



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Evolução Estelar II

Ast-202-3

Aula 2

Evolução estelar - resumo executivo

Carlos Alexandre Wuensche

INPE - Divisão de Astrofísica

ca.wuensche@inpe.br

O processo evolutivo...

LINHA DO TEMPO CÔSMICA

Da Idade das Trevas...

Os astrônomos não possuem observações diretas de eventos ocorridos entre a emissão da radiação cósmica de fundo (mais ou menos 400 mil anos depois do Big Bang) e o aparecimento das primeiras galáxias e quasares (cerca de um bilhão de anos mais tarde). Mas, com a ajuda de simulações por computador, os pesquisadores esboçaram uma teoria para explicar como um universo escuro pôde formar o cosmo luminoso que vemos hoje.

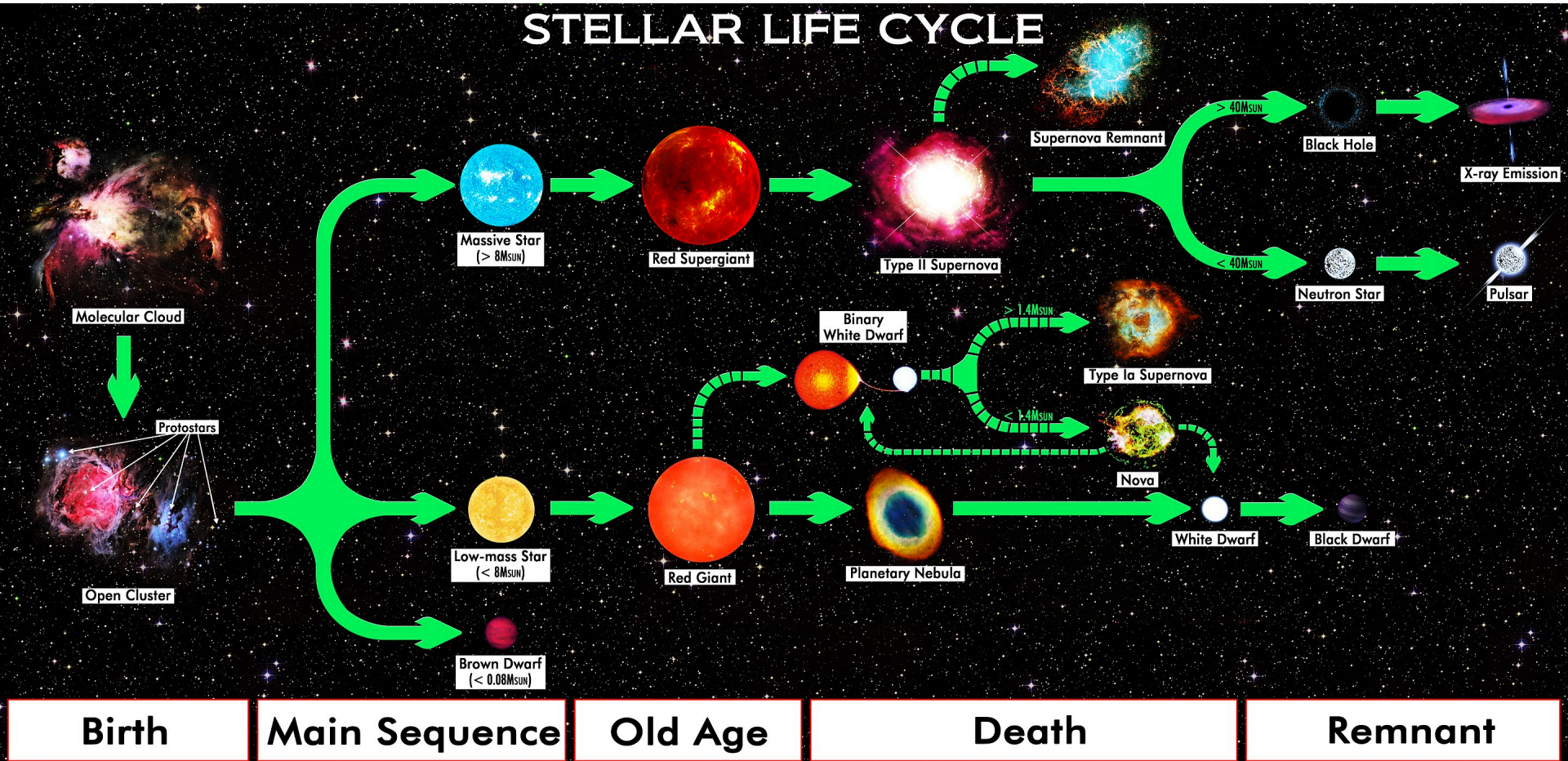


...ao Renascimento

O aparecimento das primeiras estrelas e protogaláxias.

O curso de Ev. Estelar II...

que poderia chamar-se somente Evolução Estelar...



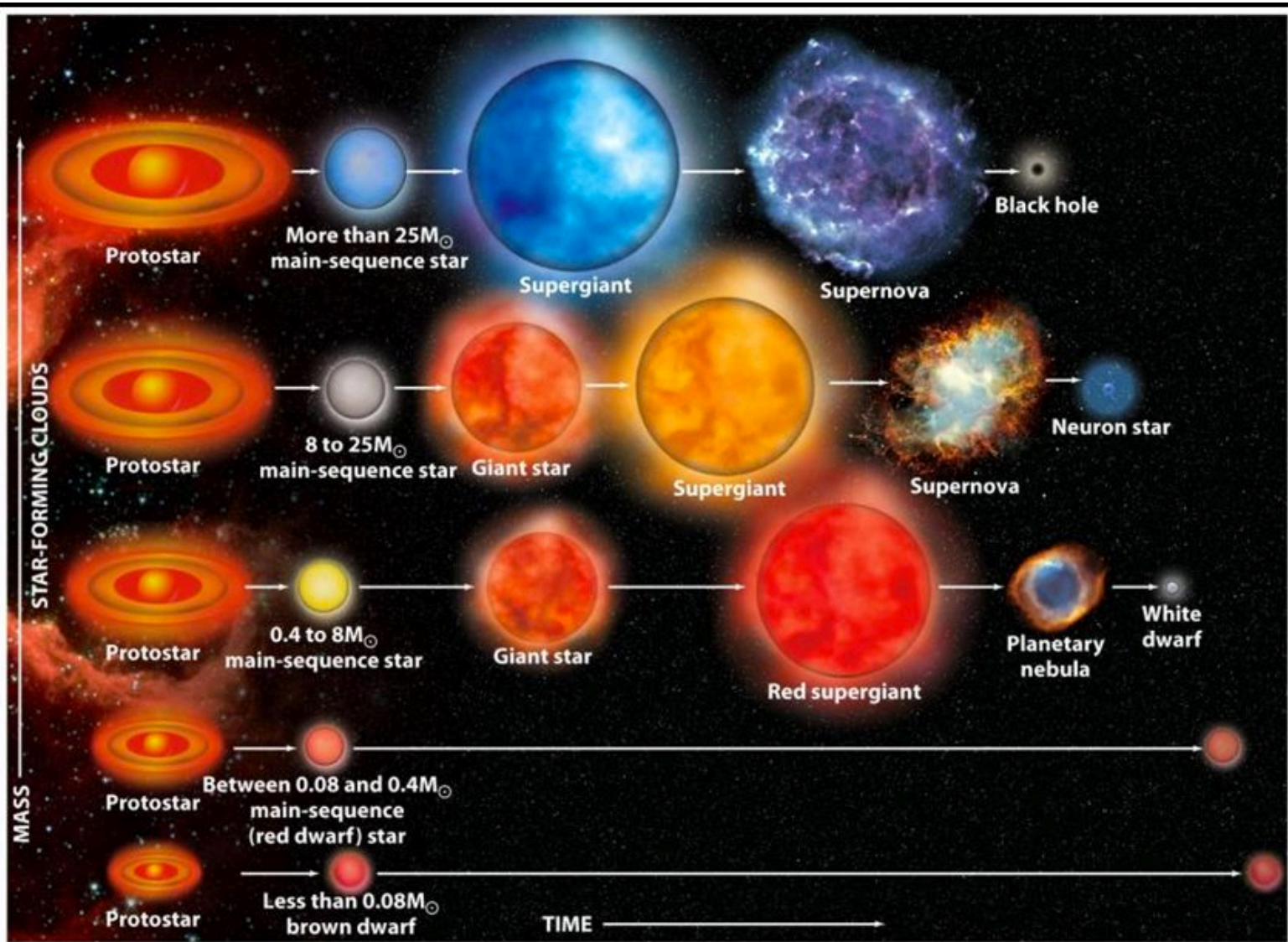


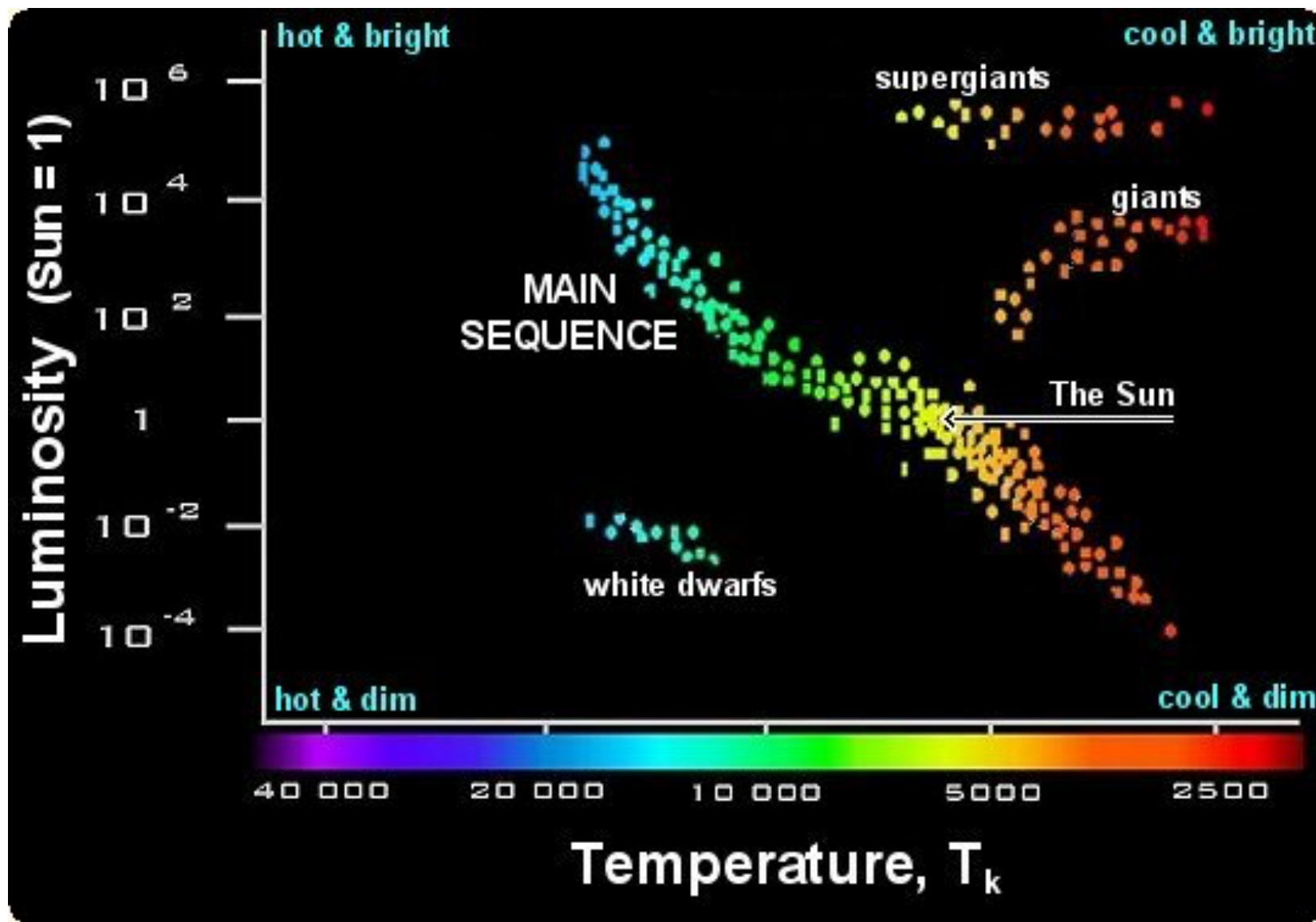
Figure 20-24a
 Universe, Tenth Edition
 © 2014 W. H. Freeman and Company

A Summary of Stellar Evolution

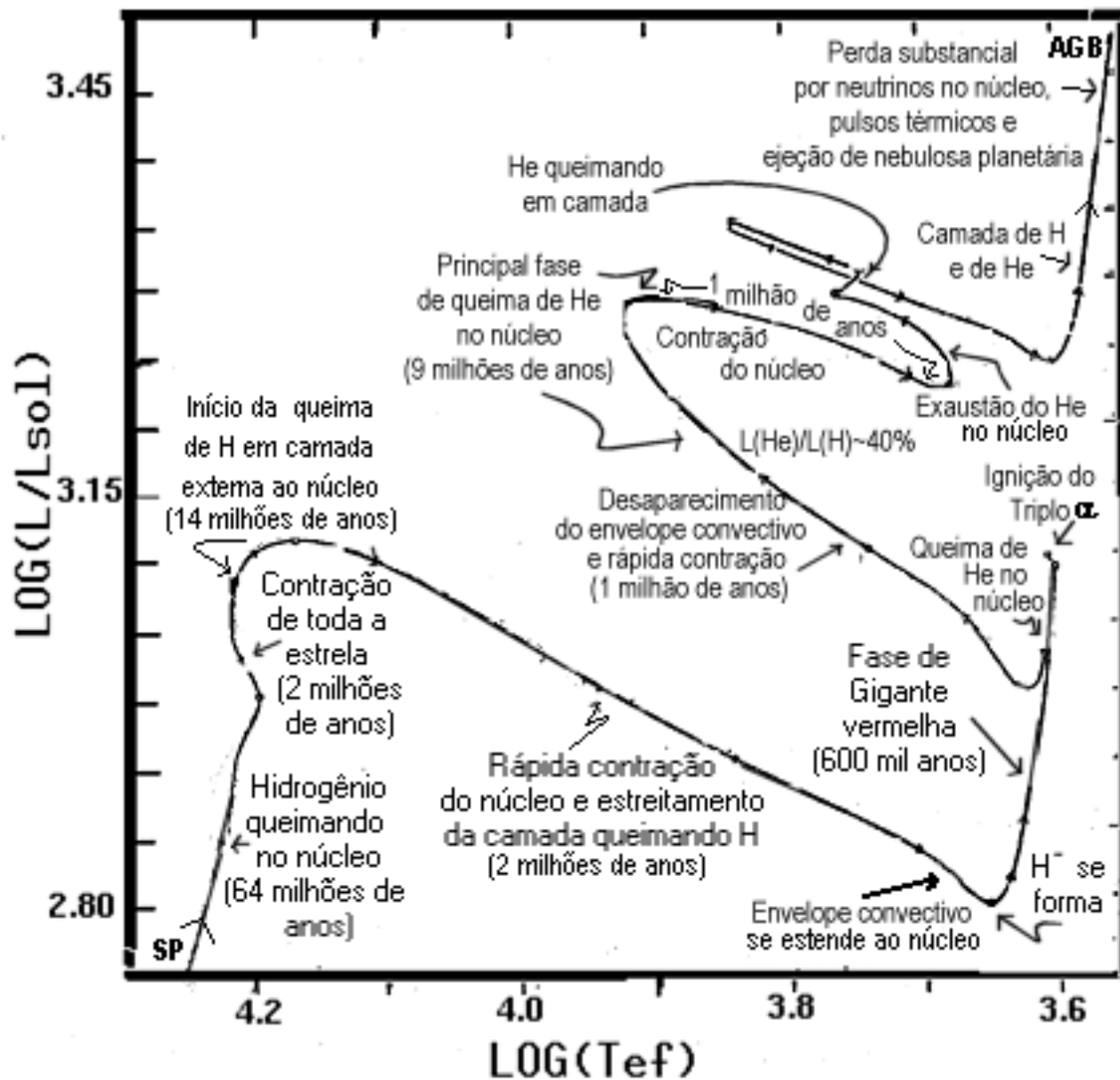
Como obter uma visão geral?

☑ Diagrama H-R

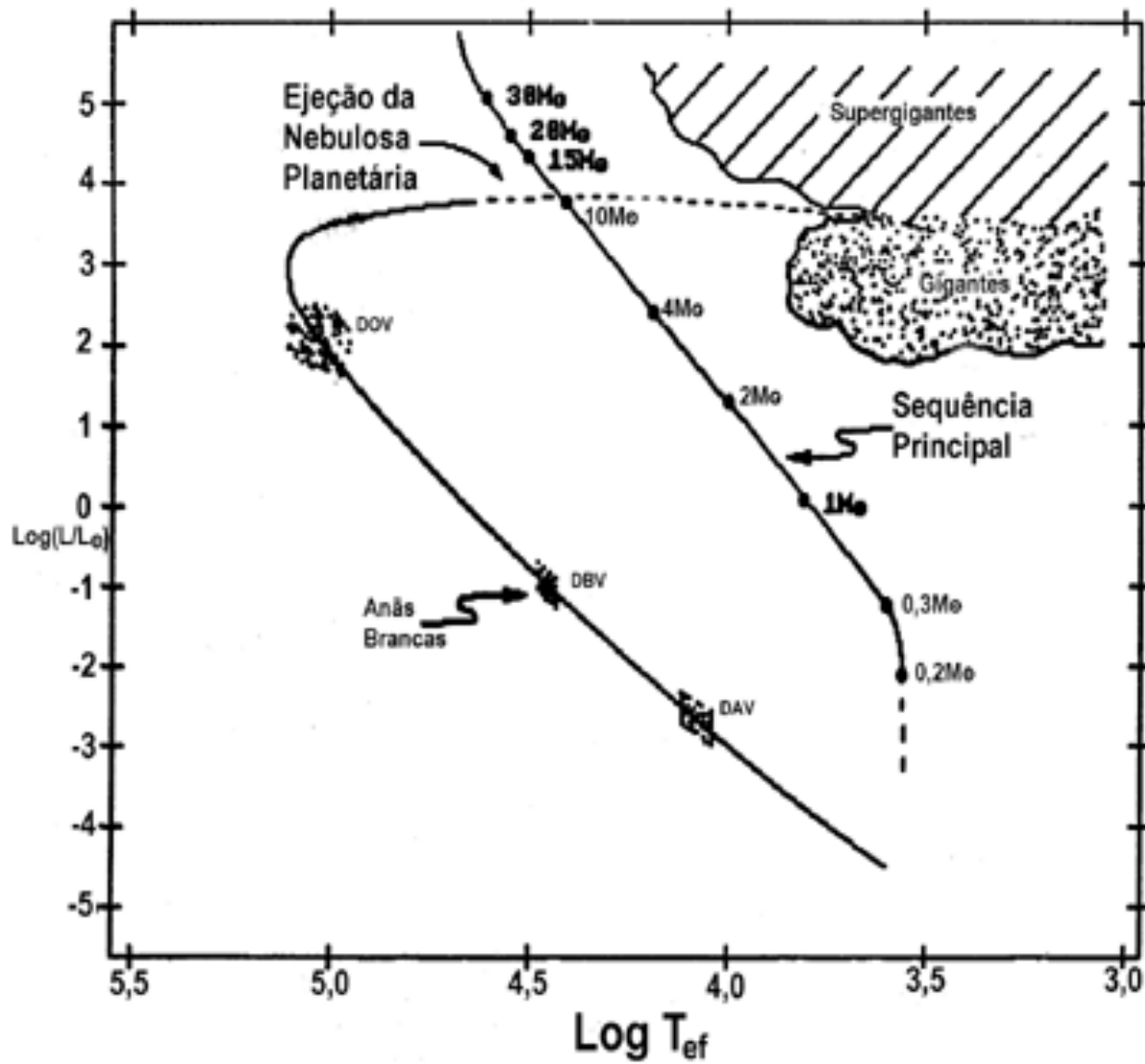
- ✓ Quadro evolutivo dos diversos tipos de objetos celestes
- ✓ Possibilidade de estudar classes diferentes num mesmo aglomerado globular (**mesmas condições iniciais, distância e composição química**)
- ✓ Para um mesmo objeto, define claramente a dependência Luminosidade x Temperatura efetiva, para uma dada massa inicial.
- ✓ Define também as regiões proibidas antes da estrela chegar na sequência principal (protoestrela)



Fonte: Western Washington Univ.



Crédito: Kepler, S. O. e Saraiva, M. F. – Introdução à Astronomia e Astrofísica



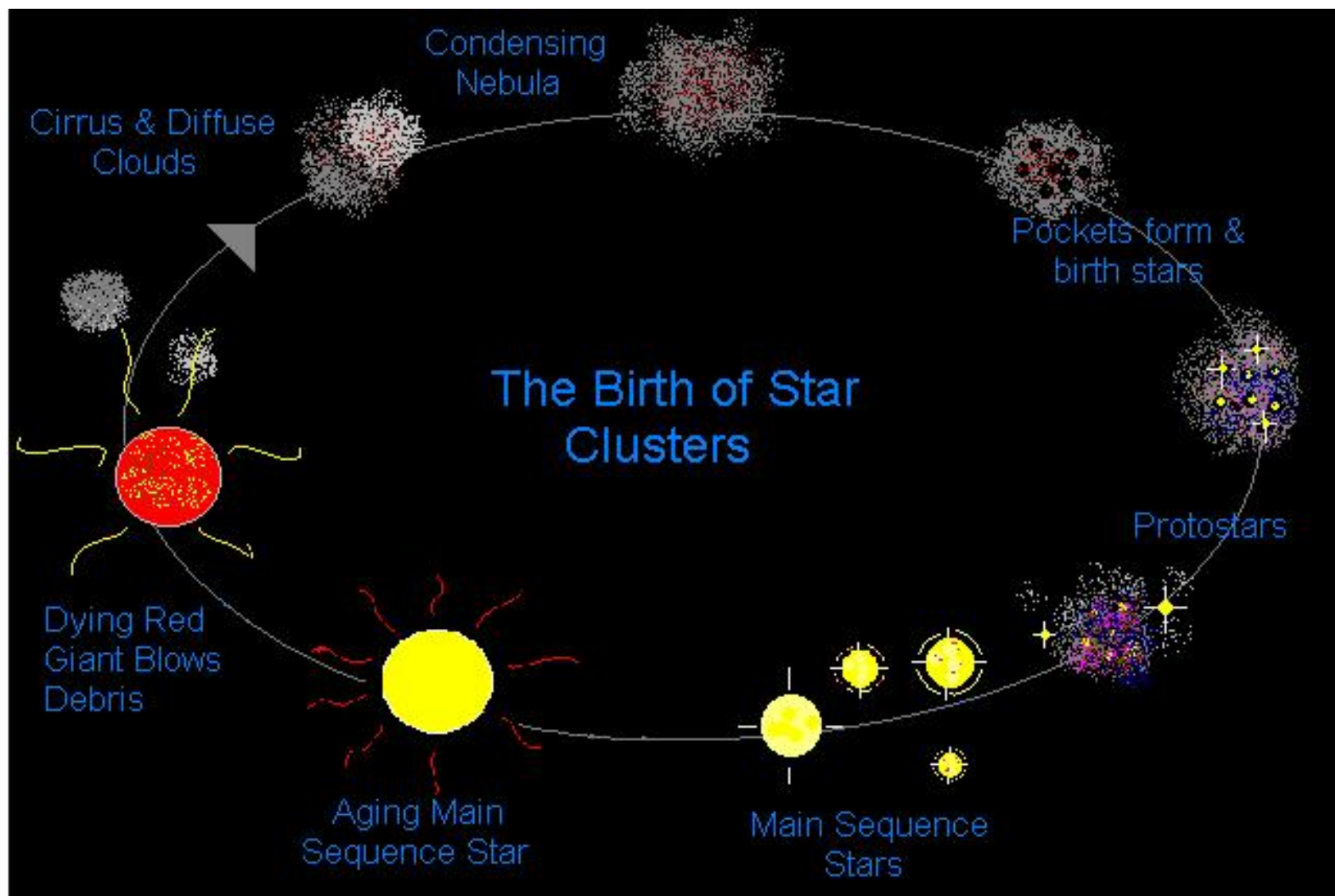
Crédito: Kepler, S. O. e Saraiva, M. F. – Introdução à Astronomia e Astrofísica

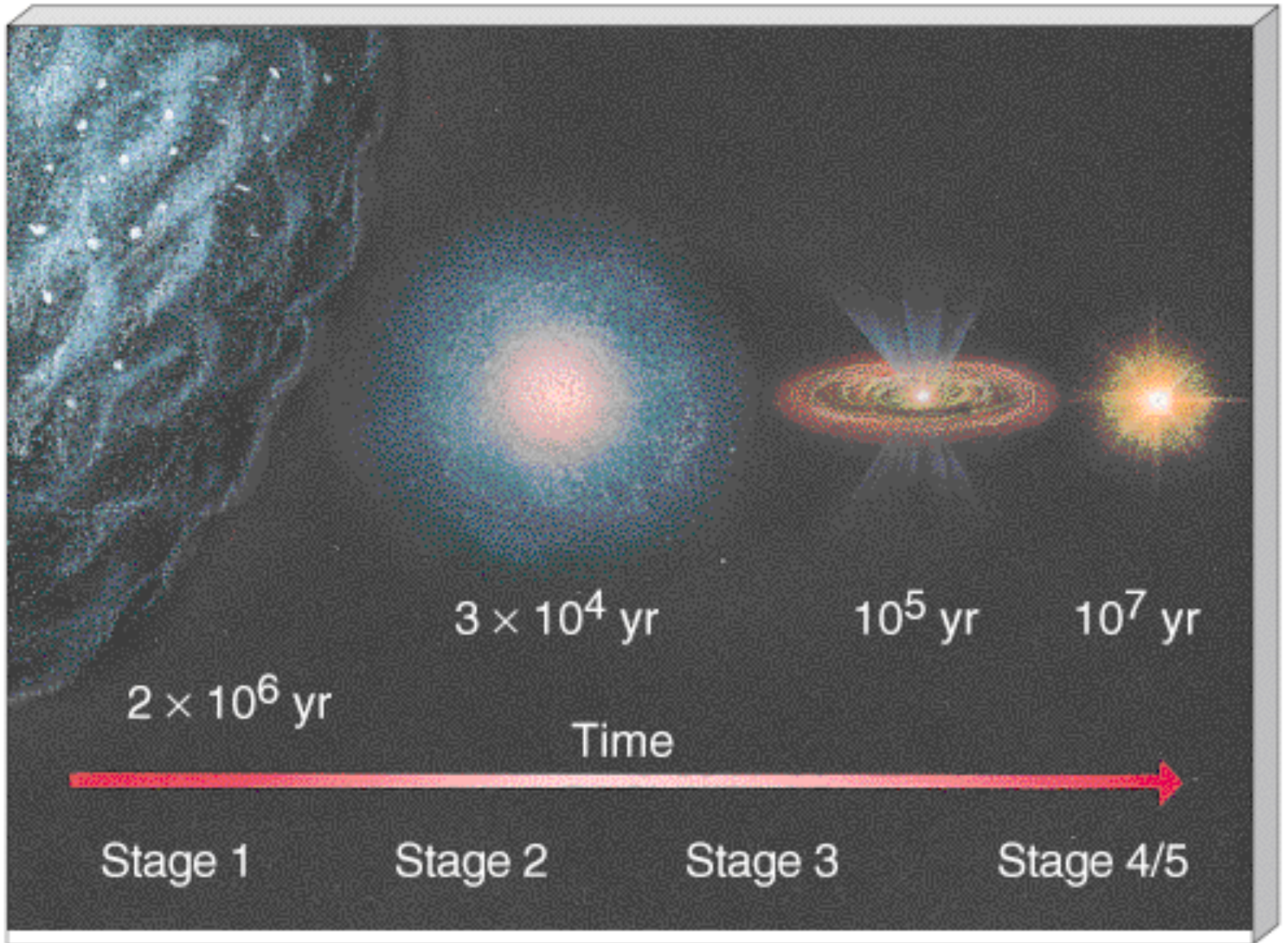


O meio interestelar

- ☑ De onde as estrelas vêm? Material no meio interestelar
- ☑ Composição típica: hidrogênio, hélio e algumas moléculas complexas
- ☑ Poeira e metais também são encontrados.
- ☑ Matéria prima para formação de estrelas: nuvens moleculares

Formação estelar



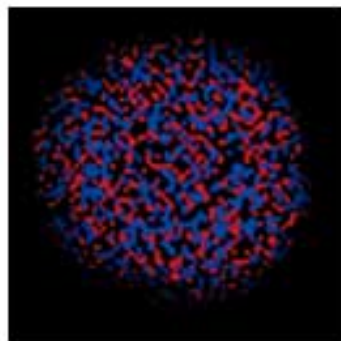


Da "gestação" ao nascimento...

- ☑ Massa inicial $> 100 M_{\text{Sol}}$ e raio inicial da ordem de $10^{18} - 10^{19}$ cm ($R_{\text{Sol}} = 7 \times 10^{10}$ cm).
- ☑ Contração após atingir o limite de Jeans, de acordo com a escala de tempo de Kelvin-Helmholtz.
- ☑ Movimento ao longo da linha de Hayashi.
- ☑ Início da queima nuclear ao entrar na sequência principal (ZAMS).

Etapas

1. Nuvem de gás
2. Fragmentação
3. Protoestrela
4. Contração
5. Trajetória de Hayashi e ignição
6. Ajuste à sequência principal

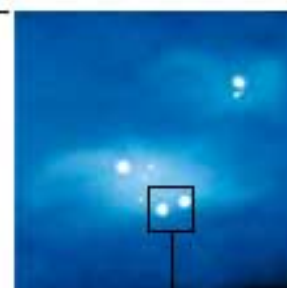
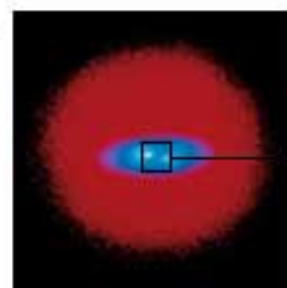


Tumulto primordial

O processo que levou à criação das primeiras estrelas foi muito diferente da formação de estrelas do presente. Mas as mortes violentas de algumas delas pavimentaram o caminho para o surgimento do universo que temos hoje.

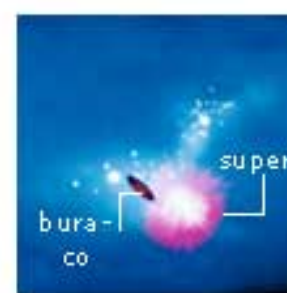
1- As protogaláxias, os primeiros sistemas de formação de estrelas, consistiam em sua maior parte de partículas elementares conhecidas como matéria escura. A matéria ordinária – principalmente átomos de hidrogênio – misturou-se no início com a matéria escura. Mas o resfriamento do gás hidrogênio permitiu que a matéria ordinária se contraísse, enquanto a matéria escura permanecia dispersa

2- O hidrogênio resfriado acomodou-se num disco giratório no centro da protogaláxia. As regiões mais densas do gás contraíram-se em aglomerados formadores de estrelas, cada um deles centenas de vezes mais densos que o Sol.



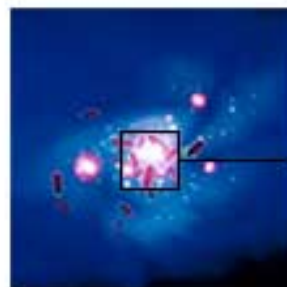
3- Alguns dos aglomerados de gás sofreram um colapso descontrolado e formaram estrelas densas e luminosas. A radiação ultravioleta das estrelas ionizou o gás hidrogênio que as envolvia.

4- Alguns milhões de anos depois, ao final de suas breves vidas, algumas das primeiras estrelas transformaram-se em buracos negros igualmente densos.

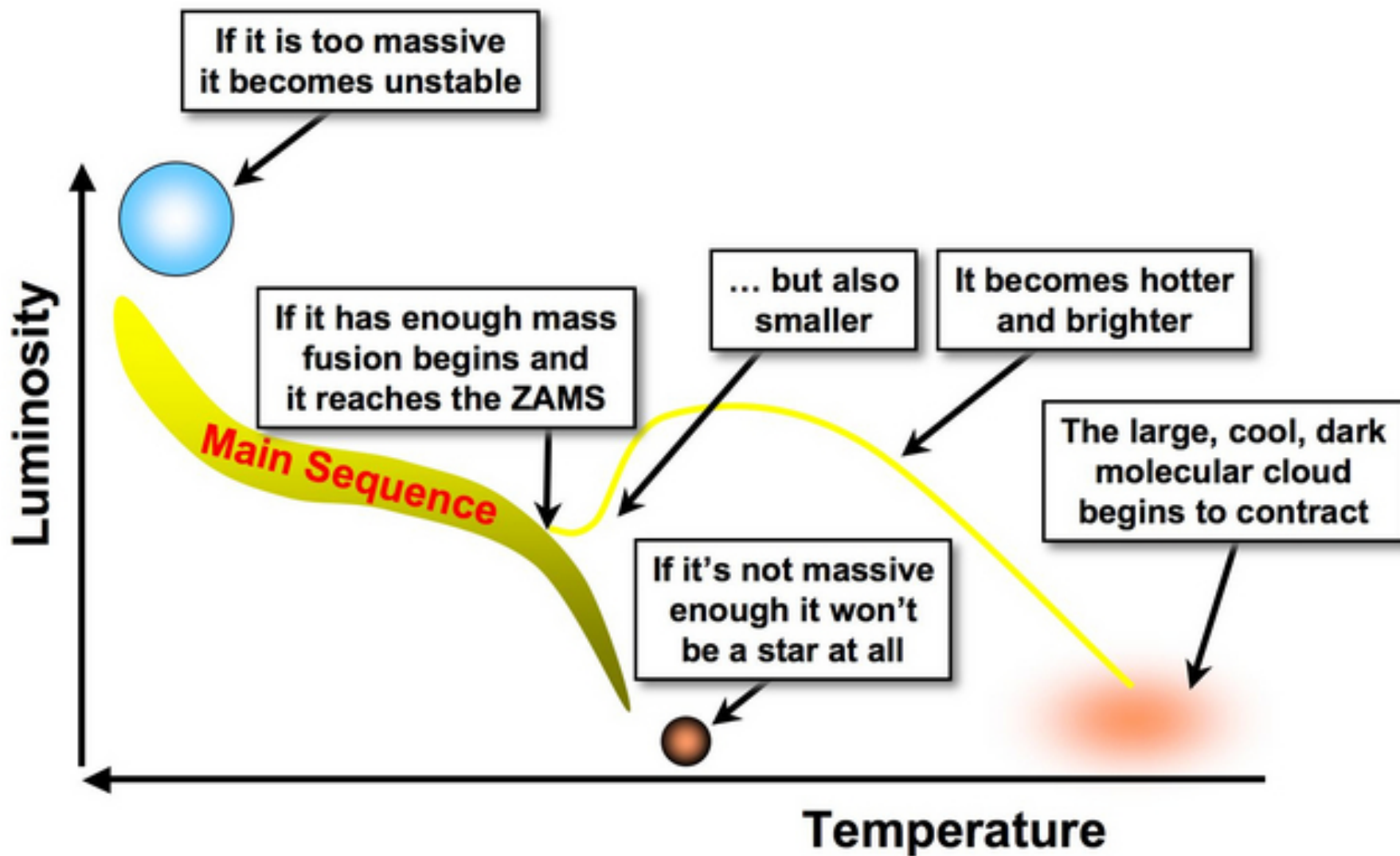


5- A atração gravitacional empurrou as protogaláxias umas em direção às outras. Ao longo de centenas de milhões de anos, sucessivas fusões levaram à criação de galáxias

6- A colisão de protogaláxias muito provavelmente disparou formações explosivas de estrelas, exatamente como as fusões galácticas fazem no universo atual

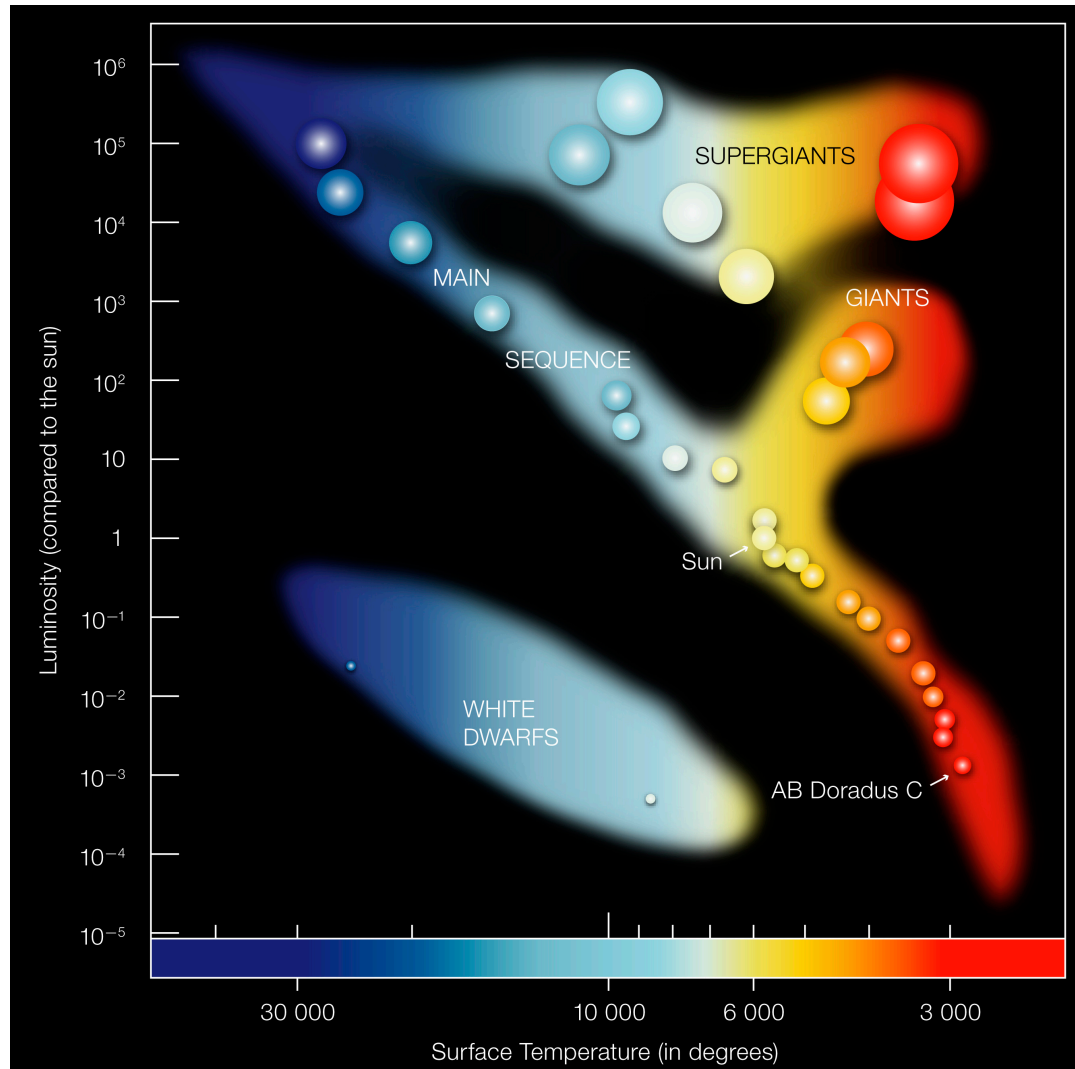


7- Os buracos negros das protogaláxias provavelmente se fundiram, levando à criação de buracos negros supermassivos. O rodópio violento de gás para dentro desses buracos negros teria gerado a radiação característica dos quasares



Sequência principal (SP)...

- ✓ Evolução de acordo com a massa e a composição química inicial
- ✓ Queima de H: 90% do tempo, que equivale ao tempo de permanência na SP!





Questões para reflexão...

- ☑ Por que 90% das estrelas conhecidas encontram-se na SP?
- ☑ Por que a massa é tão importante na determinação da trajetória evolutiva da estrela?
- ☑ Como uma estrela de 1 massa solar pode ser, em épocas diferentes, uma T-Tauri, uma gigante vermelha e uma anã branca?
- ☑ Por que e como anãs brancas e gigantes vermelhas são diferentes das estrelas da SP?

Evolução pós-SP...

- ☑ Processos sucessivos de queima de combustível nuclear, exaustão e contração.
- ☑ A cada nova contração (que depende da massa inicial) o interior da estrela se aquece e passa a queimar elementos mais pesados.
- ☑ Expansão do envelope de H → gigante vermelha!
- ☑ A partir deste estágio há uma divisão das trajetórias...

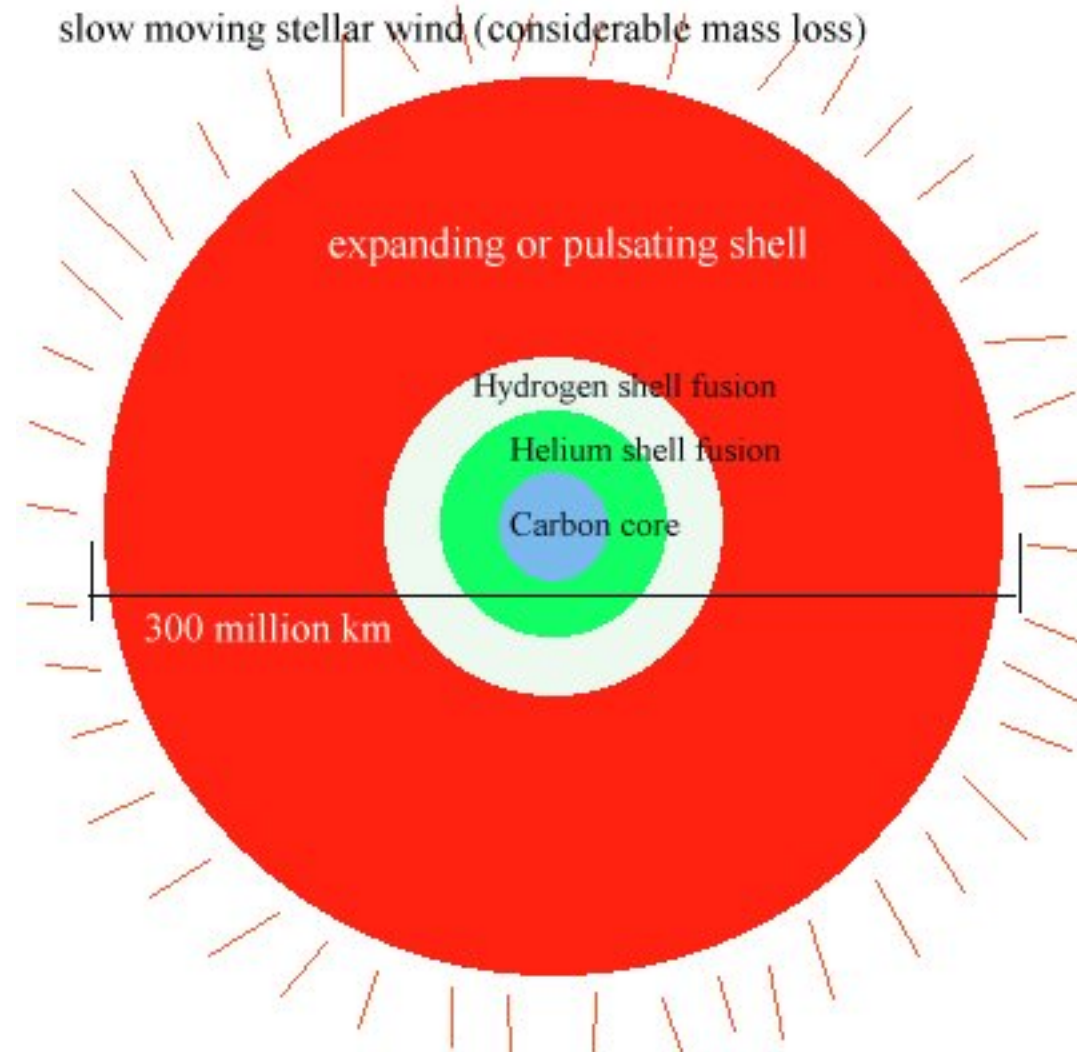


Evolução pós-SP: estrelas de baixa massa

- ☑ Para estrelas de baixa massa:
 - ✓ Ao esgotar o hidrogênio no núcleo, a estrela encolhe lentamente.
 - ✓ A temperatura no núcleo ainda não é capaz de queimar hélio, mas cresce a ponto de queimar o hidrogênio nas bordas do núcleo.
 - ✓ Recomeça a fusão nuclear do hidrogênio restante.

Fase de gigante vermelha

- ☑ Núcleo quente (elétrons degenerados) e envelope bastante frio.
- ☑ Gigante (raio grande) vermelha (T_{sup} baixa)
- ☑ Causada pelo excesso de temperatura na camada externa de hidrogênio, aumentando seu brilho e diminuindo a temperatura superficial ($F = L / 4\pi r^2$).





A física do interior da GV...

- ☑ Fusão de hélio ($T > 10^8$ K).
- ☑ Energia produzida no núcleo gera aumento de temperatura.
- ☑ Pressão permanece constante (ainda núcleo degenerado) com o aumento de temperatura.
- ☑ Fusão quase instantânea de todo o hélio
- ☑ FLASH do hélio.

Estágios finais ($M < 3 M_{\text{Sol}}$)

- ☑ Por que, após o flash do hélio, a pressão de degenerescência dos elétrons é removida?
- ☑ Fusão de hélio em carbono
- ☑ Resfriamento e expansão do envelope
- ☑ Núcleos e elétrons se recombinaam
- ☑ O envelope é ejetado → nebulosa planetária!



Massas e evolução estelar

- ☑ Intervalo típico de massas estelares: 0,08 a 40–50 M_{Sol} .
- ☑ Estrelas hipergigantes: massas até 160 M_{Sol} .
- ☑ Razoavelmente constante ao longo da vida da estrela.
- ☑ Variação de menos de 1% desde entrada na SP até o estágio de nebulosa planetária ou supernova, numa estrela normal.



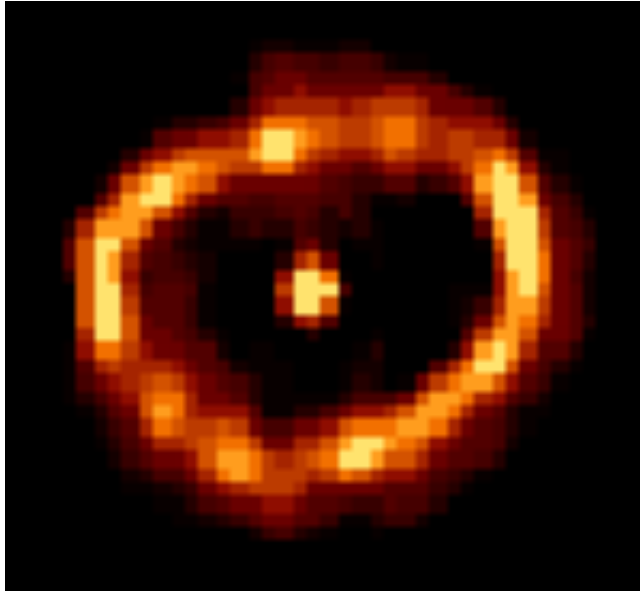
Perda de massa e evolução estelar

- ☑ Perda de até 60% por vento estelar, no caso de estrelas muito massivas.
 - ✓ Estrelas com $M > 25 M_{\text{Sol}}$ podem perder até 60% de sua massa via vento estelar.
- ☑ Transferência de massa em sistemas binários.
- ☑ Processos catastróficos (nebulosas planetárias ou supernovas).

Acresção Nova!!!

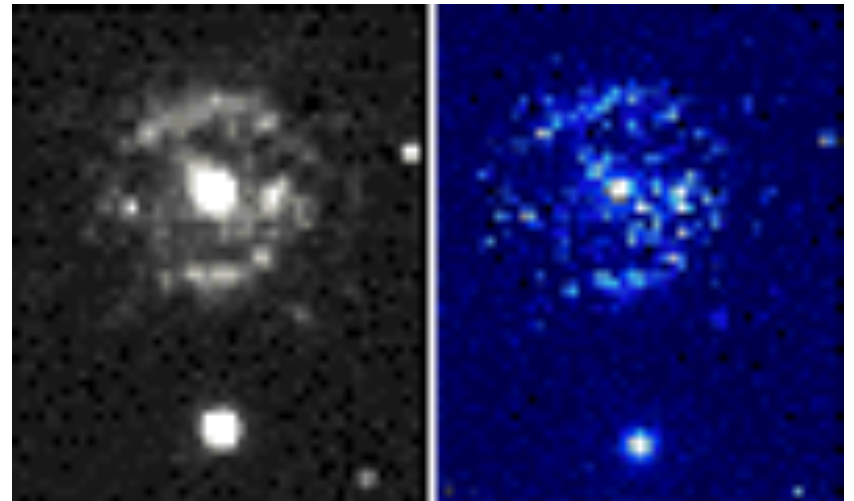
- ☑ Em um sistema constituído de anã branca + gigante vermelha, a transferência de matéria eleva a temperatura da anã até que possa haver um surto de reações nucleares (queima de H) em sua superfície.
- ☑ Nova!!!! $L_{nova} / L_{AB} \sim 10.000$
- ☑ O H e o He remanescente esperam nova “sobrecarga” por transferência para que haja um novo surto.
- ☑ Novas x supernovas?????

Novas...



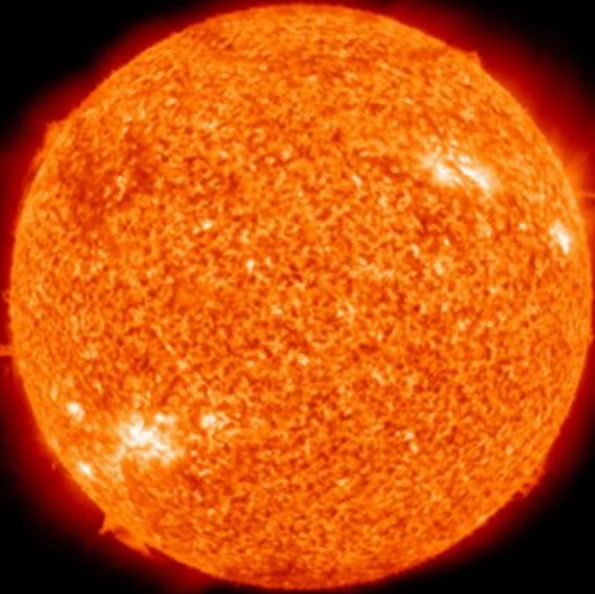
Nova Cygni

Evolução temporal
de uma nova



Nebulosa planetária...

Planetary Nebula: The Death of a Star



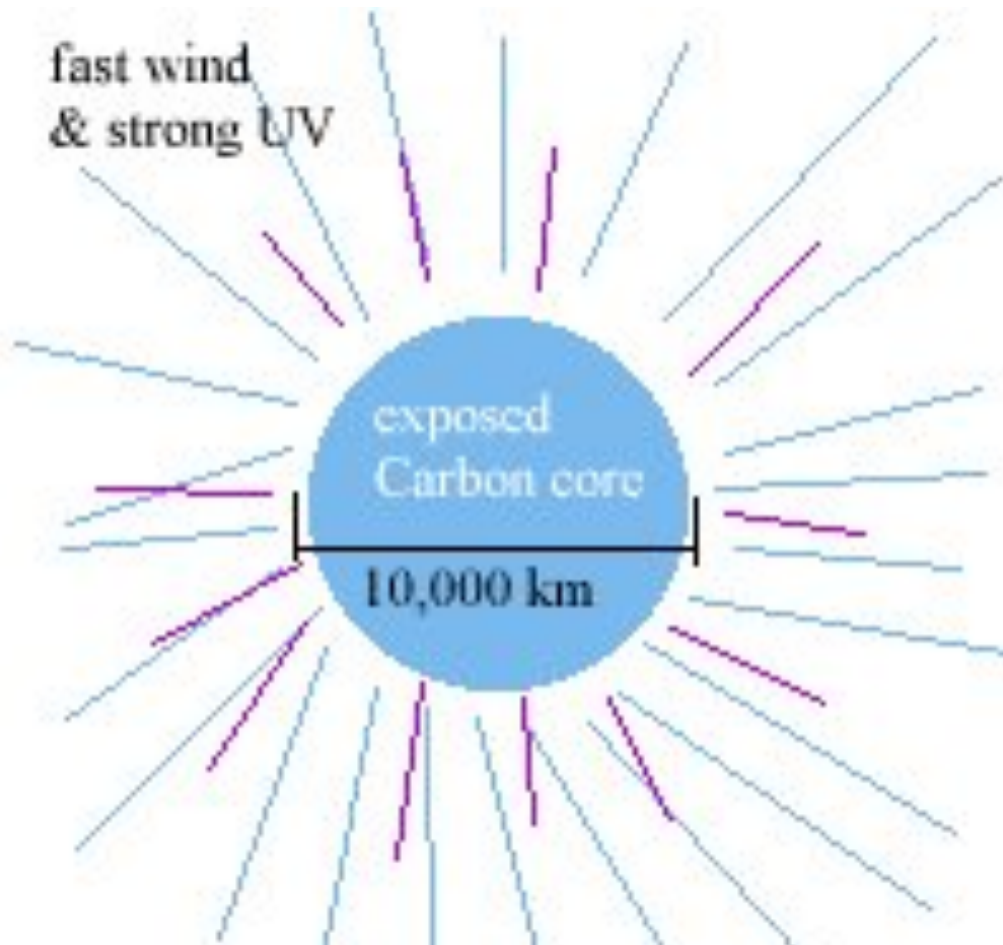
When the star runs out of helium, it gives out a large burst of energy and pushes its atmosphere into space, creating a Planetary Nebula.



Videos:

- [1. Planetary Nebula](#)**
- [2. Zoom into Planetary Nebula NGC 5189](#)**

Após a nebulosa planetária...



Sirius A e B

Núcleo torna-se uma anã branca



Estágios finais ($M > 1 M_{\text{sol}}$)

- ☑ Não se sabe exatamente o limite de transição, mas a maioria dos autores define 8 massas solares como a fronteira entre massa intermediária e grande massa.
- ☑ Se a massa da estrela, ao entrar na SP, for maior do que $8 M_{\text{sol}}$, o processo de queima nuclear continua a partir do carbono (oxigênio, neônio, etc., até o ferro).
- ☑ Aí o processo é interrompido.... por que?



Estágios finais ($M > 1 M_{\text{sol}}$)

- ☑ Vimos que parte dos elementos químicos entre o hidrogênio e o ferro são formados durante o processo evolutivo das estrelas... mas e os outros?
- ☑ E os elementos de número de massa superior ao ferro (até o urânio)?
- ☑ Que fração da matéria total do Universo constituem esses elementos (H, He..., Fe)?

Supernovas

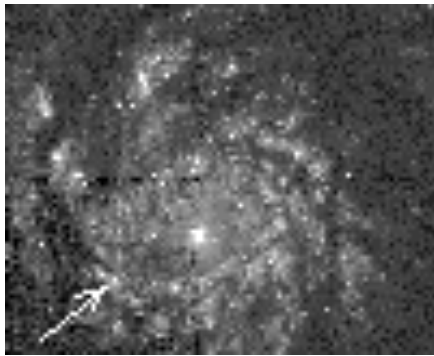
- ☑ Um dos eventos mais catastróficos do Universo.
- ☑ Cerca de 100 a 200 eventos anuais na nossa Galáxia.
- ☑ Provável criador de instabilidades que dão início à formação estelar.
- ☑ Ao terminar o ciclo de geração de energia nuclear (H – Fe) as camadas externas da estrela colapsam sob a ação de seu próprio peso:
 - ✓ Pressão gravitacional quebra todos os núcleos existentes. Captura eletrônica forma nêutrons.
 - ✓ Compressão forma um “núcleo de nêutrons”.



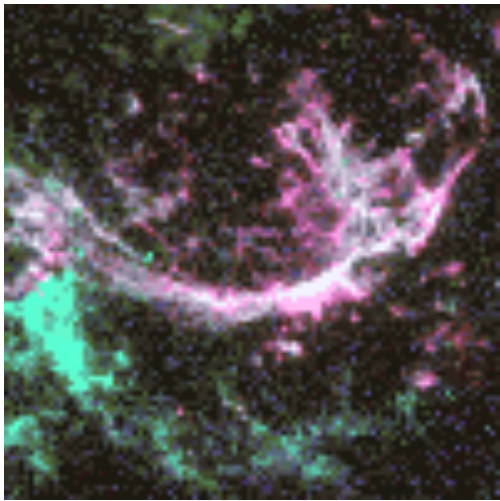
Supernovas

- ☑ Duração do colapso: ~ 1 segundo!
- ☑ Interrupção do colapso no centro e rebote.
- ☑ Raio do núcleo: 10 km ($R_{\text{Sol}} = 7 \times 10^5$ km).
- ☑ Geração de uma enorme onda de choque.
- ☑ Expulsão (por causa da onda de choque e dos neutrinos) das camadas externas.

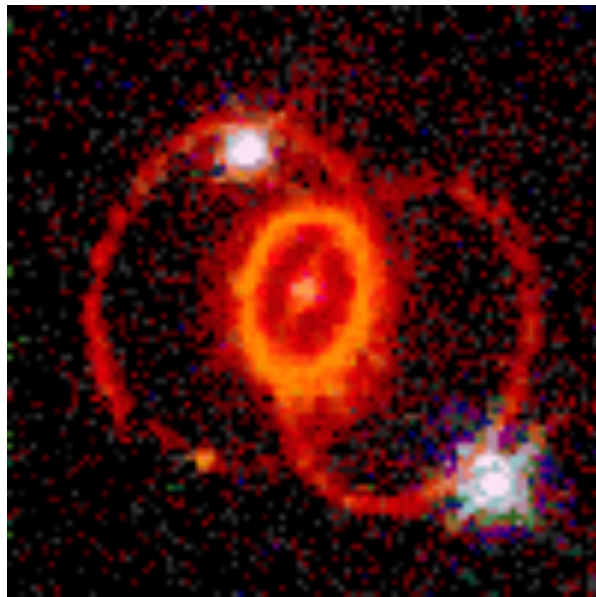
Supernovas (arquivos do Hubble)



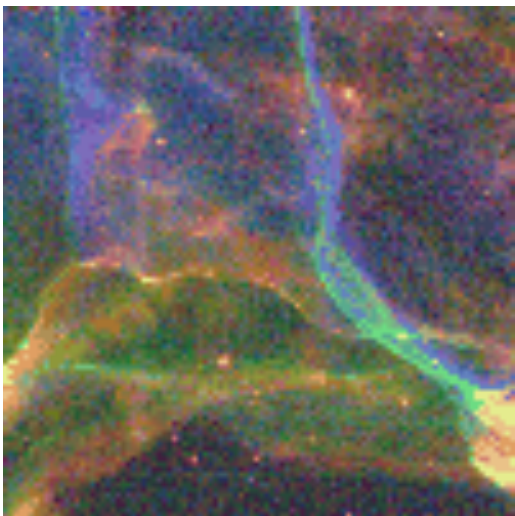
M51



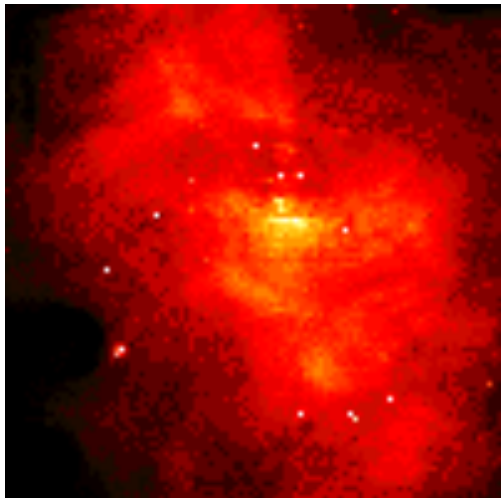
Cygnus



SN 1987A



SN do Veu



Nebulosa do Caranguejo



Limites de massa


- ☑ Massa final $< 1,44 M_{\text{Sol}}$ \longrightarrow anã branca
- ☑ $1,44 M_{\text{Sol}} < M < 2-3 M_{\text{Sol}}$ \longrightarrow estrela de
nêutrons
- ☑ Massa final $> 3 M_{\text{Sol}}$ \longrightarrow buraco
negro



Estágios finais – estrelas de nêutrons

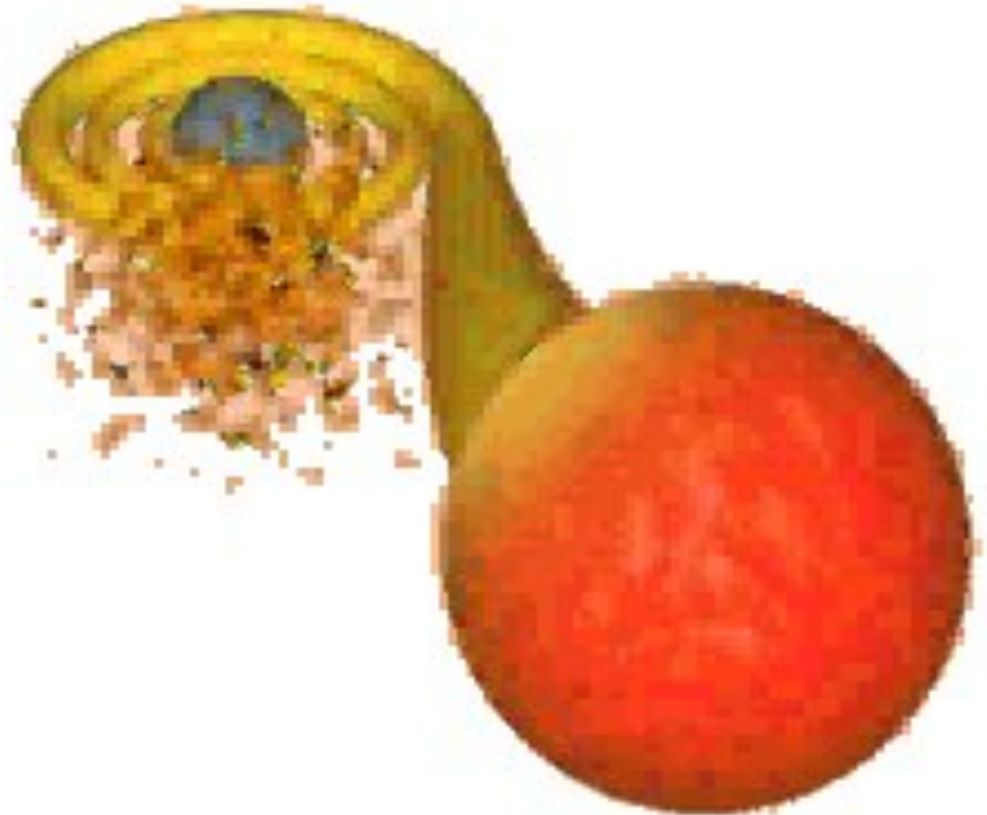
- ☑ Propriedades típicas:
 - ✓ $\rho \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$
 - ✓ $r \sim 10 \text{ km}$
 - ✓ $B \sim 10^{12} \text{ G}$
- ☑ Qual é a diferença entre estrelas de nêutrons e pulsares?
- ☑ O que cria os pulsares?
- ☑ $P_{\text{rot}} \sim 0,01 \text{ a } 10 \text{ s}$ ($P_{\text{Sol}} \sim 25 - 29 \text{ dias}$). Por que essa diferença?

Buracos negros

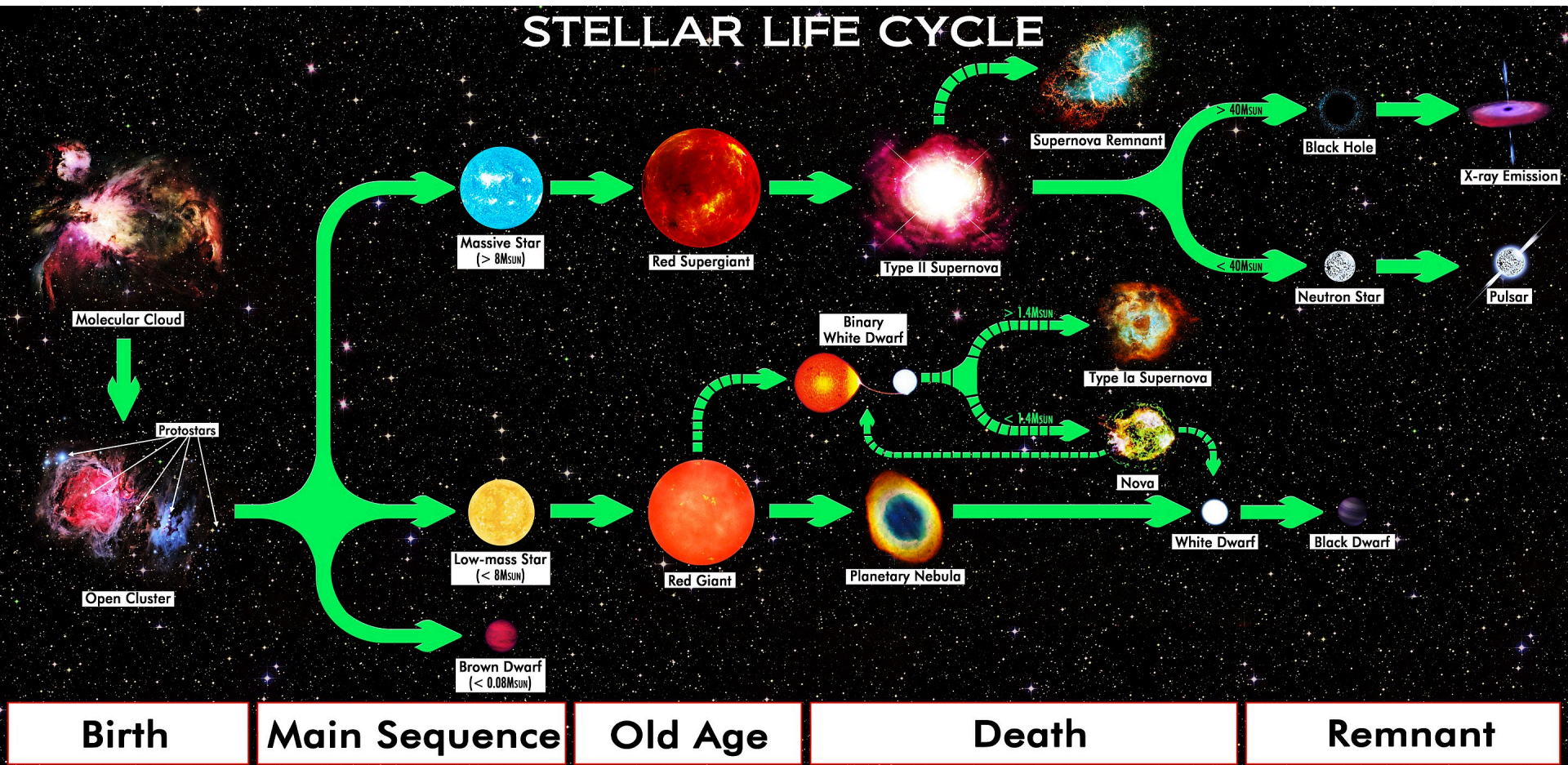
- ☑ $M_{\text{caroço}} > 3 M_{\text{Sol}}$, a pressão dos nêutrons degenerados é incapaz de suportar a pressão gravitacional  buraco negro!!!
- ☑ Dimensão: não há (singularidade), entretanto nos referimos ao horizonte de eventos via raio de Schwarzschild.
- ☑ Observação indireta via acreção de matéria das vizinhanças.
- ☑ Uma das prováveis causas da existência de lentes gravitacionais.

Acresção em sistemas binários

- ☑ Transferência de massa altera radicalmente os rumos da evolução estelar para estrelas binárias!

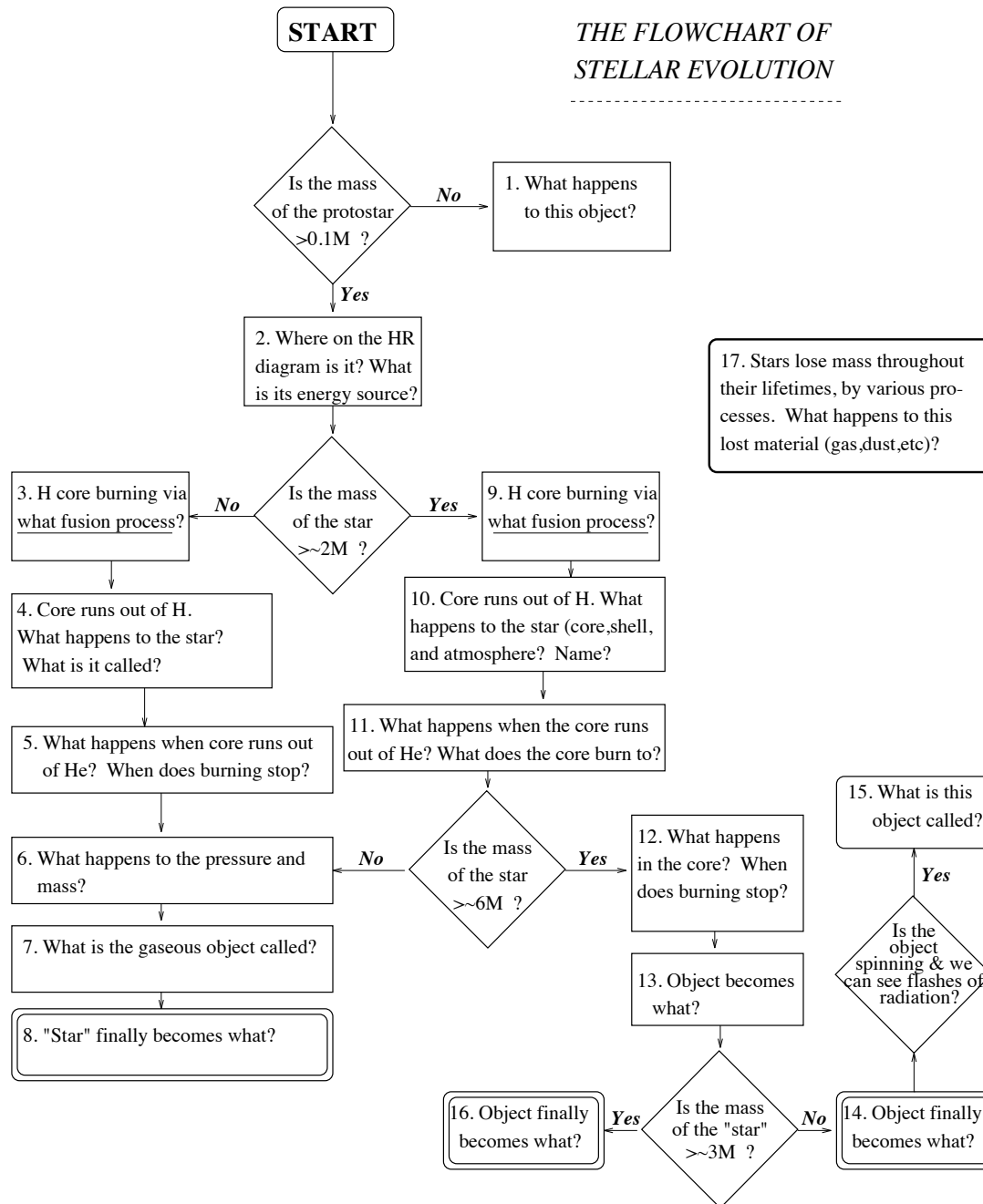


Só para lembrar...



E o ciclo acima é uma pequena parte do ciclo da matéria-energia no Universo...

*THE FLOWCHART OF
 STELLAR EVOLUTION*



SEU CYCLES OF MATTER AND ENERGY

Onde a evolução estelar se encontra, nessa rede de interações??



Fonte: Beyond Einstein, GSFC/NASA (2003)



FIM DA AULA 2