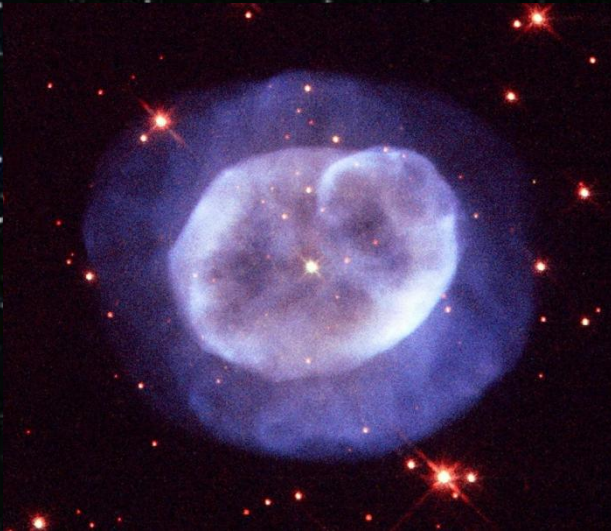


# Anãs Brancas 2

*J.E. Horvath*  
IAG-USP



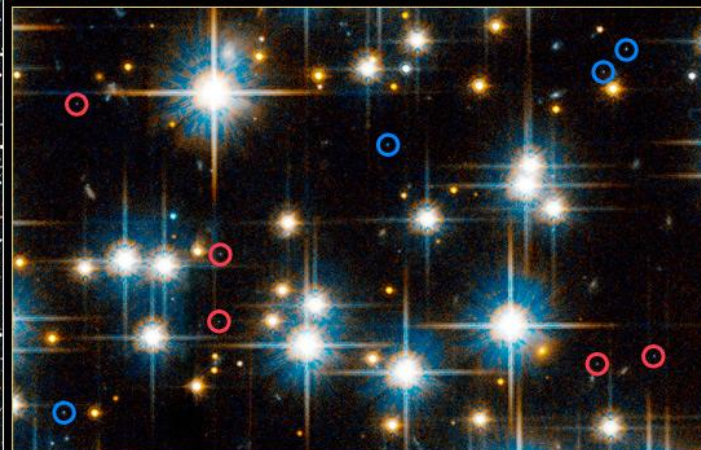
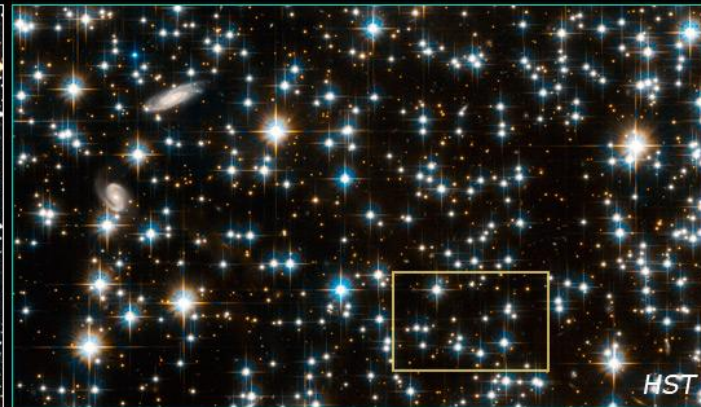
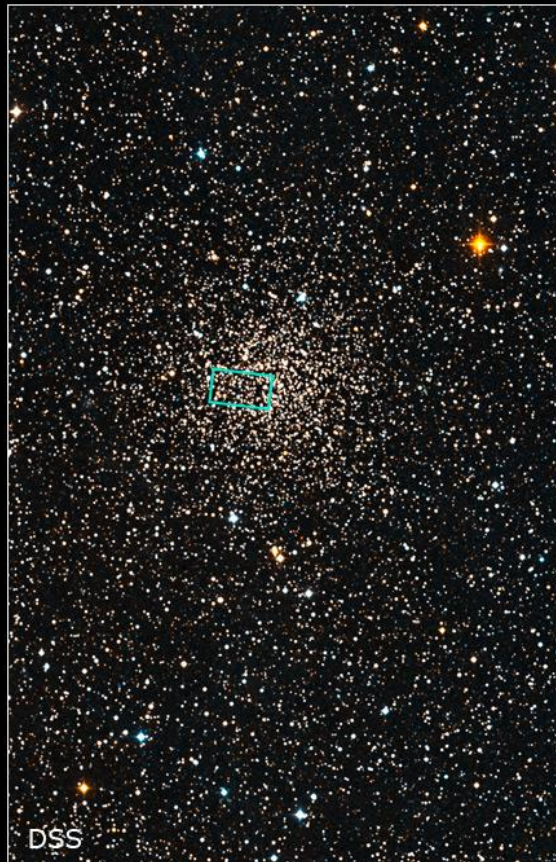


# O quê observamos das anãs brancas?

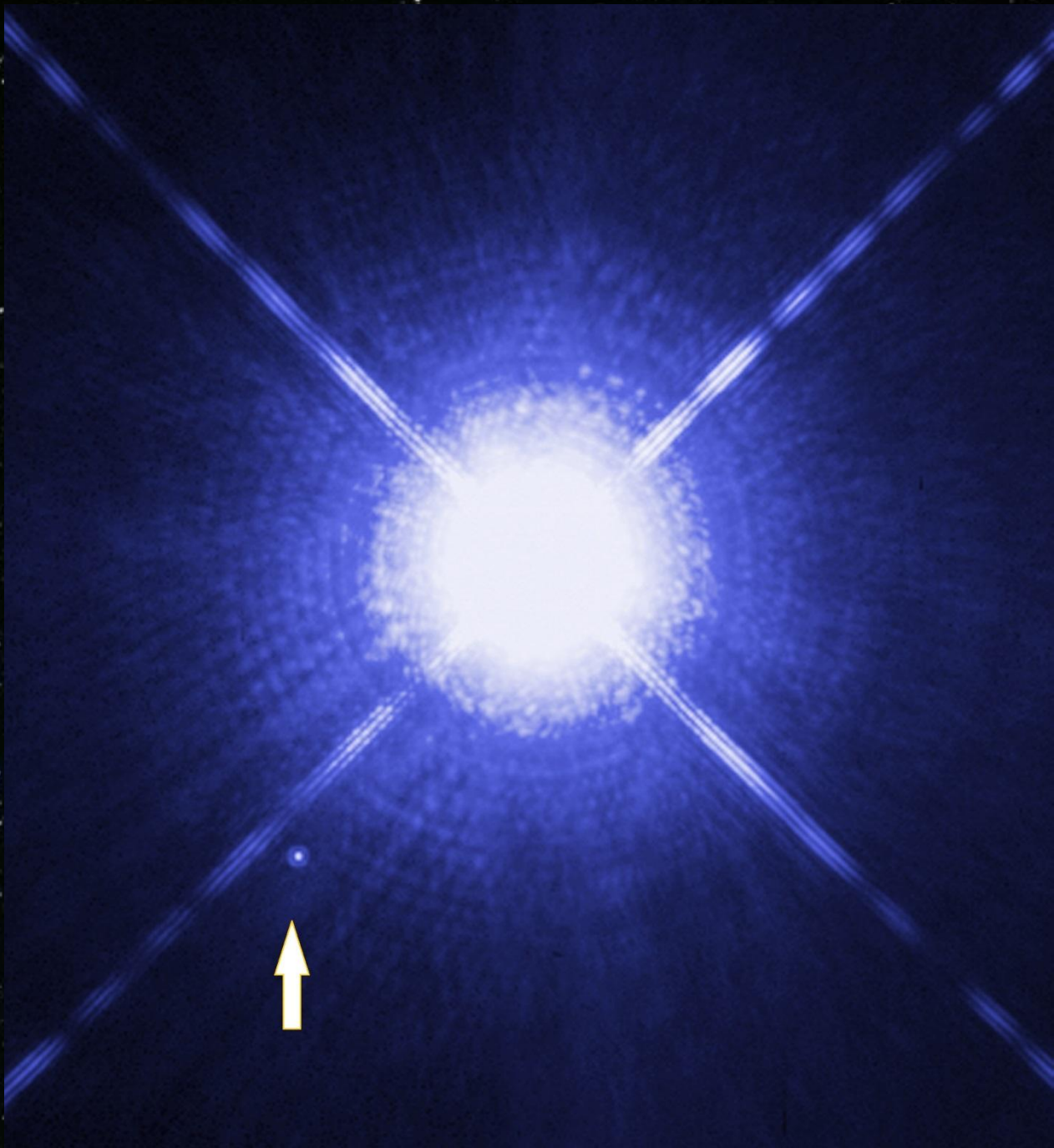
As anãs brancas existem em grande número, incluindo algumas bem próximas com magnitudes  $< 12$ . Catar anãs brancas não é nada difícil

White Dwarf Stars in Open Cluster NGC 6791

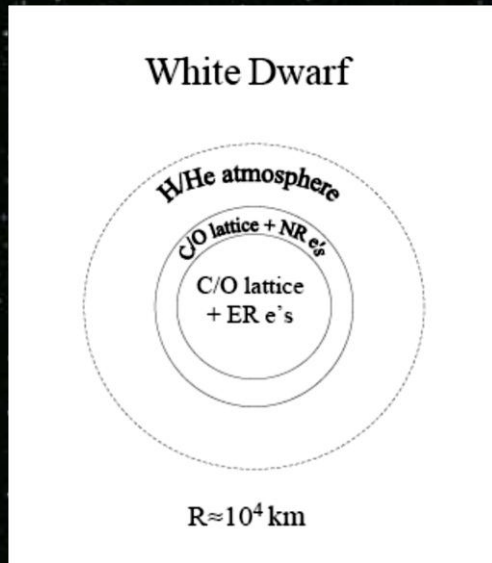
HST • ACS







Além do caroço de C-O ou mais pesado, a radiação é processada pela atmosfera, que contém H, He ou até C

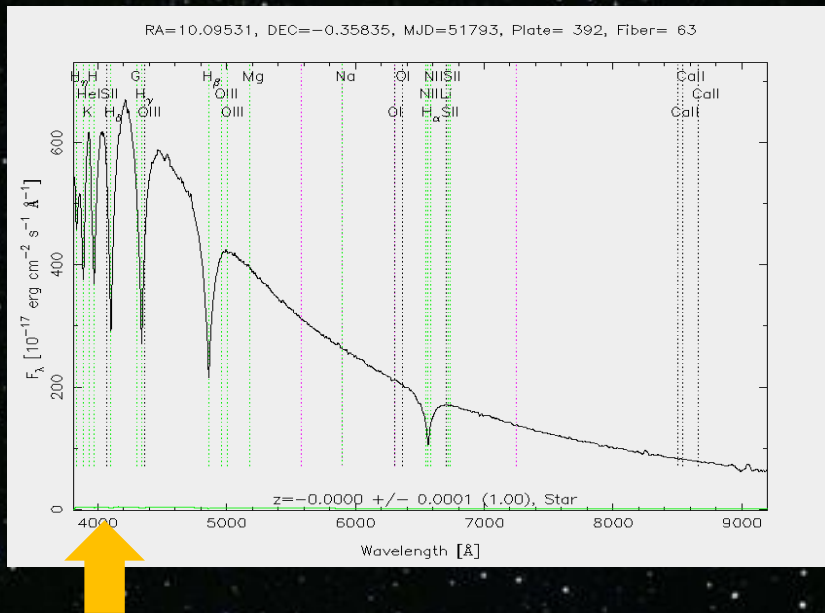


$$L = 4\pi\sigma R^2 T_{eff}^4$$

$$F(D) = \frac{L}{4\pi D^2} \rightarrow R^2 = \frac{FD^2}{\sigma T_{eff}^4}$$

É necessária uma estimativa boa da distância D

São realmente brancas as “anãs brancas”?

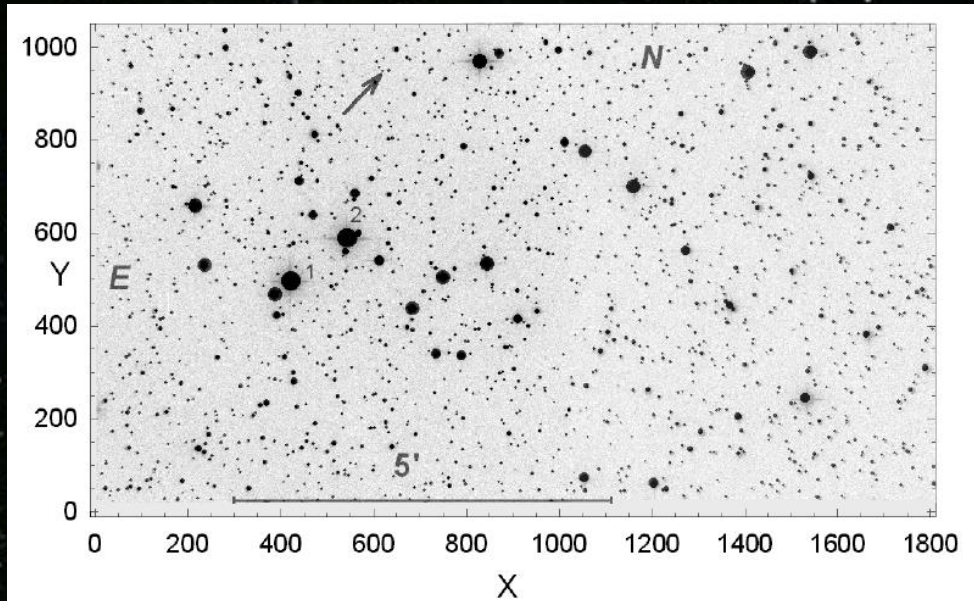


Na verdade as primeiras que ficaram conhecidas tinham temperaturas bem altas, e assim o máximo da curva de Planck estava no UV. Para o olho humano, a parte visível tinha mais ou menos a mesma intensidade e era “branco”. Hoje são conhecidas até com  $T \sim 3000 \text{ K}$



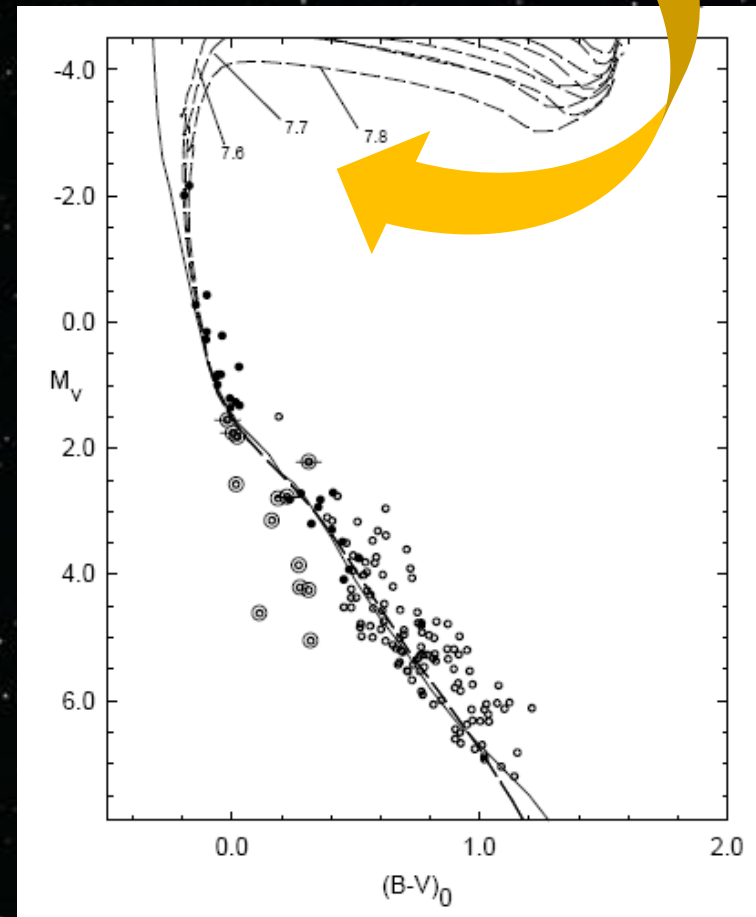


## NGC 2751 e um membro WD



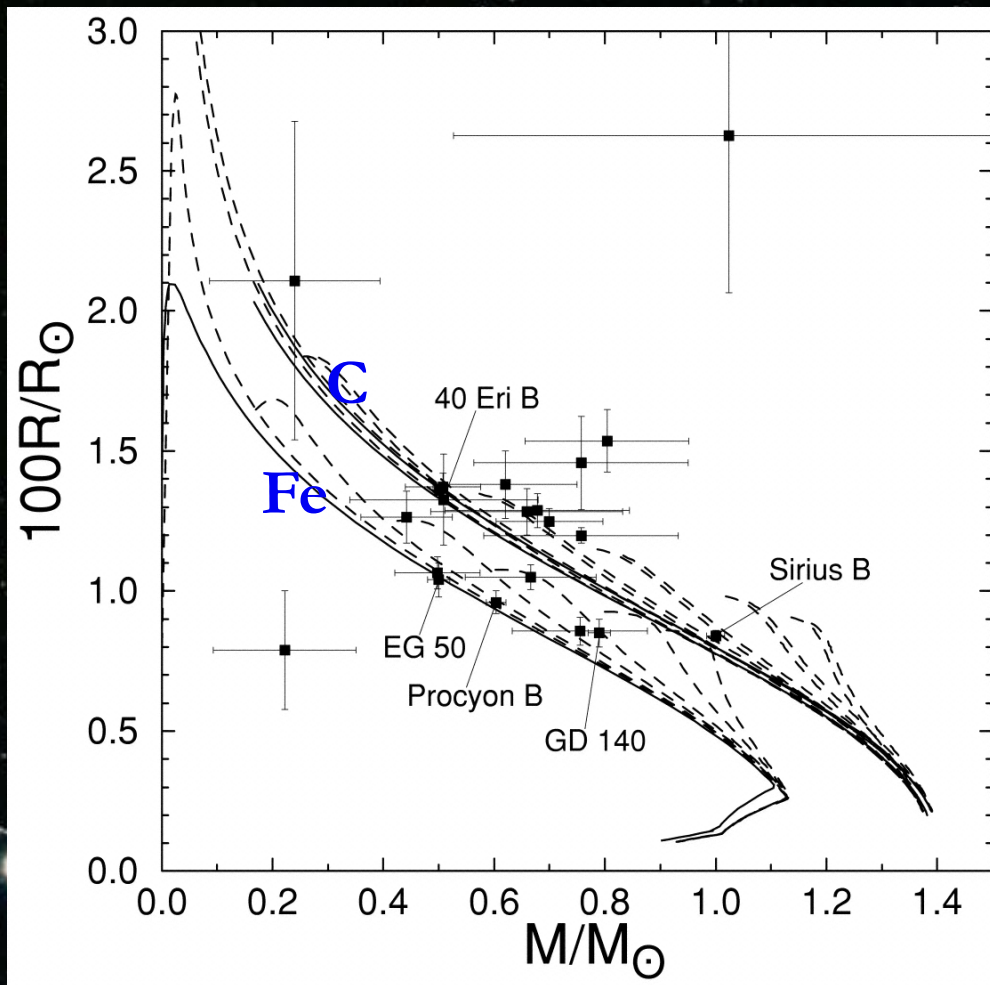
Mas as estrelas de  $7.5 M_{\text{sun}}$  ainda estão na MS !

$M_{\text{prog}} > 7.5 M_{\text{sun}} ?$



Evidência que mostra que a teoria da Evolução Estelar não está terrivelmente errada...

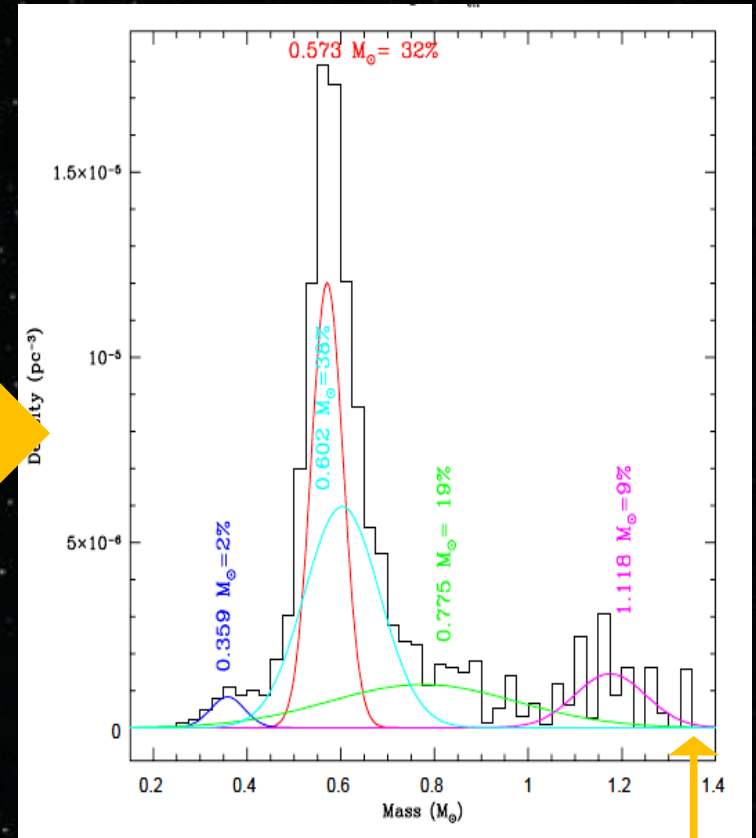
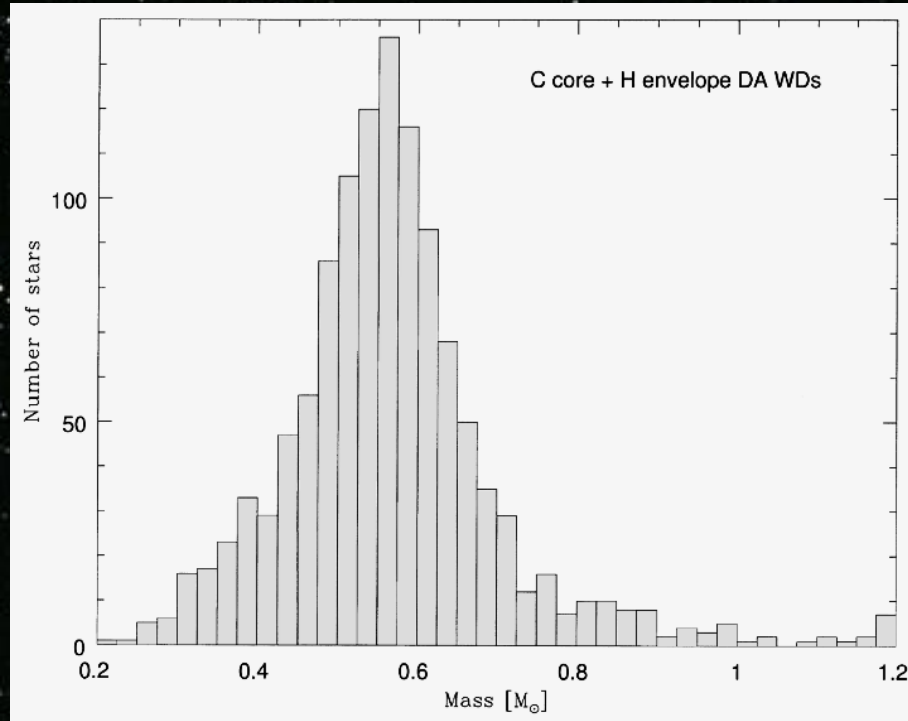
A importância de conhecer as distâncias de forma precisa...



GAIA já liberou o primeiro catálogo com  $\sim 10^9$  estrelas

Kepler et al. 2006  
A maior massa conhecida

$$\langle M \rangle \sim 1.6 M_{\text{sun}}$$



$$M \sim 1.33 M_{\text{sun}}$$





Intervalo...

# Esfriamento e cristalização de anãs brancas

*(any fool can cook a white dwarf...-Icko Iben)*

$$L(t) = - \left( \frac{dE_{th}}{dT_c} \right) \left( \frac{dT_c}{dt} \right).$$



$T_c$  é a do caroço isotérmico

$$c_V^e = \frac{3}{2} \frac{k}{AH} \frac{\pi^2}{3} Z \frac{kT}{E_F},$$

dos elétrons, muito pequeno

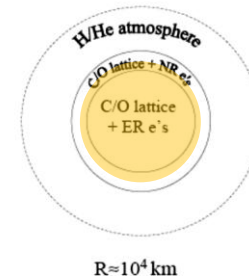
$$c_V^{ion} = \frac{3}{2} \frac{k}{AH}.$$

dos íons (clássico)



$$L \approx - \frac{3}{2} \frac{kM}{AH} \frac{\partial T_c}{\partial t},$$





$$K = K_0 \rho T^{-3,5}$$

no envelope (a matéria fica não degenerada... opacidade de Kramers)

$$\frac{dT}{dP} = \frac{3}{4ac} \frac{L_\tau}{4\pi GM_\tau} \frac{K}{T^3}$$

$$T^{7,5} dT = \frac{3}{4ac} \frac{L}{4\pi GM} \frac{K_0 \mu H}{k} P dP$$

$$P_{\text{ideal}} = \frac{k}{\mu H} \rho T = P_{\text{nr}} = \kappa \left( \frac{\rho}{\mu_e} \right)^{5/3}$$

na base do envelope a pressão do lado de “fora” E a do caroço devem ser iguais

$$\frac{\rho}{\mu_e} = \left( \frac{kT}{\mu H} \right)^{3/2} \left( \frac{\mu_e}{\kappa} \right)^{3/2}$$

$$P = \kappa^{-3/2} \left( \frac{kT \mu_e}{\mu H} \right)^{5/2}$$

$$\frac{L}{L_\odot} \approx 1,7 \times 10^{-3} \frac{M}{M_\odot} \left( \frac{4 \times 10^{23}}{K_0} \right) \frac{\mu}{\mu_e^2} \left( \frac{T_c}{10^7 \text{K}} \right)^{3,5}$$

E o tempo para esfriar em função da  $L$  observada é

$$t_{\text{esfriar}} \approx 6,3 \times 10^6 \left( \frac{A}{12} \right)^{-1} \left( \frac{K_{\odot}}{4 \times 10^{23}} \right)^{2/7} \left( \frac{\mu}{\mu_e^2} \right)^{-2/7} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{5/7} \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-5/7} \text{ anos}$$

Mestel (1952!) Van Horn

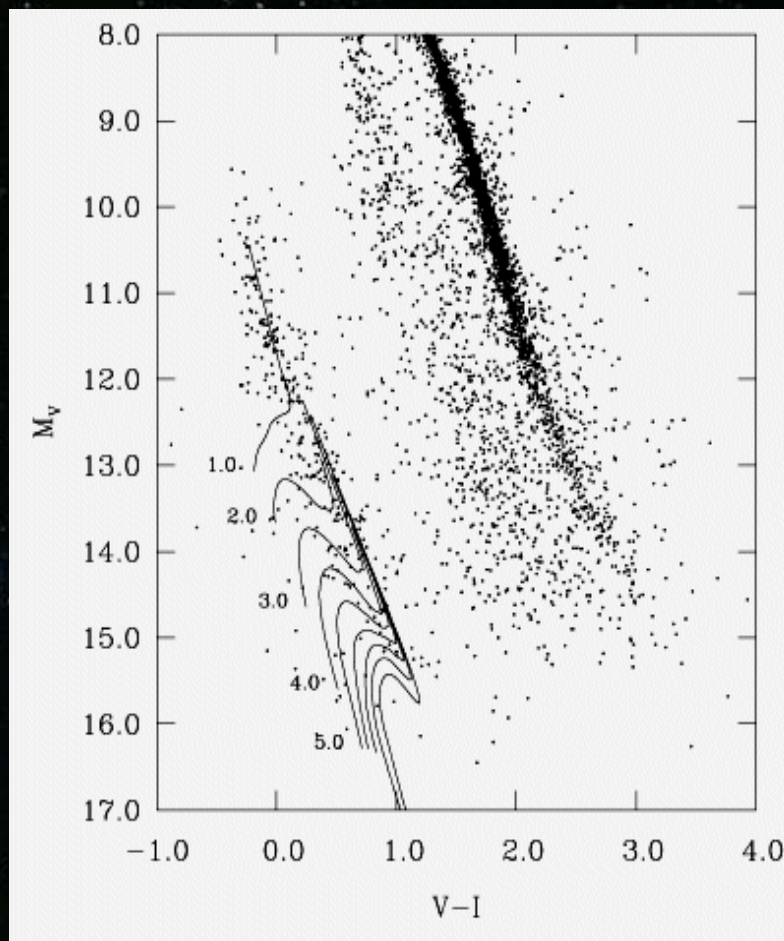
Levando em conta os neutrinos quando a  $L$  é alta, cristalização, reações pycnonucleares e contração gravitacional, esse tempo é corrigido num  $\sim 20\%$  para

$$t_{\text{esfriar}} = 8,8 \times 10^6 \left( \frac{A}{12} \right)^{-1} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{5/7} \left( \frac{\mu}{2} \right)^{-2/7} \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-5/7} \text{ anos}$$



## Sequência das anãs brancas no aglomerado M4

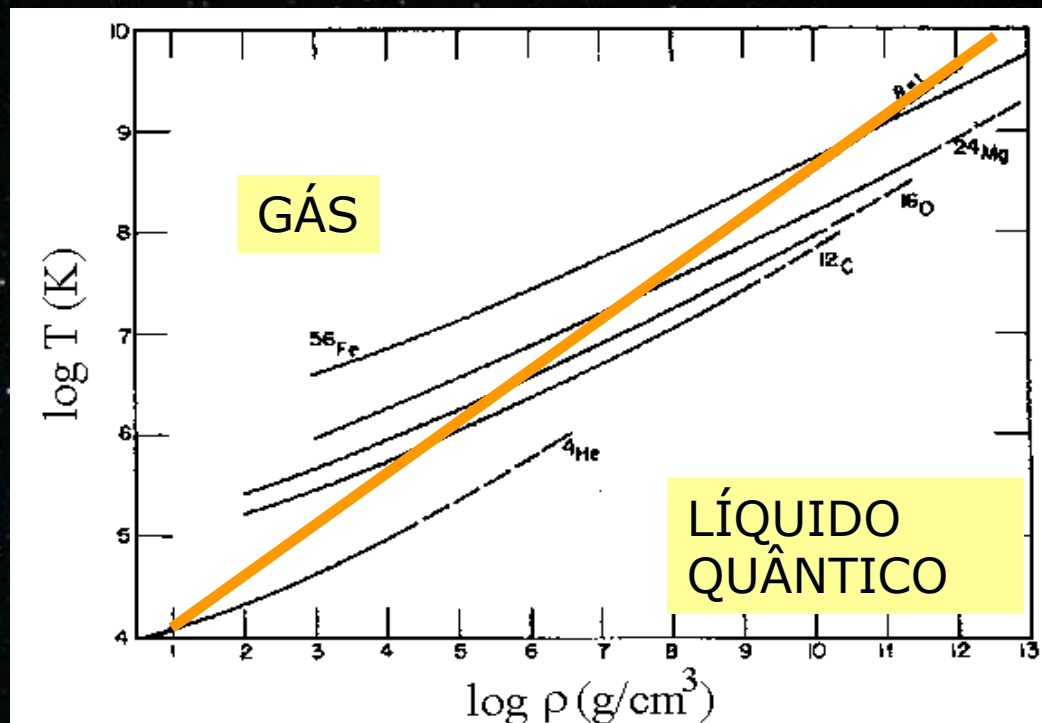
As mais fracas são  $\sim 10^{-4}$  da  $L_{\text{sol}}$ . Acredita-se que não poderiam ser muito mais fracas, já que o disco da galáxia não é velho o suficiente quanto para terem esfriado tanto assim. Note-se a variedade de cores V - I



# Cristalização das anãs brancas?

As interações de Coulomb “localizam” os íons espacialmente

$$\Gamma = \frac{(Ze)^2 / \langle r \rangle}{kT} = 2,28 \frac{Z^2}{A^{1/3}} \frac{(\rho/10^6 \text{ g cm}^{-3})^{1/3}}{T/10^7 \text{ K}}, \quad = 180$$



Quando o cristal se forma aumenta (libera calor latente !)  
ESFRIAMENTO  
MAIS LENTO

Mas **não são necessariamente** “diamantes” no céu, já que a simetria do cristal pode ser a de uma rede **triangular** nunca vista no laboratório... Se finalmente resulta que a favorecida é uma simetria cúbica, tudo bem

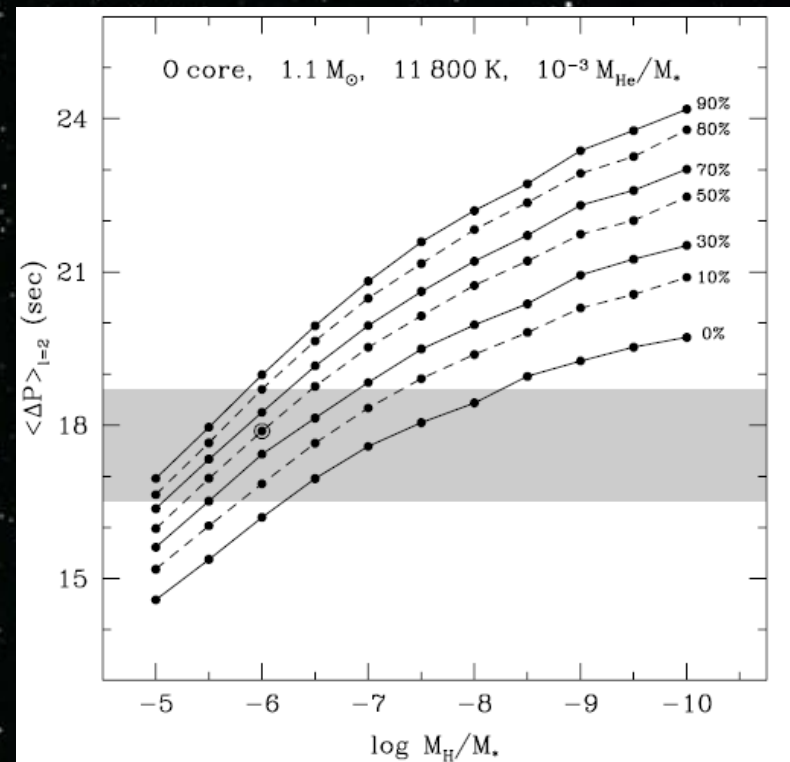


Cómo sabemos se uma anã branca está cristalizada (no centro)?

BPM 37093 apresenta frequências de oscilação com amplitudes de  $\sim 4$  mmg (!). Ao reproduzir estas (muitas) frequências o modelo que as explica precisa estar com o caroço de C ao menos 50% cristalizado (S.O. Kepler UFRGS e colaboradores)

**Table 3.** Frequencies detected from two WET campaigns.

XCOV	Frequency ( $\mu\text{Hz}$ )	Period (s)	$\langle$ Amplitude) (mma)	Identification		
				$k$	$\ell$	$m$
17	1513.2	660.8	0.475			
[ 17	1569.5	637.2	0.650			
16	1570.6	636.7	1.741	34	2	-1
[ 17	1578.5	633.5	1.310	34	2	+1
16	1579.2	633.2	1.081			
16	1629.9	613.5	1.131	18	1	0
16	1664.9	600.7	0.875	32	2	0
16	1718.2	582.0	1.032	31	2	0
[ 17	1767.1	565.9	0.458			
16	1768.5	565.5	1.174	30	2	-1
16	1777.6	562.6	0.879	30	2	+1
[ 17	1820.8	549.2	0.801			
16	1823.5	548.4	1.149	29	2	0
17	1882.9	531.1	1.156	28	2	0
17	1954.1	511.7	0.679	27	2	0





Na próxima aula, as estrelas de nêutrons