

V Escola José Plínio Baptista

Pulsações estelares:

Estrelas anãs brancas pulsantes

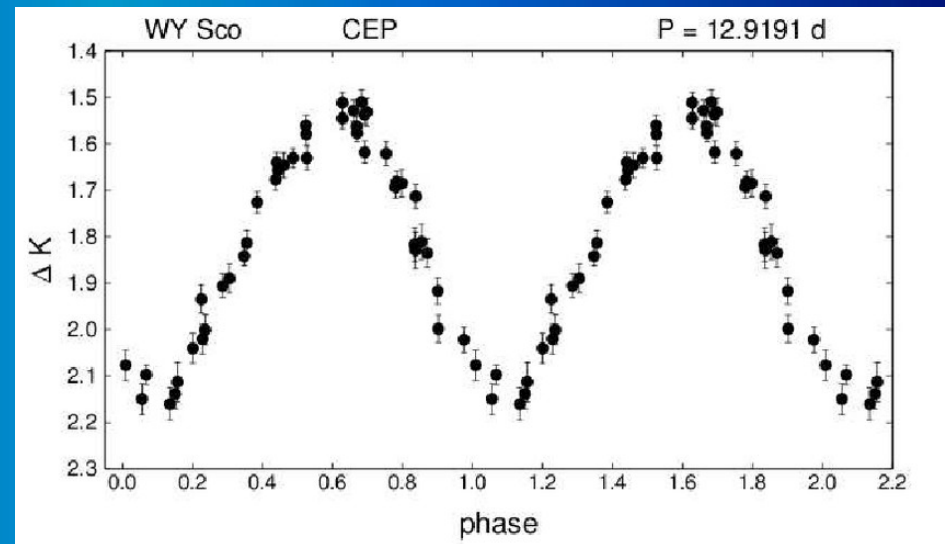
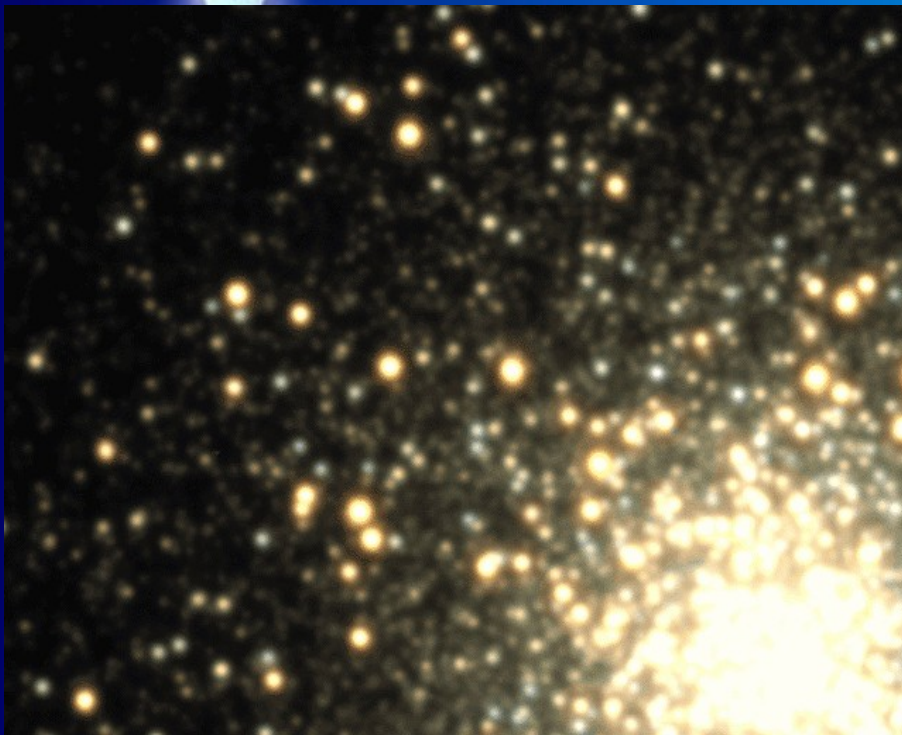
Alejandra Daniela Romero



Estrelas pulsantes

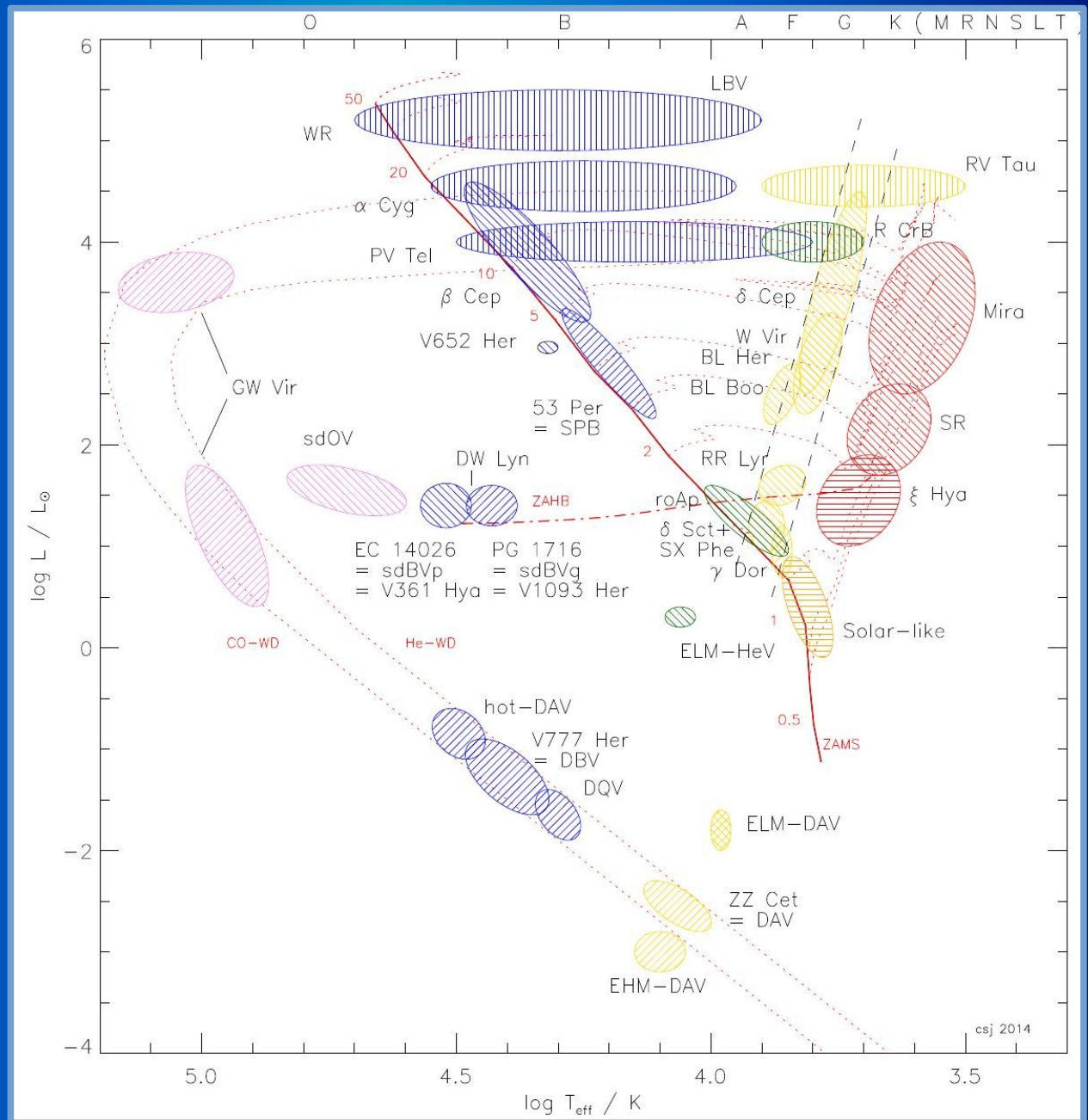
Estrelas que apresentam variabilidade periódica no seu brilho.

Podem apresentar um período (Cefeidas) ou ser multiperíódicas (anãs brancas).

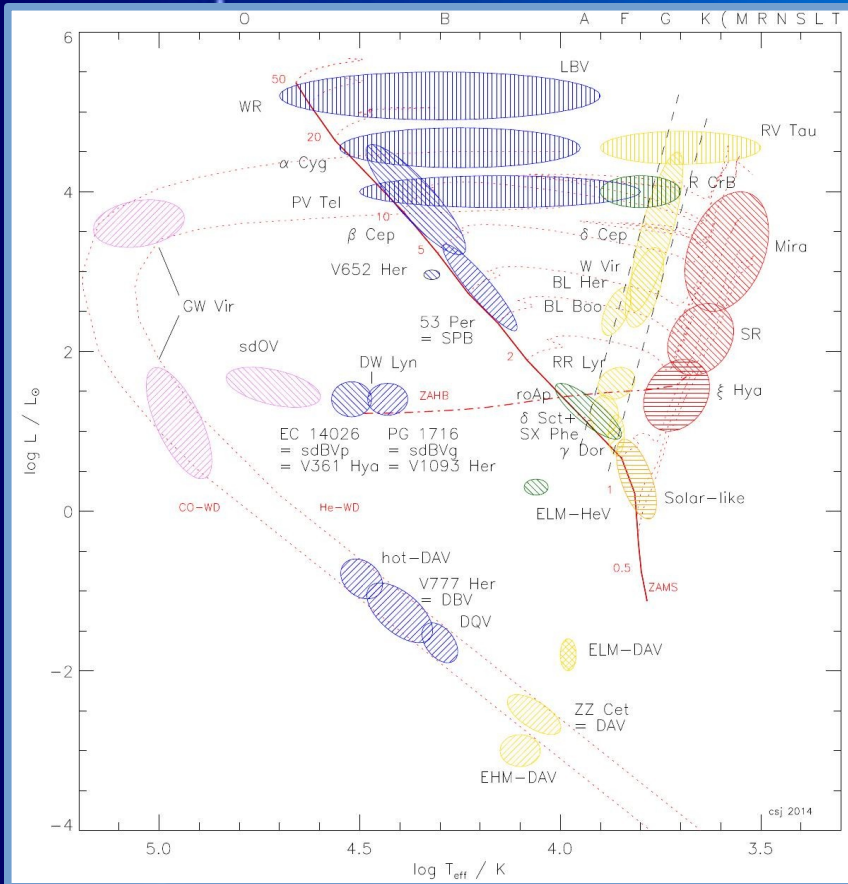


Estrelas pulsantes

Jeffery & Saio (2016)



Estrelas pulsantes



Podemos dividir os tipos de modos de pulsação em 3 categorias:

Modos radiais:

- Similares as ondas de som;
- Deslocamento só na direção radial, mantem a simetria esférica;
- Cefeidas, Mira, RR Lira

Modos não-radiais de pressão:

- Similares a ondas de som.
- Deslocamento principal na direção radial.
- Sol, δ Scuti

Modos não-radiais de gravidade:

- Similares as ondas na superfície da água (ondas de gravidade);
- Deslocamento principal na direção transversal;
- γ Doradus, sdB/sdO, anãs brancas.

Teoria de pulsações estelares

Equações de fluídos: Conservação de massa, momento linear e de energia.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{u} &= \rho \vec{f} - \nabla P - \rho \nabla \Phi + \nabla \Theta \\ \rho T \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) S &= \rho (\epsilon_N + \epsilon_V) - \nabla \cdot \vec{F}_R\end{aligned}$$

Equação de Poisson para o potencial gravitacional

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Pequenas perturbações do estado de equilíbrio: as quantidades físicas se escrevem como o valor de equilíbrio mais uma pequena perturbação:

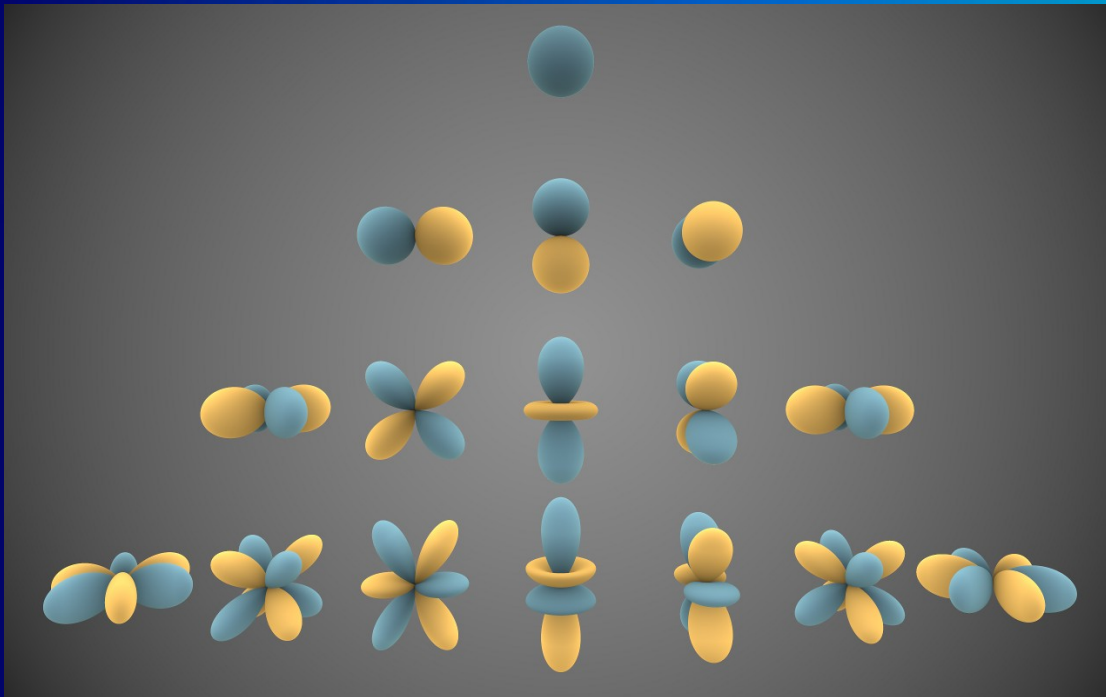
$$f'_{k,\ell,m}(r, \theta, \phi, t) = f'_{k,\ell,m}(r) Y_\ell^m(\theta, \phi) \exp(i\sigma_{k,\ell,m} t)$$

Teoria de pulsações estelares

$$f'_{k,\ell,m}(r, \theta, \phi, t) = f'_{k,\ell,m}(r) Y_{\ell}^m(\theta, \phi) \exp(i\sigma_{k,\ell,m} t)$$

Esféricos harmônicos

$$Y_{\ell m}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2\ell + 1}{4\pi} \frac{(\ell - m)!}{(\ell + m)!}} P_{\ell}^m(\cos \theta) e^{im\varphi},$$



Descrição dos níveis atômicos




$$\begin{aligned} \ell &= 10 \\ m &= 5 \end{aligned}$$

Teoria de pulsações estelares

$$f'_{k,\ell,m}(r, \theta, \phi, t) = f'_{k,\ell,m}(r) Y_{\ell}^m(\theta, \phi) \exp(i\sigma_{k,\ell,m} t)$$

Sustituindo a dependência com os ângulos e o tempo, o sistema de equações diferenciais em derivadas parciais se transforma em um sistema de equações lineares na coordenada radial.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \xi_r)}{dr} - \frac{g}{c_S^2} \xi_r + \left(1 - \frac{L_{\ell}^2}{\sigma^2}\right) \frac{P'}{\rho c_S^2} &= \frac{\ell(\ell+1)}{\sigma^2 r^2} \Phi' \\ \frac{1}{\rho} \frac{dP'}{dr} + \frac{g}{\rho c_S^2} P' + (N^2 - \sigma^2) \xi_r &= -\frac{d\Phi'}{dr} \\ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi'}{dr} \right) - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} \Phi' &= 4\pi G \rho \left(\frac{P'}{\rho c_S^2} + \frac{N^2}{g} \xi_r \right) \end{aligned}$$

Problema de autovalores (frequências de oscilação) e autovetores (funções de onda).

Teoria de pulsações estelares

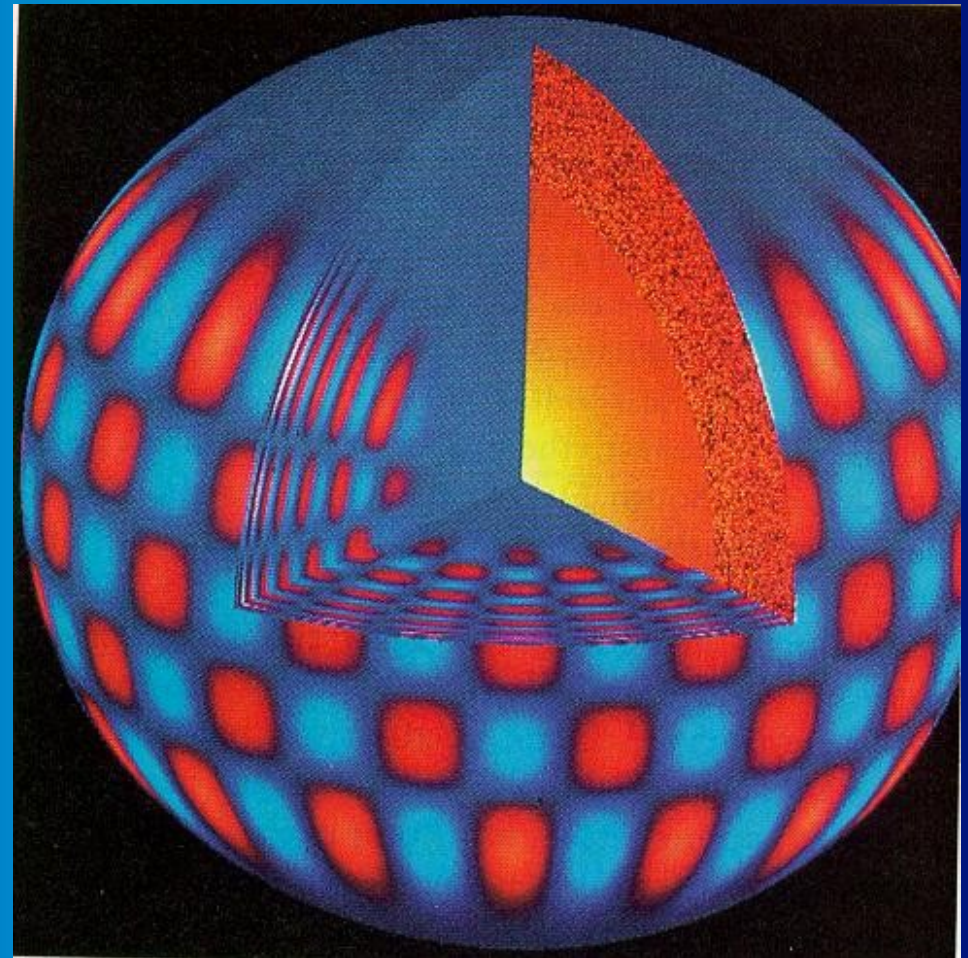
$$f'_{k,\ell,m}(r, \theta, \phi, t) = f'_{k,\ell,m}(r) Y_{\ell}^m(\theta, \phi) \exp(i\sigma_{k,\ell,m}t)$$

Cada frequência do sistema está caracterizada por três números:

ℓ = grau harmônico (número de linhas nodais na superfície)

m = ordem azimuthal

k = ordem radial (número de nodos na direção radial)



Teoria de pulsações estelares

$$f'_{k,\ell,m}(r, \theta, \phi, t) = f'_{k,\ell,m}(r) Y_\ell^m(\theta, \phi) \exp(i\sigma_{k,\ell,m} t)$$

Frequências características

$$L_\ell^2 = \frac{(\ell + 1)\ell}{r^2} c_S^2$$

Frequência de Lamb: proporcional à velocidade do som, relacionada com modos de pressão e radiais.

$$N^2 = g \left(\frac{1}{\Gamma_1} \frac{d \ln p}{dr} - \frac{d \ln \rho}{dr} \right)$$

Frequência de Brunt- Väisälä: frequência de oscilação de uma bolha convectiva, relacionada com modos de gravidade.

Relação de dispersão

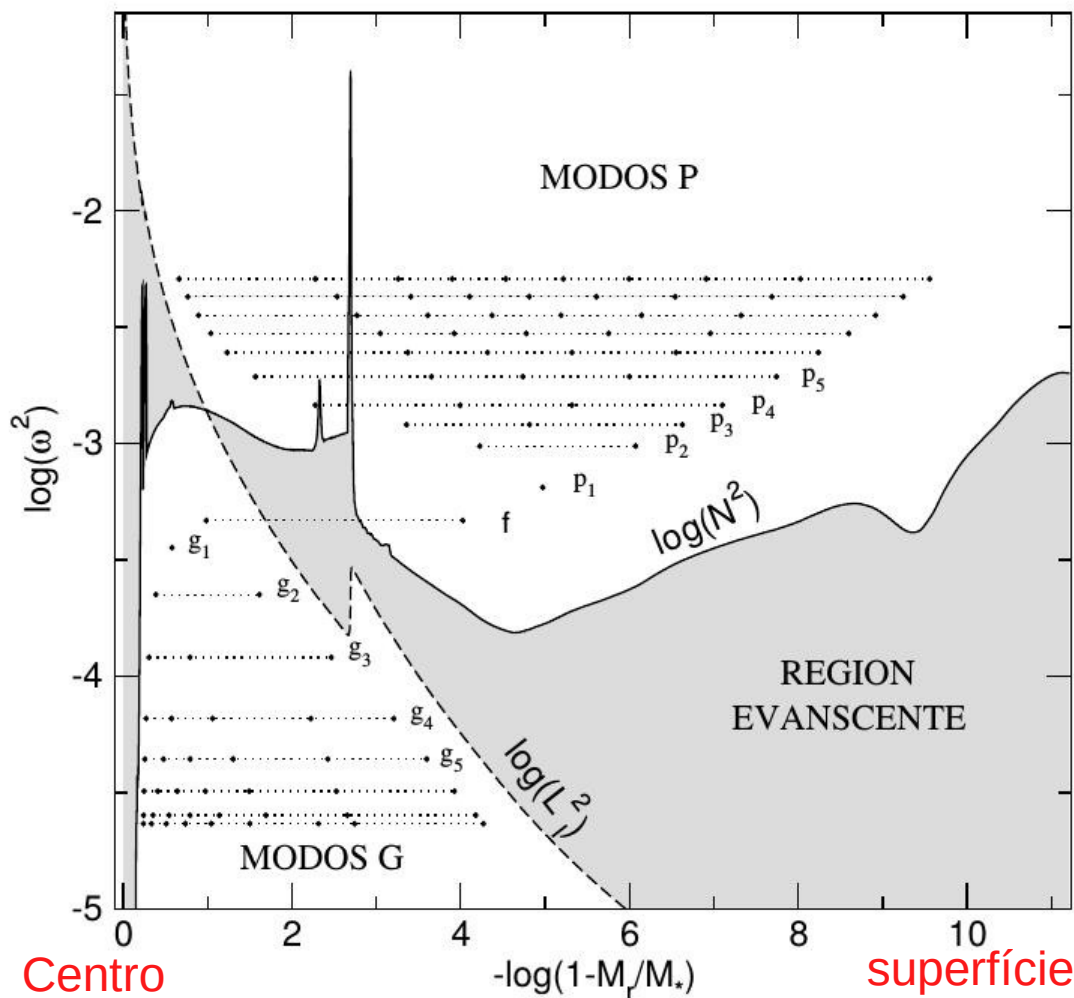


$$k_r^2 = \frac{1}{\sigma^2 c_S^2} (\sigma^2 - L_l^2) (\sigma^2 - N^2)$$

Teoria de pulsações estelares

k_r^2 deve ser positivo para ter uma solução que se propague:

$$\sigma^2 > L^2, N^2 \text{ ou } \sigma^2 < L^2, N^2$$



Temos regiões de propagação e de evanescência dentro da estrela.

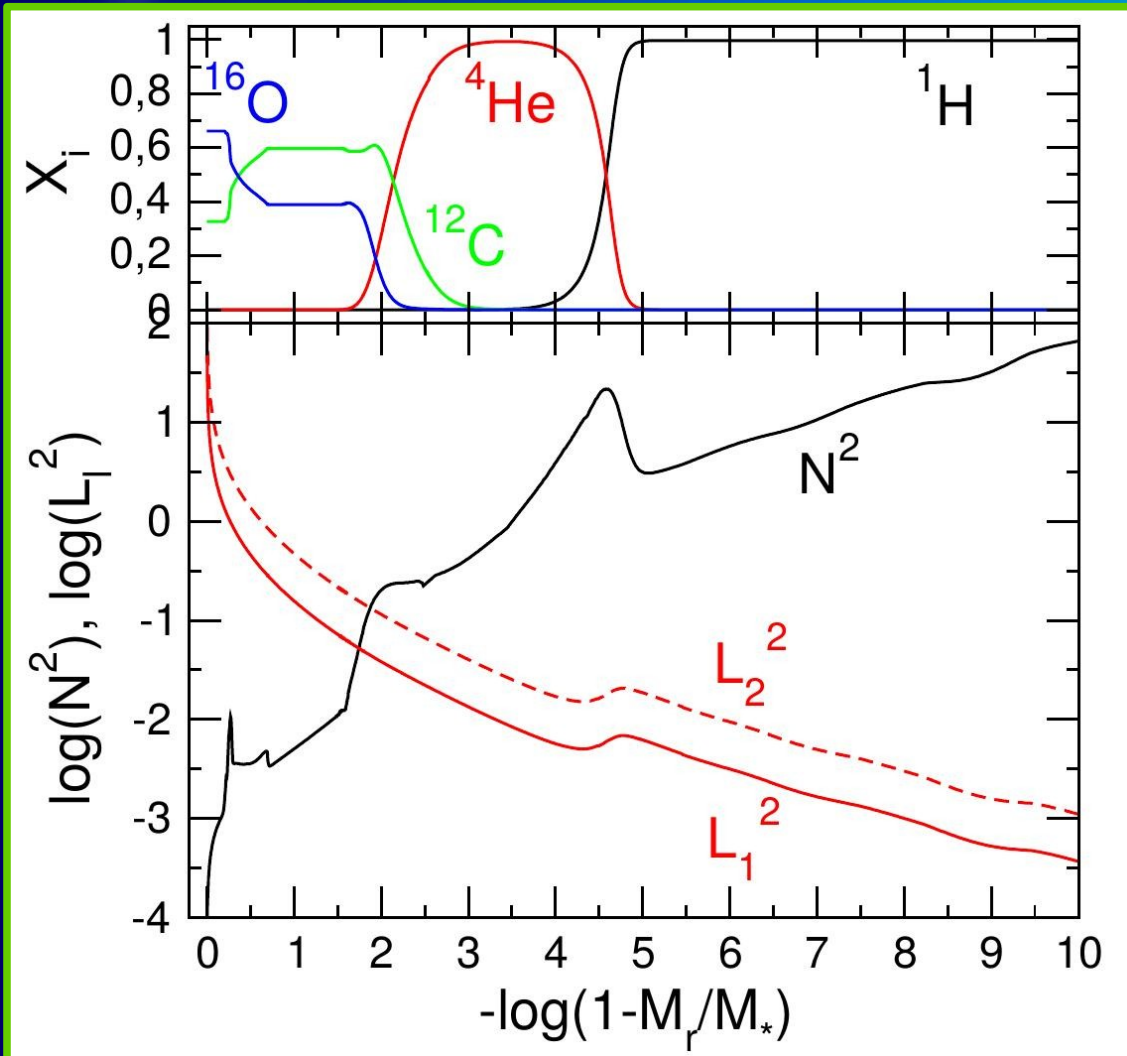
Teoria de pulsações estelares

k_r^2 deve ser positivo para ter uma solução que se propague:

$$\sigma^2 > L_l^2, N^2 \text{ ou } \sigma^2 < L_l^2, N^2$$

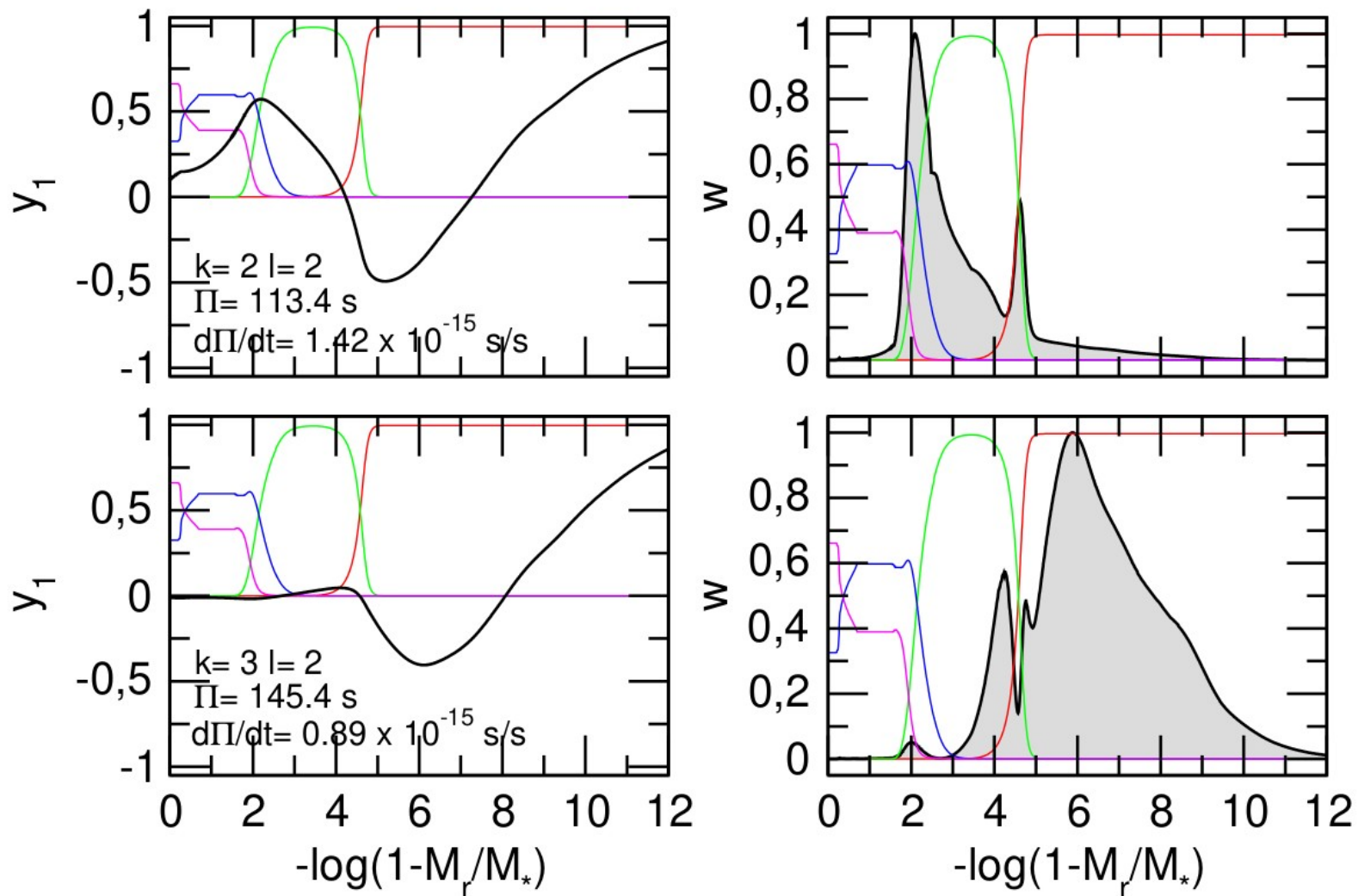
$$k_r^2 = \frac{1}{\sigma^2 c_s^2} (\sigma^2 - L_l^2) (\sigma^2 - N^2)$$

A frequência N^2 é muito sensível às transições químicas.

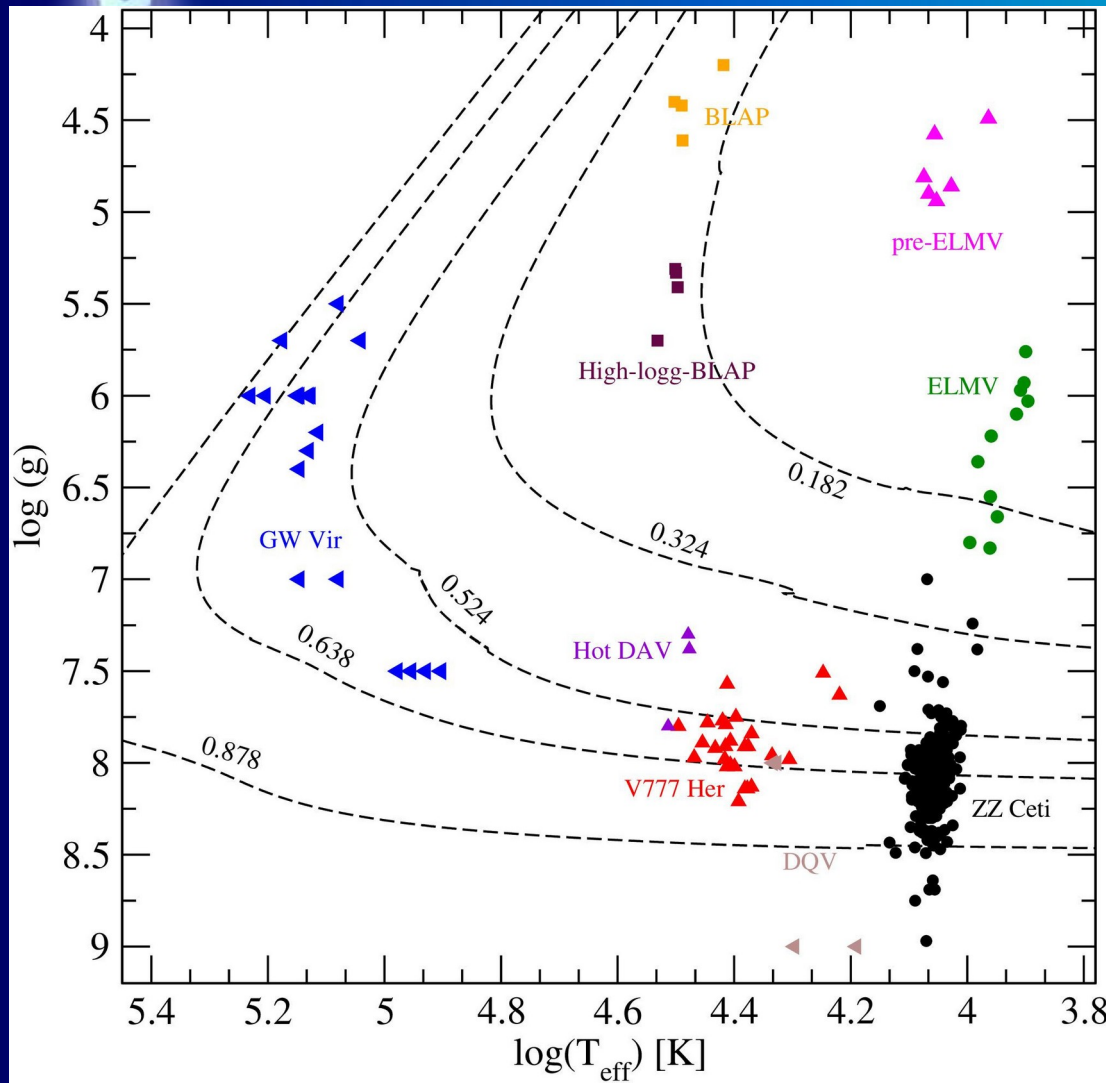


Teoria de pulsações estelares

k_r^2 deve ser positivo para ter uma solução que se propague:



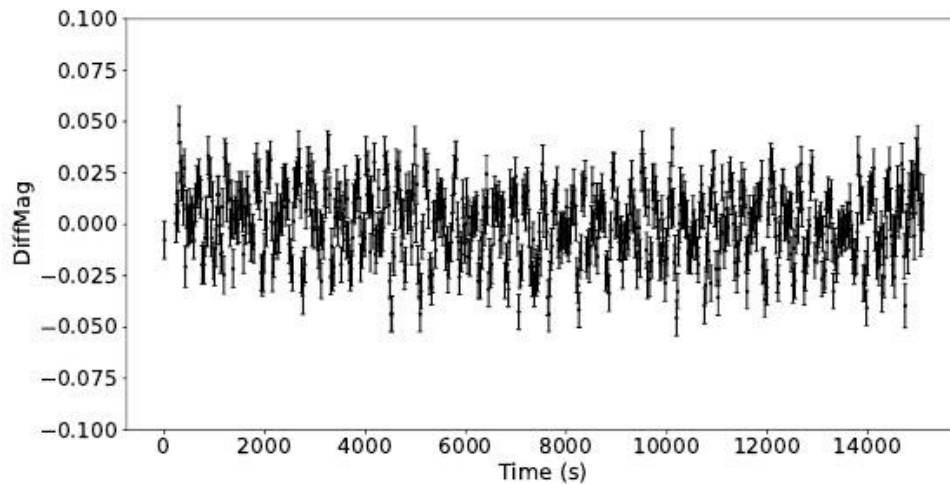
Anãs brancas pulsantes



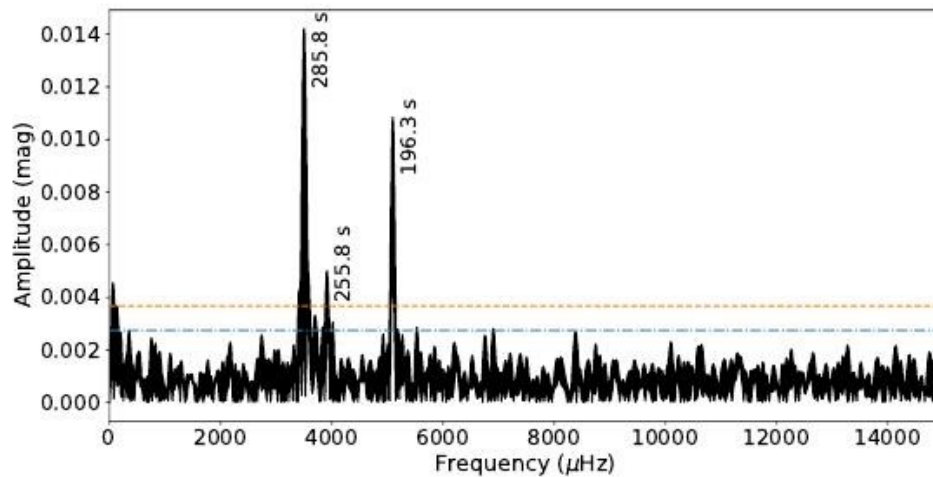
- PNNV: 400 – 6000 s , 110 000 – 170 000 K
- GW Vir (DO): 300 – 2600 s, 80 000 – 160 000 K
- V777 Her (DB): 120 - 1100 s, 22400 – 28400 K
- ZZ Ceti (DA): ~70- 1200 s, 10400 – 12800 K

Anãs brancas pulsantes

J0828+0949, ZZ Ceti



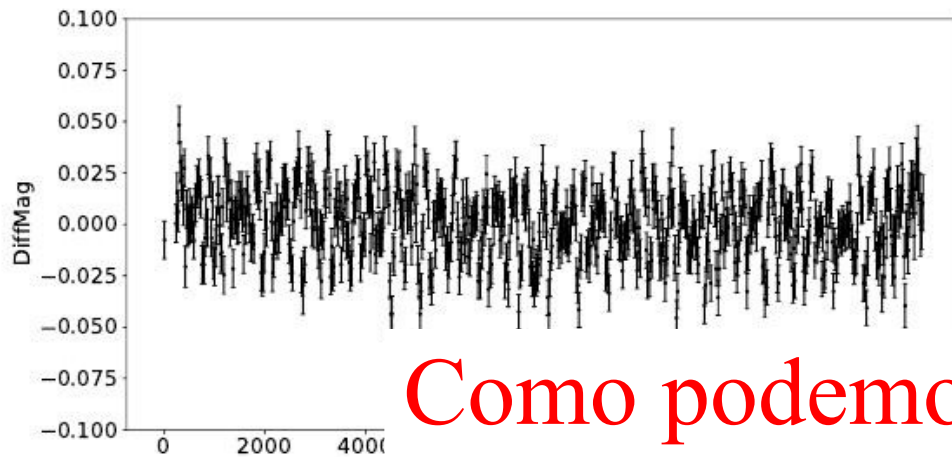
Curva de luz



Transformada de Fourier

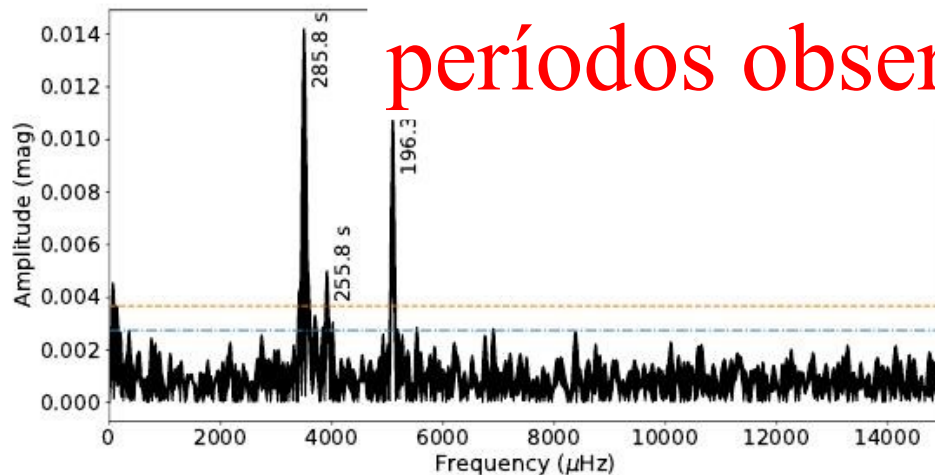
Anãs brancas pulsantes

J0828+0949, ZZ Ceti



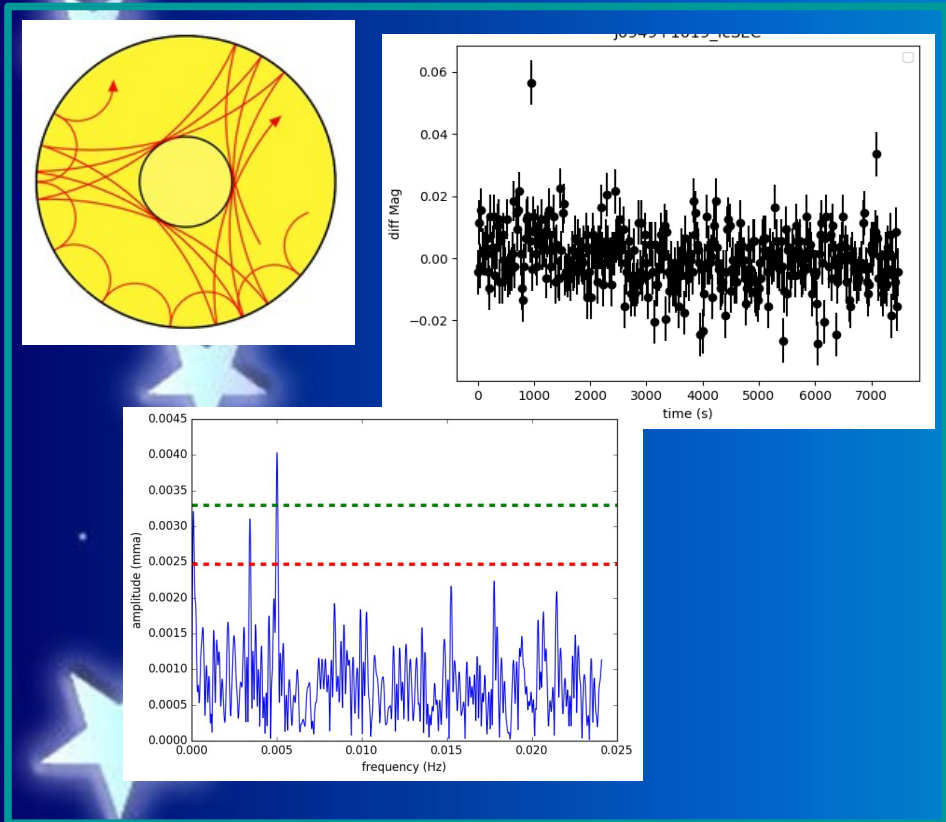
← Curva de luz

Como podemos estudar as
anãs brancas usando os
períodos observados?



← Transformada
de Fourier

Astrossismologia

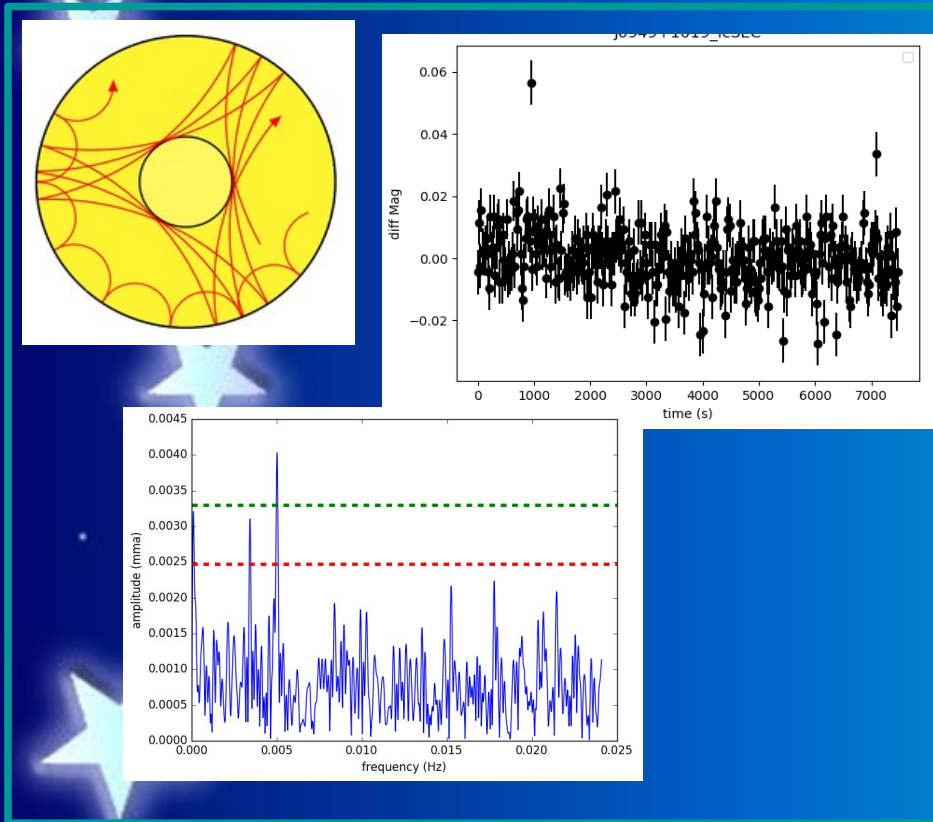


+



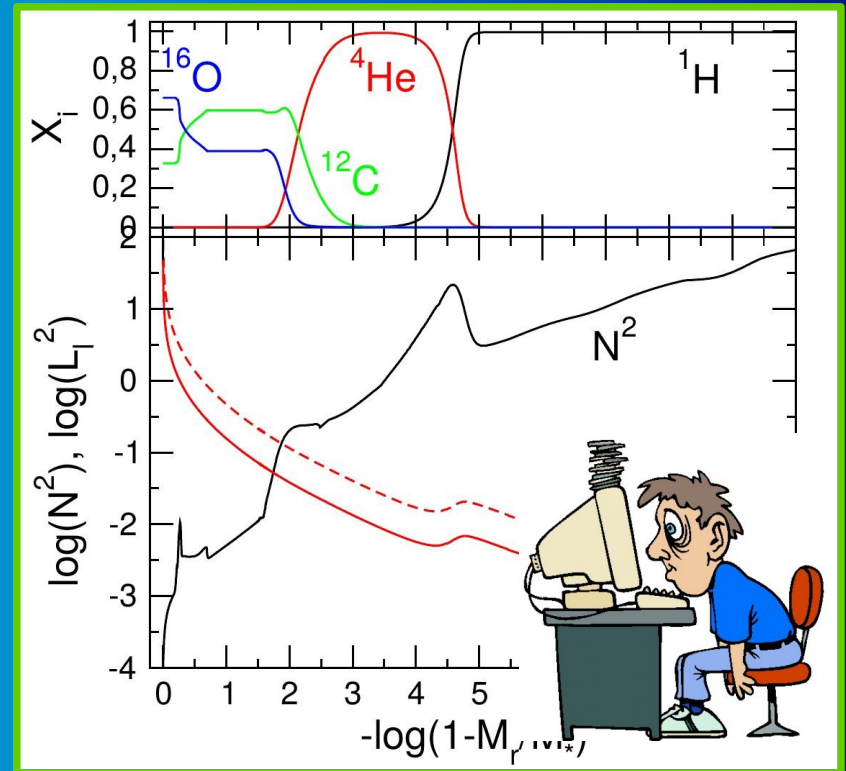
Períodos observados

Astrossismologia



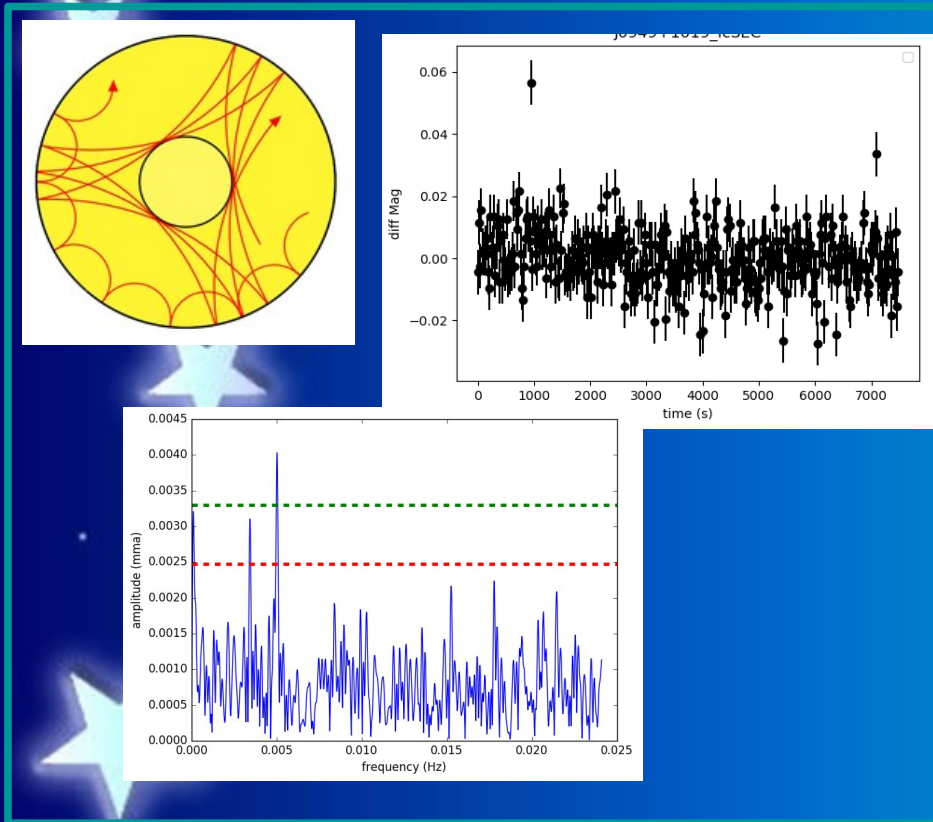
Períodos observados

+

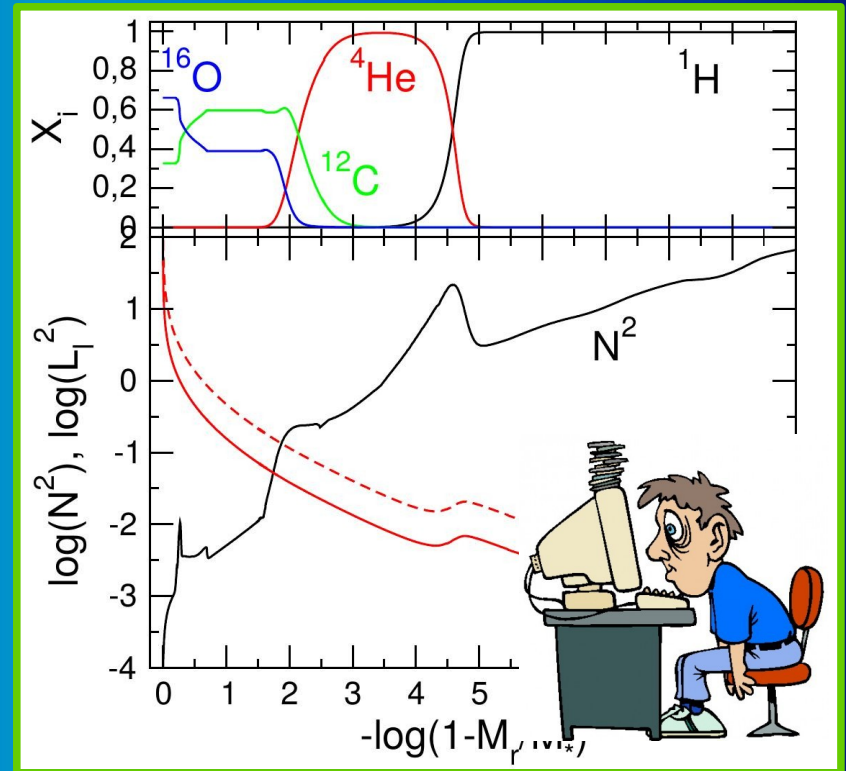


Períodos de pulsação
obtidos a partir de modelos
representativos

Astrossismologia



+



Períodos observados

Períodos de pulsação
obtidos a partir de modelos
representativos

Modelo de
melhor ajuste



Astrossismologia: G117-B15A

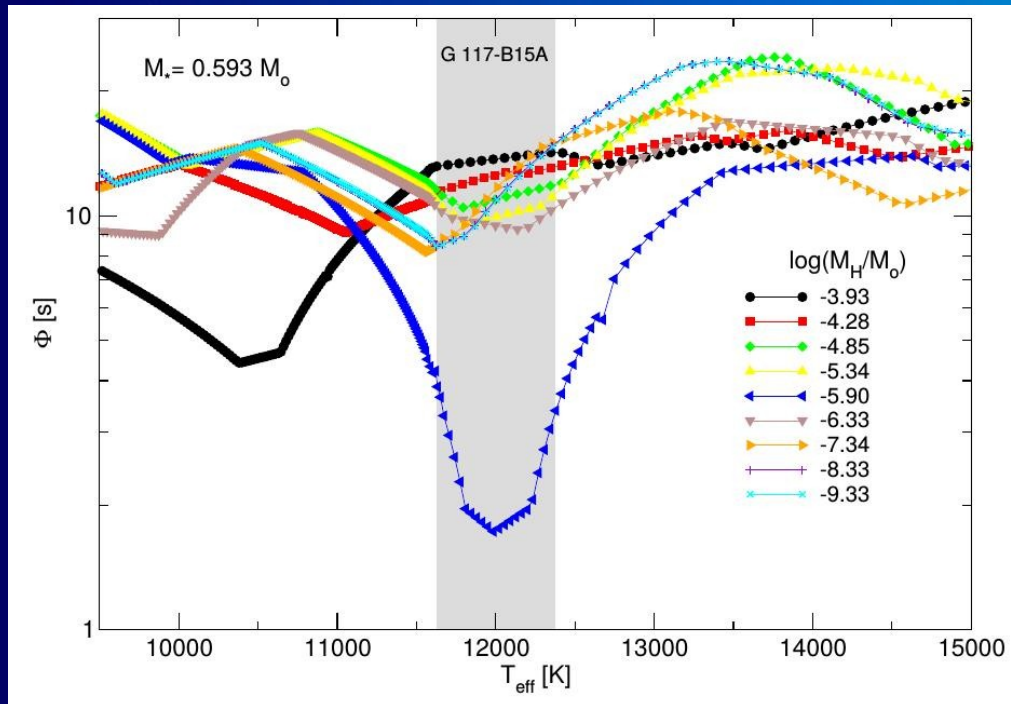

$$\chi^2 = \chi^2(M_*, M_H, T_{\text{eff}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min |\Pi_k^{\text{Teo}} - \Pi_i^{\text{Obs}}|^2$$

Função de qualidade

Astrossismologia: G117-B15A

$$\chi^2 = \chi^2(M_*, M_H, T_{\text{eff}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min |\Pi_k^{\text{Teo}} - \Pi_i^{\text{Obs}}|^2$$

Função de qualidade



Períodos observados: 215.20 /
270.46 / 304.05

Períodos teóricos: 215.215 /
273.437 / 301.854

Parâmetros do modelo:

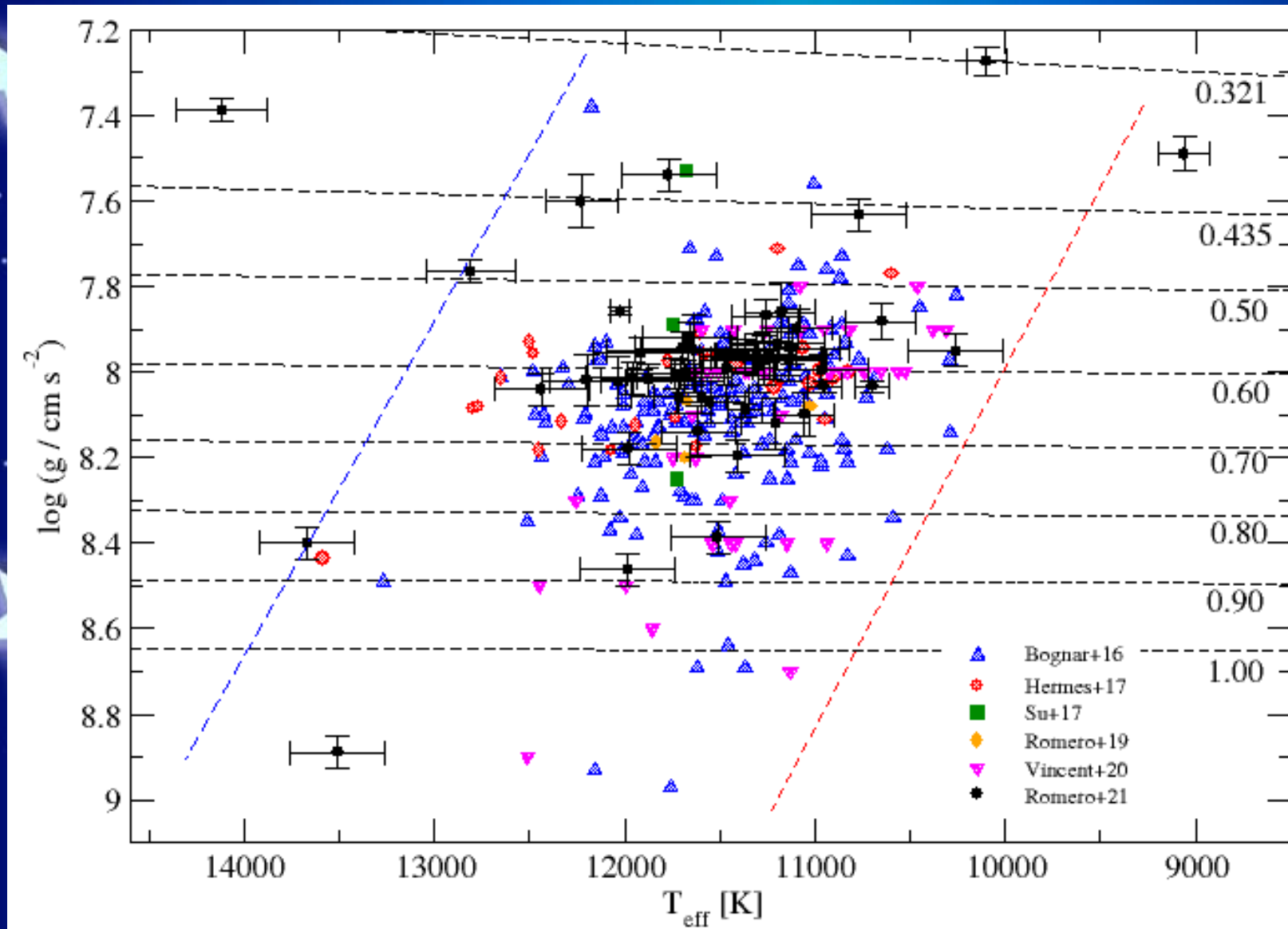
- $M = 0.593 M_{\text{sol}}$
- $T_{\text{eff}} = 11986 \text{ K}$
- $M_H = 7.47 \cdot 10^{-6} M_{\text{sol}}$

https://www.youtube.com/watch?time_continue=52&v=mZnGfBtQdDk

<https://www.youtube.com/watch?v=98G-jwiAGvc&fbclid=IwAR14FjMd2gEvfSlwa05q4NaFgn0ONRfima9wHRfhtD3TVuMnB4eUDIZeTo>

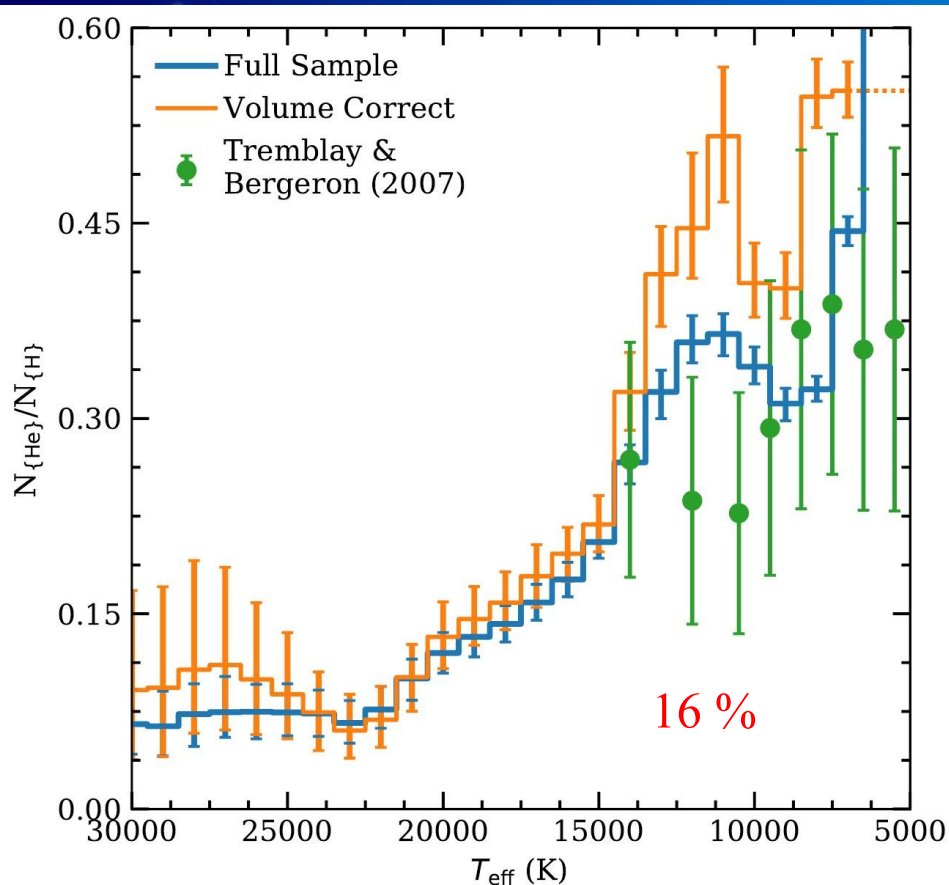
Ver video

Estrelas ZZ Ceti

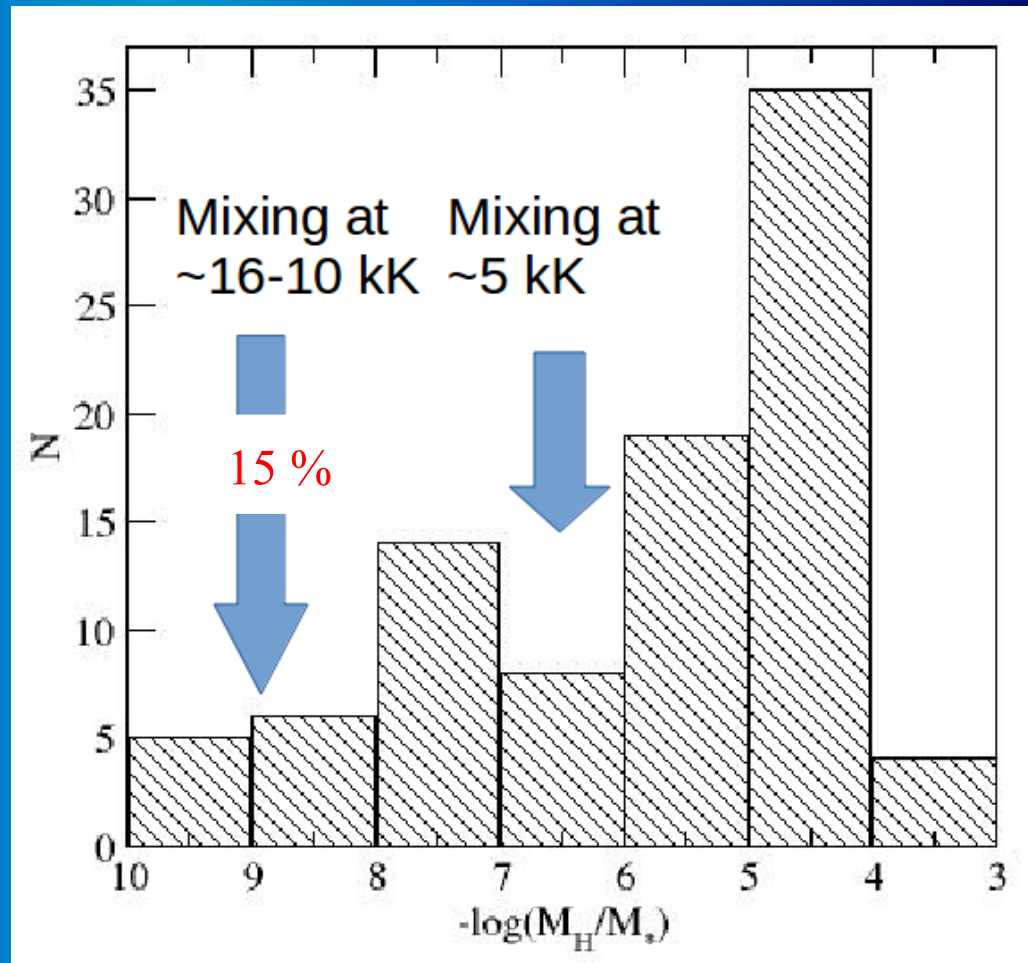


Estrelas ZZ Ceti

Romero et al. (2019)



Ourique et al. (2019)





Obrigada!!!