

V Escola José Plínio Baptista

Estrelas anãs brancas II:

Modelos Teóricos

Alejandra Daniela Romero

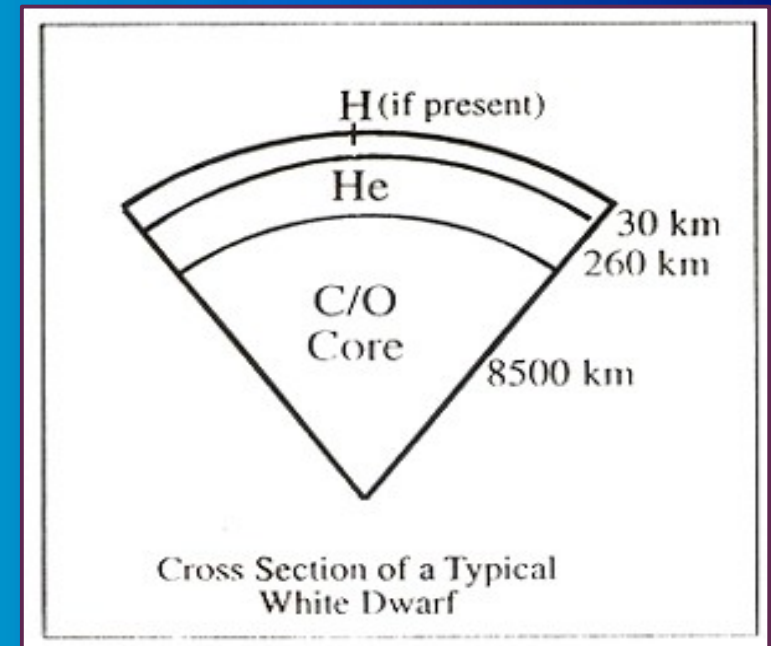


Estrelas anãs brancas

Final da vida das estrelas com massas $< 10 \pm 2 M_{\text{sol}}$.

$M \sim 0.6 M_{\text{sol}}$, $R \sim 10.000 \text{ km}$, $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$

$T_c \sim 2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^6 \text{ K}$

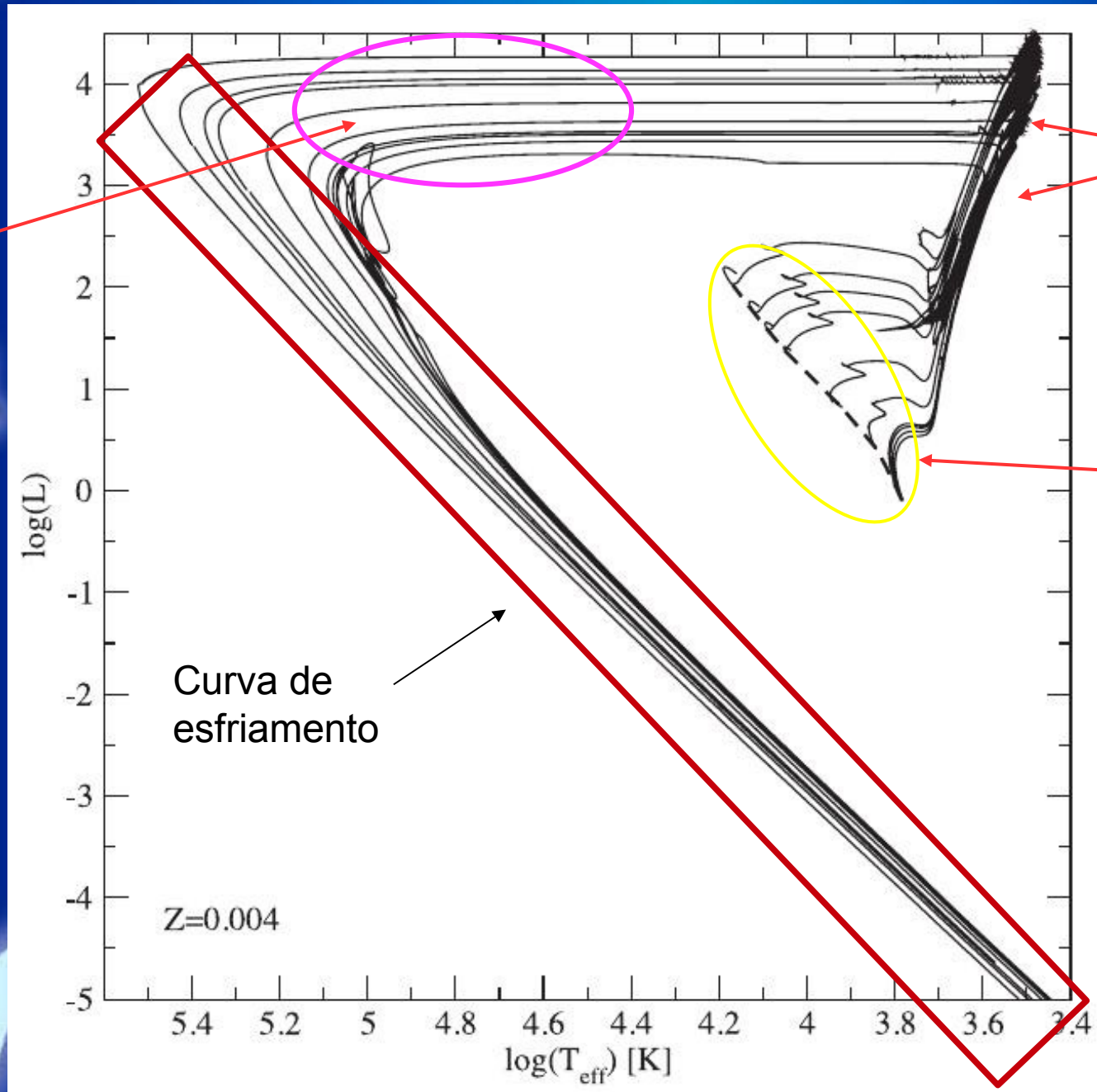


A pressão é dominada pelo gás de elétrons degenerado (que não depende da temperatura);

A estrutura térmica está dominada pelos ions não degenerados.

Lembrando como se formam as anãs brancas

Nebulosa Planetaria



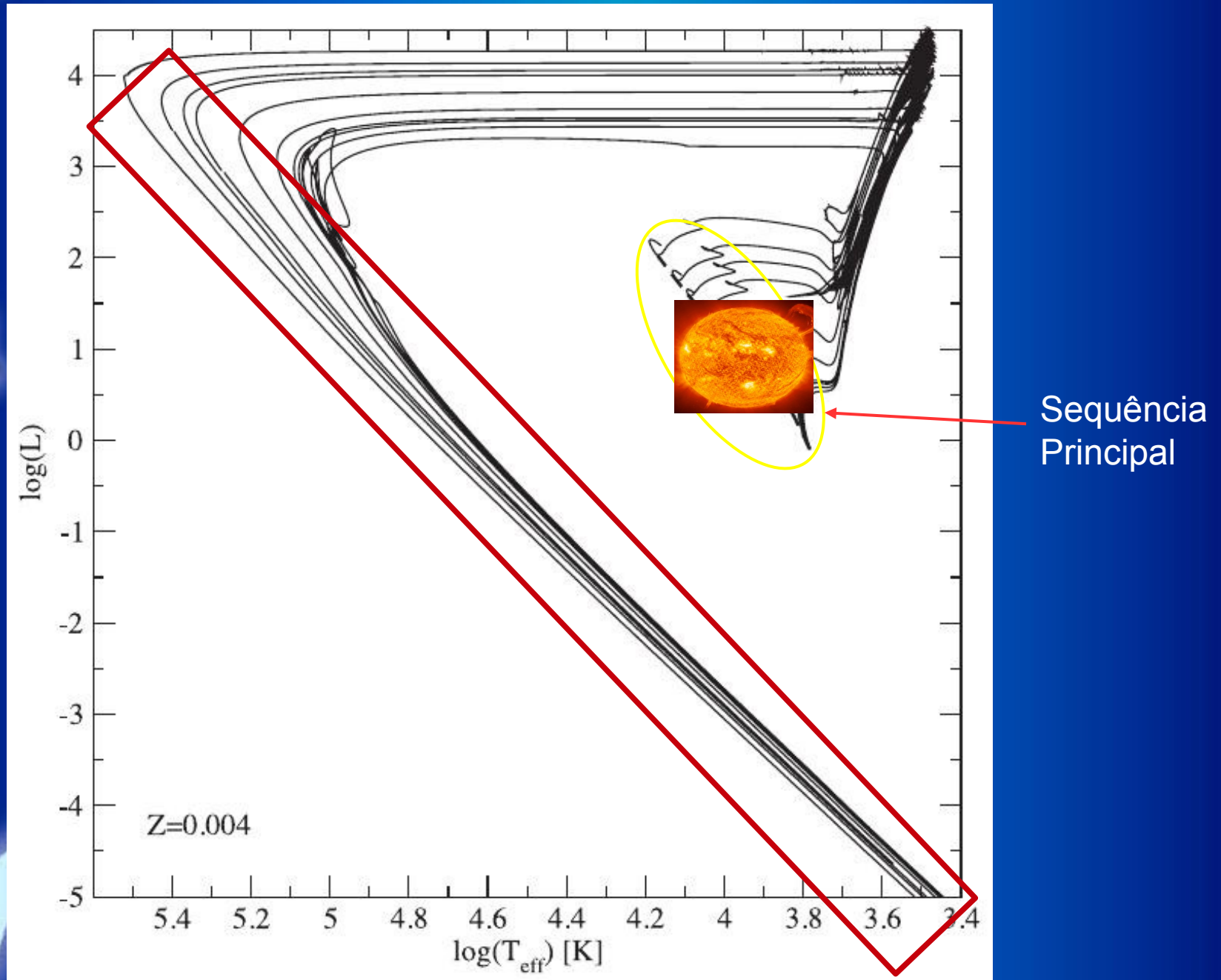
Etapa de gigante
(Queima de He)

Sequência Principal
(queima de H)

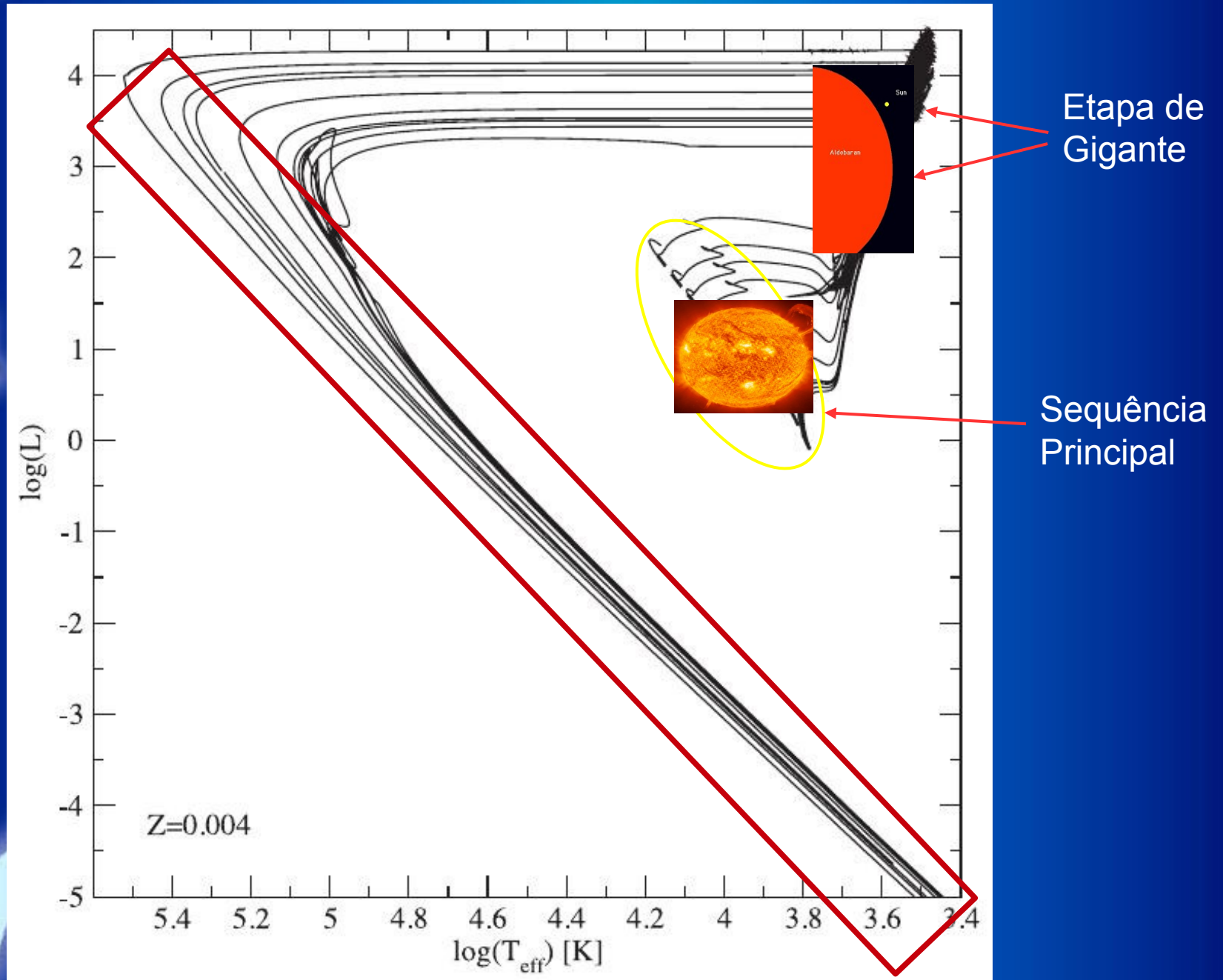
Curva de
esfriamento

$Z=0.004$

Lembrando como se formam as anãs brancas

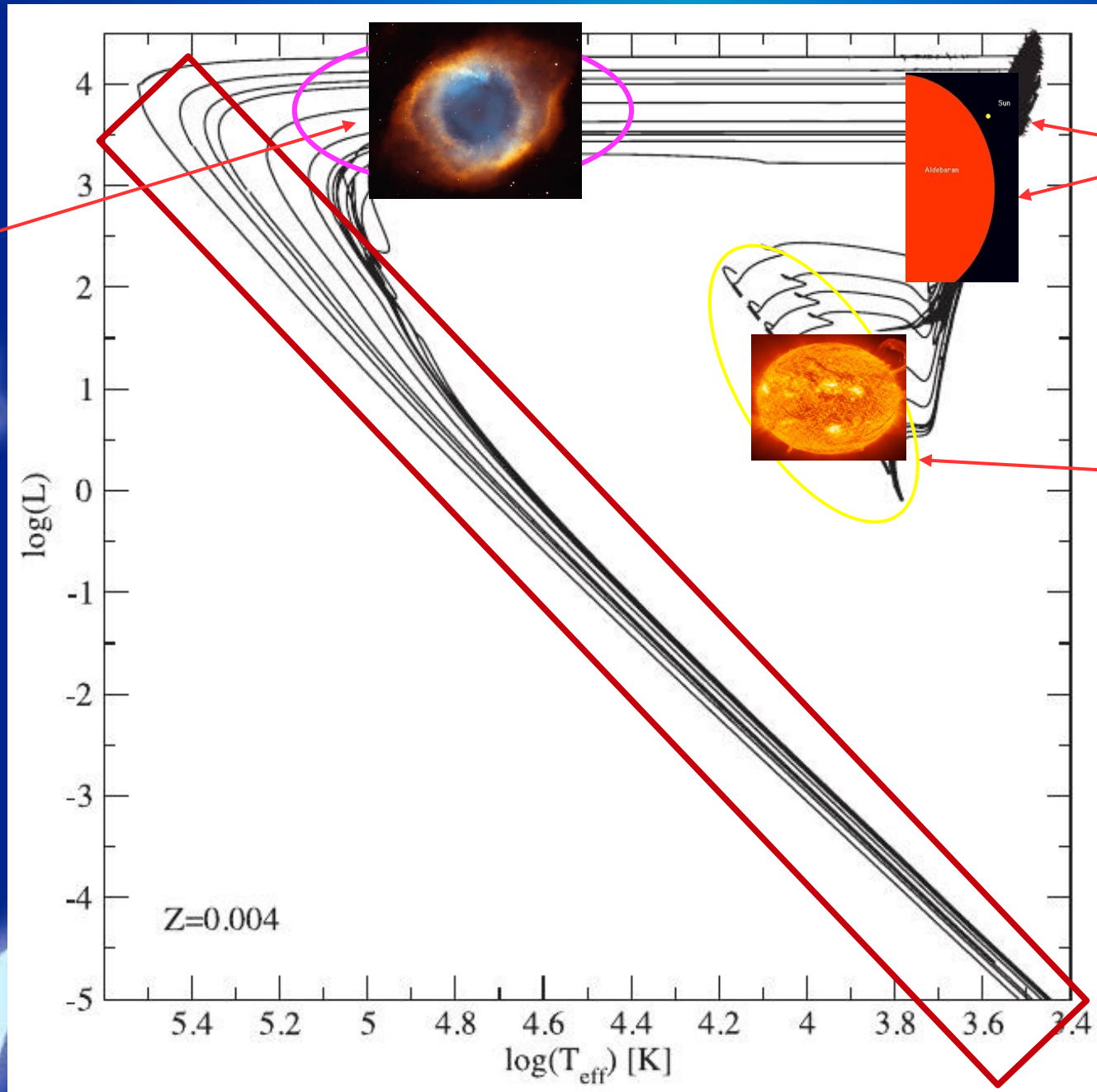


Lembrando como se formam as anãs brancas



Lembrando como se formam as anãs brancas

Nebulosa Planetaria

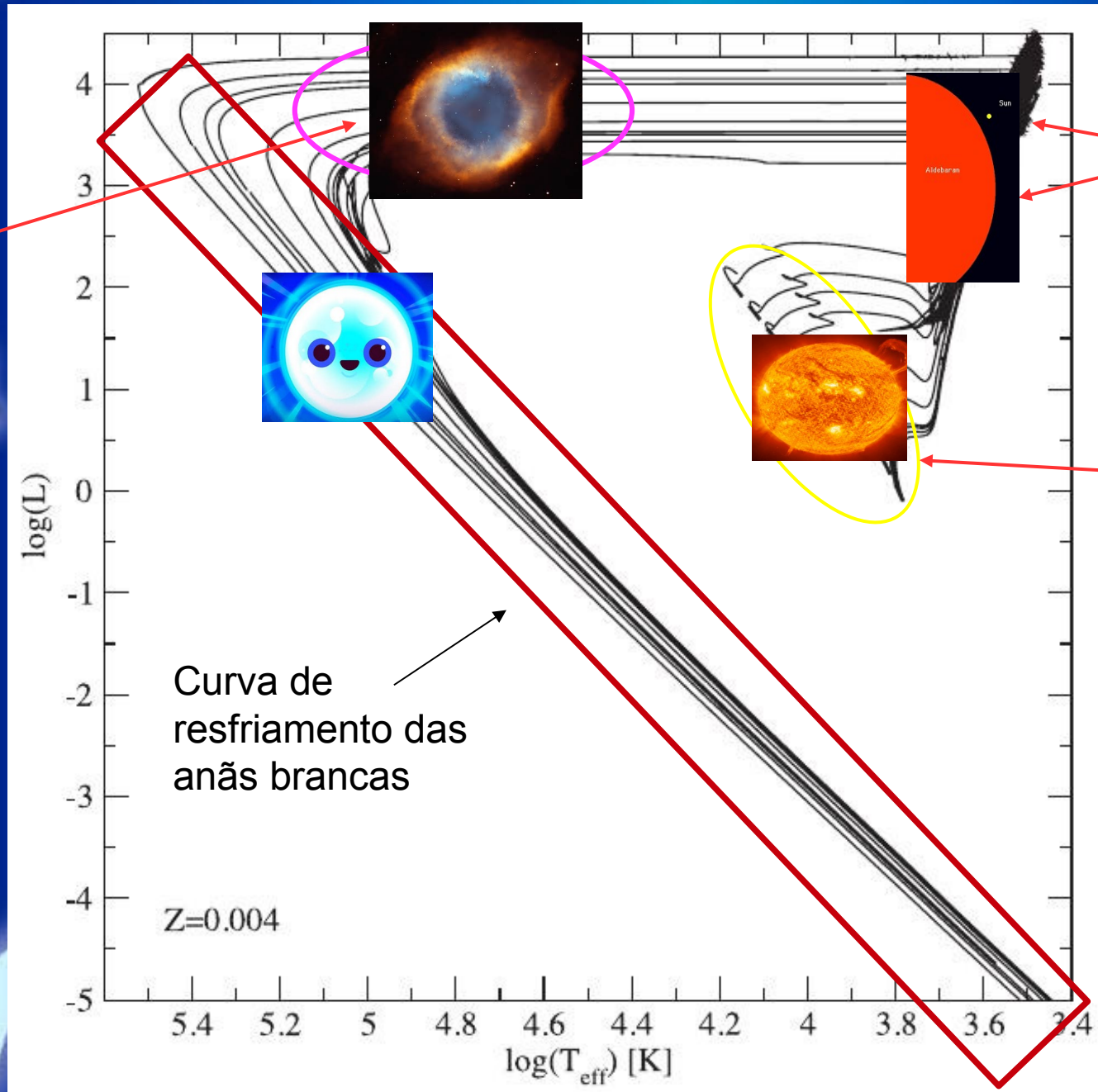


Etapas de Gigante

Sequência Principal

Lembrando como se formam as anãs brancas

Nebulosa Planetaria



Etapa de Gigante

Sequência Principal

Curva de resfriamento das anãs brancas

$Z=0.004$

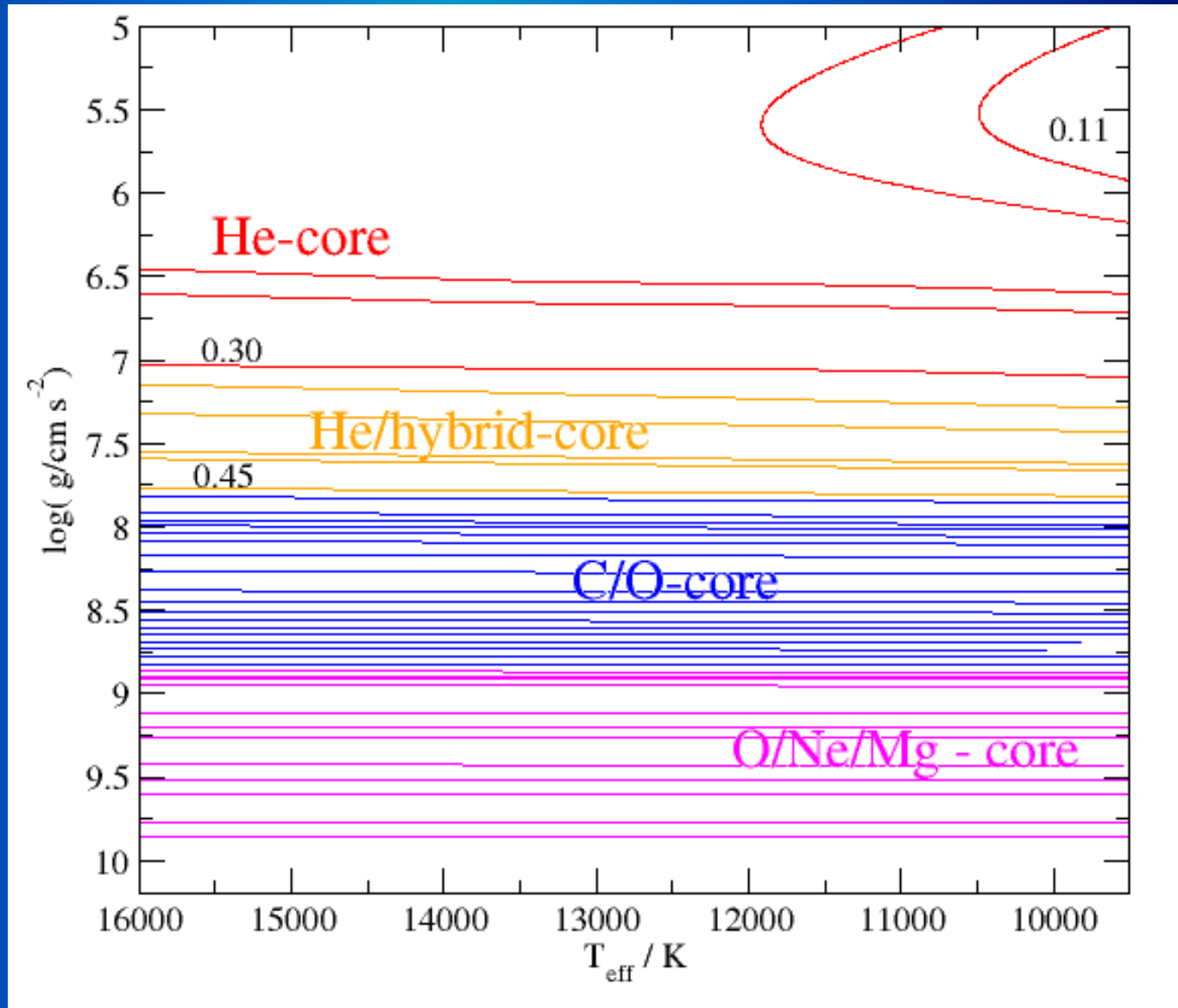
Sequências de esfriamento

He-core: $< 0.3 M_{\text{sun}}$

He- or Hybrid-core 0.30 to $0.45 M_{\text{sun}}$

C/O-core: ~ 0.45 to $\sim 1.05 M_{\text{sun}}$

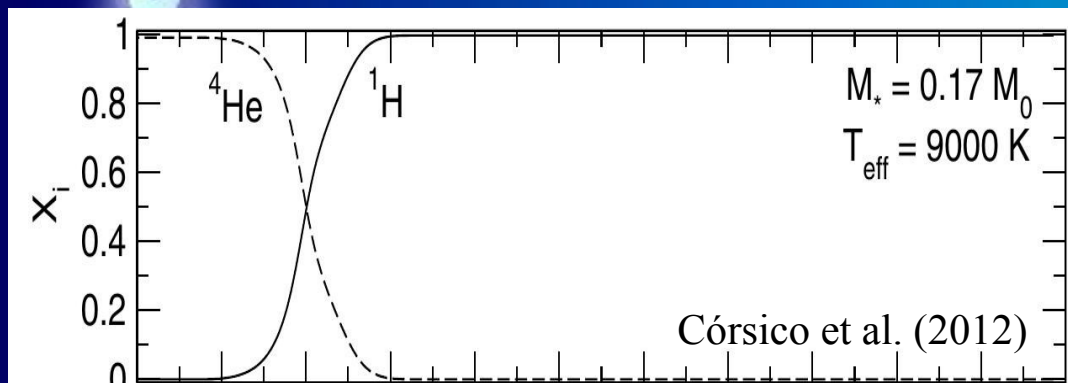
O/Ne/Mg < 1.05 - $1.10 M_{\text{sun}}$



Althaus et al. (2013), Althaus et al. (2009), Romero et al. (2015), Lauffer et al. (2008)

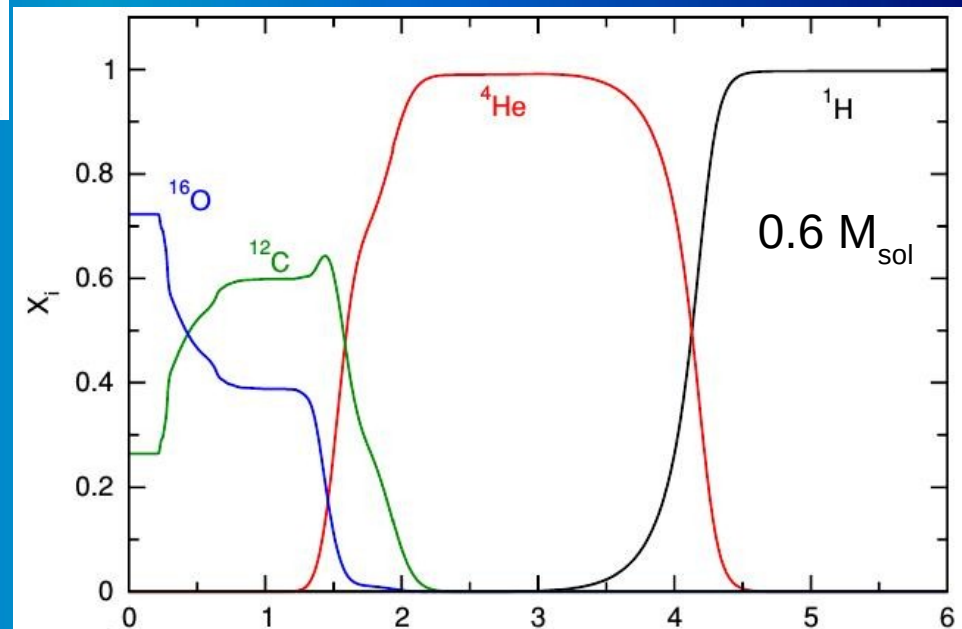
Composição central

Dependendo da massa, temos diferentes composições do núcleo

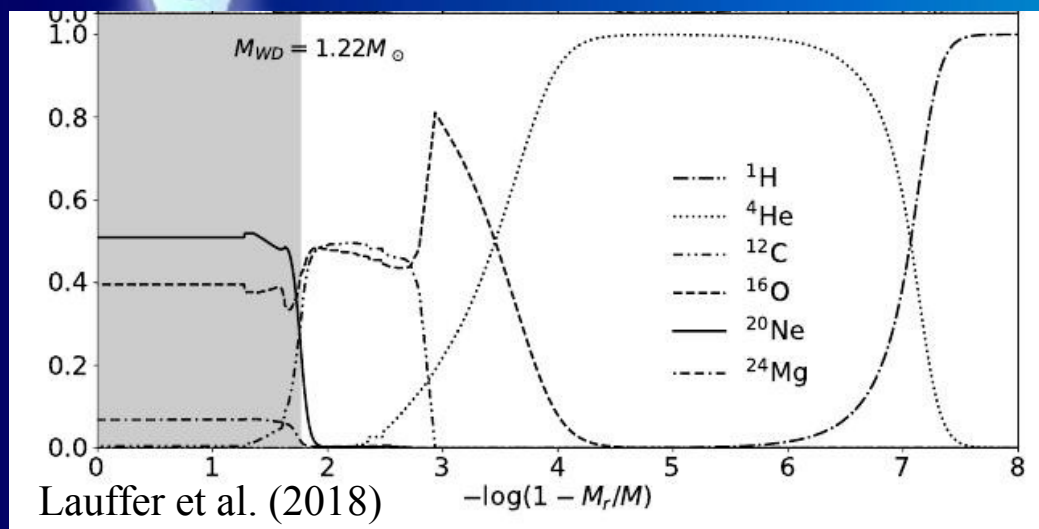


Núcleo de He : $M < 0.40 M_{\text{sol}}$

Romero et al. (2012)



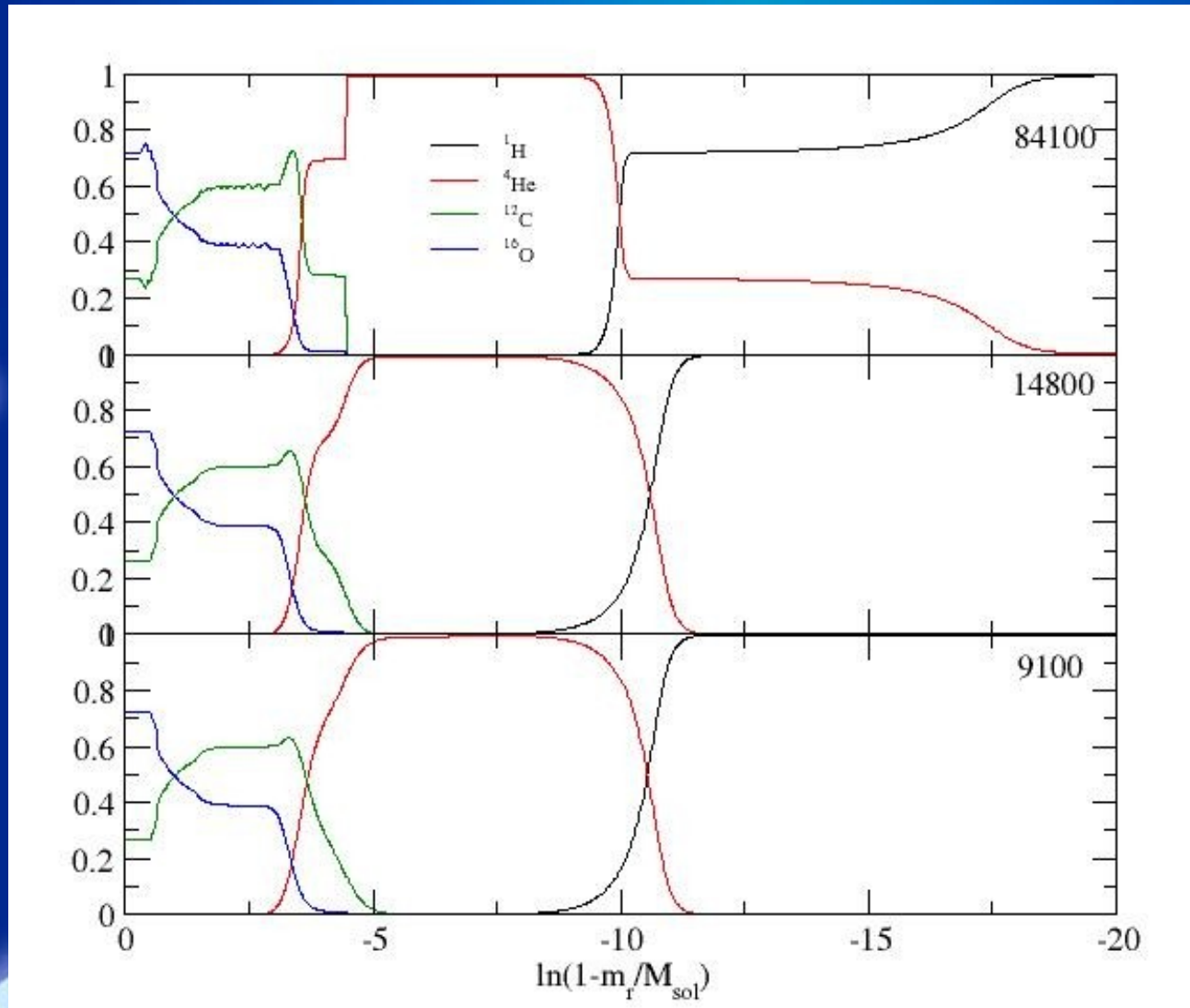
Núcleo de C/O:
 $0.40 M_{\text{sol}} < M < 1 M_{\text{sol}}$



Núcleo de O/Ne/Mg
 $M > 1 M_{\text{sol}}$

Difusão

- Por que as estrelas anãs brancas têm uma estrutura estratificada?

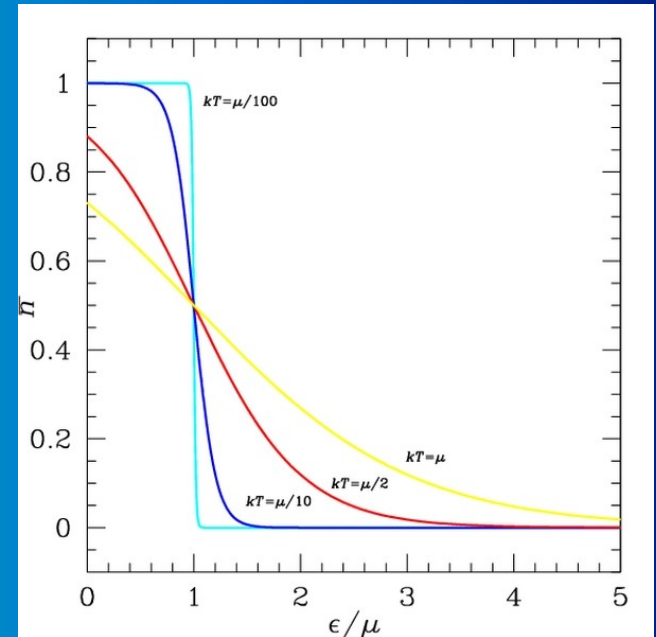


Devido à alta gravidade superficial os elementos mais pesados vão para o centro e os mais leves ficam na superfície.

Relação Massa-Raio

Eléctrons são férmions: distribuição de Fermi-Dirac

A distribuição para um gás completamente degenerado é um degrau



$$P_{\text{NR}} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} N_A^{5/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{5/3}$$

$$P_{\text{UR}} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} n_e^{4/3} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} N_A^{4/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{4/3}$$

Para esse caso a pressão é independente da temperatura!

Relação Massa-Raio

Eléctrons são férmions: distribuição de Fermi-Dirac

Caso não relativista $p=mv$

$$P_{\text{NR}} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} N_A^{5/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{5/3}$$

Relação massa-raio

Relação Massa-Raio

Eléctrons são férmions: distribuição de Fermi-Dirac

Caso não relativista $p=mv$

$$P_{\text{NR}} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} N_A^{5/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{5/3}$$

$$M \propto \frac{1}{R^3}$$

Relação massa-raio

Relação Massa-Raio

Eléctrons são férmions: distribuição de Fermi-Dirac

Caso não relativista $p=mv$

$$P_{\text{NR}} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} N_A^{5/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{5/3}$$

$$M \propto \frac{1}{R^3}$$

Relação massa-raio

Caso ultra-relativista $v=c$

$$P_{\text{UR}} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} n_e^{4/3} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} N_A^{4/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{4/3}$$

Relação Massa-Raio

Eléctrons são férmions: distribuição de Fermi-Dirac

Caso não relativista $p=mv$

$$P_{\text{NR}} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} = \frac{h^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} N_A^{5/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{5/3}$$

$$M \propto \frac{1}{R^3}$$

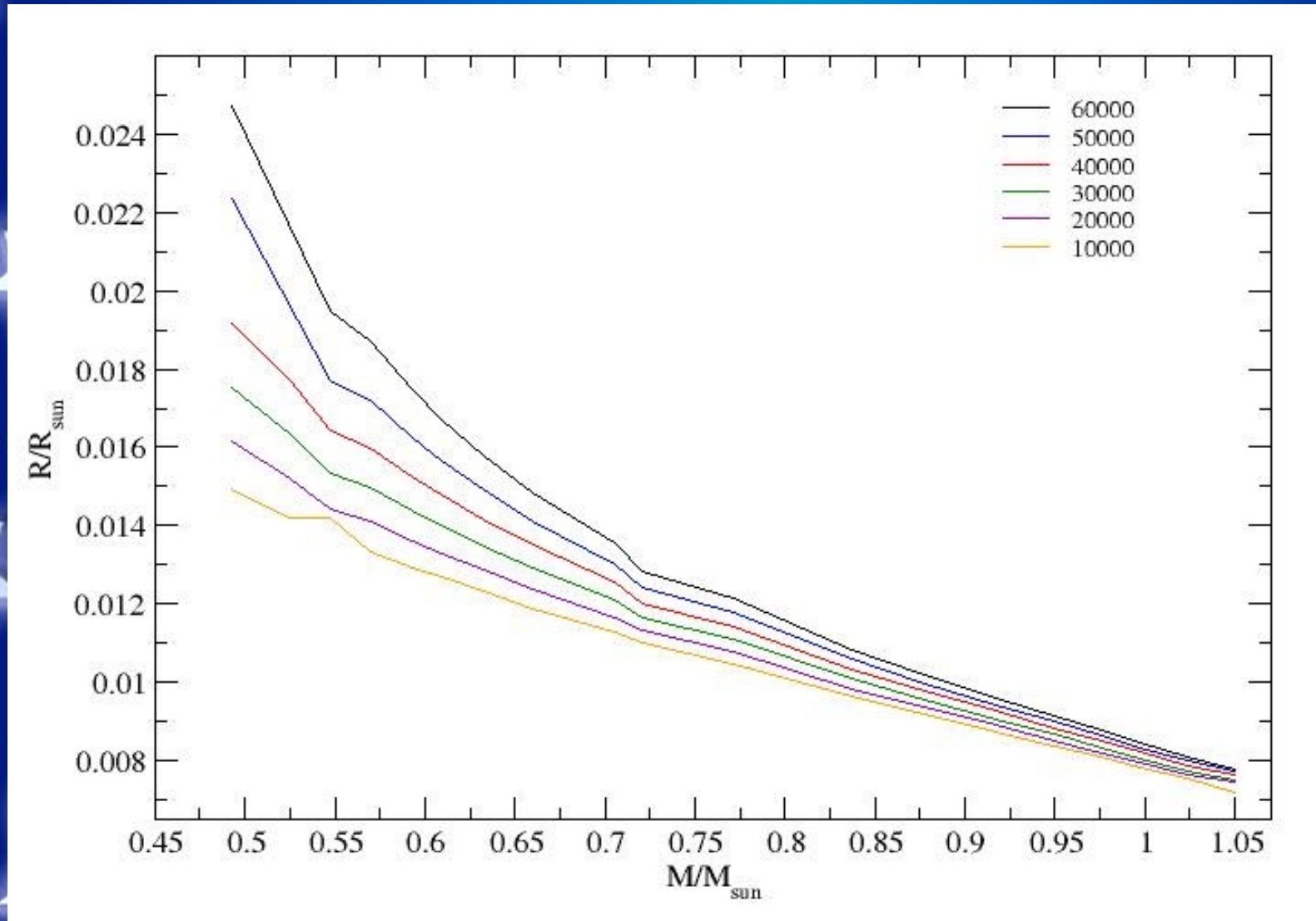
Relação massa-raio

Limite ultra-relativista $v=c$

$$P_{\text{UR}} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} n_e^{4/3} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{4/3} \frac{hc}{4} N_A^{4/3} \left(\frac{\rho}{\mu_e}\right)^{4/3}$$

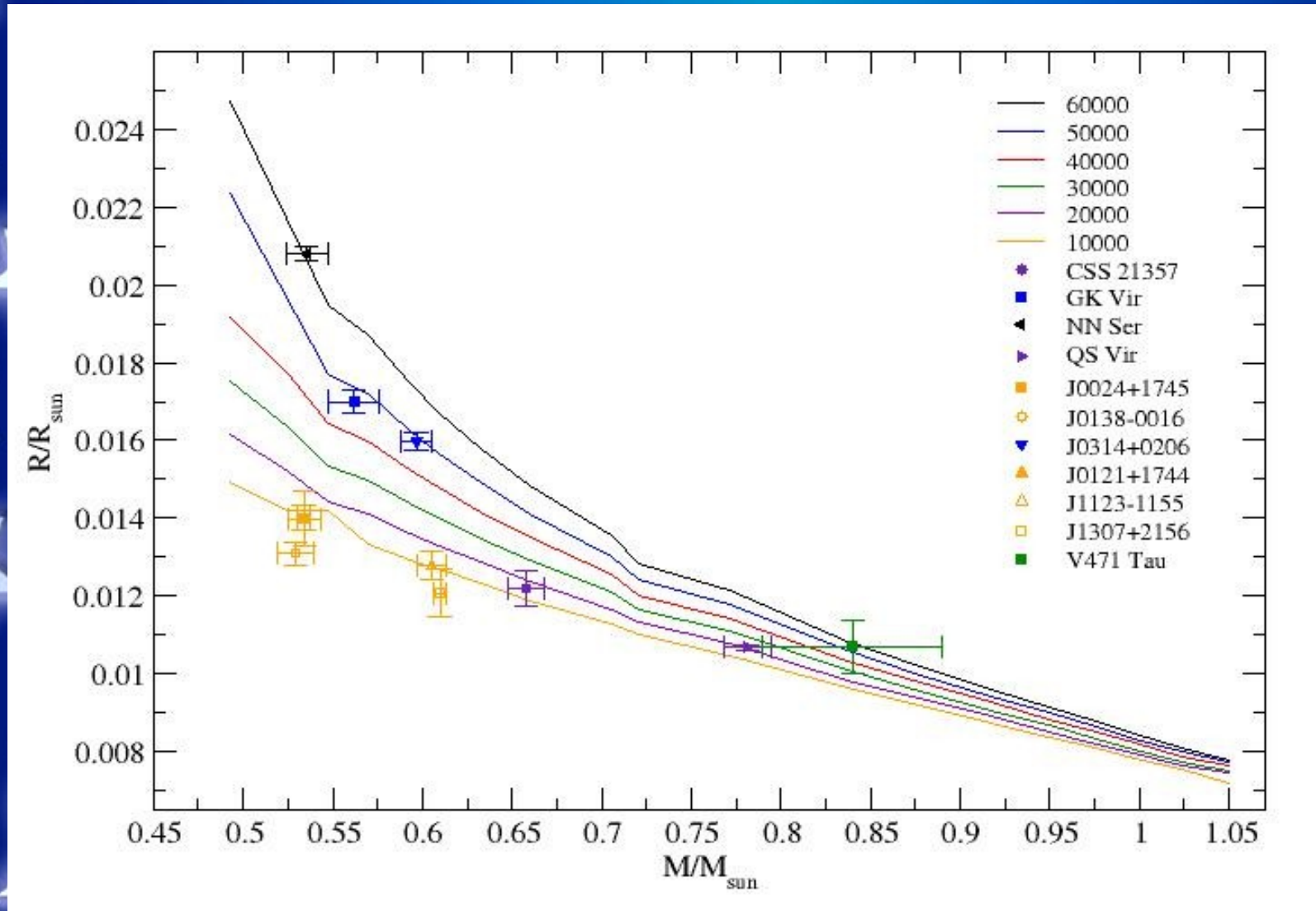
$$M_{\text{Ch}} = \frac{5.8348}{\mu_e^2} M_{\text{sol}}$$

Relação Massa-Raio



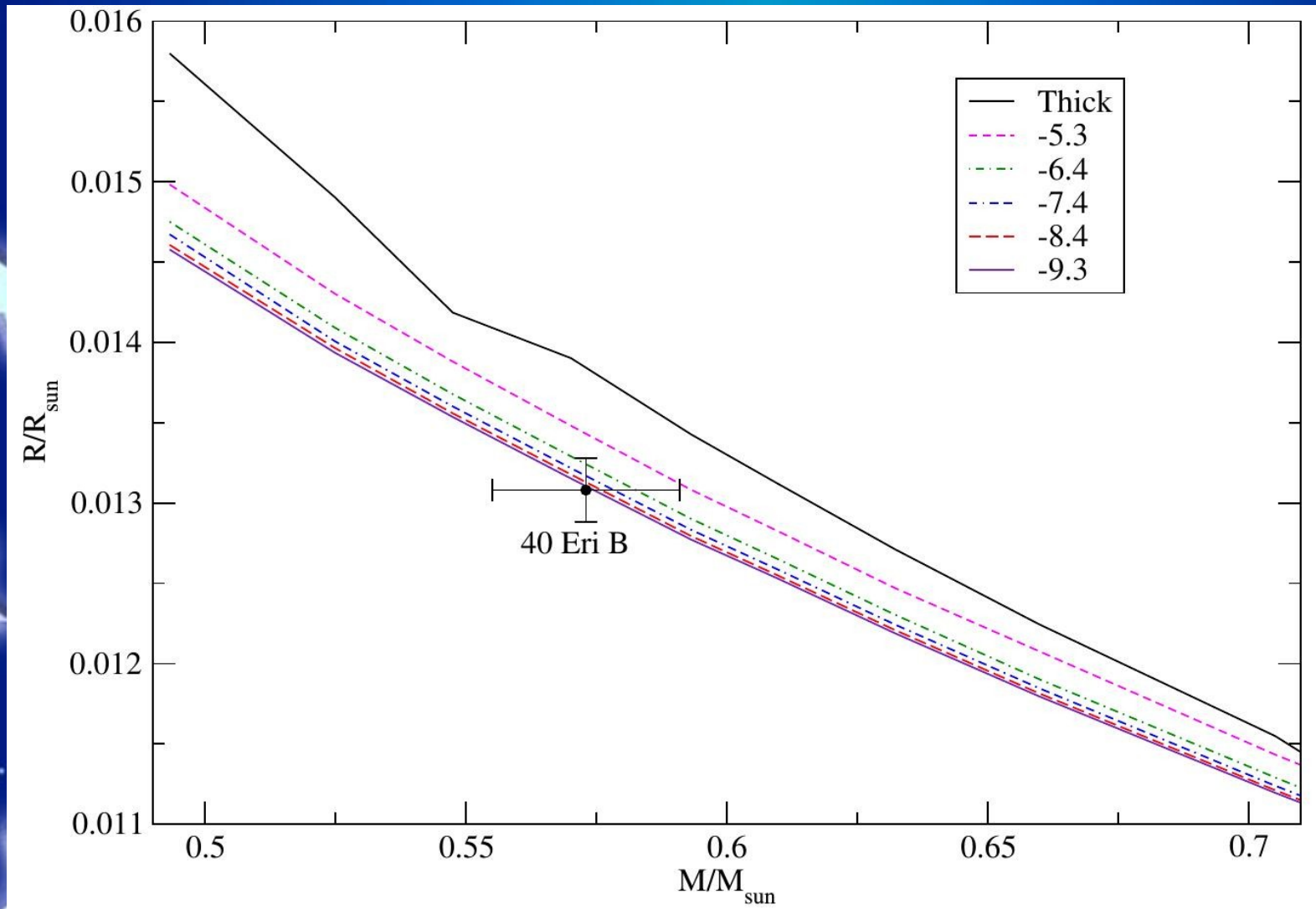
Romero et al. (2019)

Relação Massa-Raio

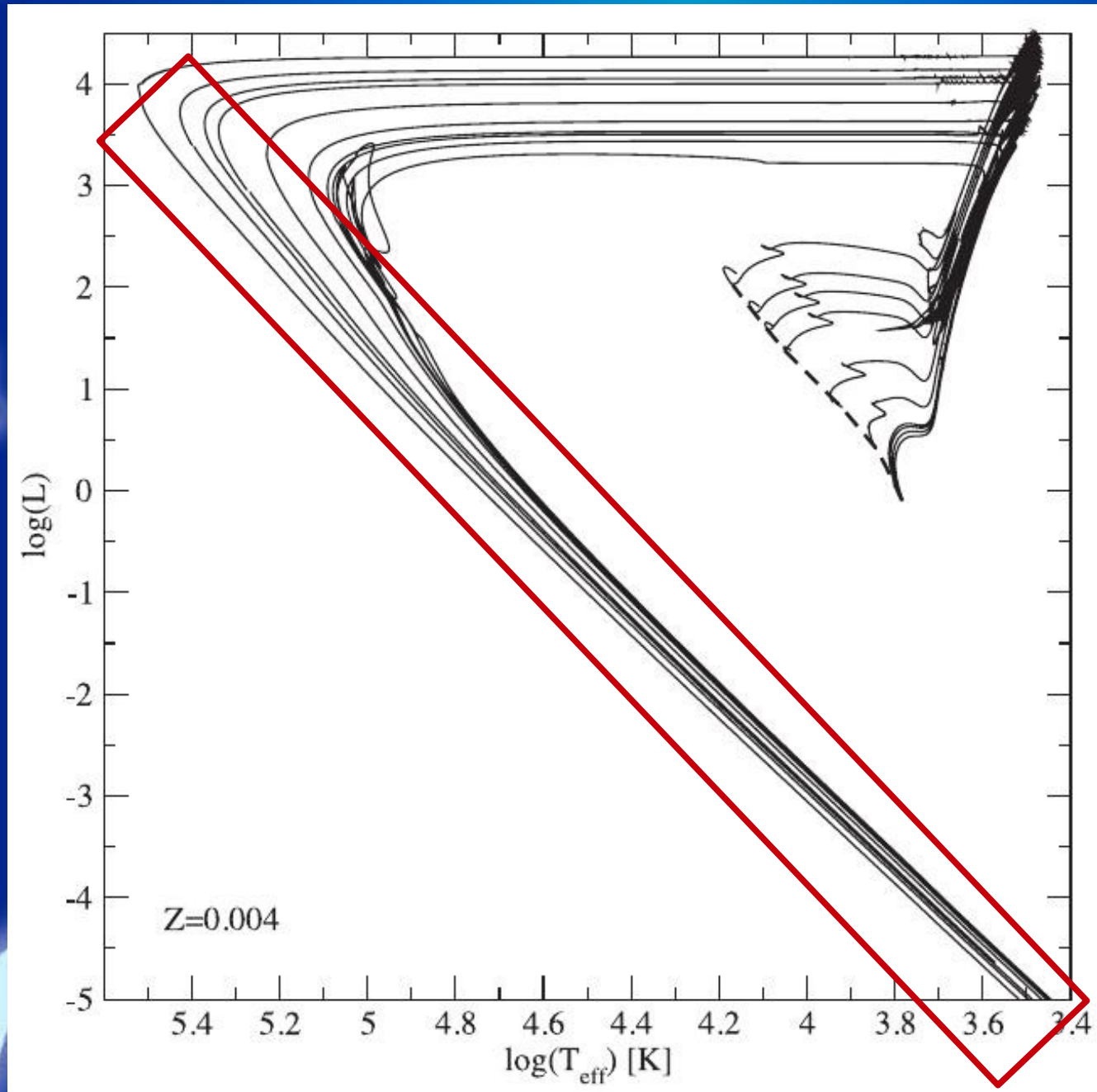


Romero et al. (2019)

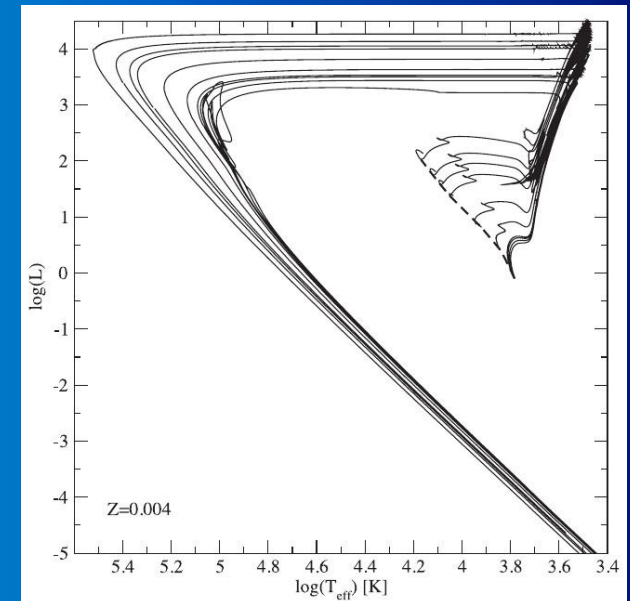
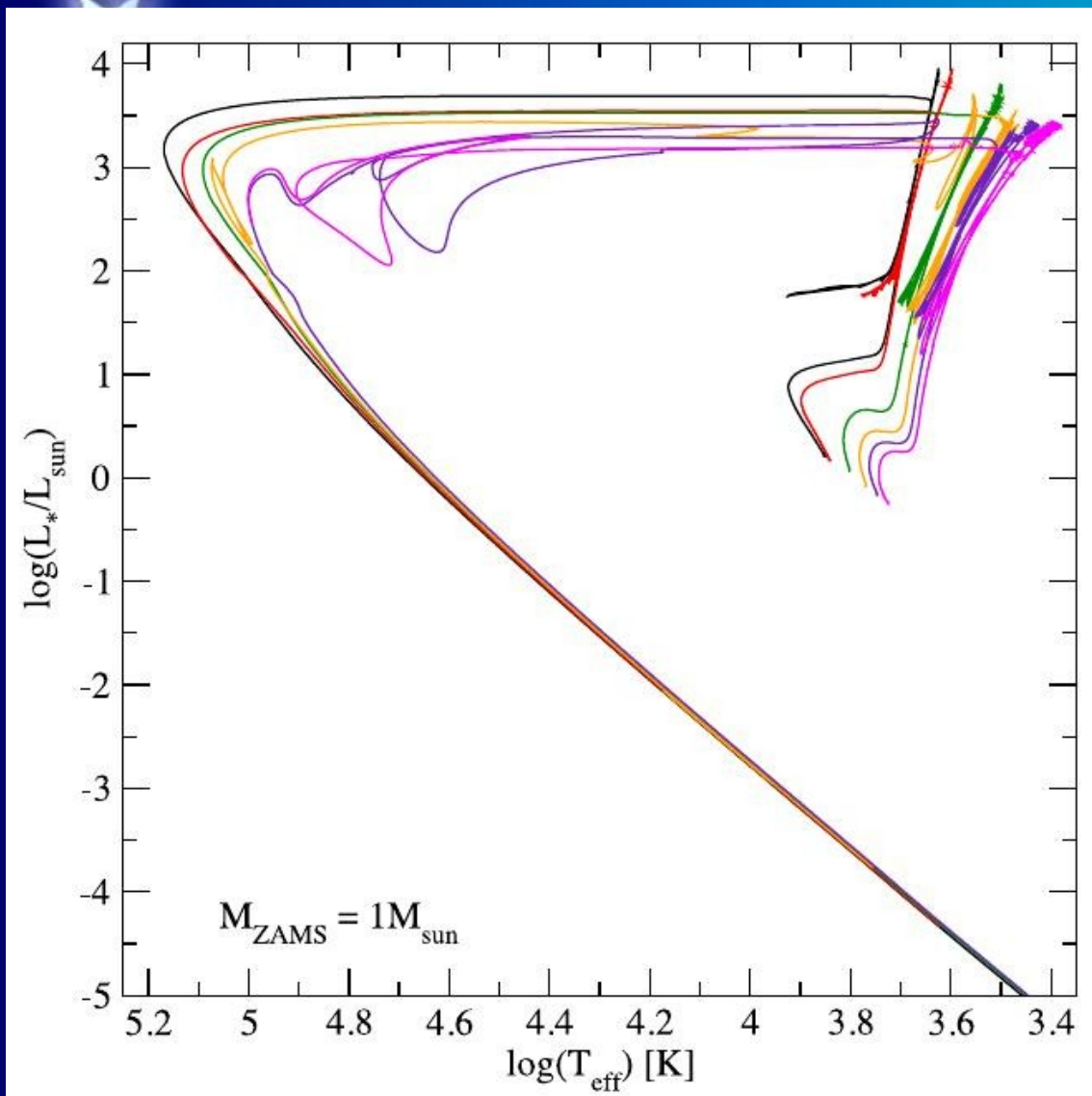
Relação Massa-Raio



Curva de resfriamento



Curva de resfriamento: Metalicidade



Pela alta gravidade superficial, os elementos pesados se difundem para o centro.

A metalicidade inicial se “perde”

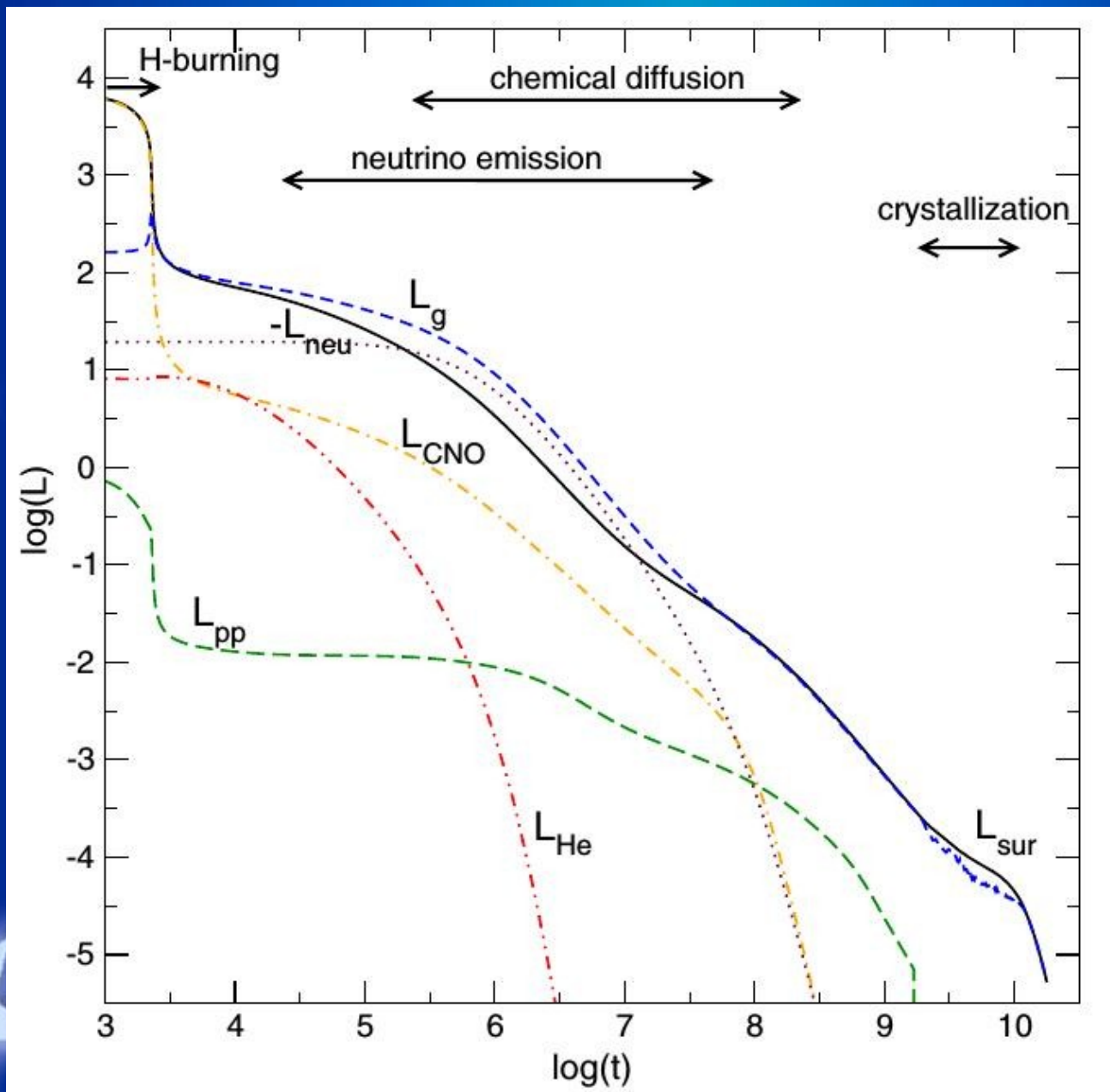
Modelo de Mestel

As anãs brancas brilham porque estão quentes: Liberam o calor armazenado nos ions não degenerados

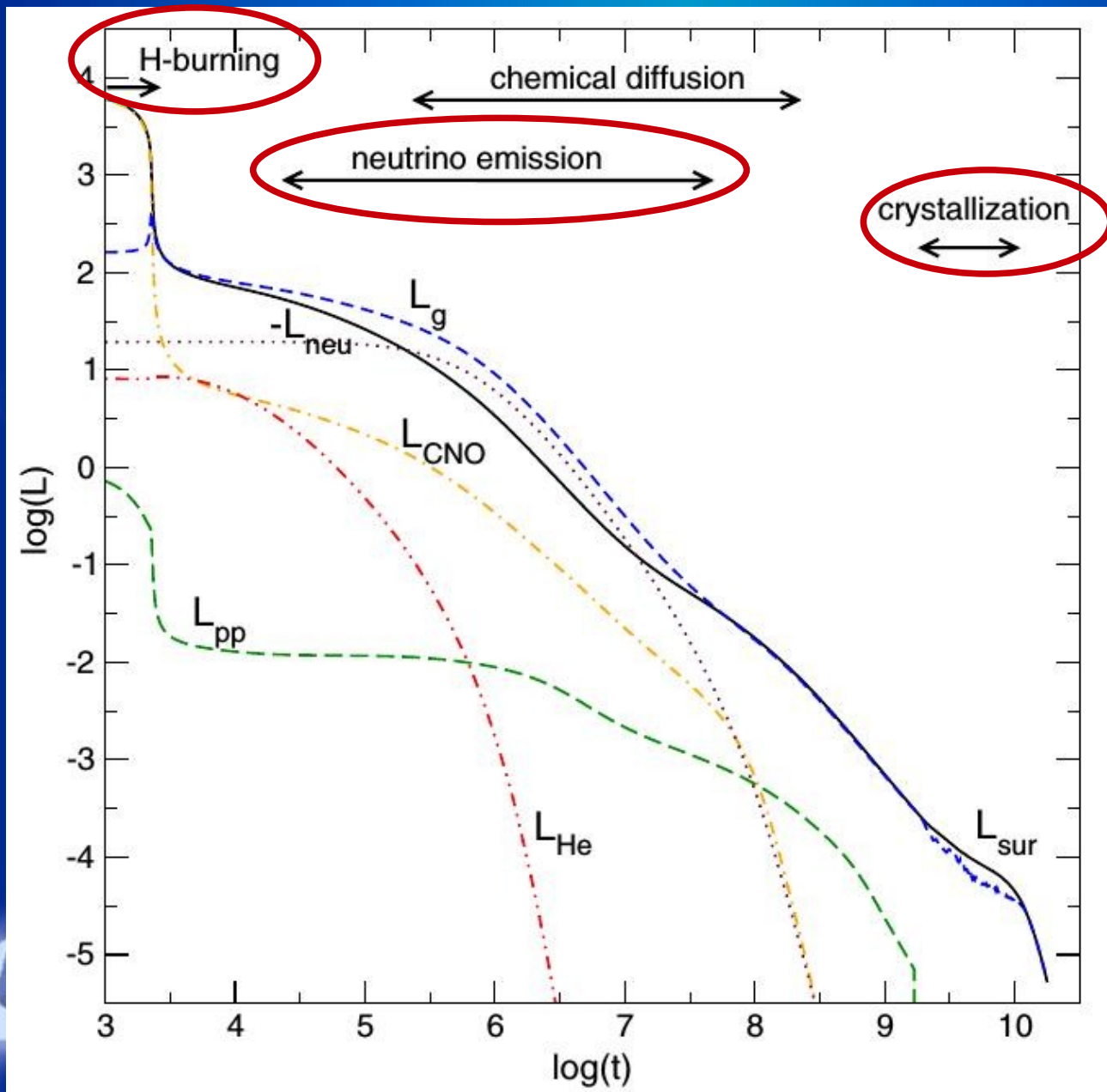
- Desprezar fontes e sumidouros de energia (energia nuclear e esfriamento por neutrinos),
- Desprezar contração gravitacional,
- Capacidade térmica dominada por ions, que formam um gás ideal,
- Assumir que o núcleo é isotérmico
- Assumir equilíbrio radiativo no envelope,
- Atmosfera cinza.

$$t_{\text{esfriar}} \simeq 6.3 \times 10^6 \left(\frac{A}{12} \right)^{-1} \left(\frac{K_o}{4 \times 10^{23}} \right)^{2/7} \left(\frac{\mu}{\mu_e^2} \right)^{-2/7} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{5/7} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-5/7} \text{ anos}$$

Resfriamento de anãs brancas



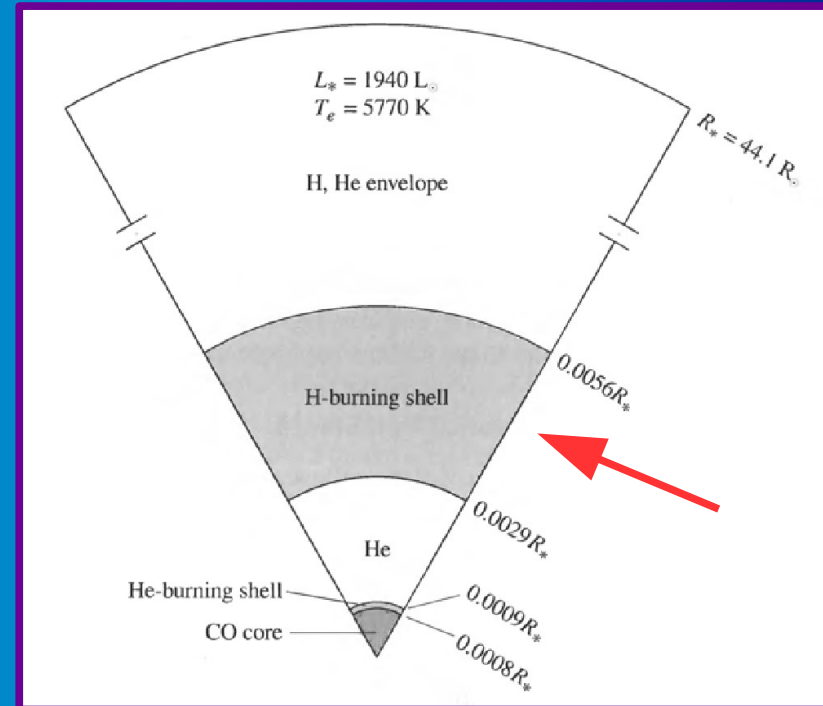
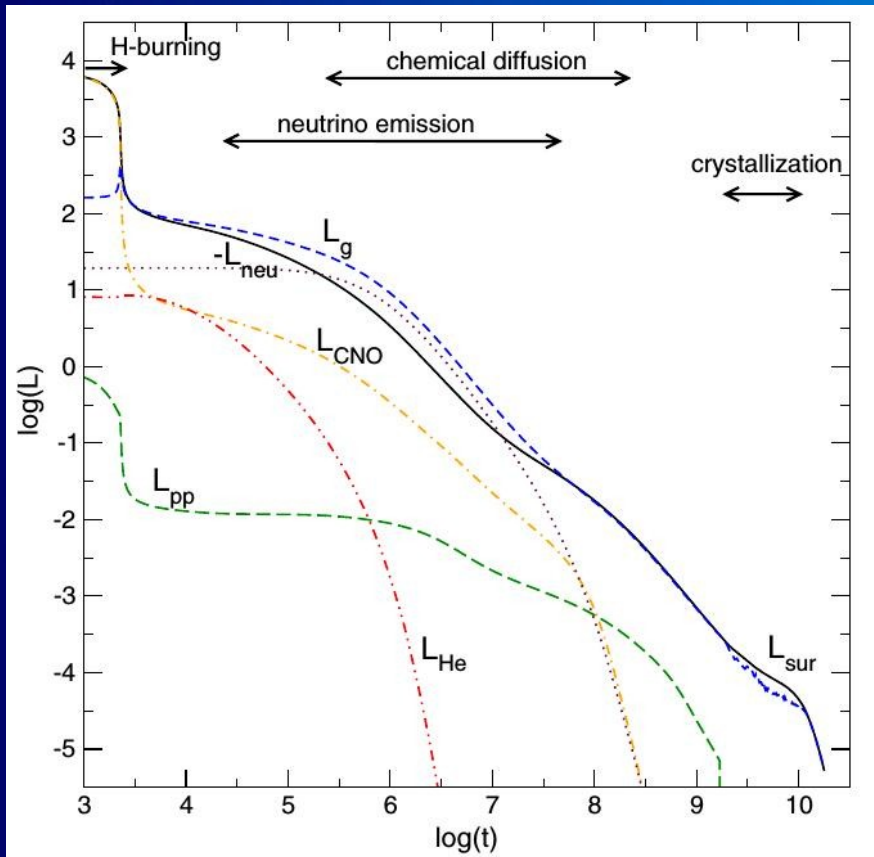
Resfriamento de anãs brancas



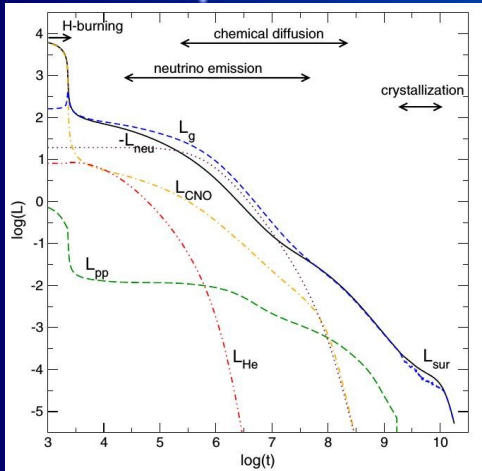
Resfriamento de anãs brancas

Reações nucleares residuais nas camadas de H

Para temperaturas altas, a camada de H em combustão pode estar ativa.



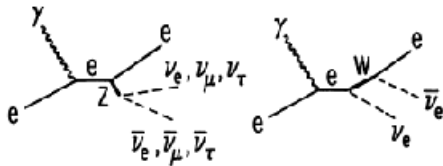
Resfriamento de anãs brancas



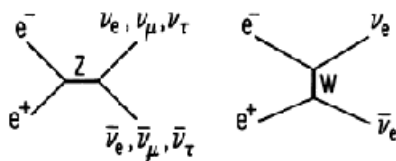
Emissão de neutrinos: A emissão de neutrinos é muito eficiente para um gás de electrons degenerado. Isso acontece a altas temperaturas onde a energia é suficiente.

A emissão de neutrinos acontece pelos processos de:

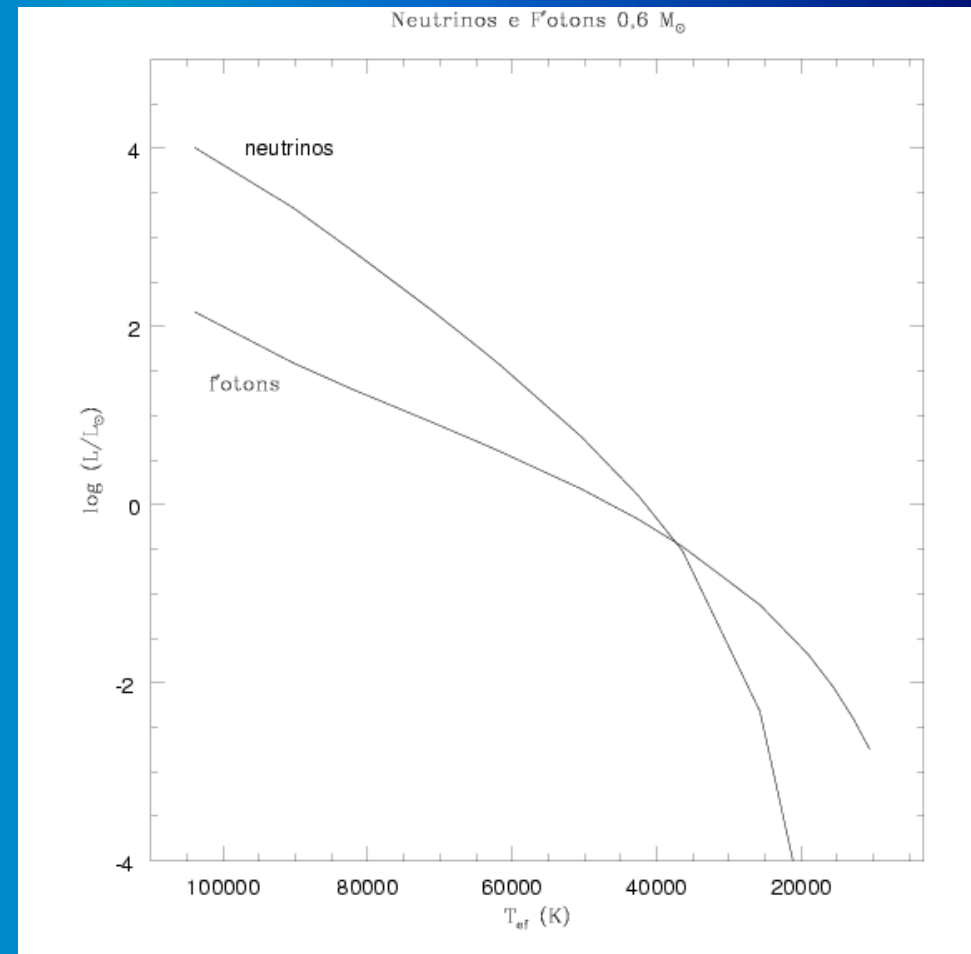
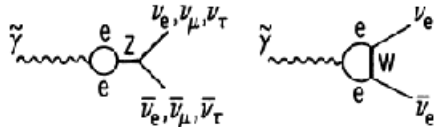
Foto



Pares

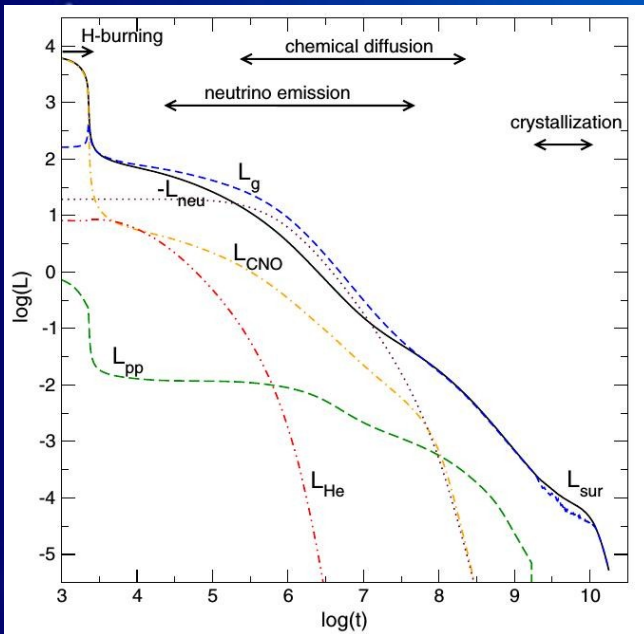


Plasma



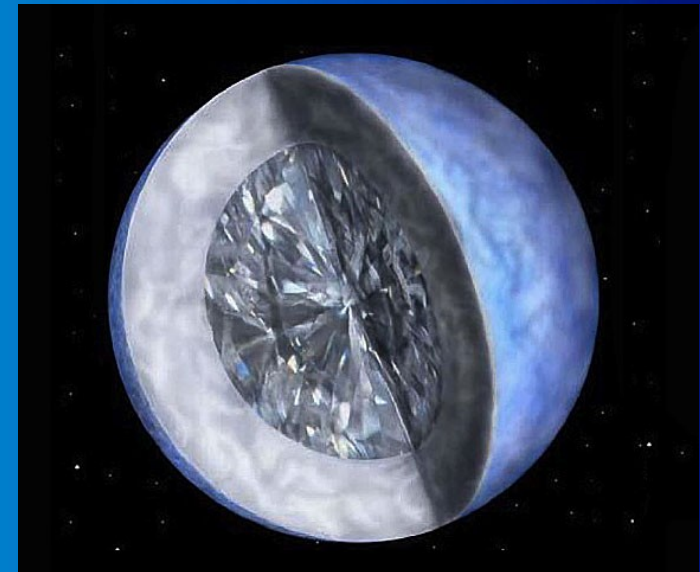
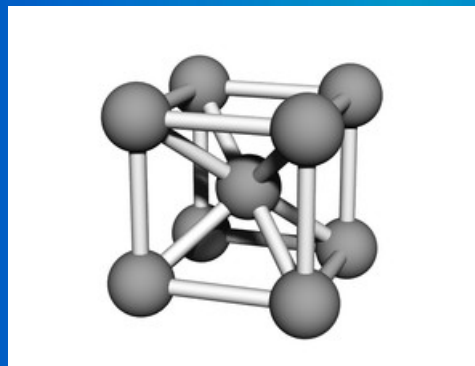
Resfriamento de anãs brancas

Cristalização: A baixas temperaturas acontece uma transição de fase de líquido a sólido no núcleo da estrela, liberando energia (calor latente).



$$\Gamma = \frac{(Ze)^2 / \langle r \rangle}{kT} = 2.28 \frac{Z^2}{A^{1/3}} \frac{(\rho/10^6 \text{ g/cm}^3)^{1/3}}{T/10^7 \text{ K}}$$

$\Gamma \sim 180 - 220$, dependendo da teoria e da composição química do gás



Próxima aula

- Estrelas anãs brancas pulsantes