

AGA 293

# **16 - Remanescentes degenerados de Estrelas**

Anãs brancas; matéria degenerada  
até 16,5 (Próxima aula 16,6 →)

Jorge Meléndez

# A descoberta de Sirius B

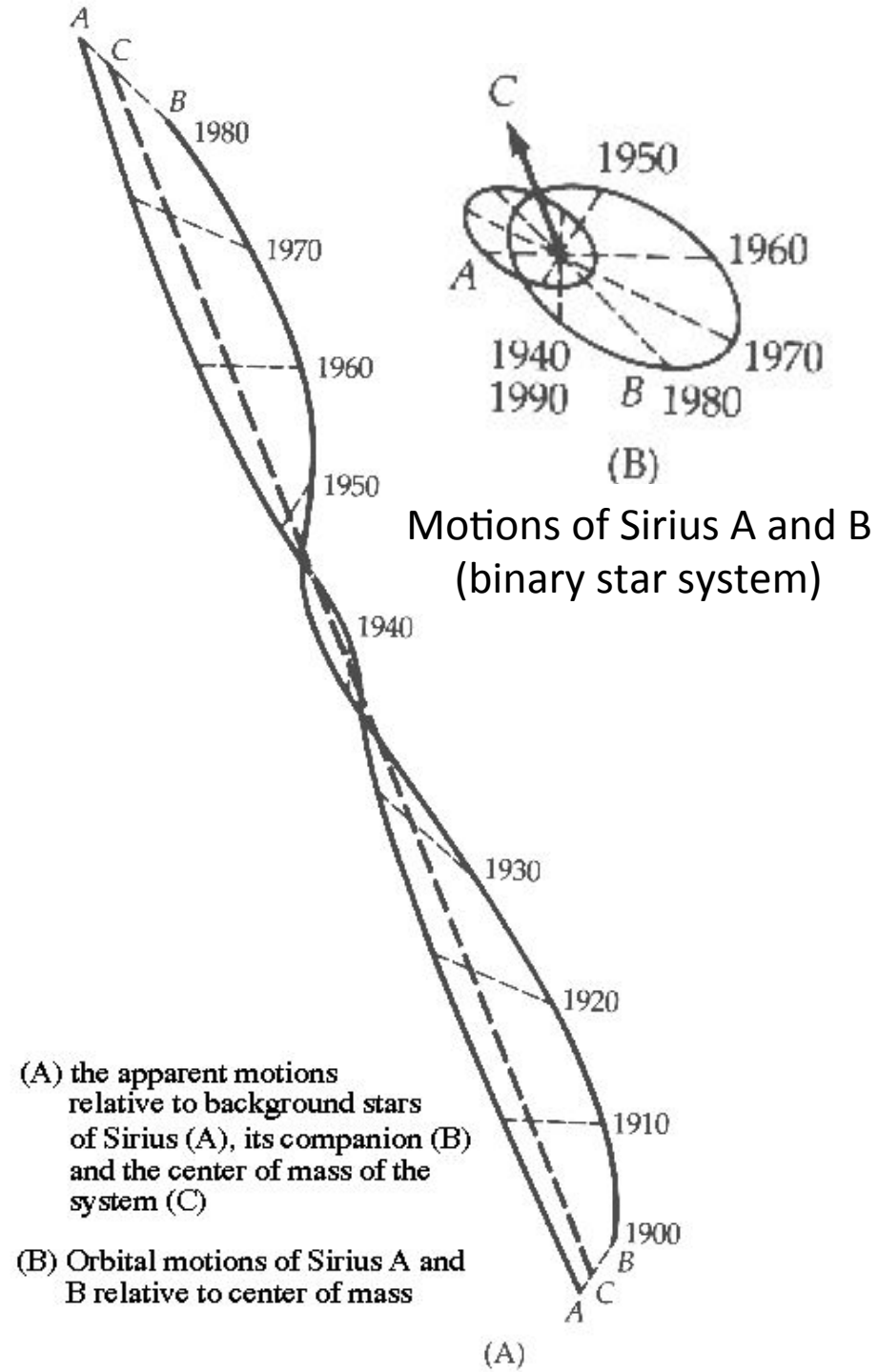


Friedrich Bessel

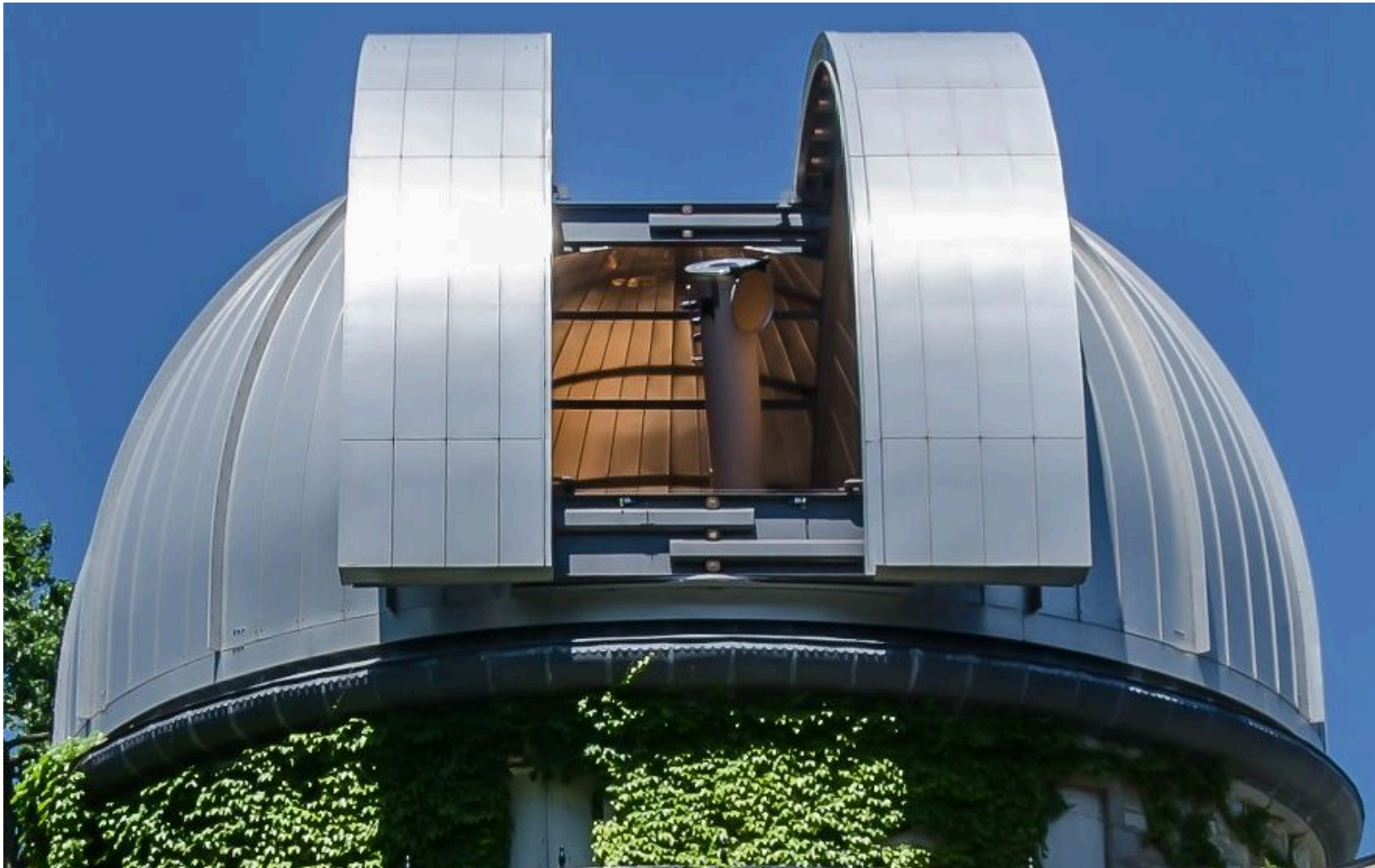
1838: paralaxe 61 Cyg.

Após 10 anos de pesquisa (1844) → Sirius é binária.

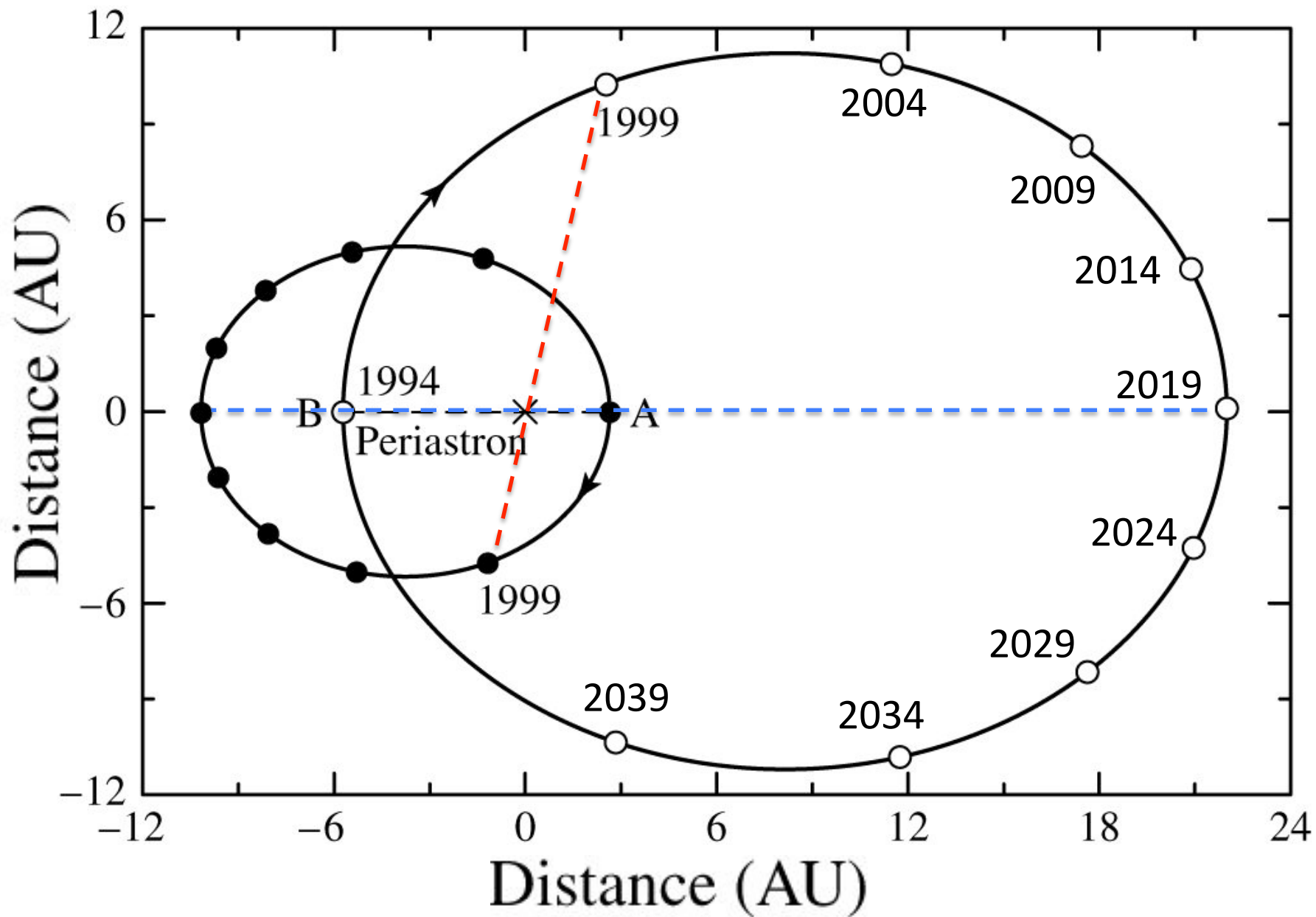
Morreu 16/3/1846 sem conseguir observar Sirius B



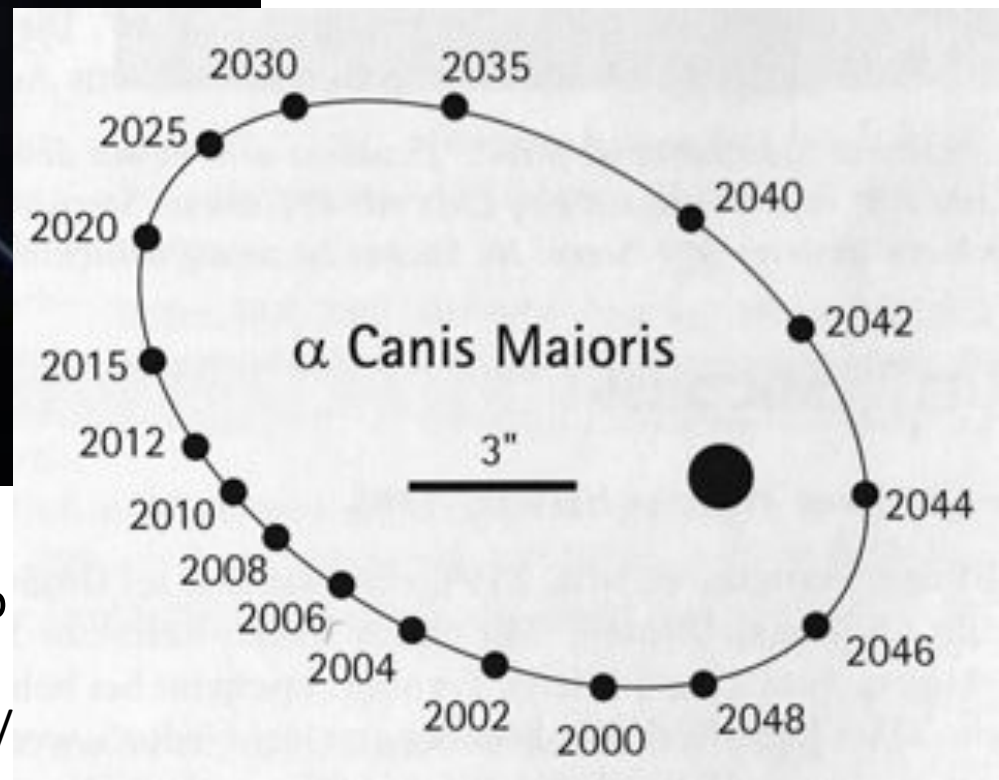
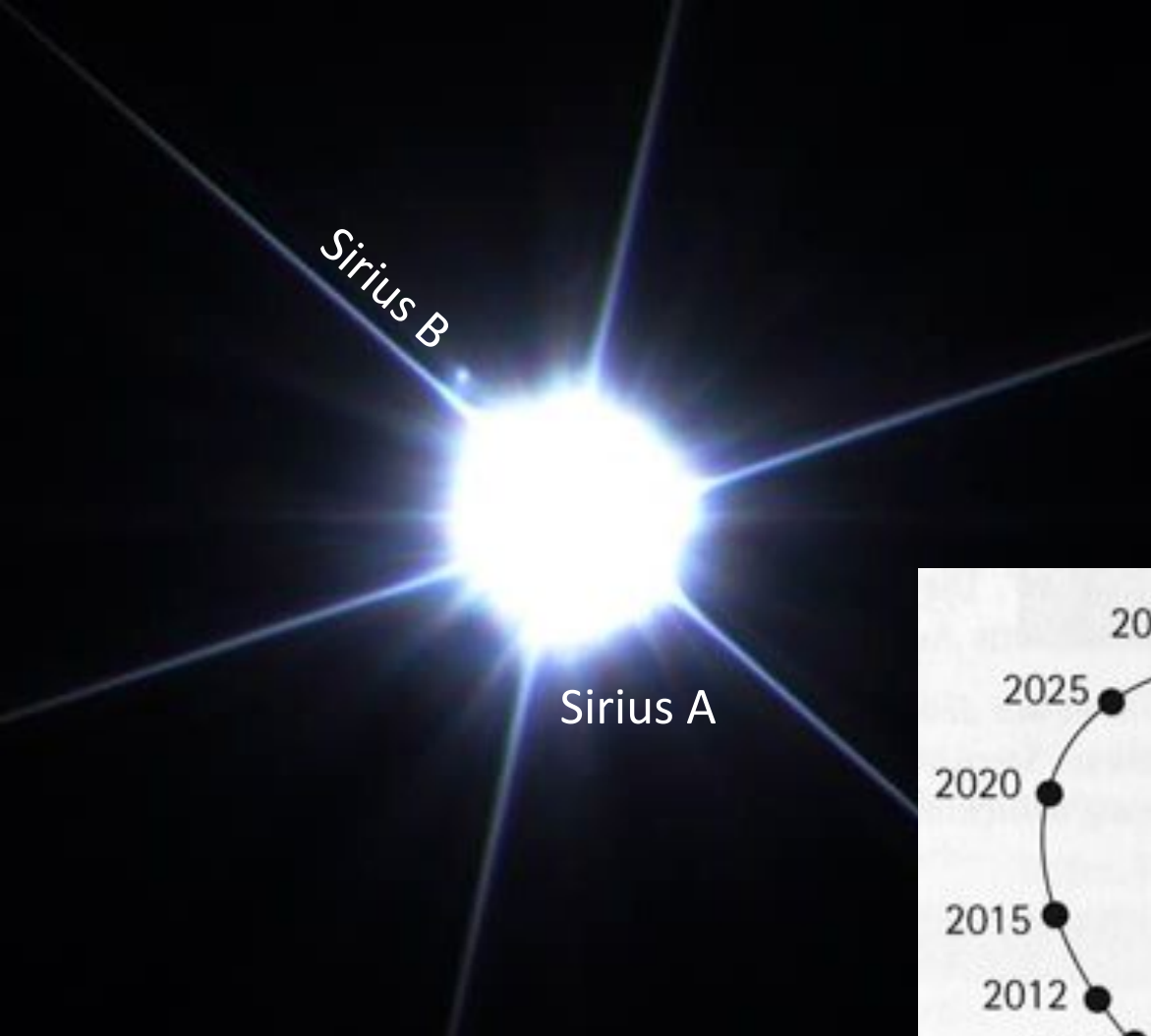
Alvan Graham Clark (1832-1897) testou em 31 Jan 1862 um novo refrator de 18,5" (47 cm), o maior da época, e fez a primeira observação de Sirius B



Dearborn Observatory



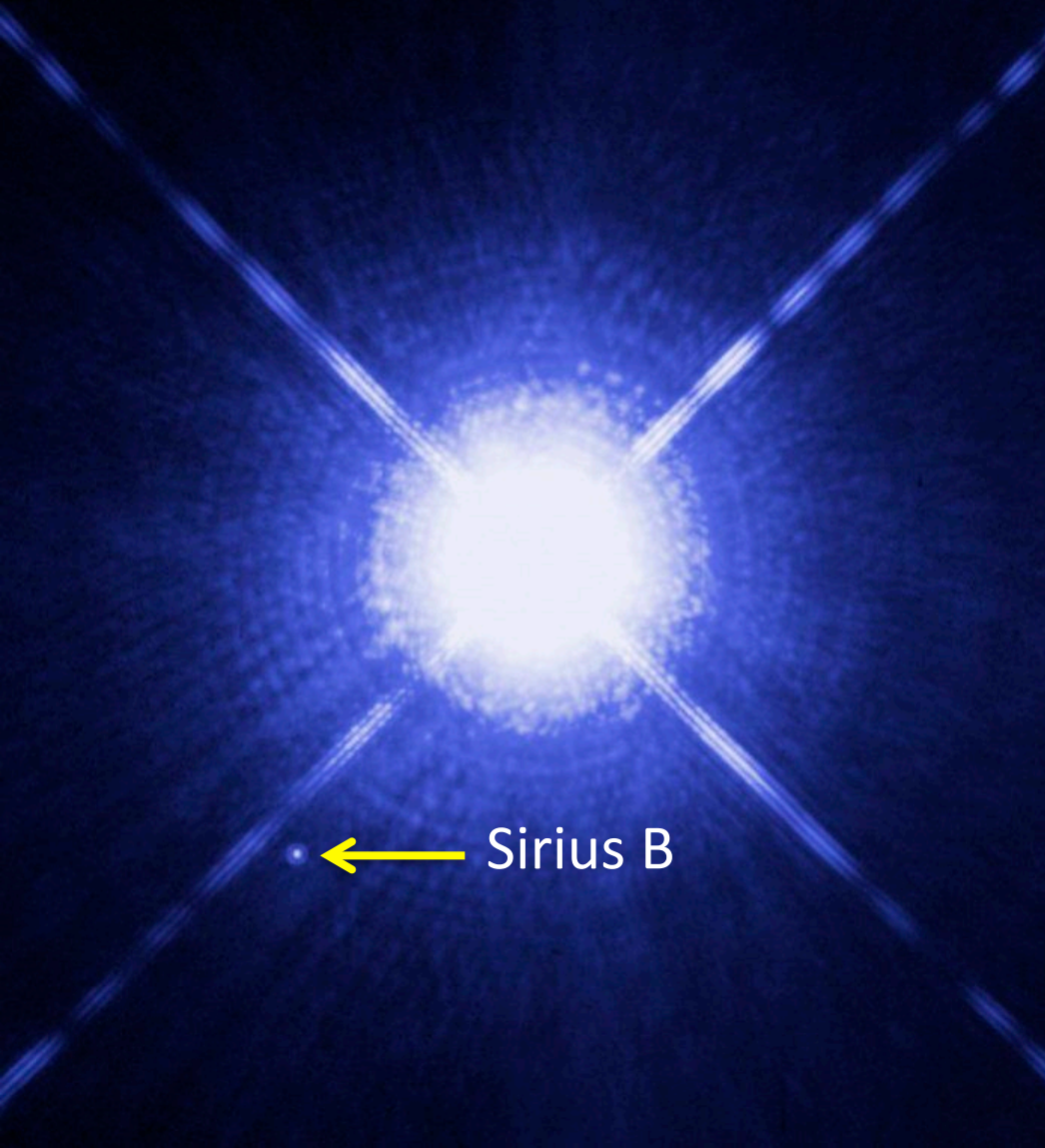
**FIGURE 16.2** The orbits of Sirius A and Sirius B. The center of mass of the system is marked with an “x.”



11/3/2017

Gabriela e Fábio Carvalho, Observatório OTUS, interior de São Paulo.

<https://www.facebook.com/observatoriootus/>



## Massas

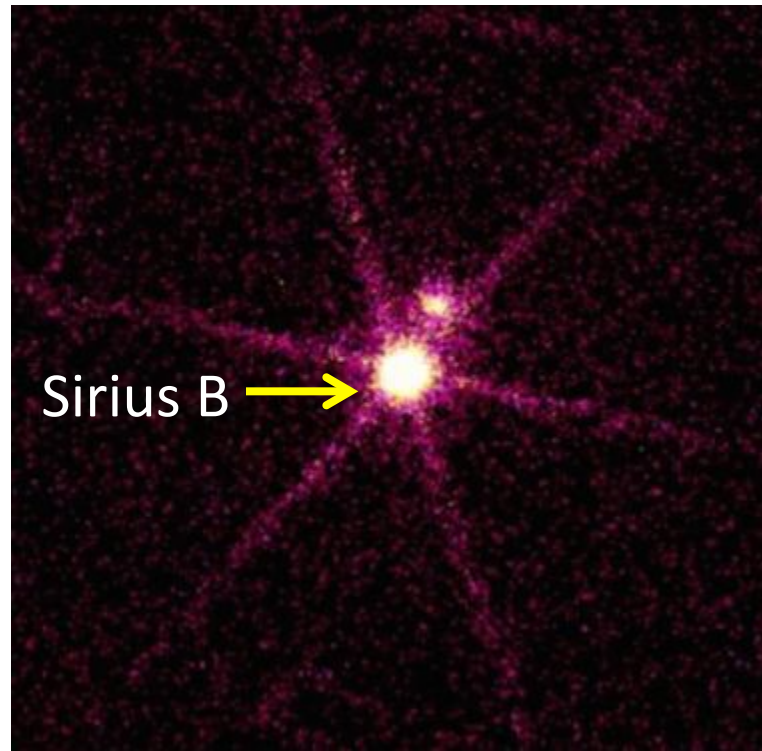
$$M (\text{Sirius A}) = 2,0 M_{\text{Sol}}$$

$$M (\text{Sirius B}) = 1,0 M_{\text{Sol}}$$

## Luminosidade

$$L (\text{Sirius A}) = 23,5 L_{\text{Sol}}$$

$$L (\text{Sirius B}) = 0,03 L_{\text{Sol}}$$

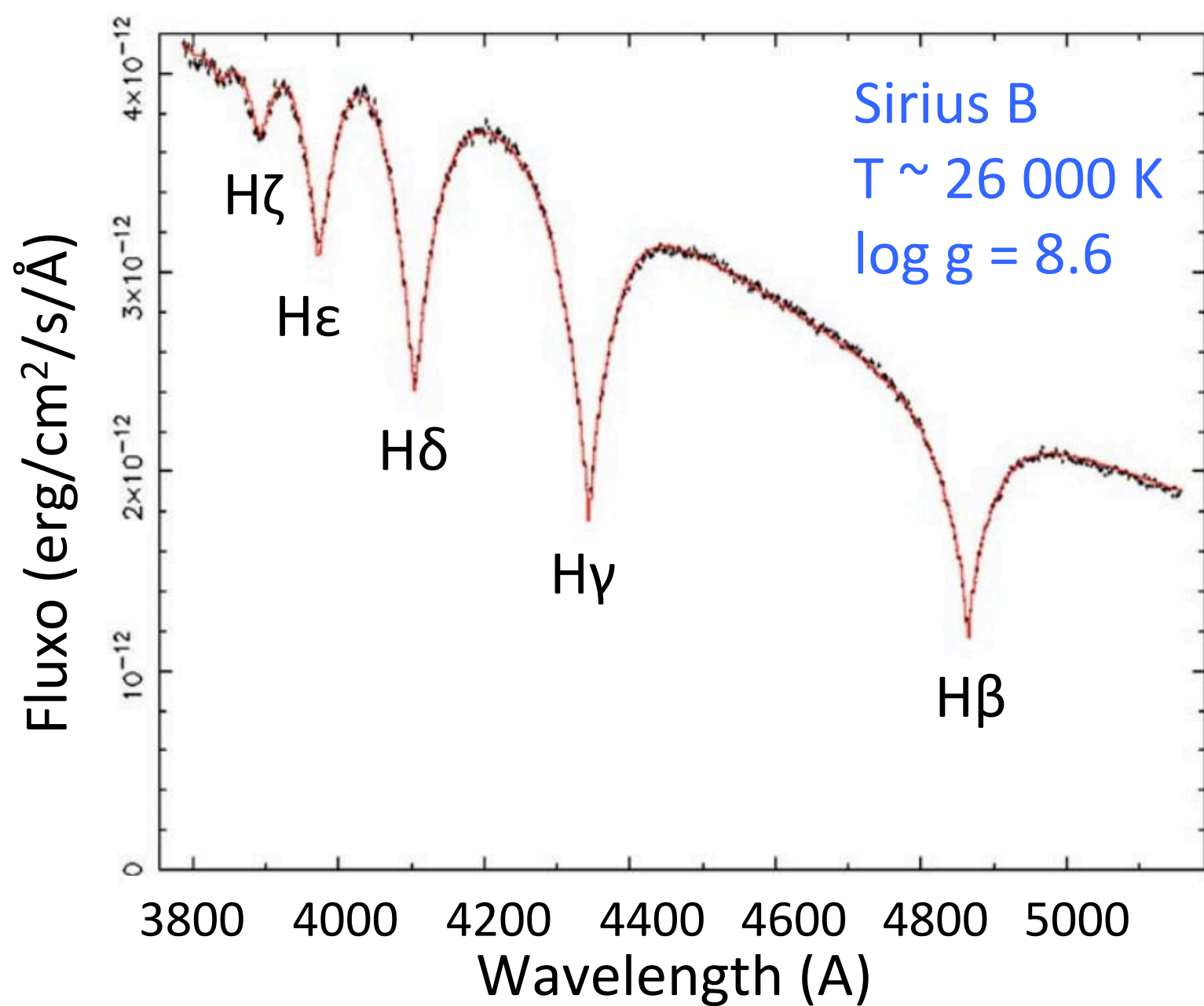


Hubble in the optical

<https://www.spacetelescope.org/images/heic0516a/>

Chandra X-rays

<https://apod.nasa.gov/apod/ap001006.html>



**Figure 5.** Section of the G430L Sirius B spectrum spanning the wavelength range 3800–5200 Å (small black crosses, size indicating the statistical errors) with the best-fitting synthetic spectrum (smooth curve – red on-line) corresponding to  $T_{\text{eff}} = 25\,193$  K and  $\log g = 8.556$ .

	Sirius A	Sirius B
Massas	2,06 $M_{\text{Sol}}$	1,05 $M_{\text{Sol}}$
Luminosidade	23,5 $L_{\text{Sol}}$	0,03 $L_{\text{Sol}}$
<b>Temperatura</b>	<b>9900 K</b>	<b>26 000 K</b>
Raio	1,7 $R_{\text{Sol}}$	0,008 $R_{\text{Sol}}$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

Radius:  $6 \times 10^3 \text{ km}$

Density:  $3,0 \times 10^9 \text{ kg m}^{-3}$

Surface gravity:  $4,6 \times 10^6 \text{ m s}^{-2}$



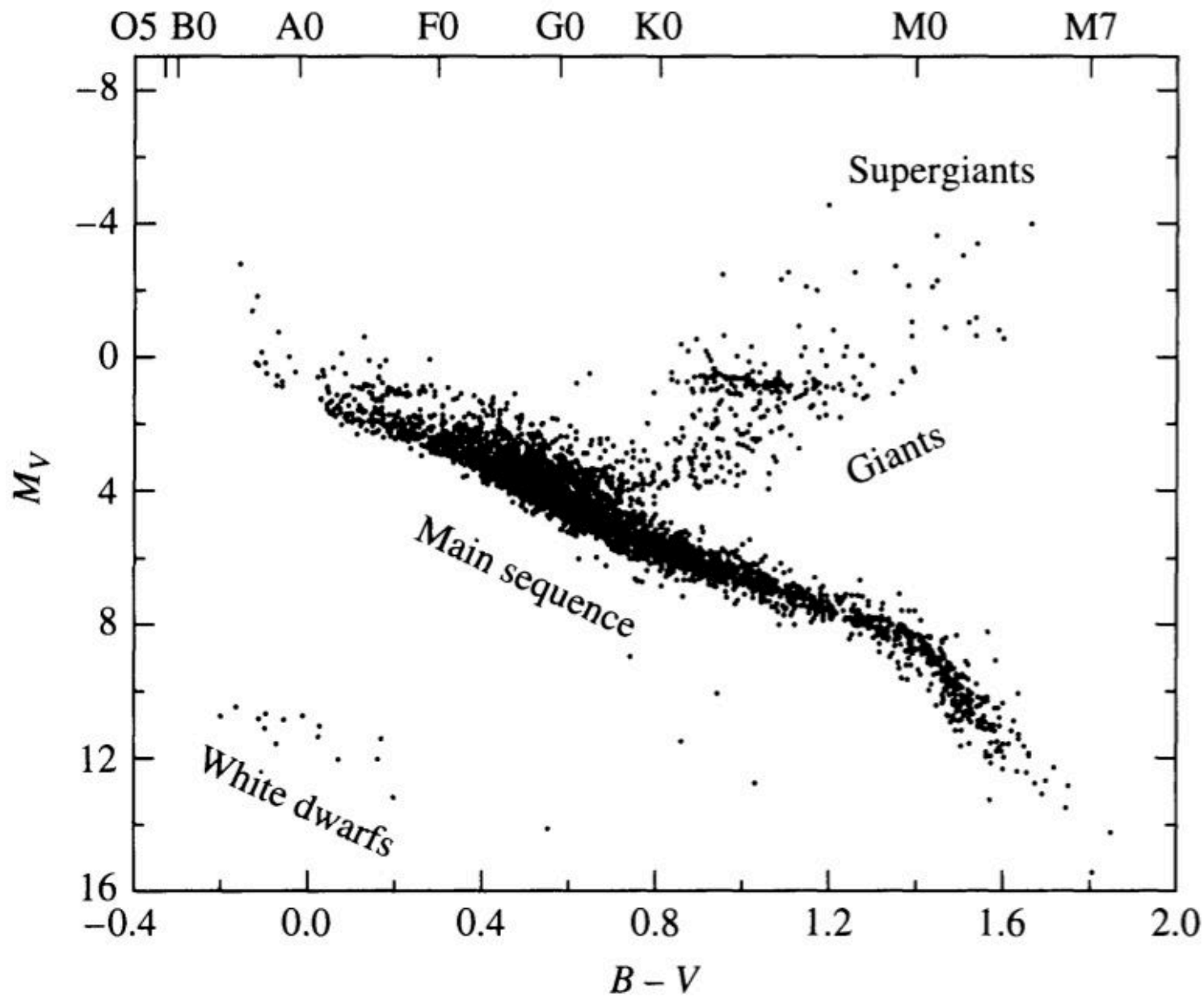
Massa inicial  $< 9 M_{\text{sol}}$ : Nebulosa planetária e anã branca



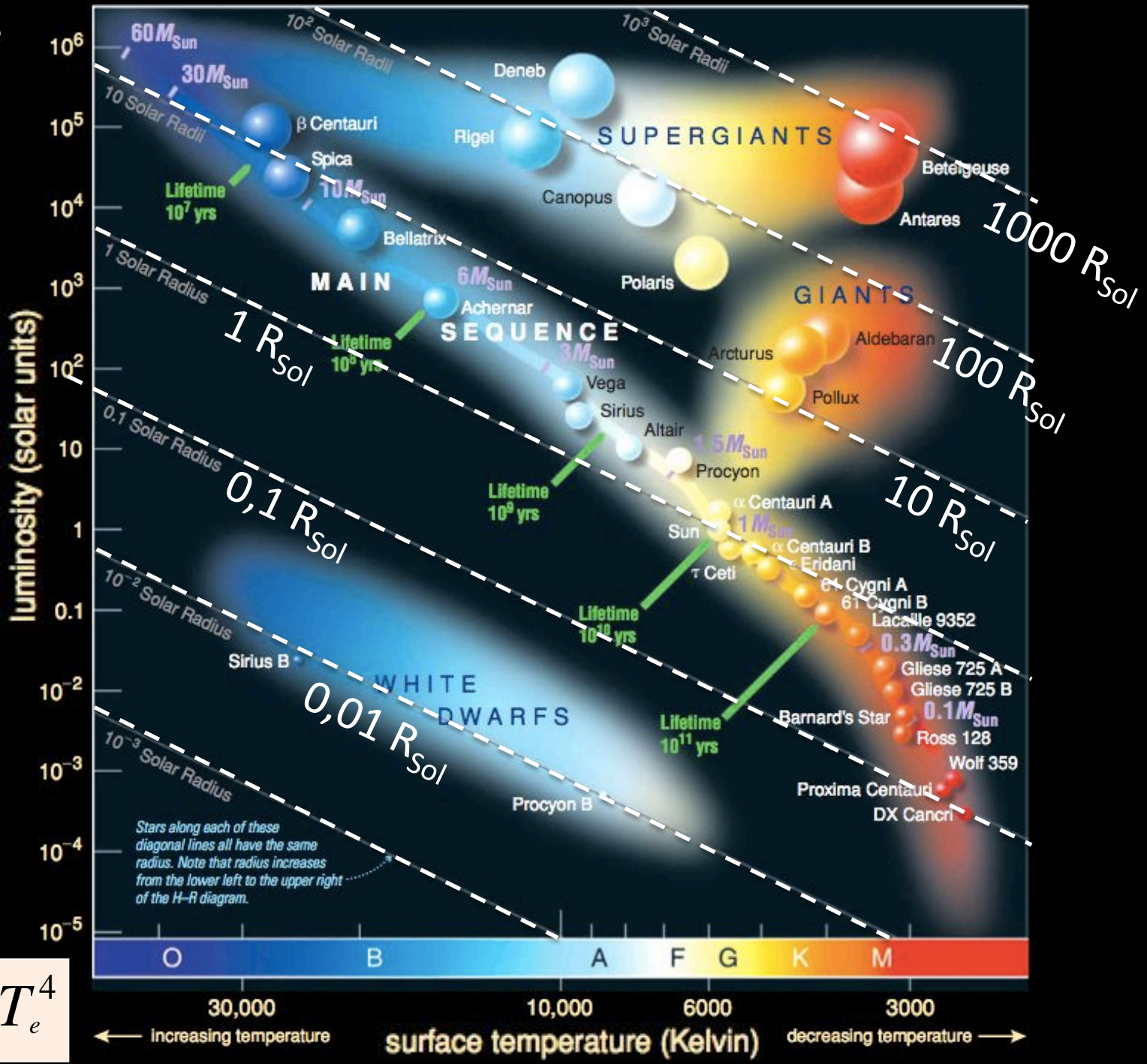
Planetary Nebula PK 164 +31.1

(c) Calar Alto Observatory. Vicent Peris, Jack Harvey

# Anãs Brancas



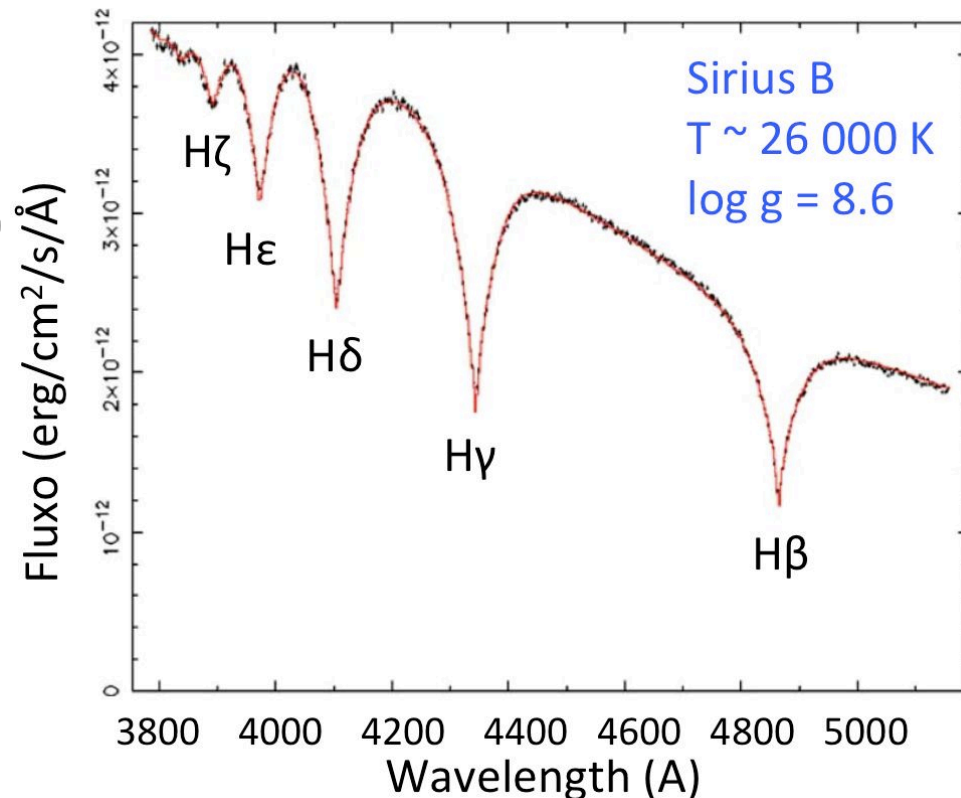
Anãs  
brancas  
vão  
esfriando  
aos  
poucos →  
diferentes  
cores



$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

# Anãs Brancas: tipo espectral D

- DA (~2/3 de todas as anãs brancas): linhas de H
- DB (~8%): apenas linhas de hélio
- DC (~14%): sem linhas ou muito fracas (<5 % do contínuo)
- DQ: linhas de carbono (atômicas ou moleculares)
- DZ: linhas de metais (podem ser engolido material rochoso)



# Condições Centrais em Anãs Brancas

Da equação de equilíbrio hidrostático:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} = -\frac{G \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \right) \rho}{r^2} = -\frac{4}{3} \pi G \rho^2 r.$$

Integrando e  
supondo  $P=0$  na  
superfície ( $r = R$ ):

$$P(r) = \frac{2}{3} \pi G \rho^2 (R^2 - r^2)$$

No centro,  $r = 0 \rightarrow P_c \approx \frac{2}{3} \pi G \rho^2 R_{\text{wd}}^2$   $R_{\text{wd}}$ : raio da  
anã branca  
 $\approx 3.8 \times 10^{22} \text{ N m}^{-2}$

$\sim 1,5$  milhão de vezes  $P_c(\text{Sol})$

# Condições Centrais em Anãs Brancas

Podemos ter estimativa da  $T_c$  usando o gradiente de temperatura radiativo

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\bar{\kappa} \rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}$$

$R_{WD}$ ,  $T_{WD}$ ,  $L_{WD}$  :  
Raio, Temp. e Lum.  
da anã branca

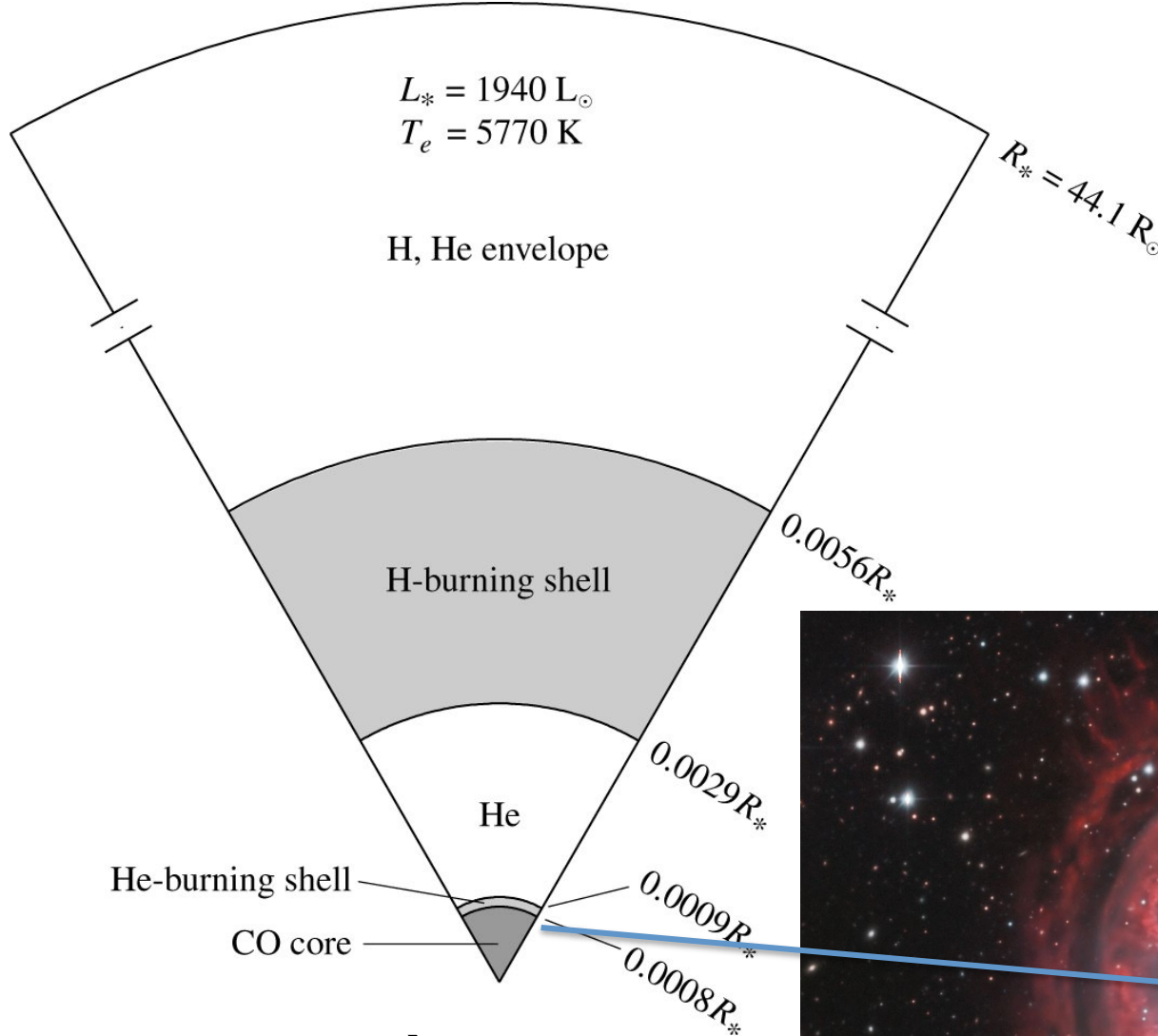
$$\frac{T_{wd} - T_c}{R_{wd} - 0} = -\frac{3}{4ac} \frac{\bar{\kappa} \rho}{T_c^3} \frac{L_{wd}}{4\pi R_{wd}^2}$$

$$T_c \approx \left[ \frac{3\bar{\kappa} \rho}{4ac} \frac{L_{wd}}{4\pi R_{wd}} \right]^{1/4} \\ \approx 7.6 \times 10^7 \text{ K}$$

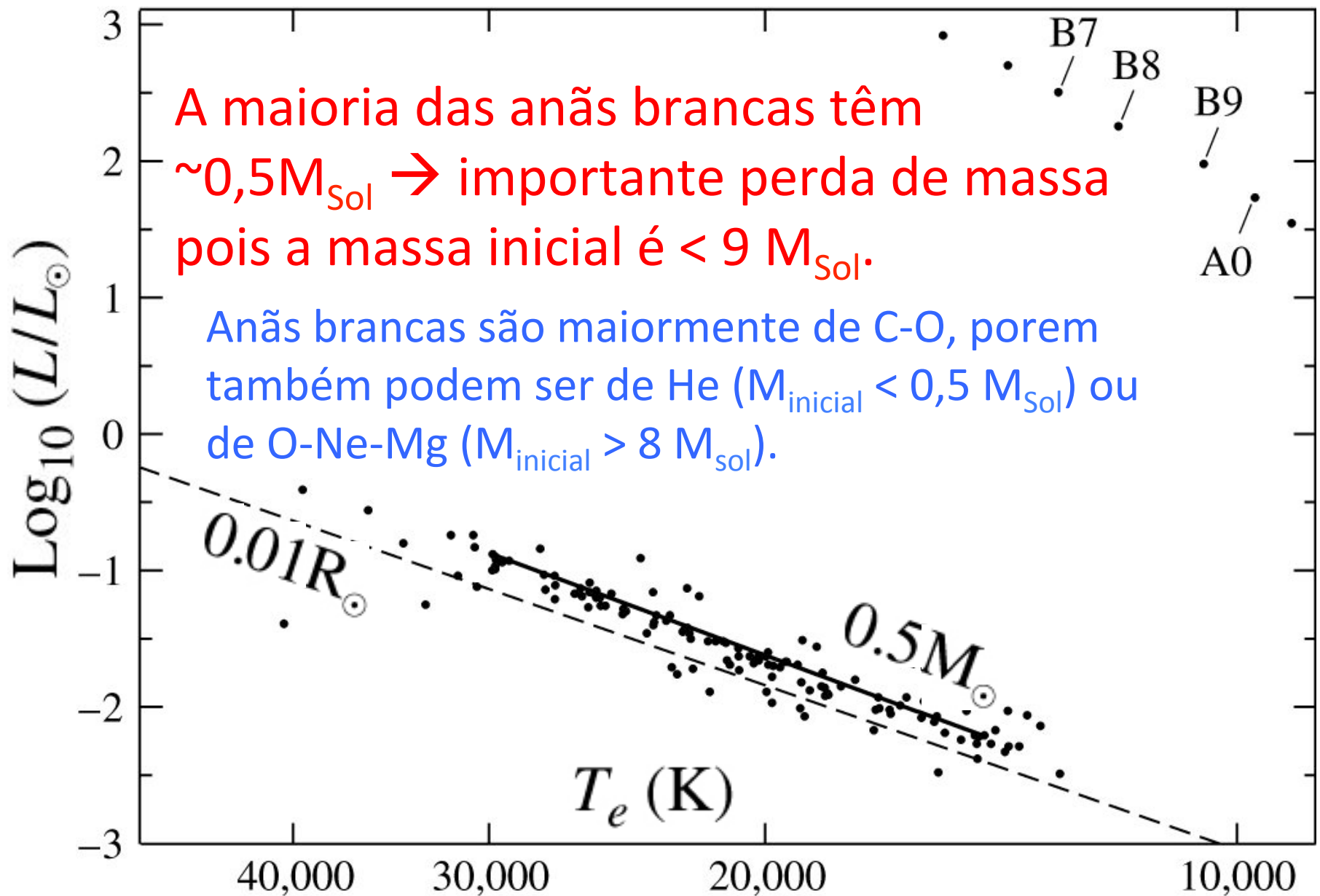
Adotando  $\bar{\kappa} = 0.02 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$   
(espalhamento e-):

→ Quase sem hidrogênio, ou as anãs brancas seriam muito mais luminosas (queima de H)

# Estrutura de estrela de massa inicial $M = 5 M_{\text{Sol}}$ no começo da fase AGB



Massa inicial  $\rightarrow$  anã branca  
 $M < 0,5 M_{\text{Sol}} \rightarrow$  He  
 $0,5 < M < 8 M_{\text{Sol}} \rightarrow$  C-O  
 $8 < M < 10 M_{\text{Sol}} \rightarrow$  O-Ne-Mg



A maioria das anãs brancas têm  $\sim 0,5 M_{\text{Sol}}$   $\rightarrow$  importante perda de massa pois a massa inicial é  $< 9 M_{\text{Sol}}$ .

Anãs brancas são majormente de C-O, porem também podem ser de He ( $M_{\text{inicial}} < 0,5 M_{\text{Sol}}$ ) ou de O-Ne-Mg ( $M_{\text{inicial}} > 8 M_{\text{Sol}}$ ).

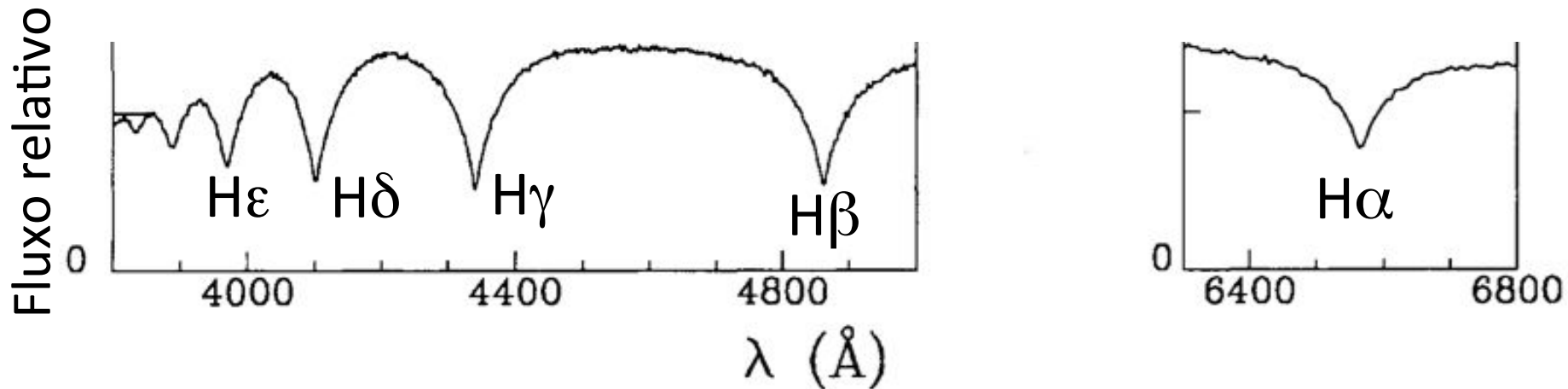
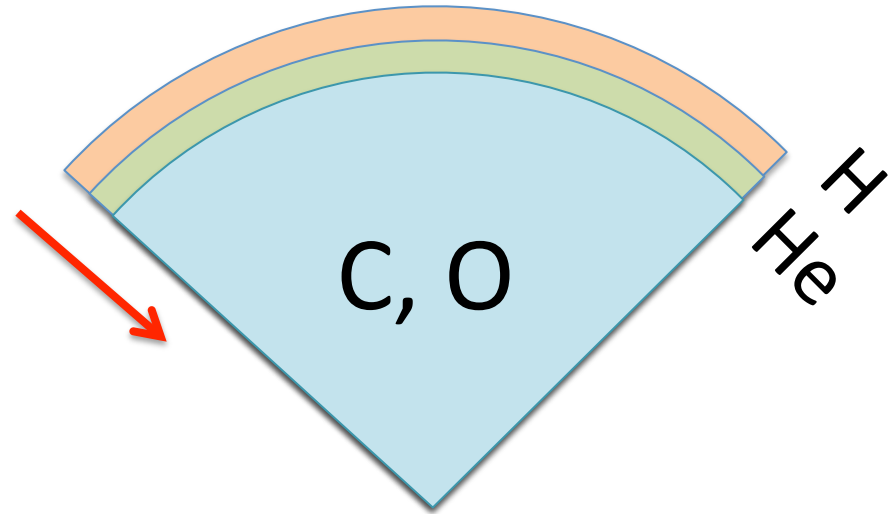
**FIGURE 16.3** DA white dwarfs on an H-R diagram. A line marks the location of the  $0.50 M_{\odot}$  white dwarfs, and a portion of the main sequence is at the upper right. (Data from Bergeron, Saffer, and Liebert, *Ap. J.*, 394, 228, 1992.)



# Espectro e composição superficial de Anãs Brancas

Devido à altíssima gravidade → elementos mais pesados para o interior: fina atmosfera do pouco H restante.

Escala de tempo ~100 anos

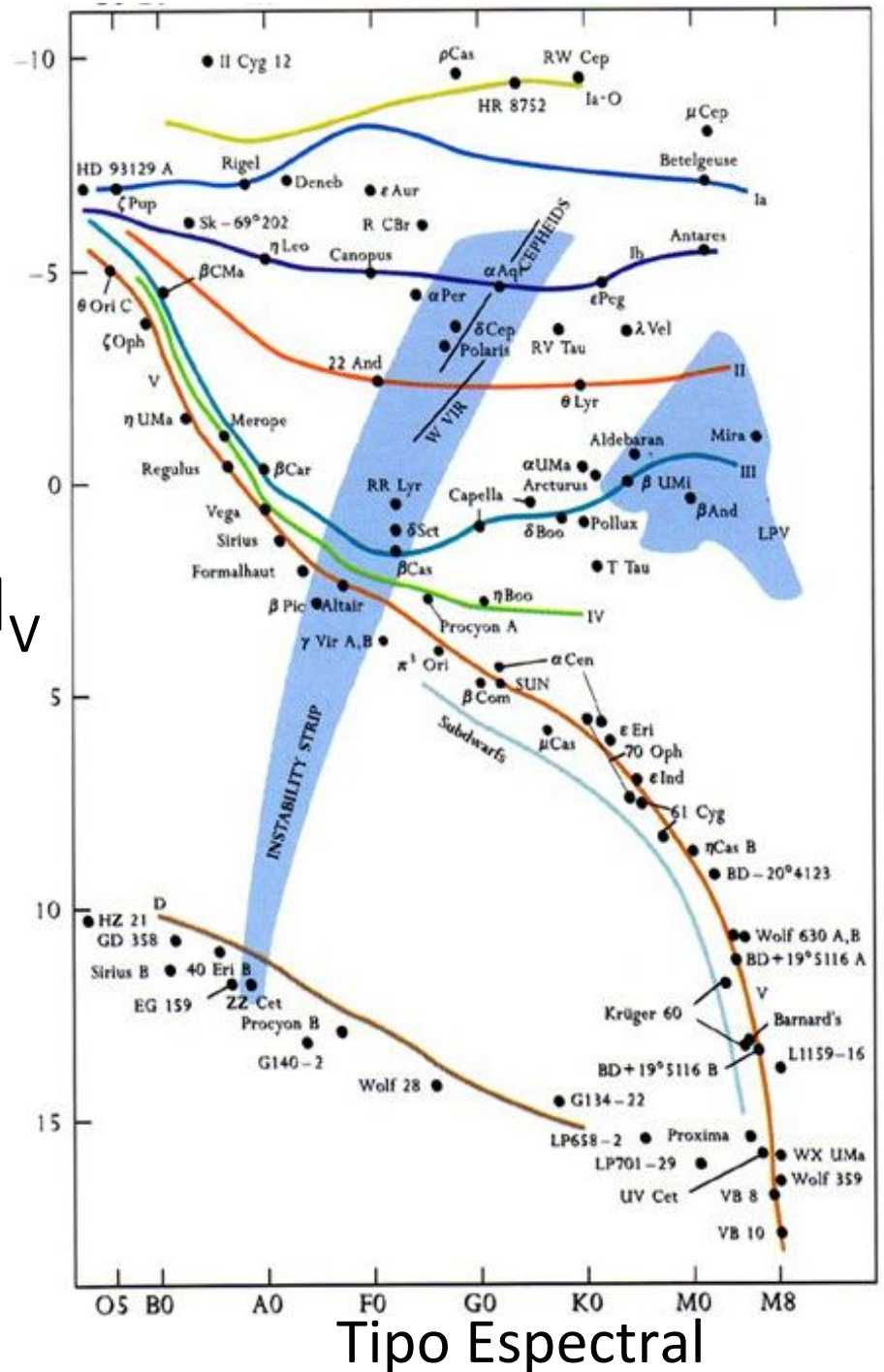


G 207-9, anã branca de tipo DA4.5

# Anãs Brancas Pulsantes:

$T_e \sim 12\,000\text{ K}$  estão na faixa de instabilidade.

$M_V$



**TABLE 14.1** Pulsating Stars. (Adopted from Cox, *The Theory of Stellar Pulsation*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1980.)

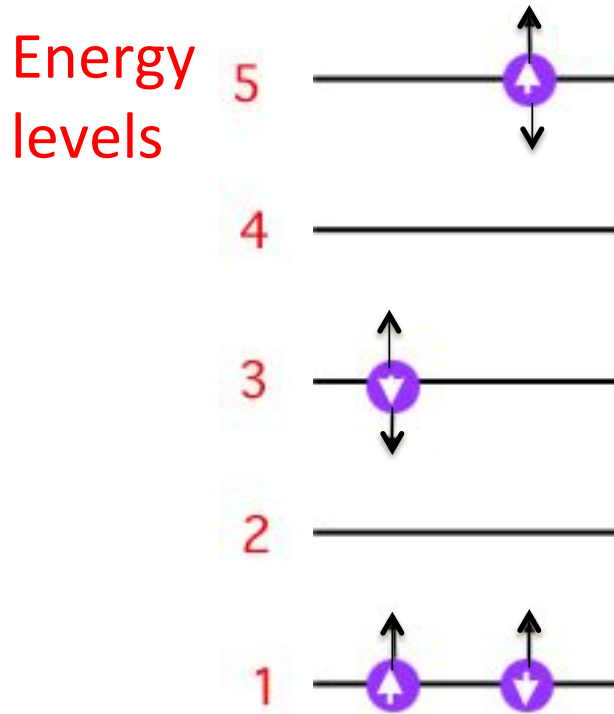
Type	Range of Periods	Population Type	Radial or Nonradial
Long-Period Variables	100–700 days	I,II	R
Classical Cepheids	1–50 days	I	R
W Virginis stars	2–45 days	II	R
RR Lyrae stars	1.5–24 hours	II	R
$\delta$ Scuti stars	1–3 hours	I	R, NR
$\beta$ Cephei stars	3–7 hours	I	R, NR
→ ZZ Ceti stars	100–1000 seconds	I	NR

Estrelas ZZ Ceti: anãs brancas pulsantes com períodos entre 100 e 1000 segundos.

Anãs brancas variáveis: DAV, DBV

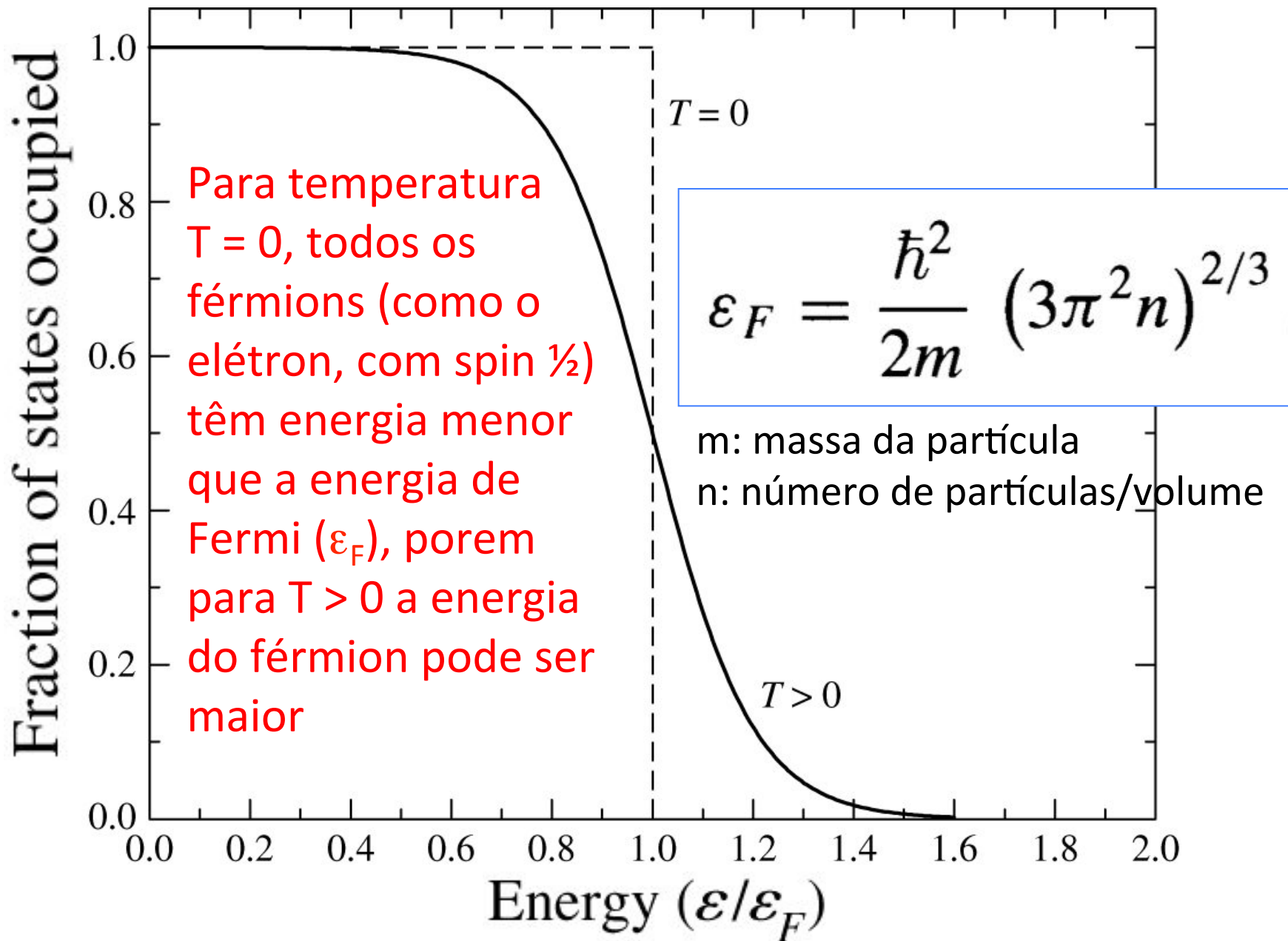
# Matéria degenerada

Para  $T \gg 0$ , o gás pode ocupar diferentes níveis de energia



Porém se  $T \rightarrow 0$ , temos menor energia e a maioria dos elétrons ocupará os níveis mais baixos

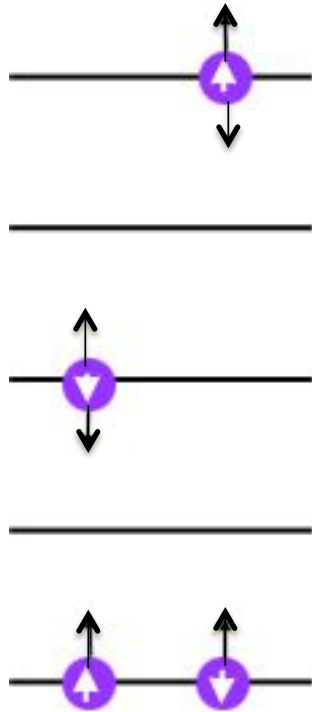
Para  $T = 0$ , todos os elétrons ocupam os níveis mais baixos de energia: gás completamente degenerado



**FIGURE 16.5** Fraction of states of energy  $\varepsilon$  occupied by fermions. For  $T = 0$ , all fermions have  $\varepsilon \leq \varepsilon_F$ , but for  $T > 0$ , some fermions have energies in excess of the Fermi energy.

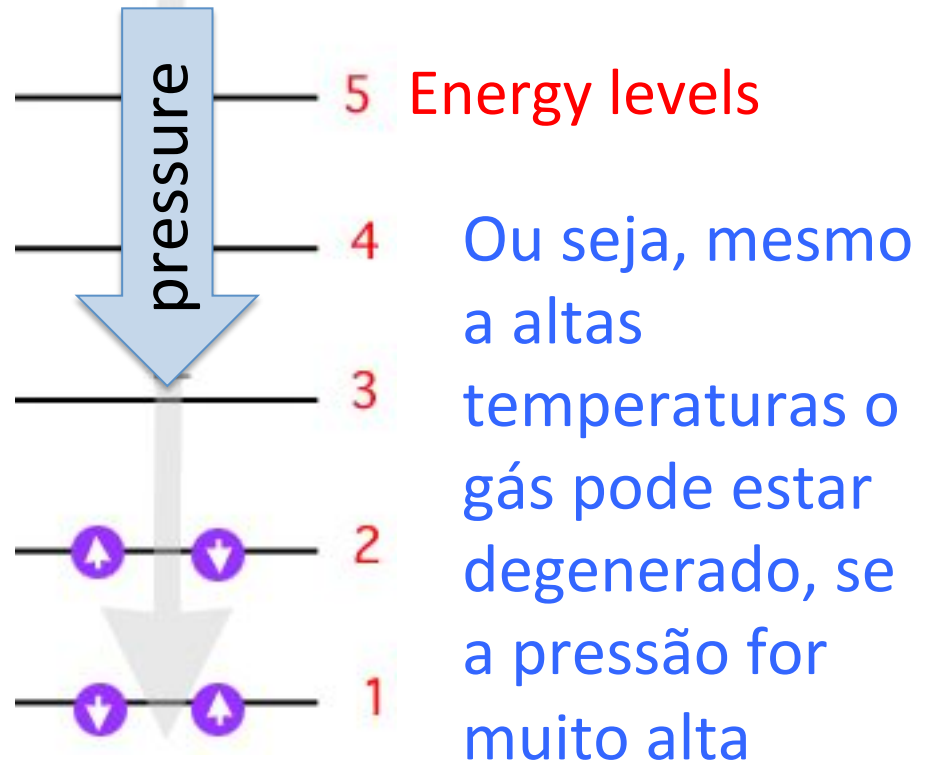
# Gás normal

Em um gás normal, os elétrons podem ocupar diversos níveis de energia



# Gás degenerado

Alta pressão também pode resultar em um gás degenerado: e- são forçados a ocupar o nível base



# Condição para degenerescência

Primeiro, vamos reescrever a energia de Fermi. Para altas temperaturas, a densidade de elétrons:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$$

$$n_e = \left( \frac{\# \text{ electrons}}{\text{nucleon}} \right) \left( \frac{\# \text{ nucleons}}{\text{volume}} \right) = \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H}$$

$$\rightarrow \varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left[ 3\pi^2 \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{2/3}$$

Se a energia térmica ( $3/2 kT$ ) for menor que a energia de Fermi  $\rightarrow$  gás degenerado

$$\frac{3}{2} kT < \frac{\hbar^2}{2m_e} \left[ 3\pi^2 \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{2/3}$$

Ou, rearranjando em função da T e  $\rho$ :  $\frac{T}{\rho^{2/3}} < \frac{\hbar^2}{3m_e k} \left[ \frac{3\pi^2}{m_H} \left( \frac{Z}{A} \right) \right]^{2/3}$

Definindo:  $\mathcal{D} \equiv 1261 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3} = 1261 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3}$

para  $(Z/A) = 0,5$

Condição para degenerescência:  $\frac{T}{\rho^{2/3}} < \mathcal{D}$



Condição para  
degenerescência:

$$\frac{T}{\rho^{2/3}} < \mathcal{D}$$

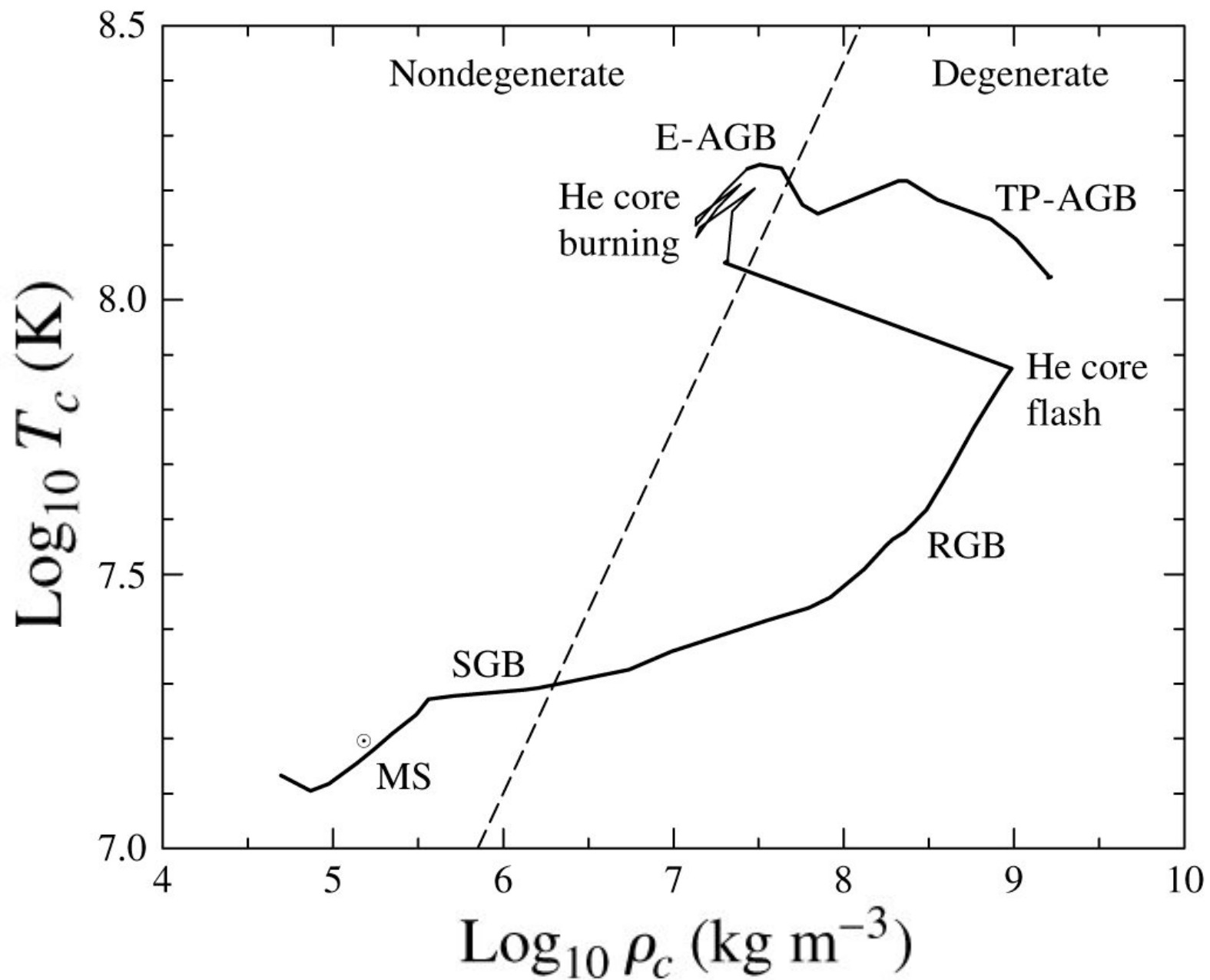
$$\mathcal{D} \equiv 1261 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3}$$

**Exemplo 16.3.1. Quão importante é a degenerescência no centro do Sol?**

No centro do Sol:  $T = 1,6 \times 10^7 \text{ K}$  e  $\rho = 1,5 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{T_c}{\rho_c^{2/3}} = 5500 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3} > \mathcal{D}$$

→ no Sol, a pressão de degenerescência de elétrons é pequena



**FIGURE 16.6** Degeneracy in the Sun's center as it evolves. (Data from Mazzitelli and D'Antona, *Ap. J.*, 311, 762, 1986.)

Condição para  
degenerescência:

$$\frac{T}{\rho^{2/3}} < \mathcal{D}$$

$$\mathcal{D} \equiv 1261 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3}$$

**Exemplo 16.3.1. Quão importante é a degenerescência no centro de Sirius B?**

Para Sirius B:  $T_c \sim 7.6 \times 10^7 \text{ K}$  e  $P_c \approx 3.8 \times 10^{22} \text{ N m}^{-2}$

$$\frac{T_c}{\rho_c^{2/3}} = 37 \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-2/3} \ll \mathcal{D}$$


→ Anã branca é completamente degenerada

# Pressão de degenerescência de $e^-$

Os elétrons são forçados a ocupar os níveis mais baixos de energia (sem violar o Princípio de Exclusão)

Porem os elétrons também têm que respeitar o Princípio de Incerteza:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar.$$


$$P = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m_e} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{5/3}$$

Usando  $(Z/A) = 0,5 \rightarrow$  para Sirius B temos  $P = 2 \times 10^{22} \text{ N/m}^2$   
 $\rightarrow$  pressão de degenerescência de  $e^-$  suporta a anã branca

$Z/A = 0,5$  por exemplo se considerarmos anã branca de C-O (para C:  $Z = 6$  e  $A = 12$ )

# Relação Massa – Volume em anãs brancas

Pressão do equilíbrio  
hidrostático:

Pressão de degenerescência:

$$\frac{2}{3} \pi G \rho^2 R_{\text{wd}}^2 = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m_e} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{5/3}$$

Supondo densidade constante:  $\rho = M_{\text{wd}} / \frac{4}{3} \pi R_{\text{wd}}^3$

$$R_{\text{wd}} \approx \frac{(18\pi)^{2/3}}{10} \frac{\hbar^2}{G m_e M_{\text{wd}}^{1/3}} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{1}{m_H} \right]^{5/3}$$

Para  $M = 1 M_{\text{sol}}$  e  $(Z/A) = 0,5 \rightarrow$  raio  $R_{\text{WD}} = 3 \times 10^6$  m, muito pequeno por um fator de 2, mas ordem de grandeza OK

$$R_{\text{wd}} \approx \frac{(18\pi)^{2/3}}{10} \frac{\hbar^2}{Gm_e M_{\text{wd}}^{1/3}} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{1}{m_H} \right]^{5/3}$$

→  $M_{\text{wd}} R_{\text{wd}}^3 = \text{constante}$

ou  $M_{\text{wd}} V_{\text{wd}} = \text{constante}$

Anãs brancas mais massivas têm raio  $R_{\text{wd}}$  menor!

É possível termos anãs brancas com  $R \sim 0$ ?

Exemplo, velocidade de  $e^-$  em Sirius B (sem considerar a relatividade, usando eq. 16.10):

$$v \approx \frac{\hbar}{m_e} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{1/3} = 1.1 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$v > 1/3 c !$

Anãs brancas não podem ter  $R \rightarrow 0$ . Efeitos da relatividade: velocidade  $e^-$  não pode exceder  $c$ .

**Limite de estabilidade:** 
$$P = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \hbar c \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{4/3}$$

# Limite de Chandrasekhar

(descoberto quando tinha 21 anos)

Para ter uma ideia da massa limite de Chandrasekhar:

Pressão do equilíbrio  
hidrostático:

Limite de pressão para  
estabilidade da anã branca:

$$\frac{2}{3} \pi G \rho^2 R_{\text{wd}}^2 = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} \hbar c \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{4/3}$$

Usando:

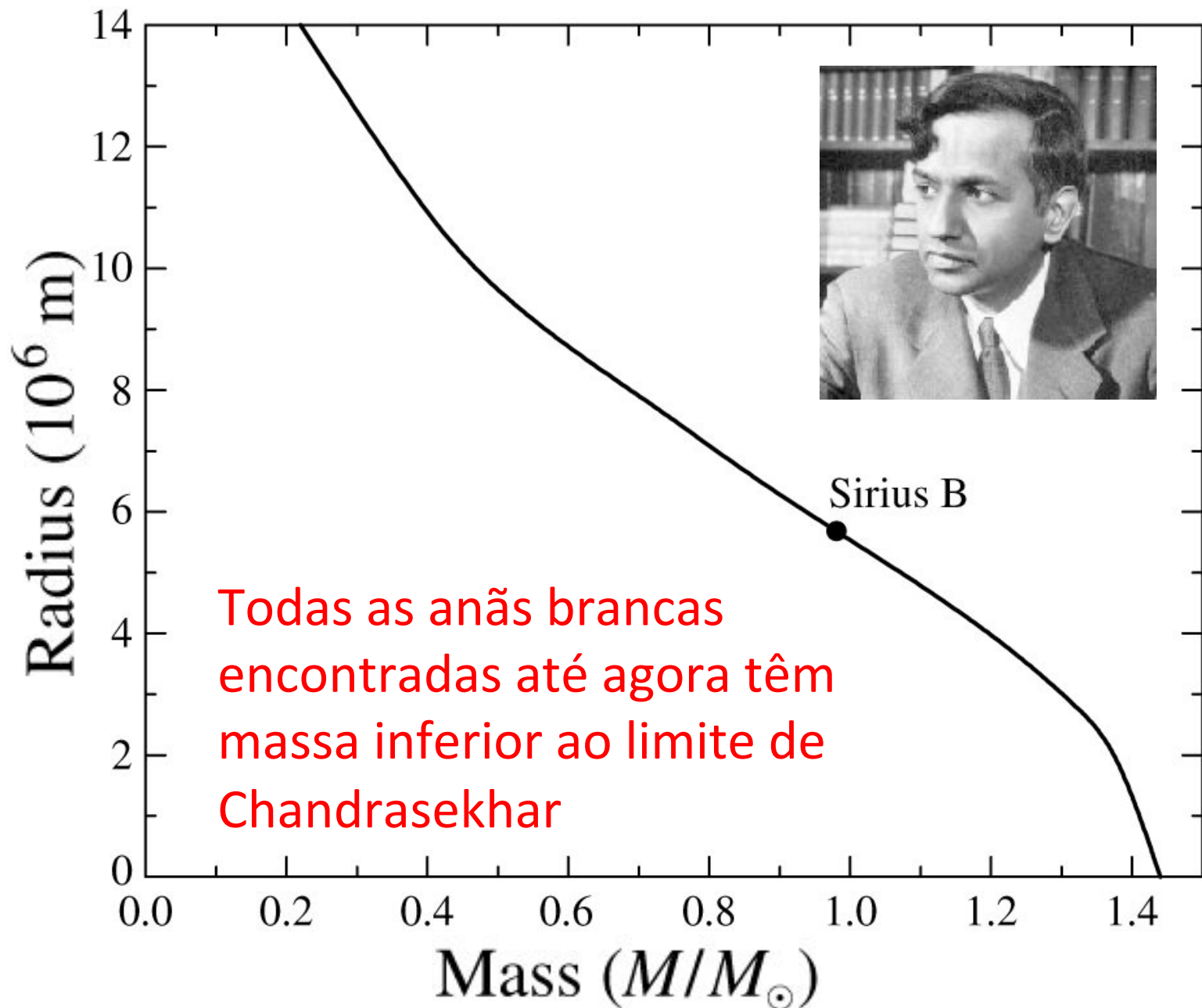
$$\rho = M_{\text{wd}} / \frac{4}{3} \pi R_{\text{wd}}^3$$

$$\rightarrow M_{\text{Ch}} \sim \frac{3\sqrt{2\pi}}{8} \left( \frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \left[ \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{1}{m_H} \right]^2$$

$$\text{Para } (Z/A) = 0,5 \rightarrow M_{\text{Ch}} = 0,44 M_{\text{Sol}}$$

Um procedimento rigoroso resulta em  $M_{\text{Ch}} = 1,44 M_{\text{Sol}}$





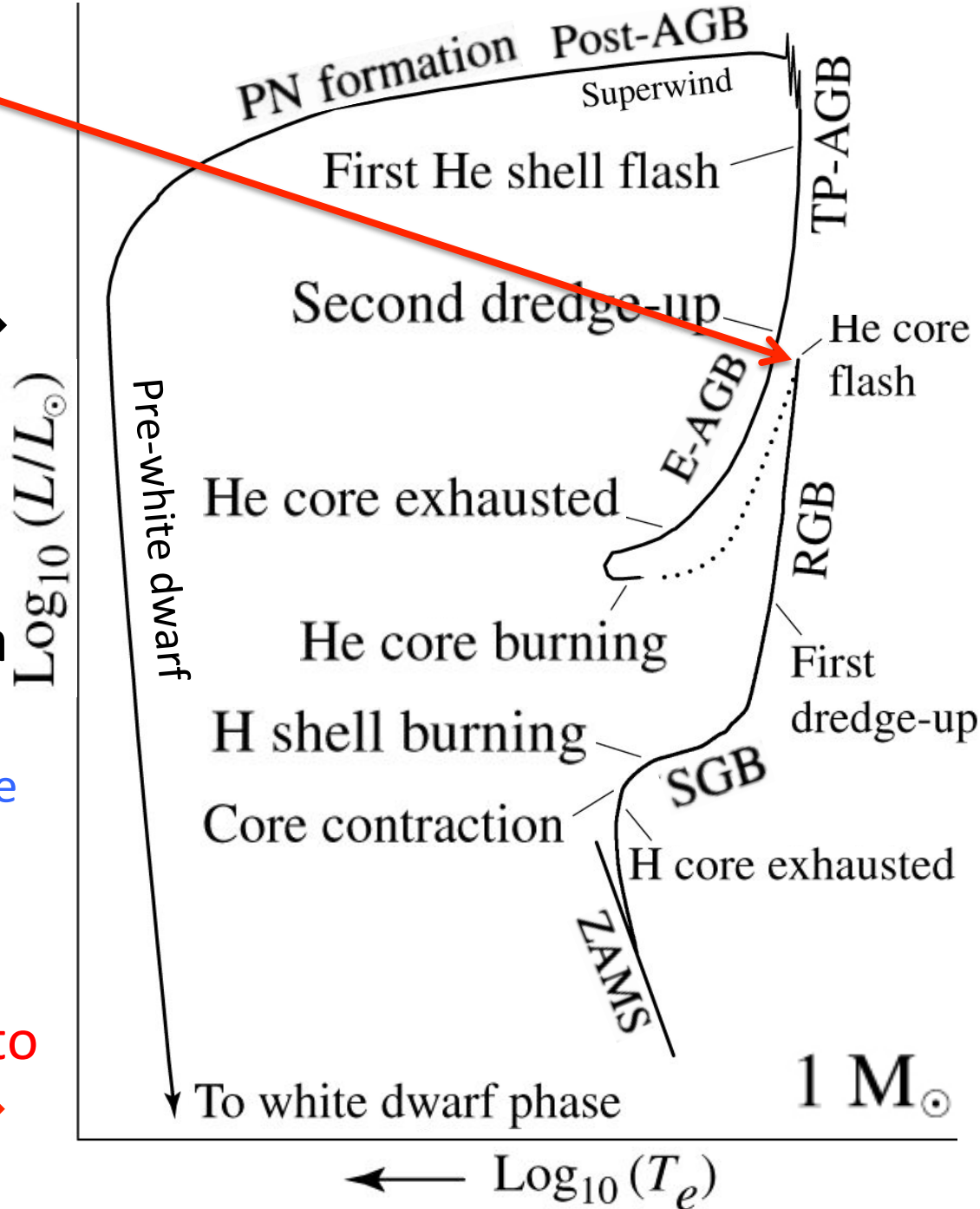
**FIGURE 16.7** Radii of white dwarfs of  $M_{\text{wd}} \leq M_{\text{Ch}}$  at  $T = 0$  K.

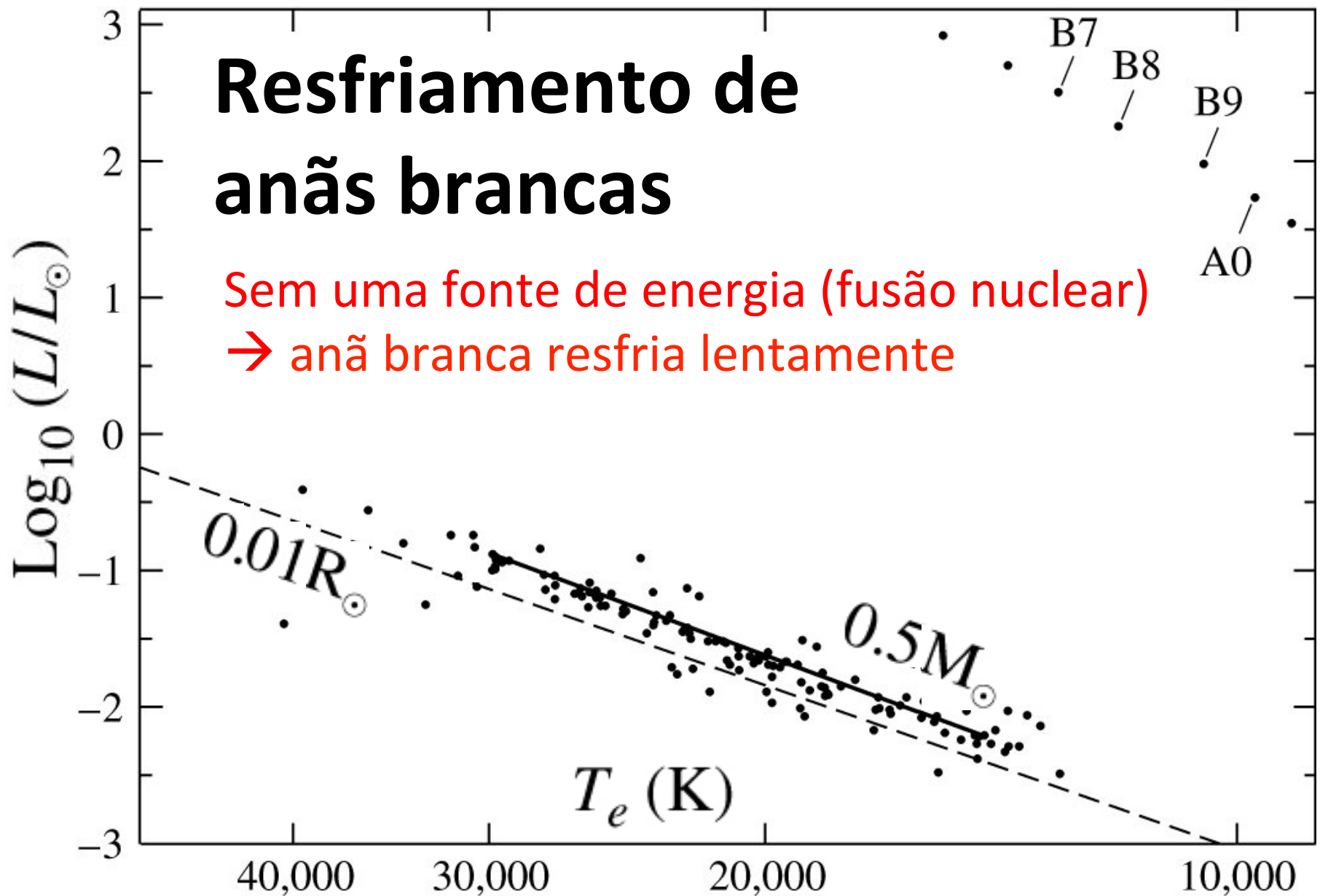
# O Flash do núcleo de He: *He Core Flash*

$M < 1,8 M_{\text{sol}}$ : núcleo de He muito degenerado  $\rightarrow$  pressão não depende muito do aumento da T. A temperatura aumenta tanto que temos queima explosiva: **Flash de He**.

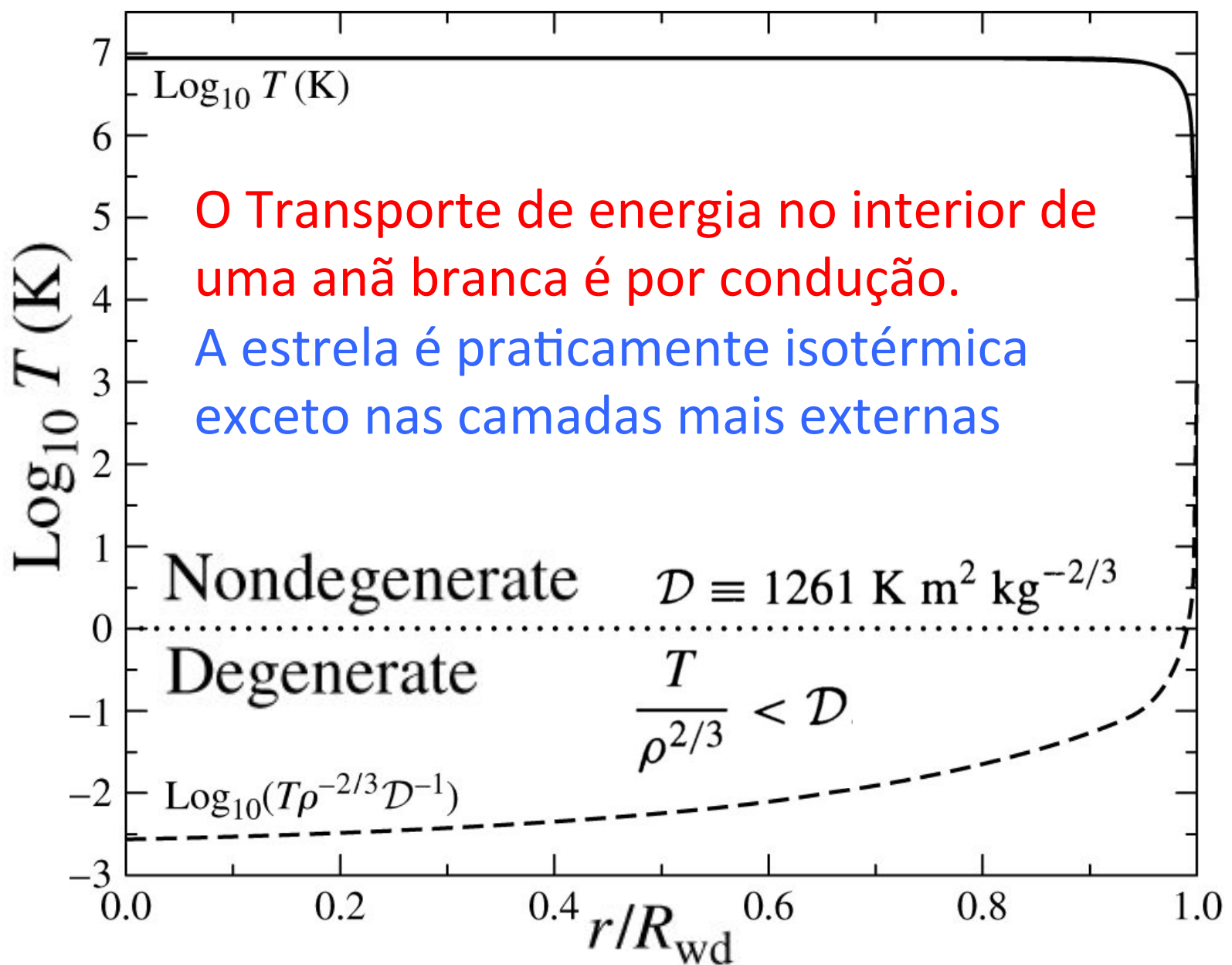
Não é observado pois boa parte da E é usada para remover a degenerescência e o resto é absorvida pelo envelope

Se a massa inicial for muito pequena ( $M < 0,5 M_{\text{sol}}$ )  $\rightarrow$  sem combustão do He





**FIGURE 16.3** DA white dwarfs on an H–R diagram. A line marks the location of the  $0.50 M_{\odot}$  white dwarfs, and a portion of the main sequence is at the upper right. (Data from Bergeron, Saffer, and Liebert, *Ap. J.*, 394, 228, 1992.)



**FIGURE 16.8** Temperature and degree of degeneracy in the interior of a white dwarf model. The horizontal dotted line marks the boundary between degeneracy and nondegeneracy as described by Eq. (16.6).

# Estrutura das camadas não degeneradas da anã branca

$$P = \left( \frac{4}{17} \frac{16\pi a c}{3} \frac{GM_{\text{wd}}}{L_{\text{wd}}} \frac{k}{\kappa_0 \mu m_H} \right)^{1/2} T^{17/4}$$

$a = 4 \sigma/c$

bound-free Kramers opacity law

$$\kappa_0 = 4.34 \times 10^{21} Z(1 + X) \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

$X, Z$ : fração de H e metais  
 $X + Y + Z = 1$

Usando a lei do gás ideal:

$$\rho = \left( \frac{4}{17} \frac{16\pi a c}{3} \frac{GM_{\text{wd}}}{L_{\text{wd}}} \frac{\mu m_H}{\kappa_0 k} \right)^{1/2} T^{13/4}$$

O limite entre o interior degenerado e a superfície é quando a energia térmica ( $3/2 kT$ ) for igual à energia de Fermi:

$$\frac{3}{2} kT = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left[ 3\pi^2 \left( \frac{Z}{A} \right) \frac{\rho}{m_H} \right]^{2/3}$$

Usando:  $\rho = \left( \frac{4}{17} \frac{16\pi ac}{3} \frac{GM_{\text{wd}}}{L_{\text{wd}}} \frac{\mu m_H}{\kappa_0 k} \right)^{1/2} T^{13/4}$

$$L_{\text{wd}} = \frac{4\mathcal{D}^3}{17} \frac{16\pi ac}{3} \frac{Gm_H}{\kappa_0 k} \mu M_{\text{wd}} T_c^{7/2} = C T_c^{7/2}$$

onde  $C \equiv 6.65 \times 10^{-3} \left( \frac{M_{\text{wd}}}{M_\odot} \right) \frac{\mu}{Z(1+X)}$

**Example 16.5.1.** Equation (16.19) can be used to estimate the interior temperature of a  $1 M_{\odot}$  white dwarf with  $L_{\text{wd}} = 0.03 L_{\odot}$ . Arbitrarily assuming values of  $X = 0$ ,  $Y = 0.9$ ,  $Z = 0.1$  for the nondegenerate envelope (so  $\mu \simeq 1.4$ ) results in<sup>16</sup>

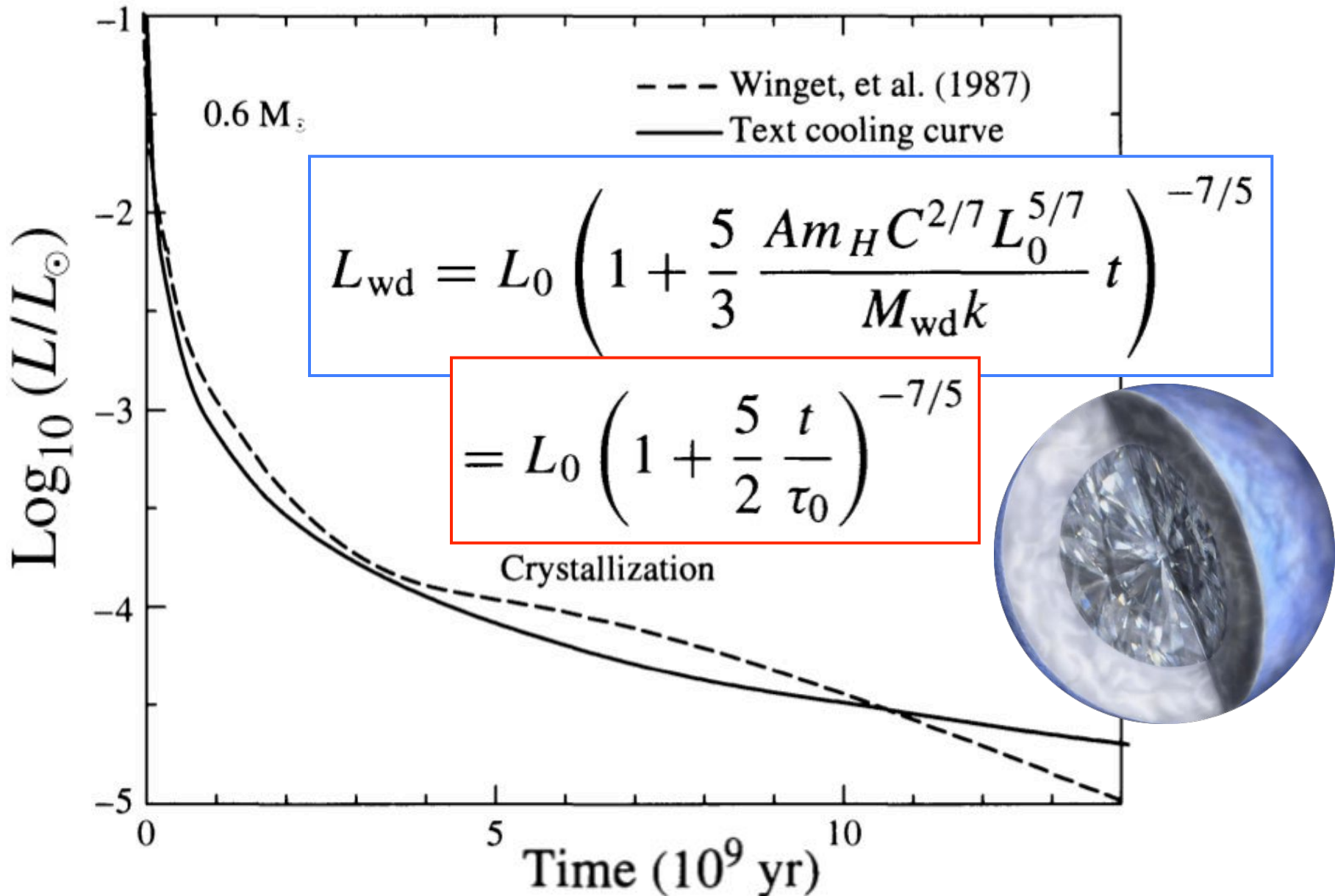
$$T_c = \left[ \frac{L_{\text{wd}}}{6.65 \times 10^{-3}} \left( \frac{M_{\odot}}{M_{\text{wd}}} \right) \frac{Z(1+X)}{\mu} \right]^{2/7} = 2.8 \times 10^7 \text{ K.}$$

Densidade na  
base do  
envelope:

$$\rho = \left( \frac{T_c}{D} \right)^{3/2} = 3.4 \times 10^6 \text{ kg m}^{-3}$$

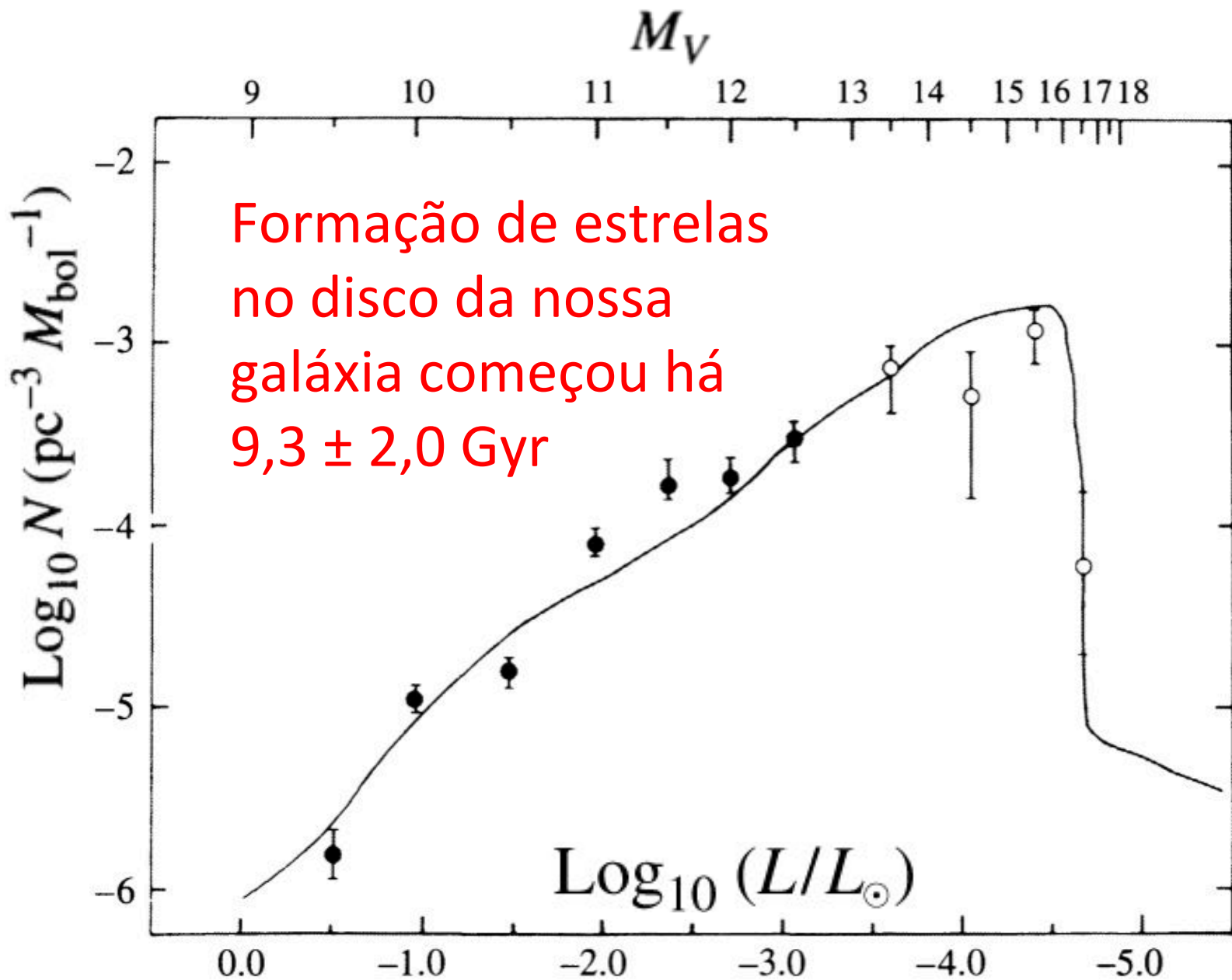
Muito menor que a densidade média da Sirius B  
( $3 \times 10^9 \text{ kg m}^{-3}$ )  $\rightarrow$  Envelope muito fino

# Resfriamento das anãs brancas



**FIGURE 16.9** Theoretical cooling curves for  $0.6 M_{\odot}$  white-dwarf models. [The solid line is from Eq. (16.23), and the dashed line is from Winget et al., *Ap. J. Lett.*, 315, L77, 1987.]

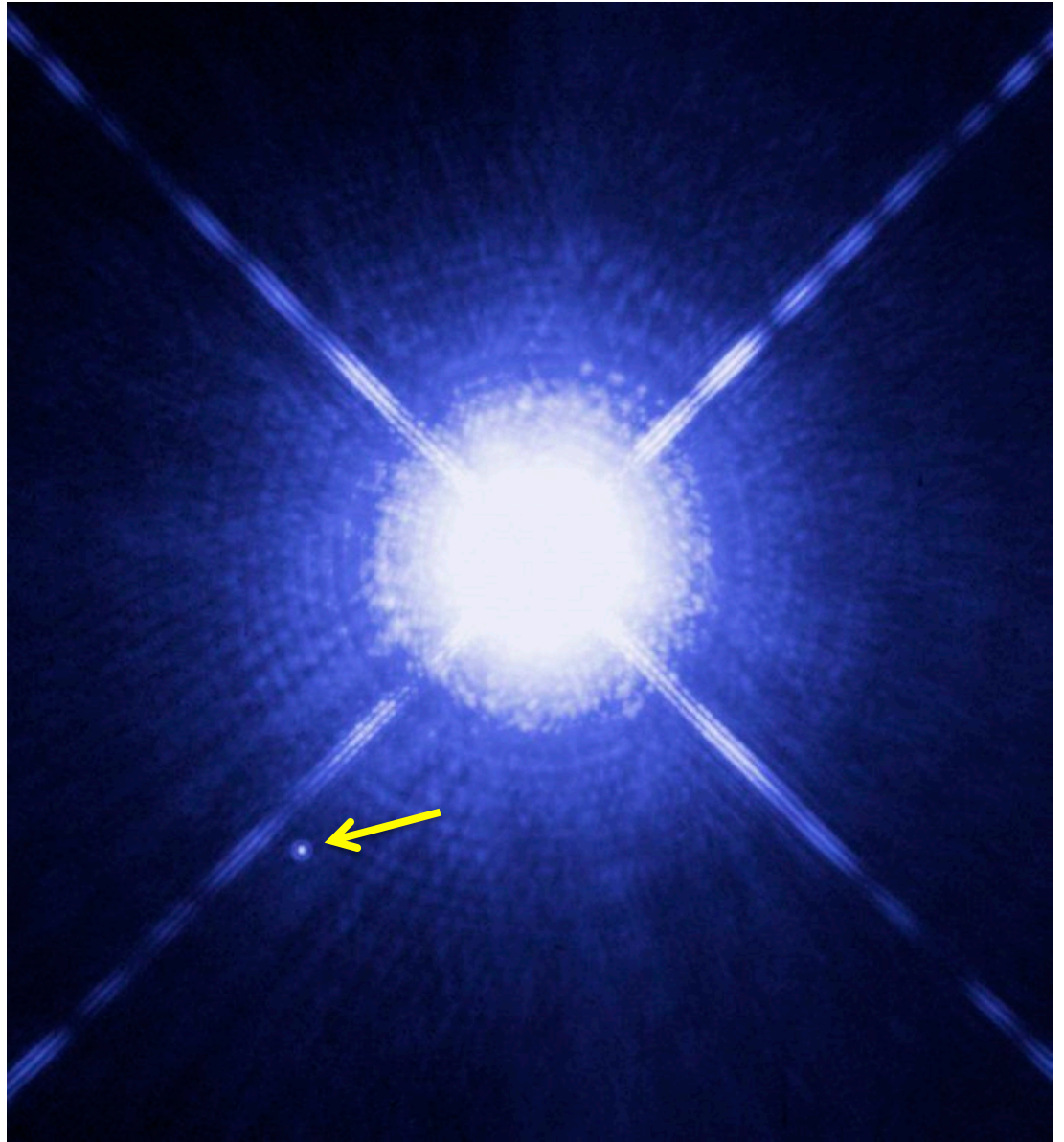




**FIGURE 16.10** Observed and theoretical distribution of white-dwarf luminosities. (Figure adapted from Winget et al., *Ap. J. Lett.*, 315, L77, 1987.)

# Idade em sistemas binários

(incluindo uma componente anã branca)

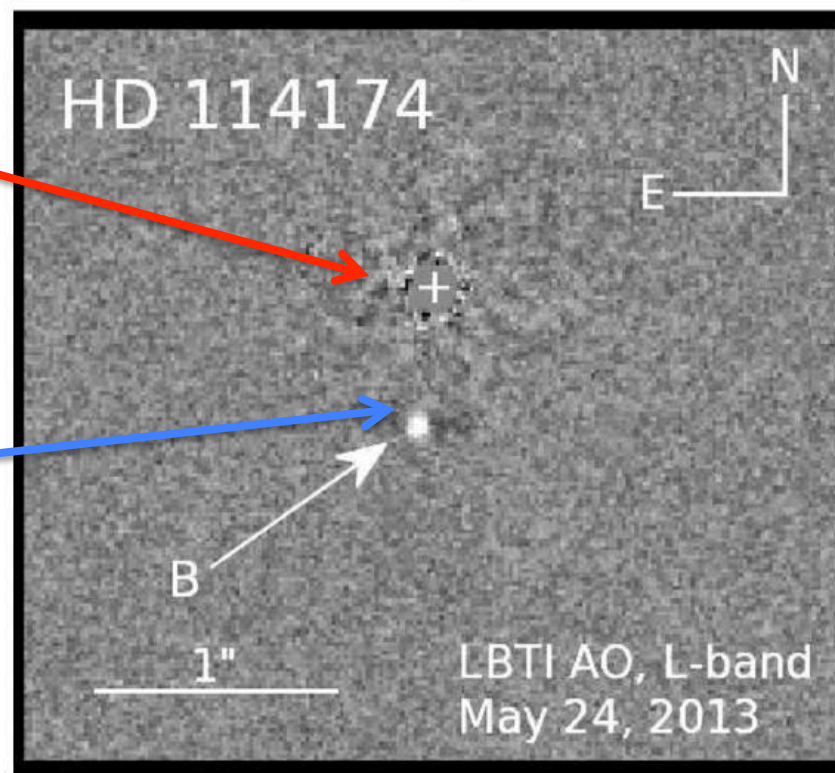


Sirius A e B

# MID-INFRARED HIGH-CONTRAST IMAGING OF HD 114174 B: AN APPARENT AGE DISCREPANCY IN A “SIRIUS-LIKE” BINARY SYSTEM

CHRISTOPHER T. MATTHEWS<sup>1</sup>, JUSTIN R. CREPP<sup>1</sup>, ANDREW SKEMER<sup>2</sup>, PHILIP M. HINZ<sup>2</sup>,  
ALEXANDROS GIANNINAS<sup>3</sup>, MUKREMIN KILIC<sup>3</sup>, MICHAEL SKRUTSKIE<sup>4</sup>, VANESSA P. BAILEY<sup>2</sup>,  
DENIS DEFRERE<sup>2</sup>, JARRON LEISENRING<sup>2</sup>, SIMONE ESPOSITO<sup>5</sup>, AND ALFIO PUGLISI<sup>5</sup>

Gêmea solar  
(HD114174 A)  
foi ocultada  
para poder  
observar a fraca  
anã branca  
(HD114174 B)



Sistema binário de  
gêmea solar e anã  
branca

**Figure 1.**  $L'$ -band recovery image of HD 114174 B after point-spread-function subtraction. The WD companion, HD 114174 B, is detected at an angular separation of  $0''.68$  with a measured contrast ratio of  $\Delta L' = 10.15 \pm 0.15$  at  $10\sigma$ . This image represents the deepest high-contrast detection within  $1''$  in the  $L'$ -band to date.

**Table 1**

Properties of HD 114174 A from Crepp et al. (2013)

Right ascension (J2000)	13 08 51.02
Declination (J2000)	+05 12 26.06
<i>B</i>	7.47 ± 0.01
<i>V</i>	6.8 ± 0.001
<i>R</i>	6.3 ± 0.02
<i>I</i>	6.0 ± 0.01
<i>Y</i> <sup>a</sup>	5.71 ± 0.01
<i>J</i>	5.613 ± 0.026
<i>H</i>	5.312 ± 0.027
<i>K<sub>s</sub></i>	5.202 ± 0.023
Distance (pc)	26.14 ± 0.37
Mass ( <i>M</i> <sub>⊙</sub> )	1.05 ± 0.05
Radius ( <i>R</i> <sub>⊙</sub> )	1.06
Luminosity ( <i>L</i> <sub>⊙</sub> )	1.13
Age (isochonal) (Gyr)	4.7 <sup>+2.3</sup> <sub>-2.6</sub>
Age (gyrochronological) (Gyr)	4.0 <sup>+0.96</sup> <sub>-1.09</sub>
(Fe/H)	0.07 ± 0.03
log( <i>g</i> ) (cm s <sup>-2</sup> )	4.51 ± 0.06
<i>T</i> <sub>eff</sub> (K)	5781 ± 44
Spectral type	G5 IV-V
<i>v</i> sin( <i>i</i> ) (km/s)	1.8 ± 0.5

**Note.** <sup>a</sup> We estimate the *Y*-band magnitude of HD 114174 A by fitting a blackbody function to *BVRIJHK<sub>s</sub>* photometric measurements (Section 3.2).

Gêmea solar (primária)

Segundo o artigo: 4,7±2.6 Gyr

Nosso grupo: 6,4± 0,7 Gyr

**Table 2**

Photometry and Best Fit Hydrogen Model for HD 114174 B

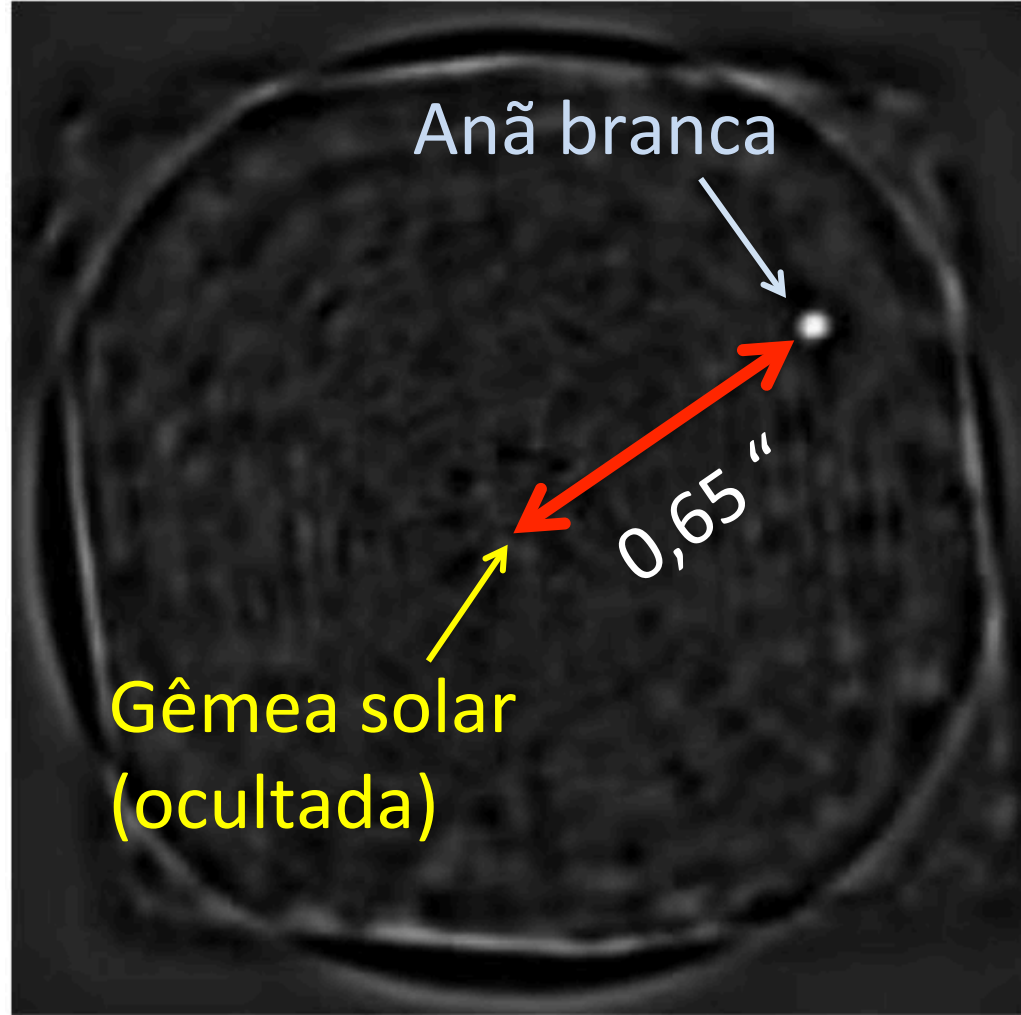
$\Delta Y$	>8.2 ± 0.7 mag
$\Delta J$	10.48 ± 0.11 mag
$\Delta K$	10.75 ± 0.12 mag
$\Delta L'$	10.15 ± 0.15 mag
<i>Y</i>	>14.0 ± 0.7
<i>J</i>	16.06 ± 0.11
<i>K<sub>s</sub></i>	15.94 ± 0.12
<i>L'</i>	15.30 ± 0.16
<i>M<sub>Y</sub></i>	>11.85 ± 0.7
<i>M<sub>J</sub></i>	13.98 ± 0.11
<i>M<sub>K<sub>s</sub></sub></i>	13.85 ± 0.12
<i>M<sub>L</sub></i>	13.21 ± 0.16
Mass ( <i>M</i> <sub>⊙</sub> )	0.54 ± 0.01
Radius ( <i>R</i> <sub>⊙</sub> )	0.01301 ± 0.00019
log <i>L/L</i> <sub>⊙</sub>	-4.30 ± 0.02
Age (Gyr)	7.77 ± 0.24
log <i>g</i>	7.94 ± 0.03
<i>T</i> <sub>eff</sub> (K)	4260 ± 360
<i>M<sub>v</sub></i>	7.90 ± 0.03
<i>M</i> <sub>bol</sub>	15.49 ± 0.03

Anã branca: 7,7 Gyr.

Porem, se a atmosfera for de He → idade 6,2 Gyr (em excelente acordo com nossa idade da gêmea solar)

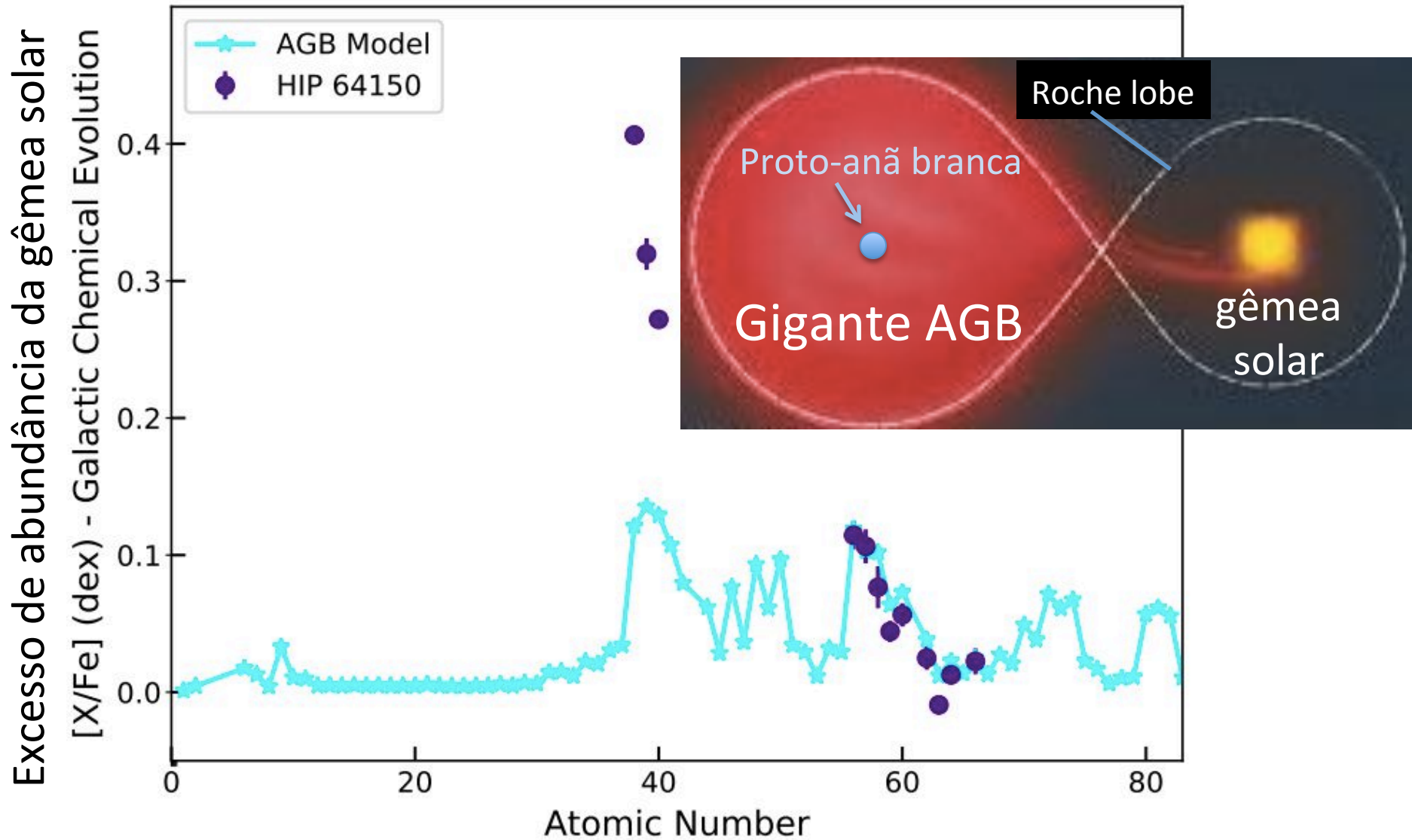
# HD114174 (= HIP 64150)

A luz da gêmea solar HD114174 (no centro) foi ocultada com o instrumento SPHERE do ESO, permitindo observar a fraca companheira, uma anã branca



**Fig. 2.** Final image obtained for the star HD114174. The know WD companion is clearly visible on the top right corner while the central star, more than  $10^4$  times brighter, has been well cancelled using ADI and SD implemented in the SPHERE subtraction procedures. Claudi et al. 2016

# Poluição de elementos de captura de nêutrons por antiga companheira AGB (agora anã branca)



# Estudo de anãs brancas no Brasil

- Kepler Oliveira (UFRGS)



- Alejandra Romero (UFRGS)



Grupo da UFRGS: observações e teoria de anãs brancas.

# Provinha

- Qual tipo de anã branca é mais numerosa? (DA, DB, DC, DQ, DZ)
- Como a anã branca se mantém em equilíbrio?
- Qual o valor da massa limite de Chandrasekhar (em massas solares)?
- Se a massa de uma anã branca for  $M$  e o volume  $= V$ , qual o volume de uma anã branca com massa  $= 1,5 M$  ?
- Qual o motivo do resfriamento das anãs frias?