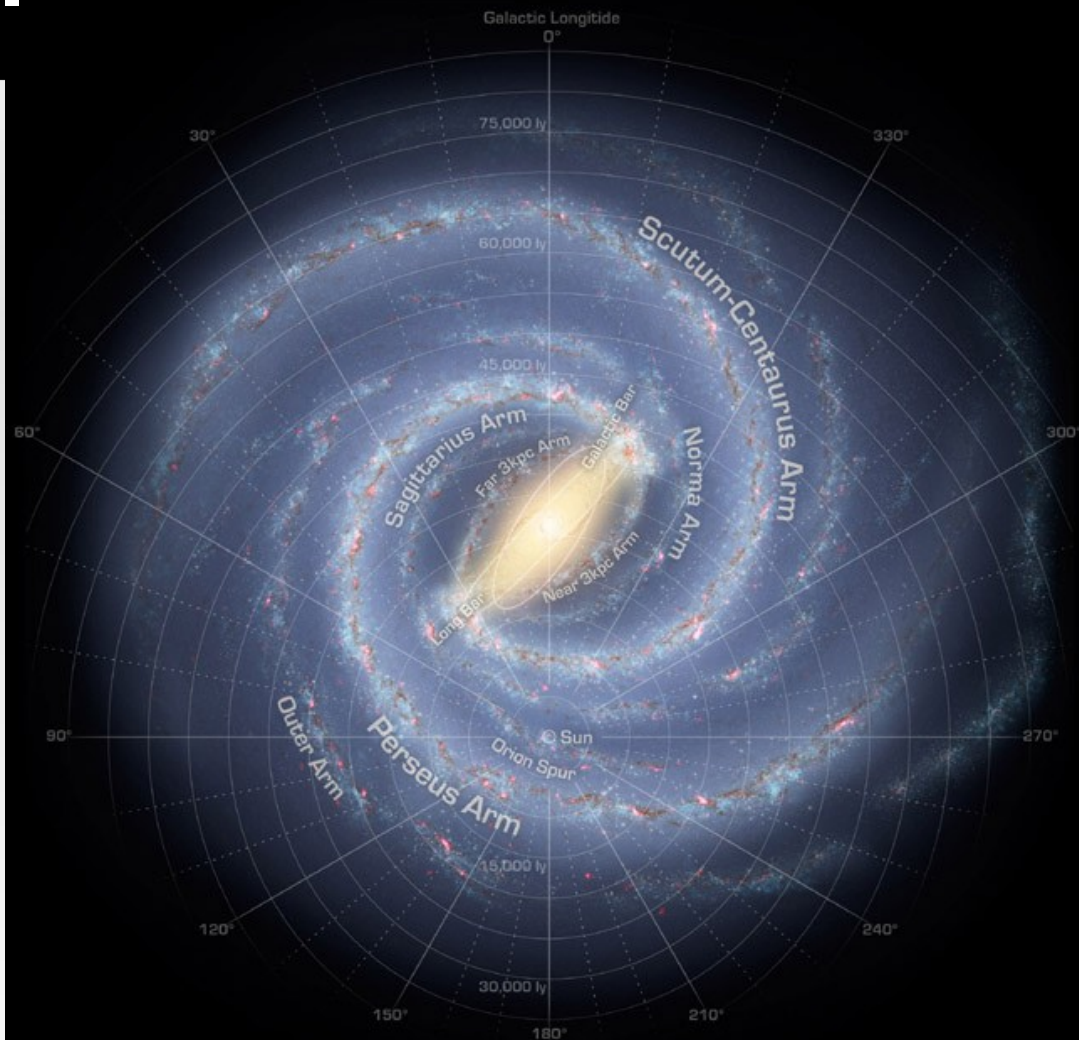


Estrutura espiral



Scutum-Centaurus

Perseus



Annotated Roadmap to the Milky Way

[artist's concept]

Idade da Galáxia

- Sistemas estelares mais velhos são os aglomerados globulares: $t \geq 10^{10}$ anos.
- Idade estimada do universo: 1.4×10^{10} anos.

