

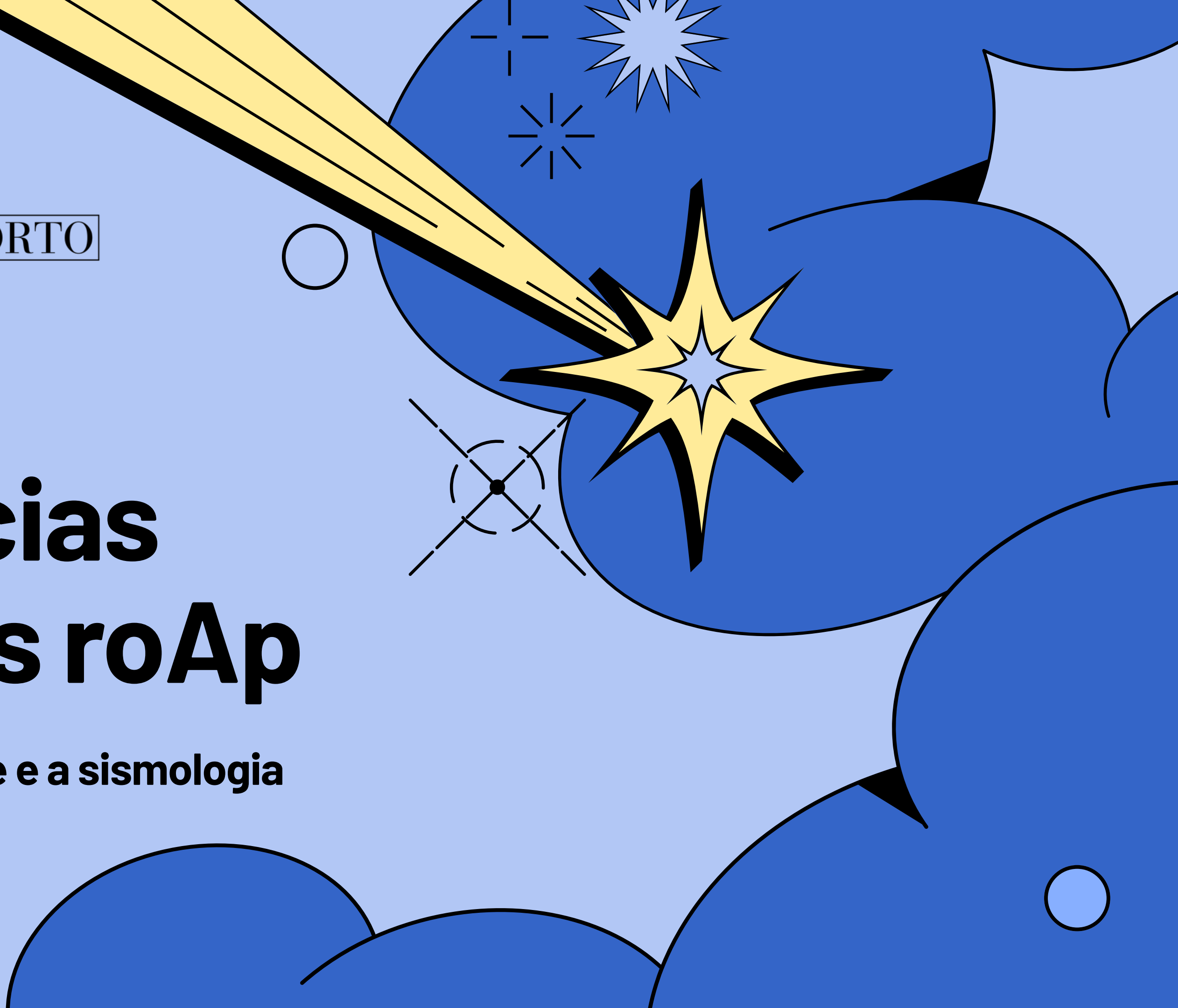


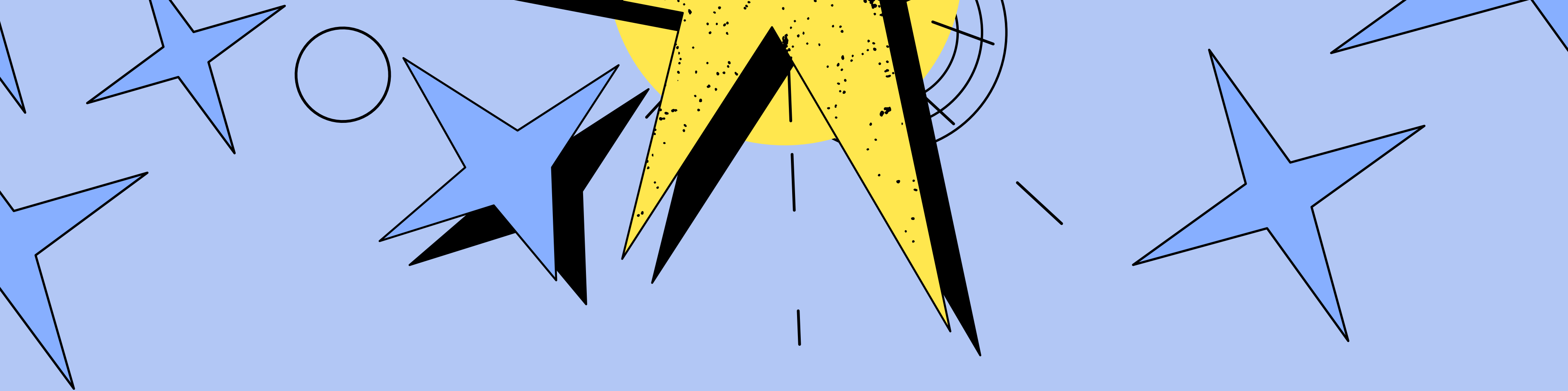
As Intermitências das Estrelas roAp

O magnetismo, a variabilidade e a sismologia

Inês Martins Rolo

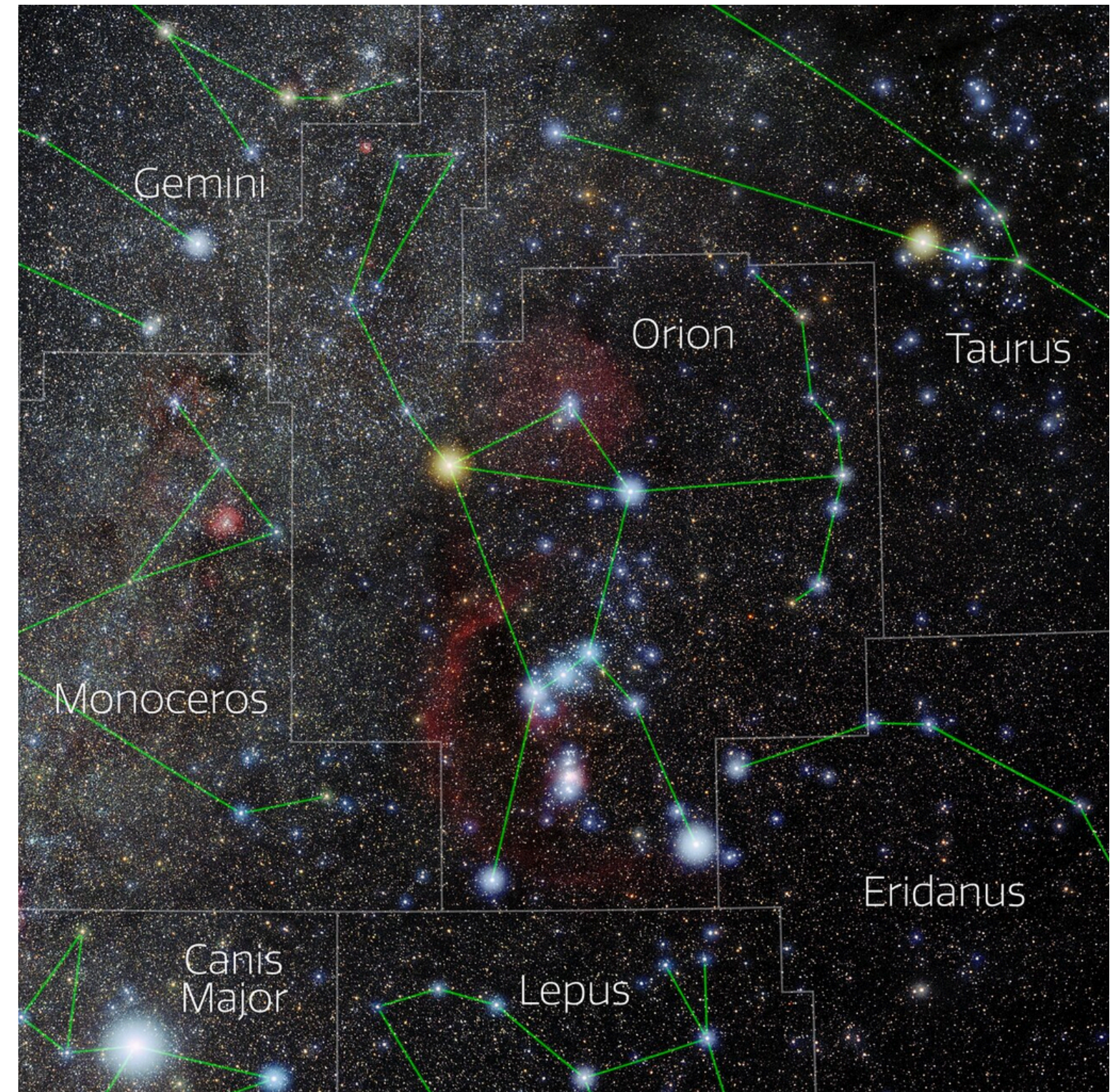
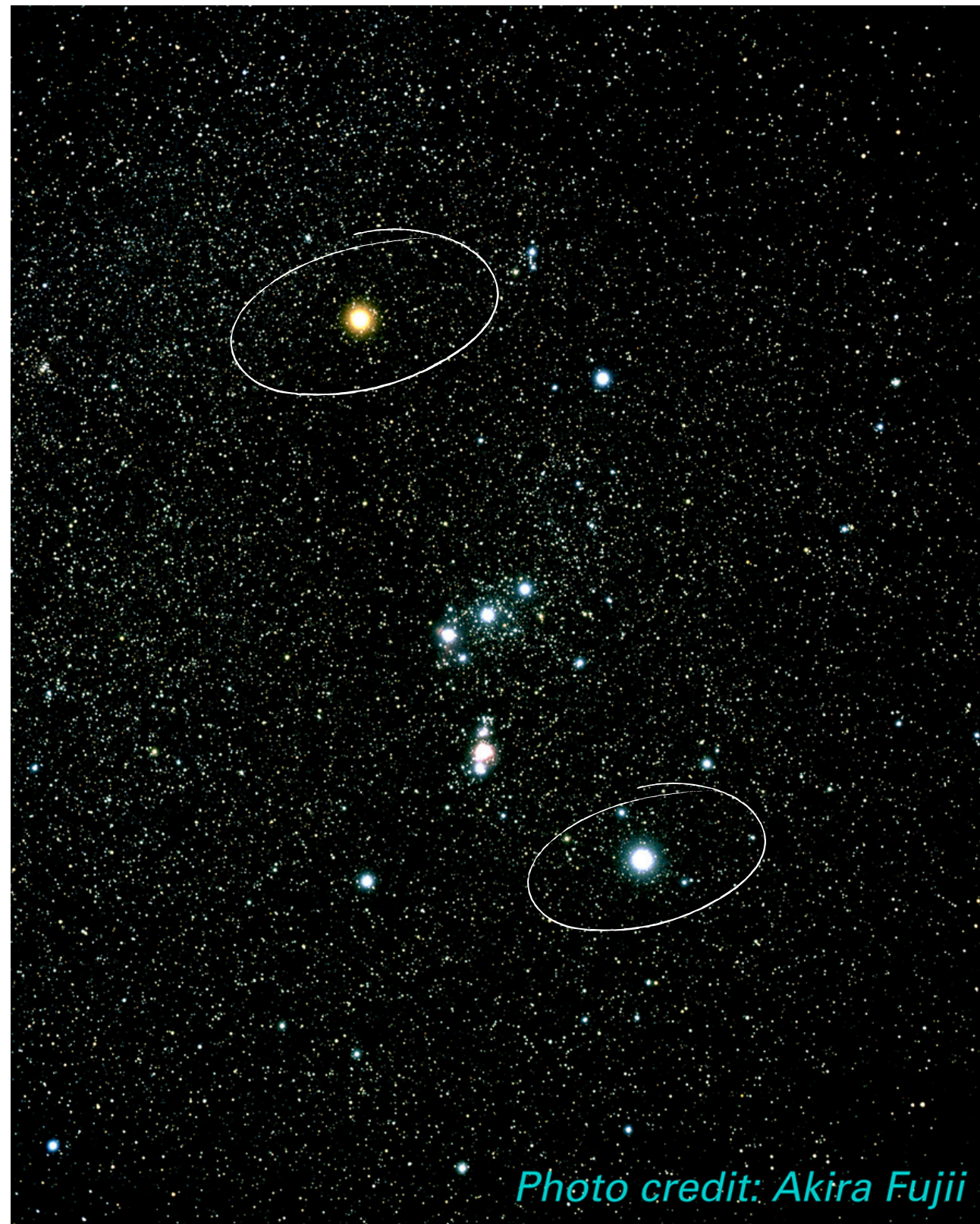
Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço,
DFA, FCUP



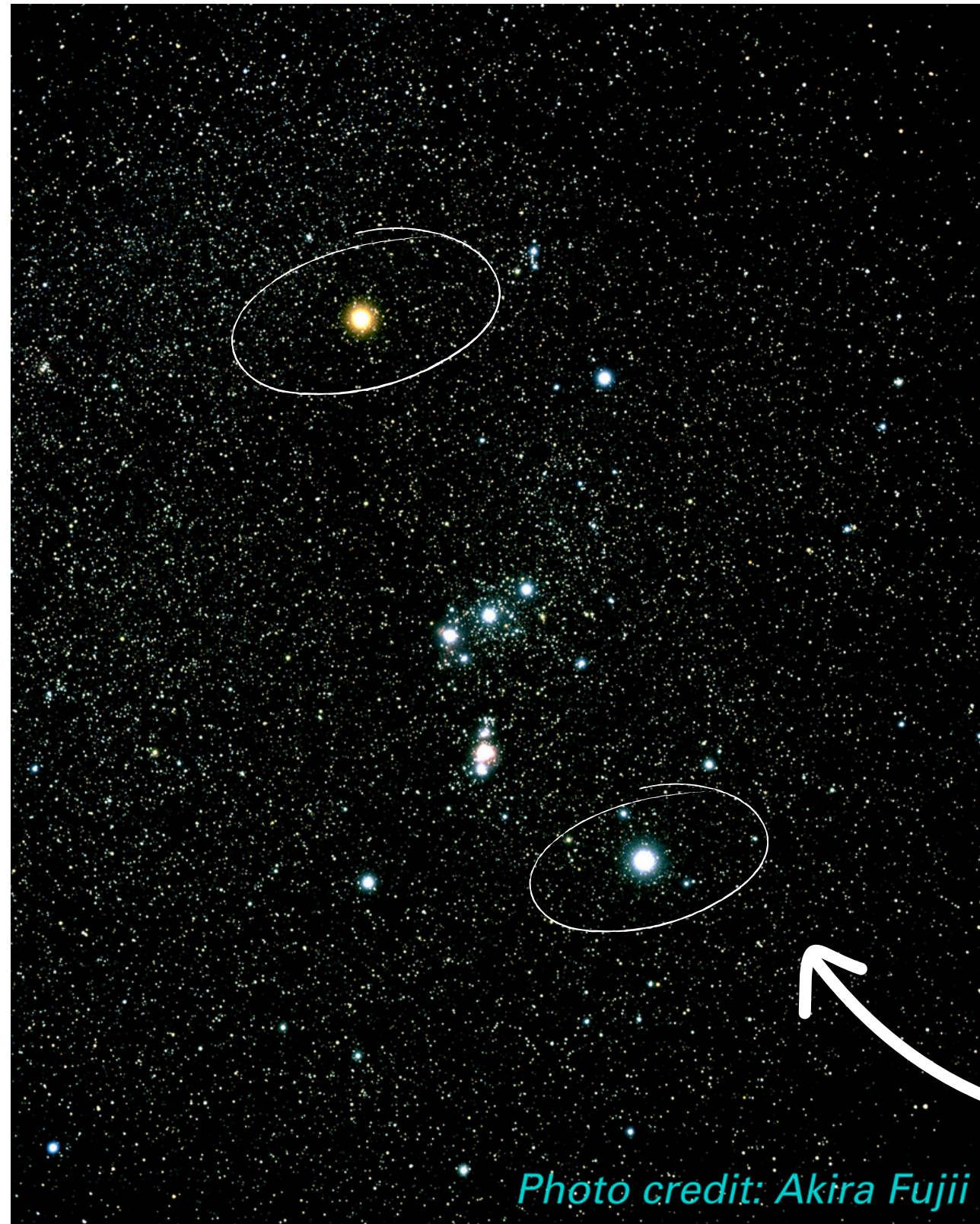


Parte I - Introdução

COMECEMOS POR OLHAR PARA AS ESTRELAS



COMECEMOS POR OLHAR PARA AS ESTRELAS



Cores diferentes!

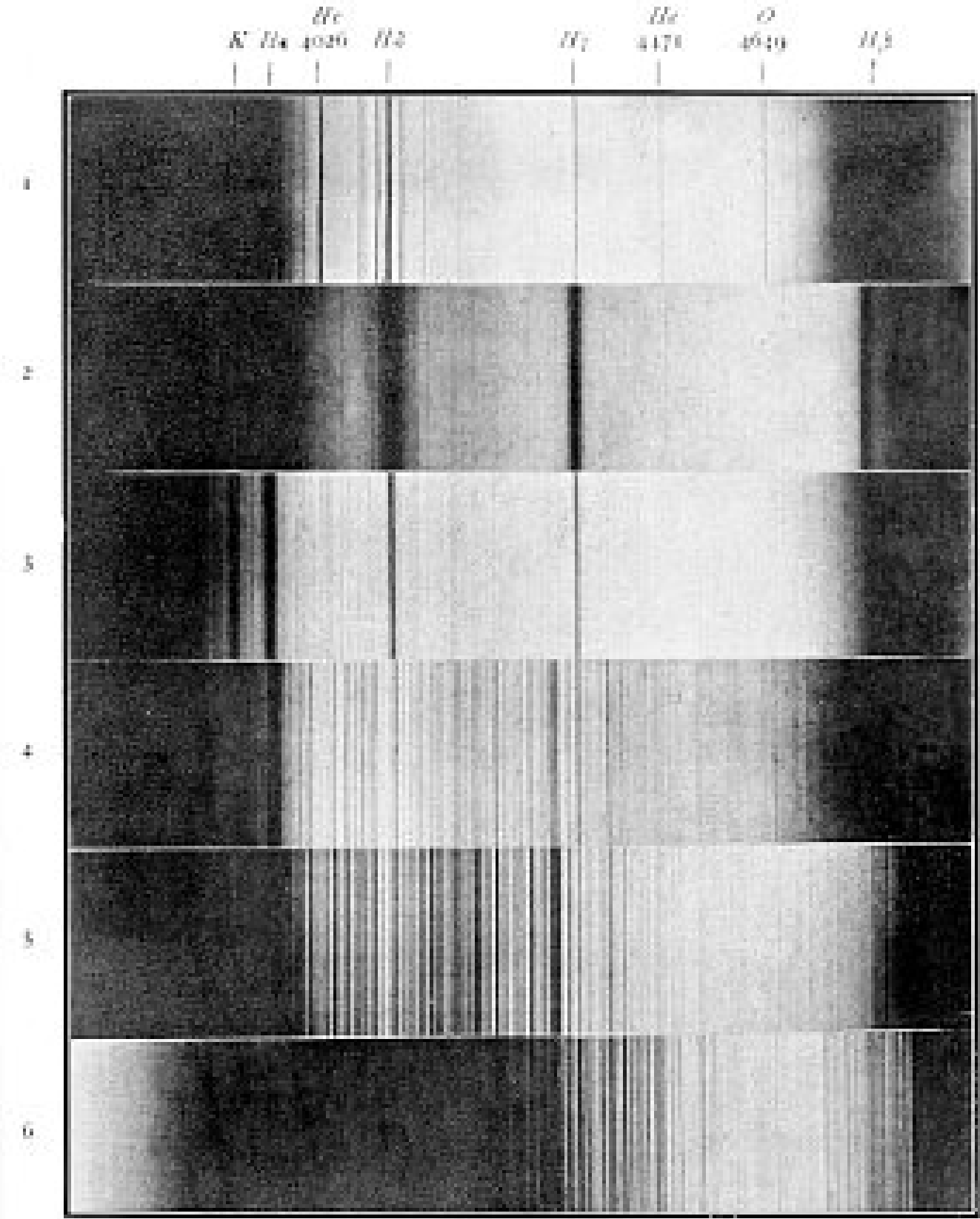
TIPOS DE ESTRELAS



Mary Anna Palmer Draper



Henry Draper



TYPICAL STELLAR SPECTRUM

(1)	α Orionis (Antares)	B0
(2)	α Canis Majoris (Sirius)	A0
(3)	α Carinae (Canopus)	F0
(4)	α Aurigae (Capella)	G0
(5)	α Bootis (Arcturus)	K0
(6)	α Orionis (Betelgeuse)	M0

Classificação
de Draper: A - Q

OS “COMPUTADORES” DE HARVARD



OS “COMPUTADORES” DE HARVARD



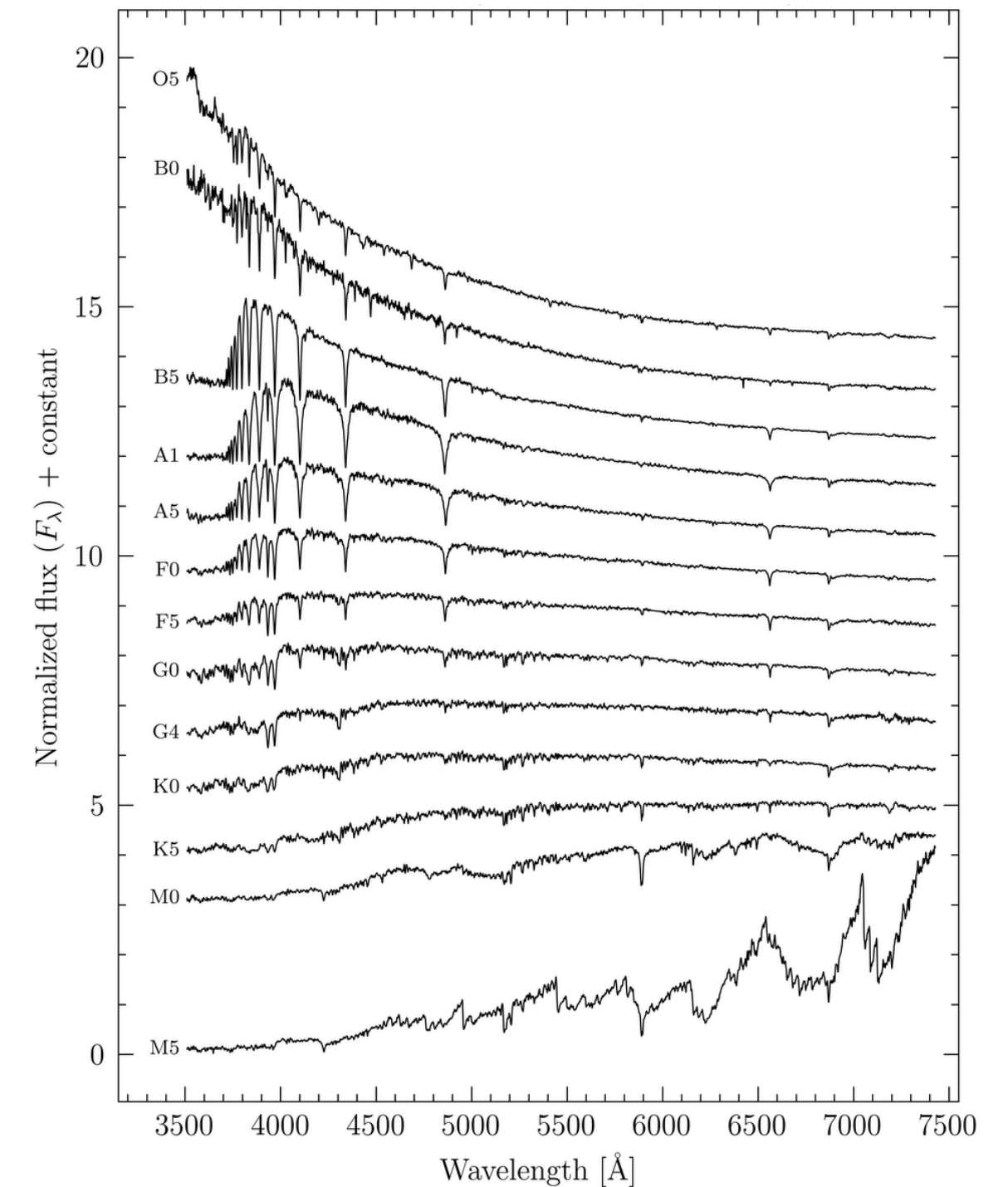
Annie Jump Cannon

Reorganizou os tipos espectrais numa sequência: **O B A F G K M**

Oh Be A Fine Girl/Guy Kiss **M**e

Classificou **à mão** cerca de **350 000** estrelas.

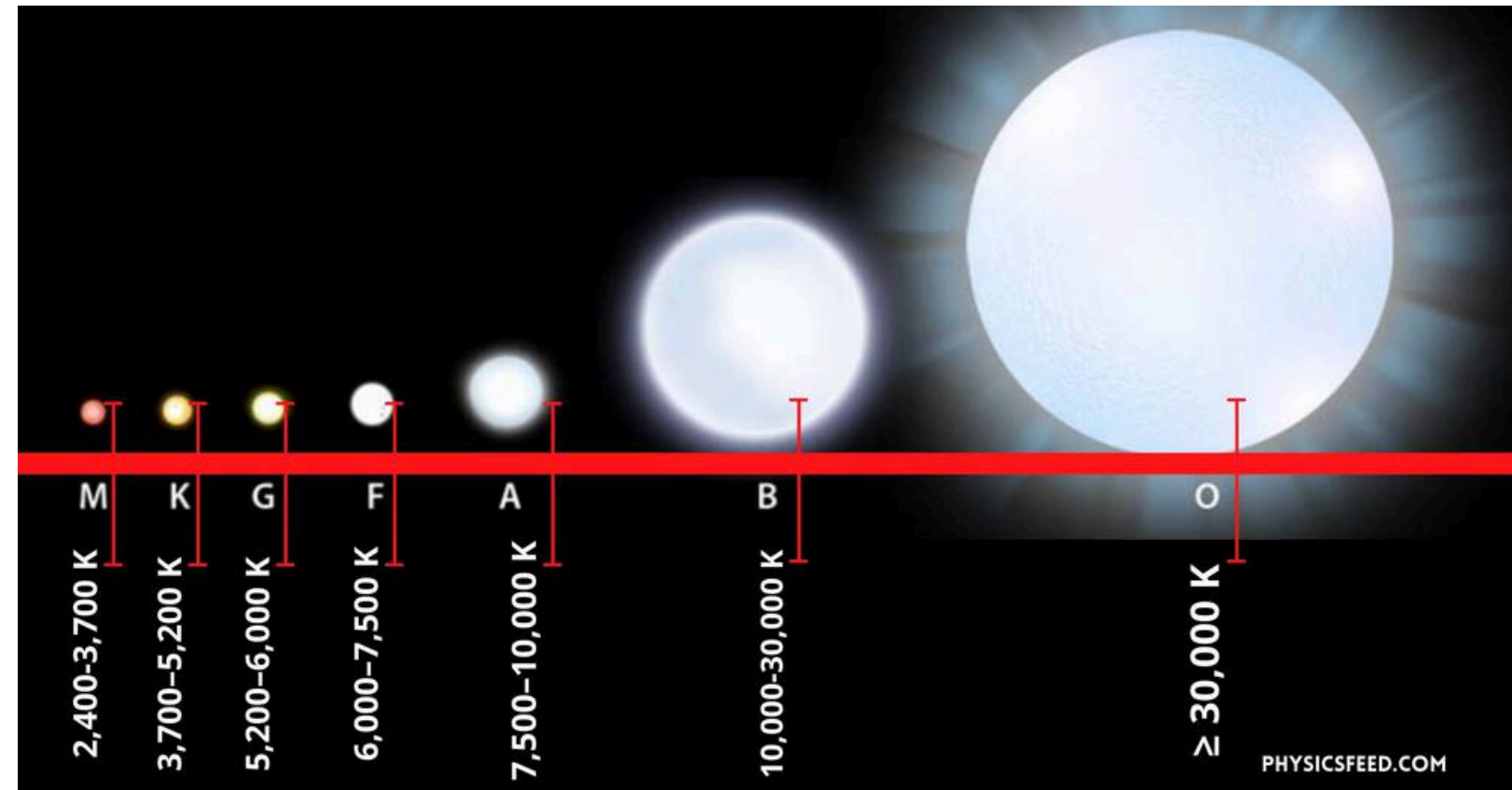
A sequência estava certa. Mas ninguém sabia o que significava. Só **20 anos** depois é que percebemos porquê...



A RESPOSTA: *TEMPERATURA*

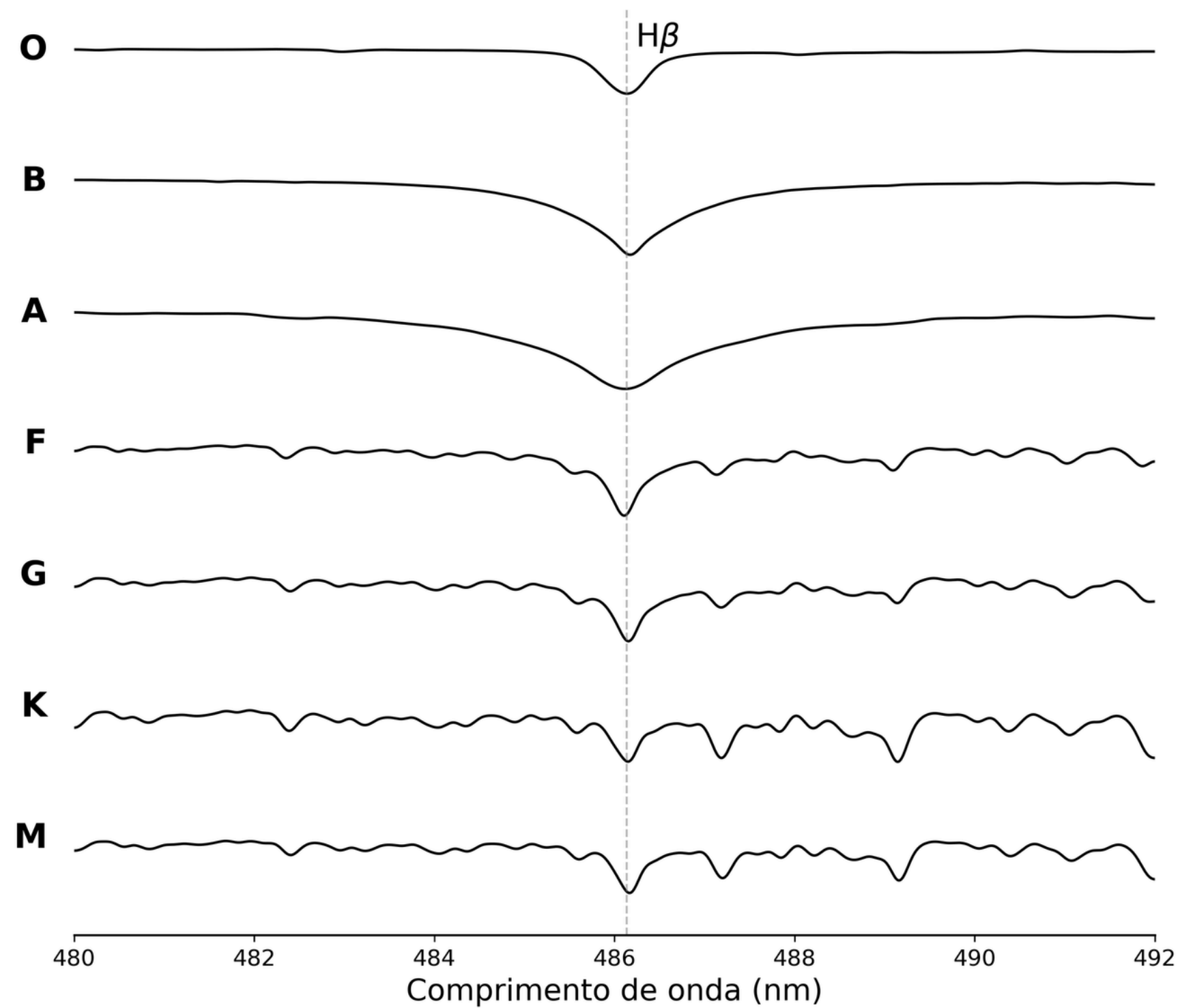


Cecilia Payne-Gaposhkin



Cecilia Payne-Gaposhkin mostrou que a sequência **O B A F G K M** é uma sequência de **temperatura**.

A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



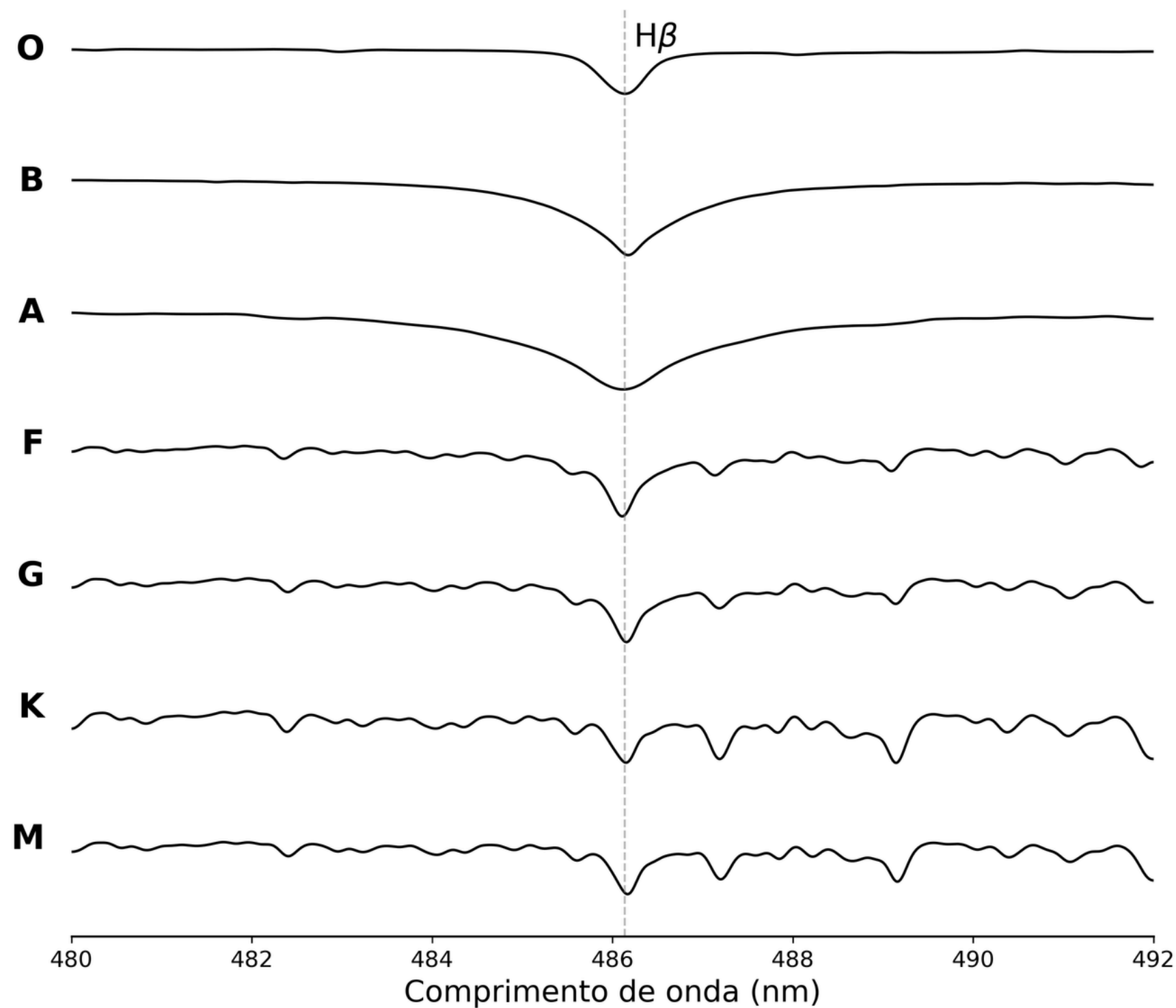
Mais quente



Mais frio

**O que
observamos?**

A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



Mais quente



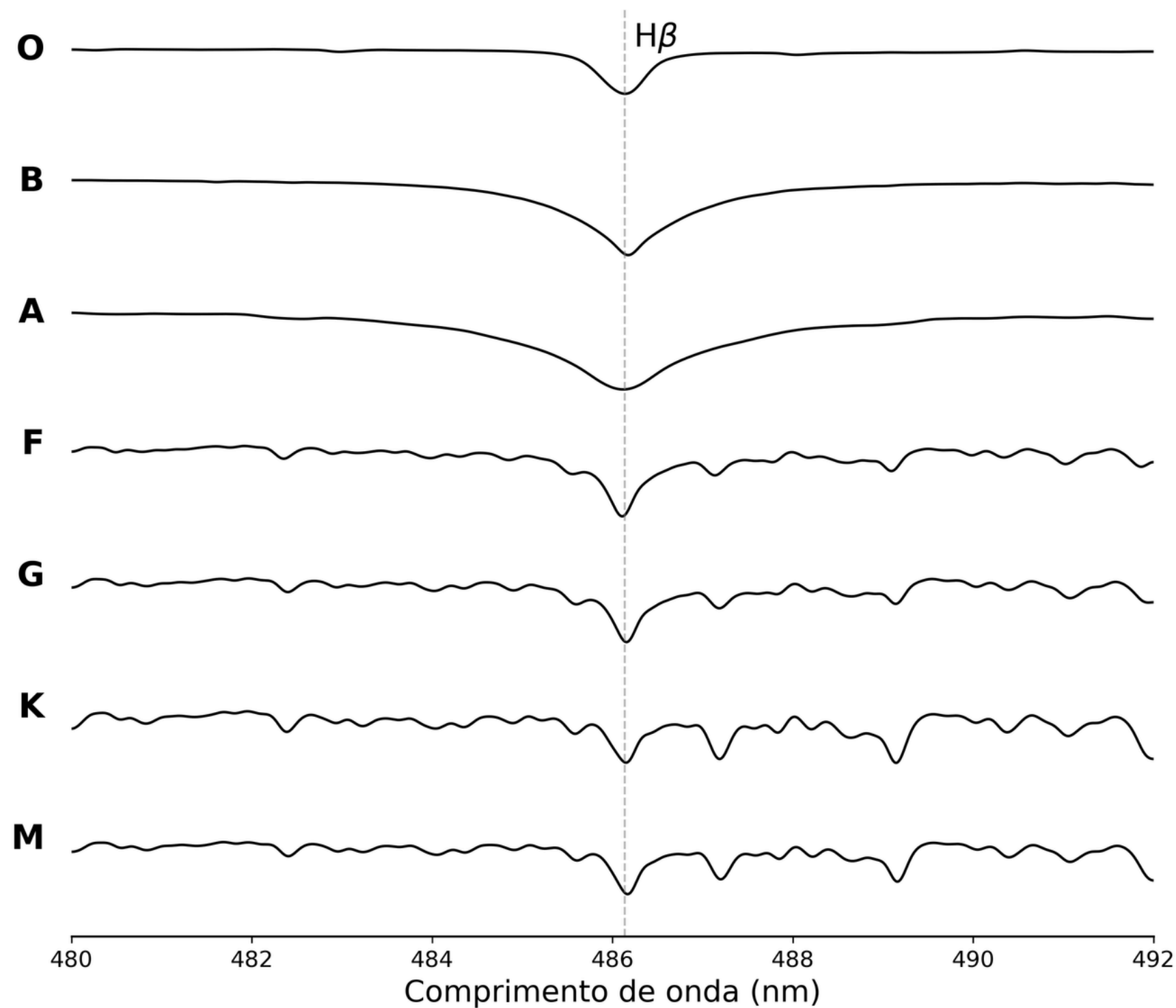
Mais frio

O que observamos?

A absorção em $H\beta$ é **máxima nas estrelas do tipo A.**

Para estrelas **mais quentes ou mais frias**, a linha enfraquece.

A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



Mais quente



Mais frio

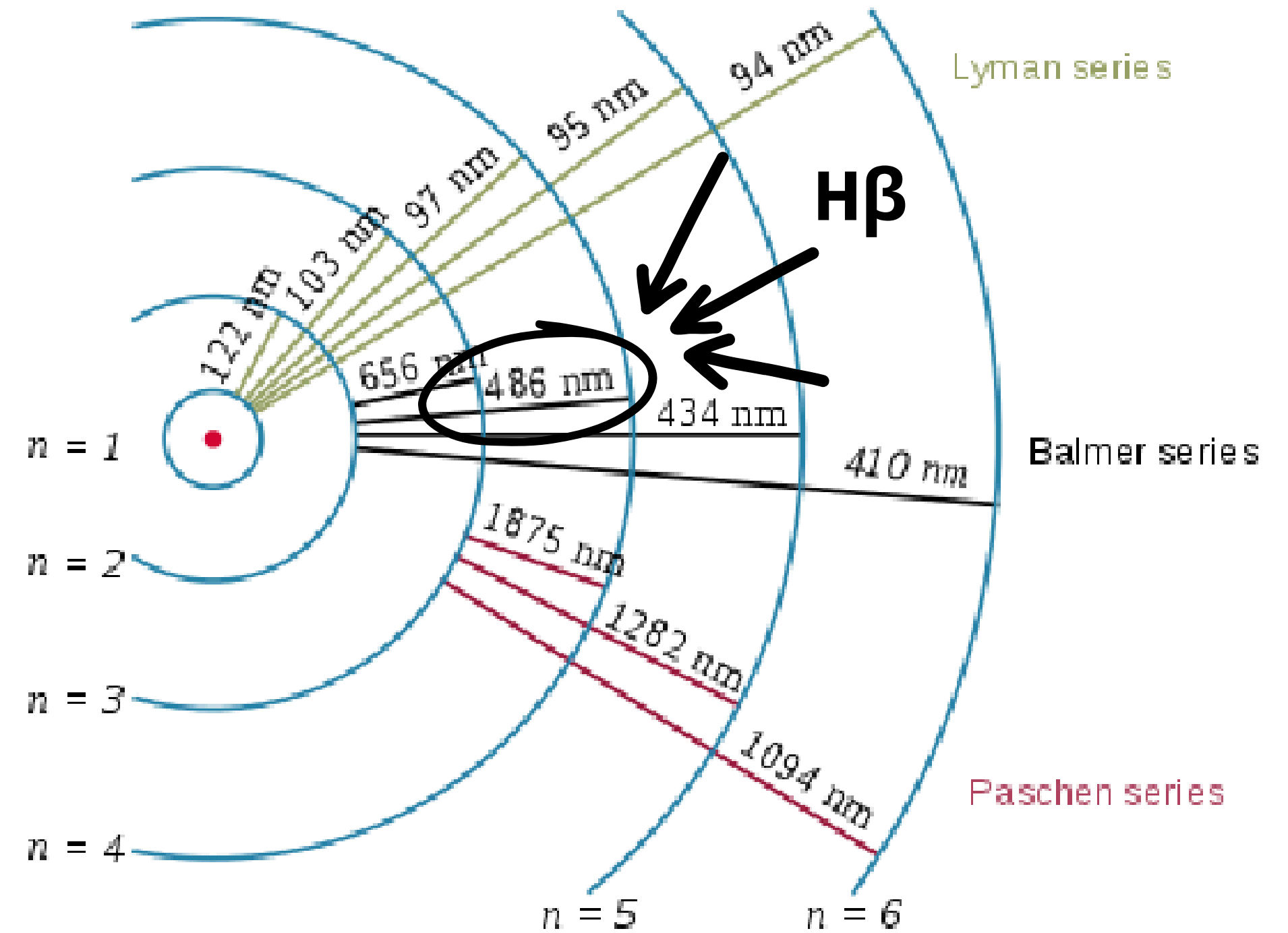
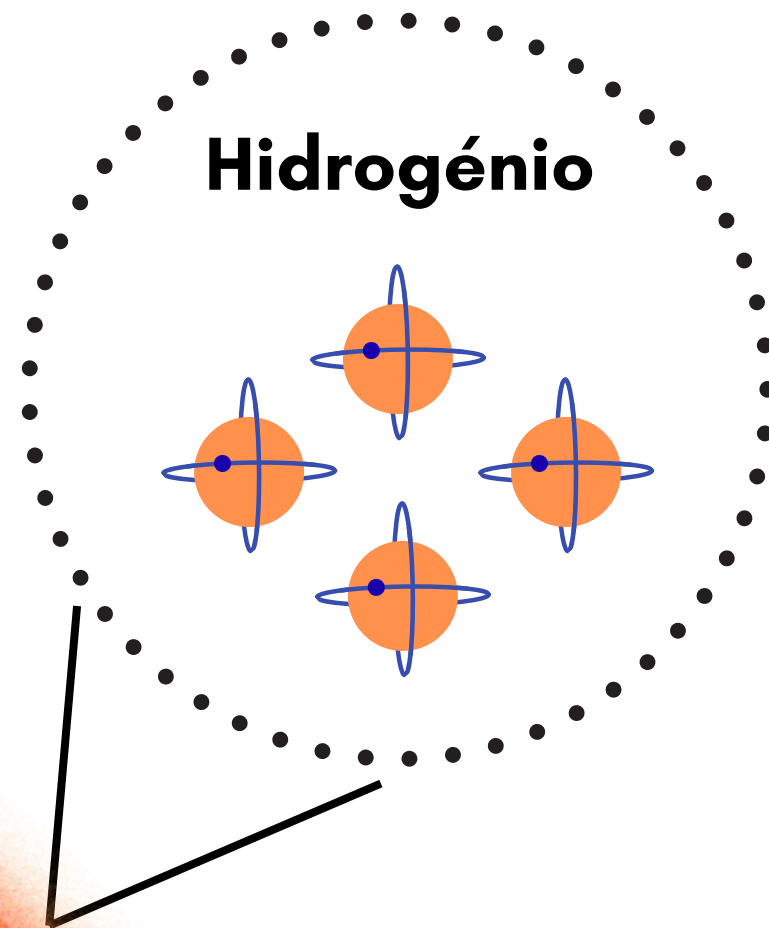
O que observamos?

A absorção em H β é **máxima nas estrelas do tipo A.**

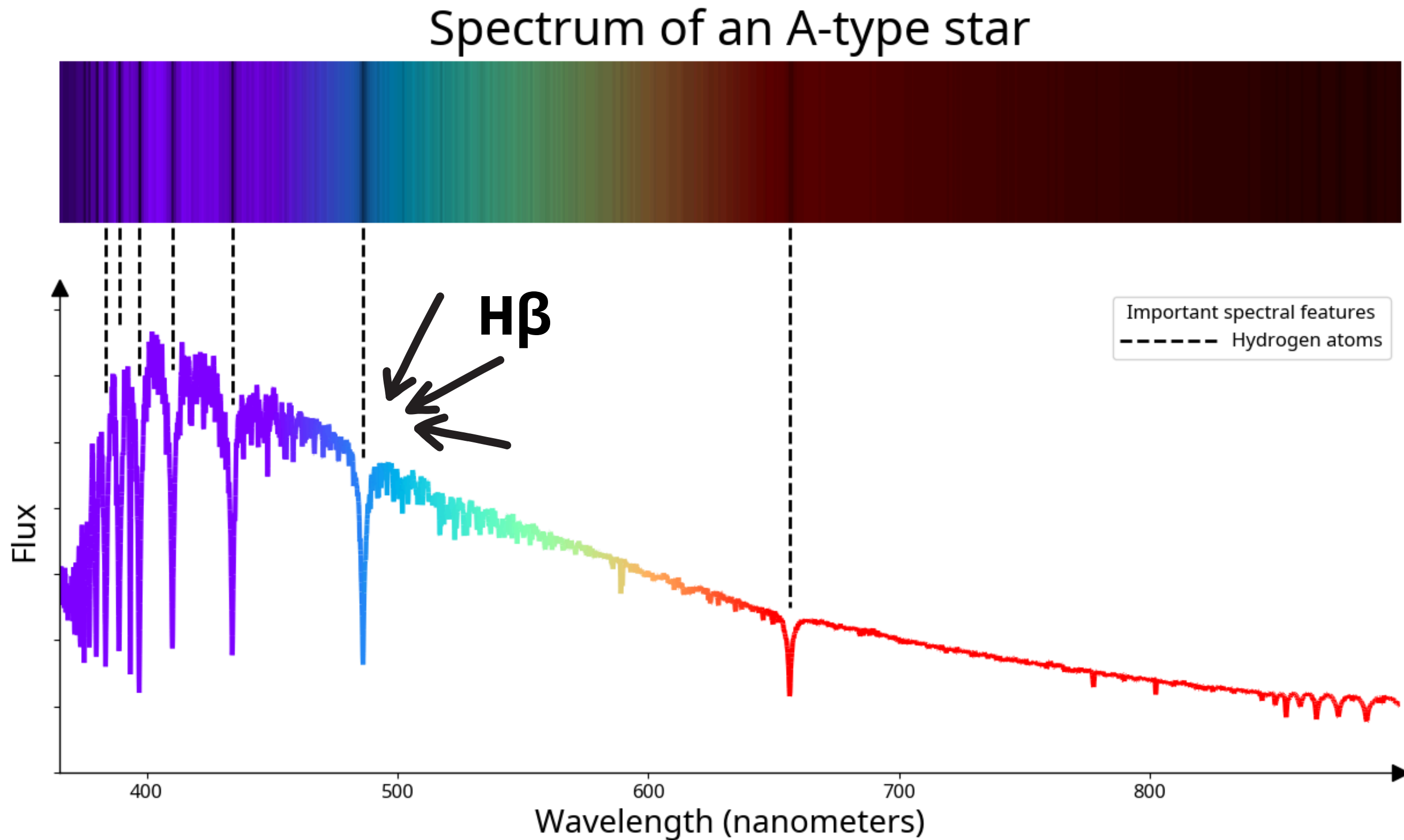
Para estrelas **mais quentes ou mais frias**, a linha enfraquece.

Porquê?

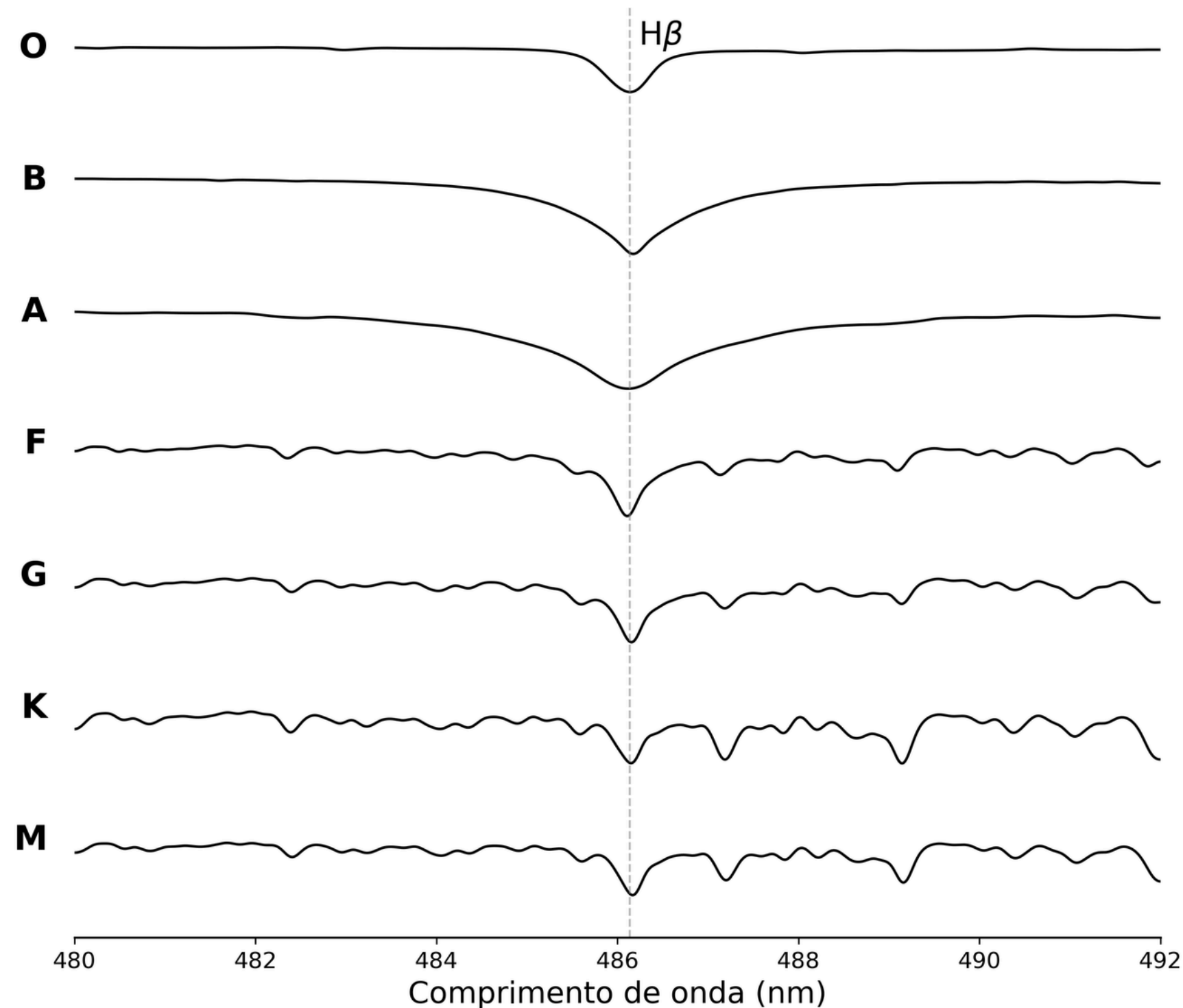
A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



A FÍSICA POR DE TRÁS DA DESCOBERTA



Mais quente



Mais frio

Nas estrelas **muito quentes**, uma parte maior do hidrogénio fica **ionizada**.

Nas estrelas do **tipo A existe o equilíbrio ideal**, com muitos átomos de hidrogénio neutro e eletrões em $n=2$, tornando **H β mais intensa**.

Nas estrelas **mais frias**, a maioria dos eletrões do hidrogénio permanece em $n=1$, por isso **poucos átomos conseguem absorver H β** .

β. ?

A TEMPERATURA NÃO NOS CONTA A HISTÓRIA TODA



Uma estrela pode parecer pouco brilhante porque **emite pouca luz** ou simplesmente porque **está muito longe**.

Se eliminarmos o efeito da distância temos **estrelas todas iguais**?

A TEMPERATURA NÃO NOS CONTA A HISTÓRIA TODA



Uma estrela pode parecer pouco brilhante porque **emite pouca luz** ou simplesmente porque **está muito longe**.

Se eliminarmos o efeito da distância temos **estrelas todas iguais**?

Não!

A TEMPERATURA NÃO NOS CONTA A HISTÓRIA TODA

Uma estrela pode parecer pouco brilhante porque **emite pouca luz** ou simplesmente porque **está muito longe**.

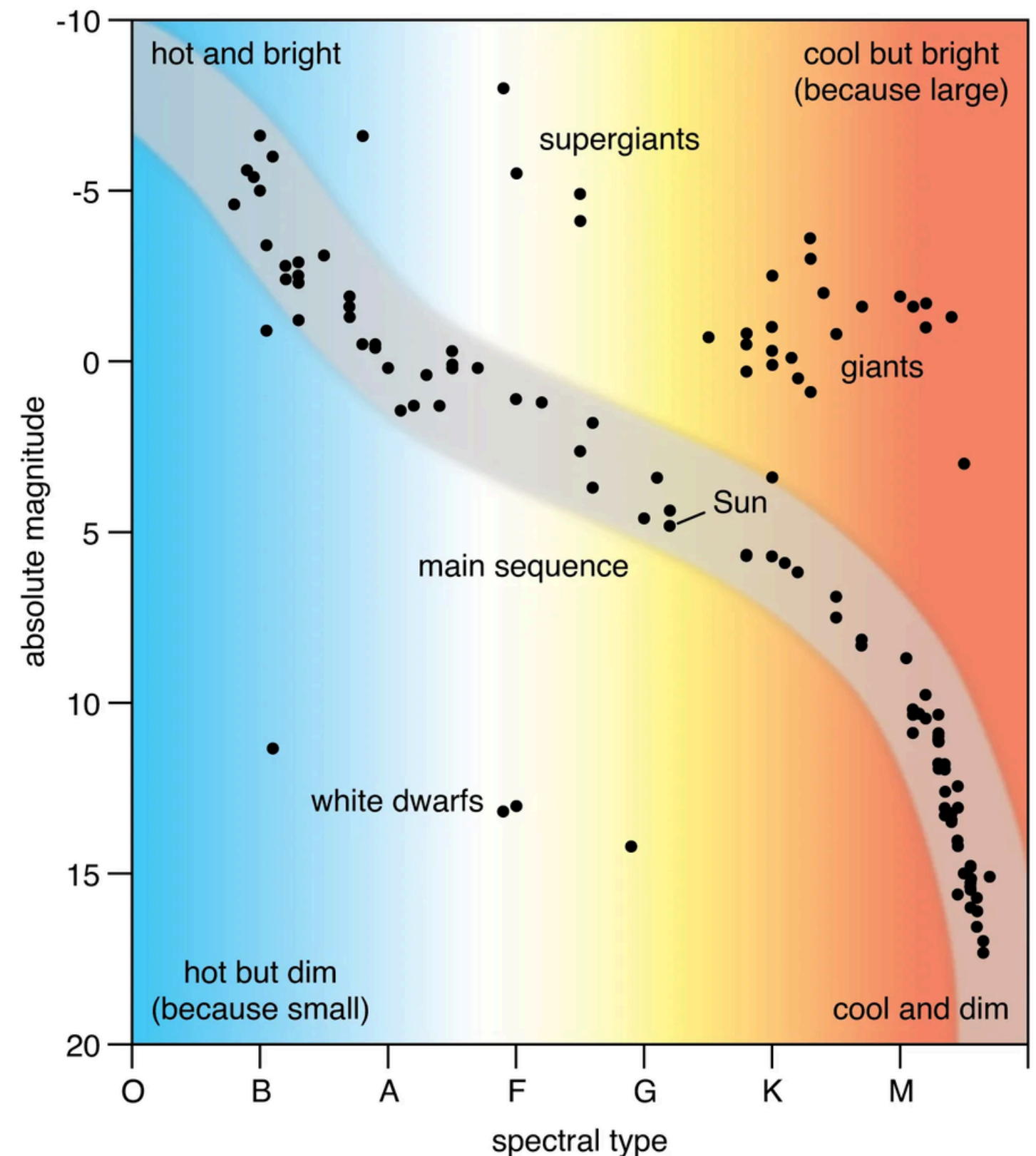
Se eliminarmos o efeito da distância temos **estrelas todas iguais**?

Não!

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

Uma estrela pode **ser fria e muito brilhante** simplesmente porque é **enorme**.

Hertzsprung-Russell diagram



RECEITA PARA FAZER UMA ESTRELA

Para perceber porque existem **estrelas com diferentes temperaturas, tamanhos e luminosidades**, temos de começar pelo seu **nascimento**.

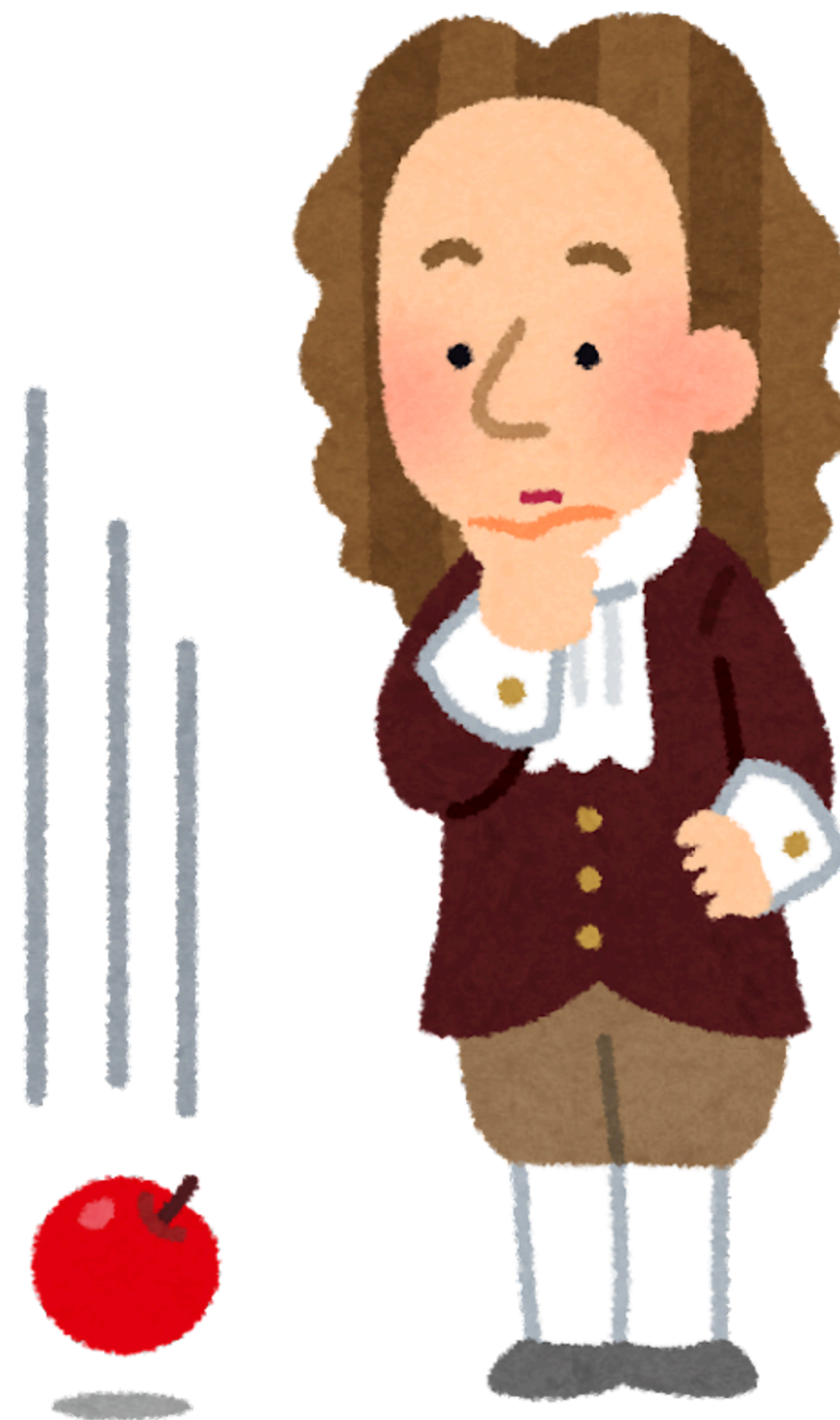
1. Encontrar uma **região densa e fria** de uma **nebulosa**



RECEITA PARA FAZER UMA ESTRELA

Para perceber porque existem **estrelas com diferentes temperaturas, tamanhos e luminosidades**, temos de começar pelo seu **nascimento**.

1. Encontrar uma **região densa e fria** de uma **nebulosa**
2. Deixar a gravidade fazer a sua **magia**: o gás começa a **colapsar** sob o seu próprio peso



RECEITA PARA FAZER UMA ESTRELA

Para perceber porque existem **estrelas com diferentes temperaturas, tamanhos e luminosidades**, temos de começar pelo seu **nascimento**.

1. Encontrar uma **região densa e fria** de uma **nebulosa**
2. Deixar a gravidade fazer a sua **magia**: o gás começa a **colapsar** sob o seu próprio peso
3. Formar uma **protoestrela**



NASA/ESA Hubble Space Telescope



Star formation by collapse of molecular clouds

Francis Villatoro

ASSIM NASCE UMA ESTRELA...

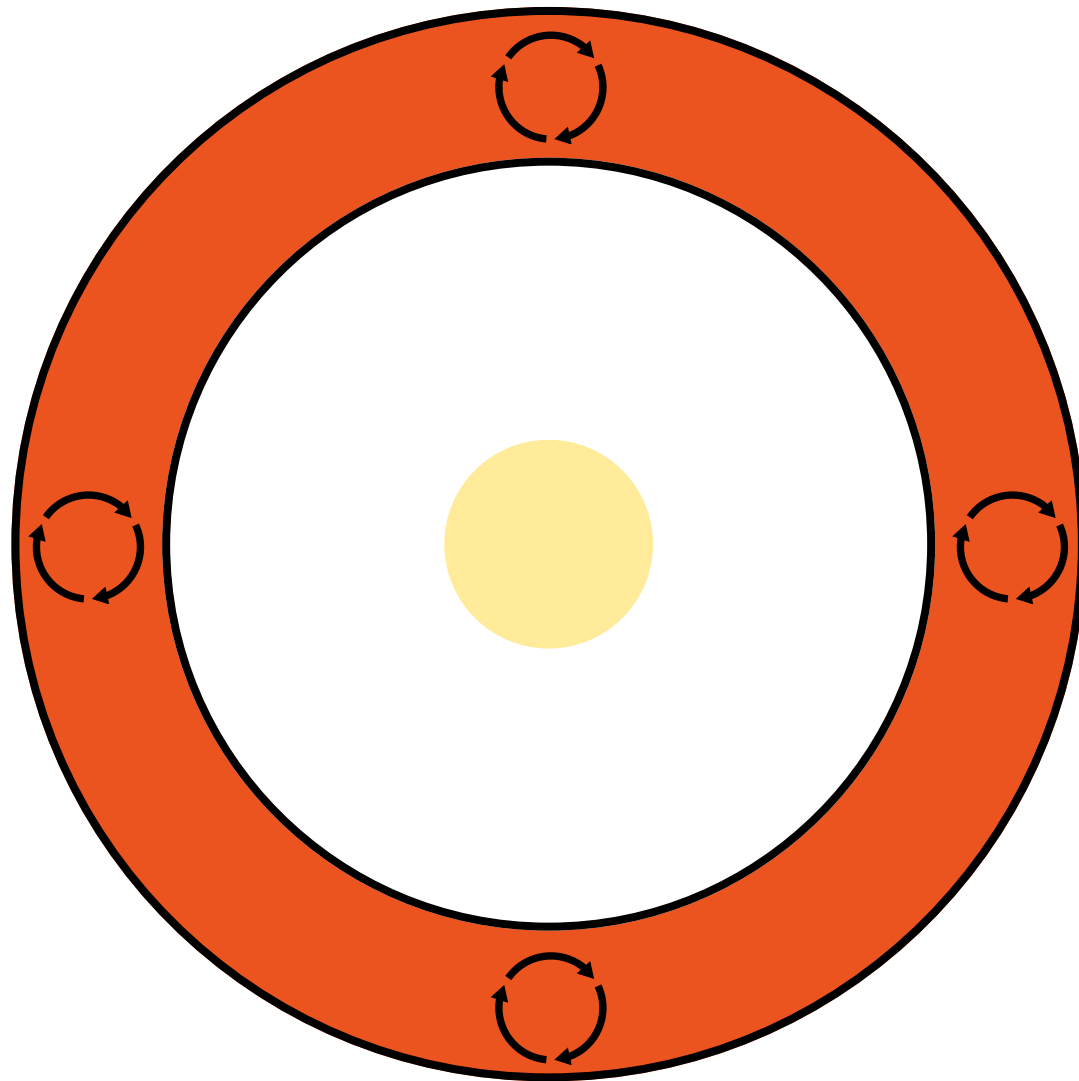
... na primeira fase da sua
evolução: a **sequência
principal!**



A SEQUÊNCIA PRINCIPAL

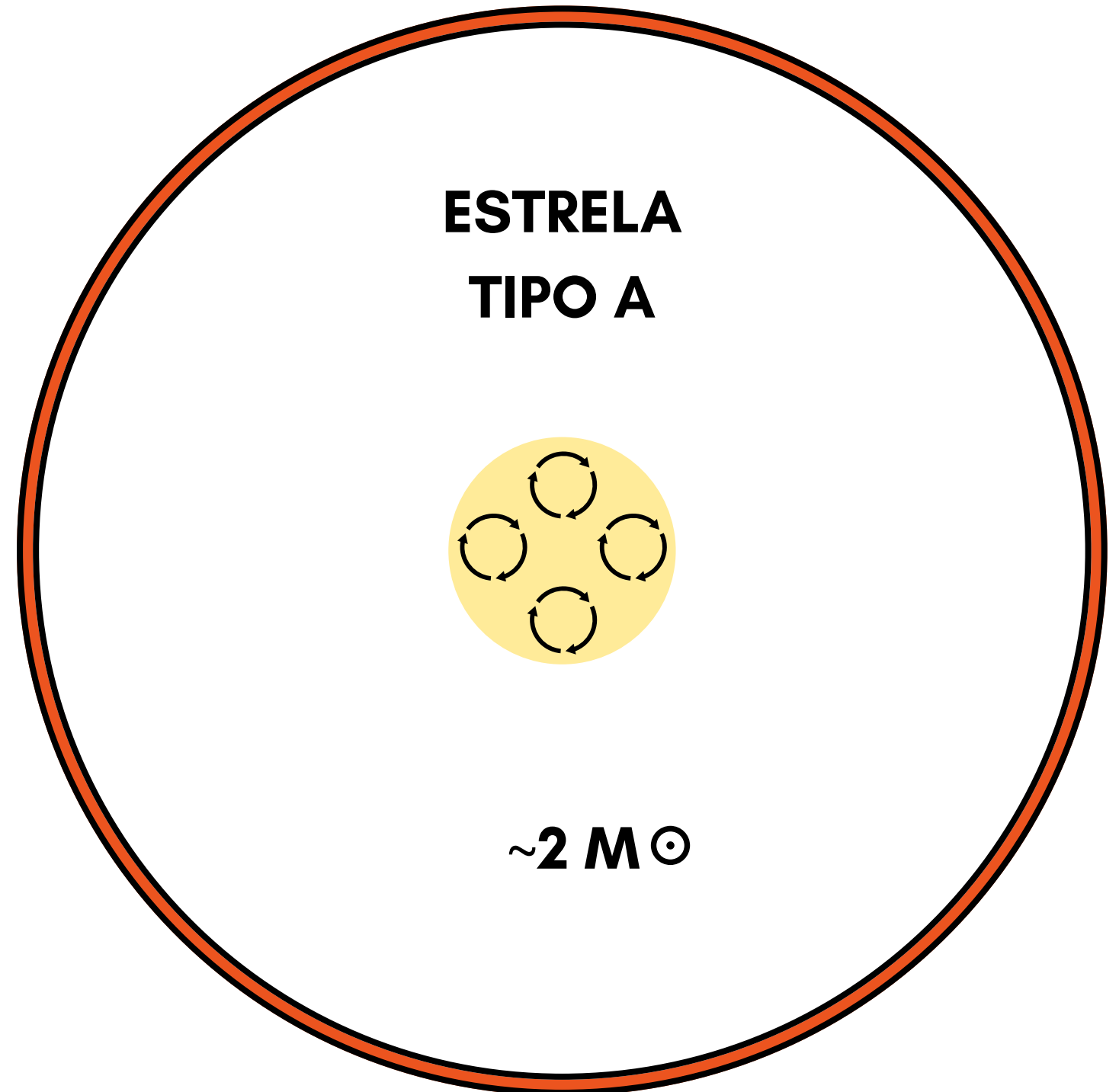
Todas estas estrelas estão a fundir hidrogénio. **Então porque são tão diferentes?**

O SOL



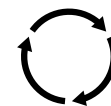
$1 M_{\odot}$

ESTRELA
TIPO A



$\sim 2 M_{\odot}$

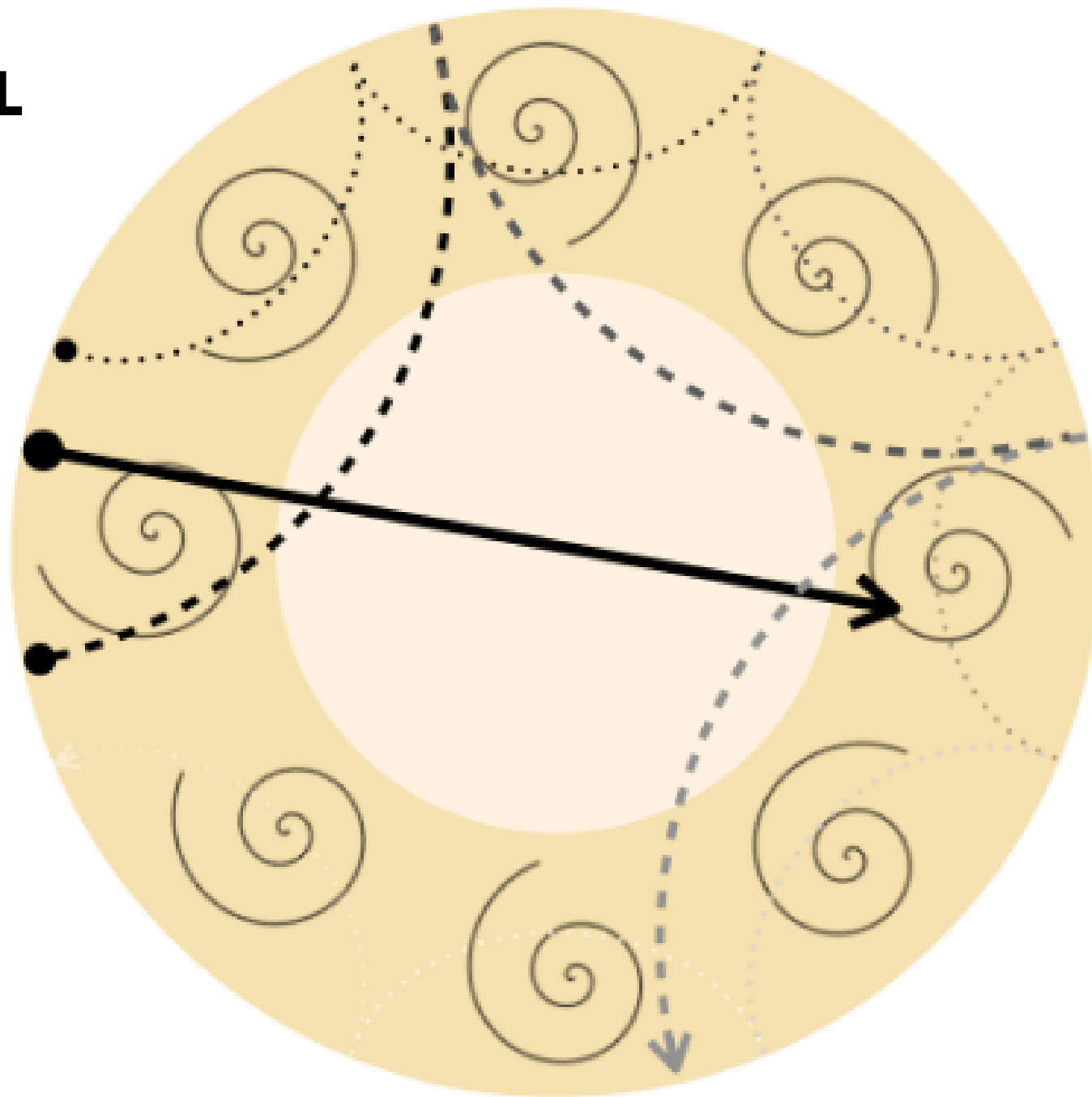
NÃO ESTÁ À ESCALA



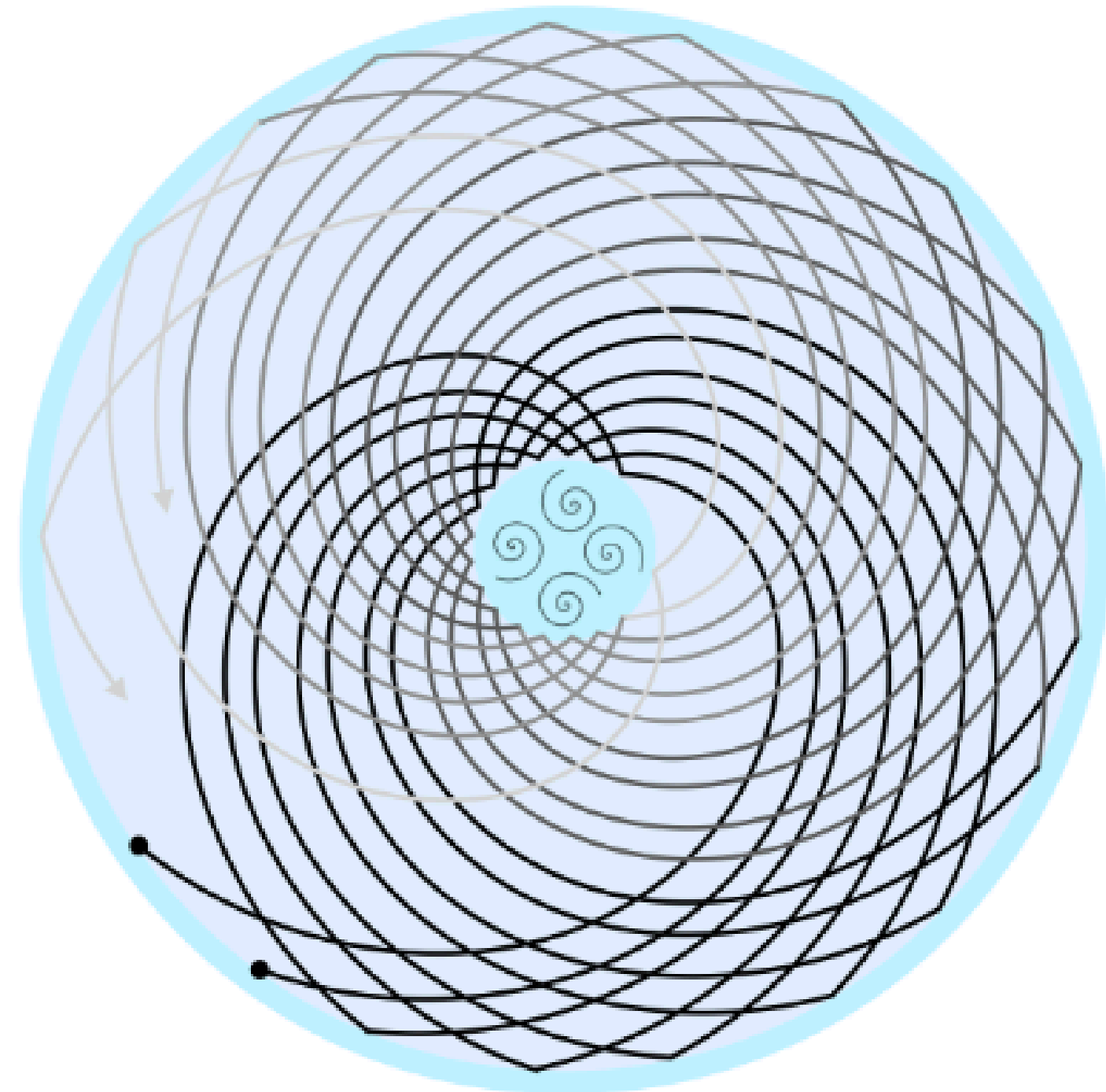
• CONVECÇÃO

ASTROSEISMOLOGIA

O SOL

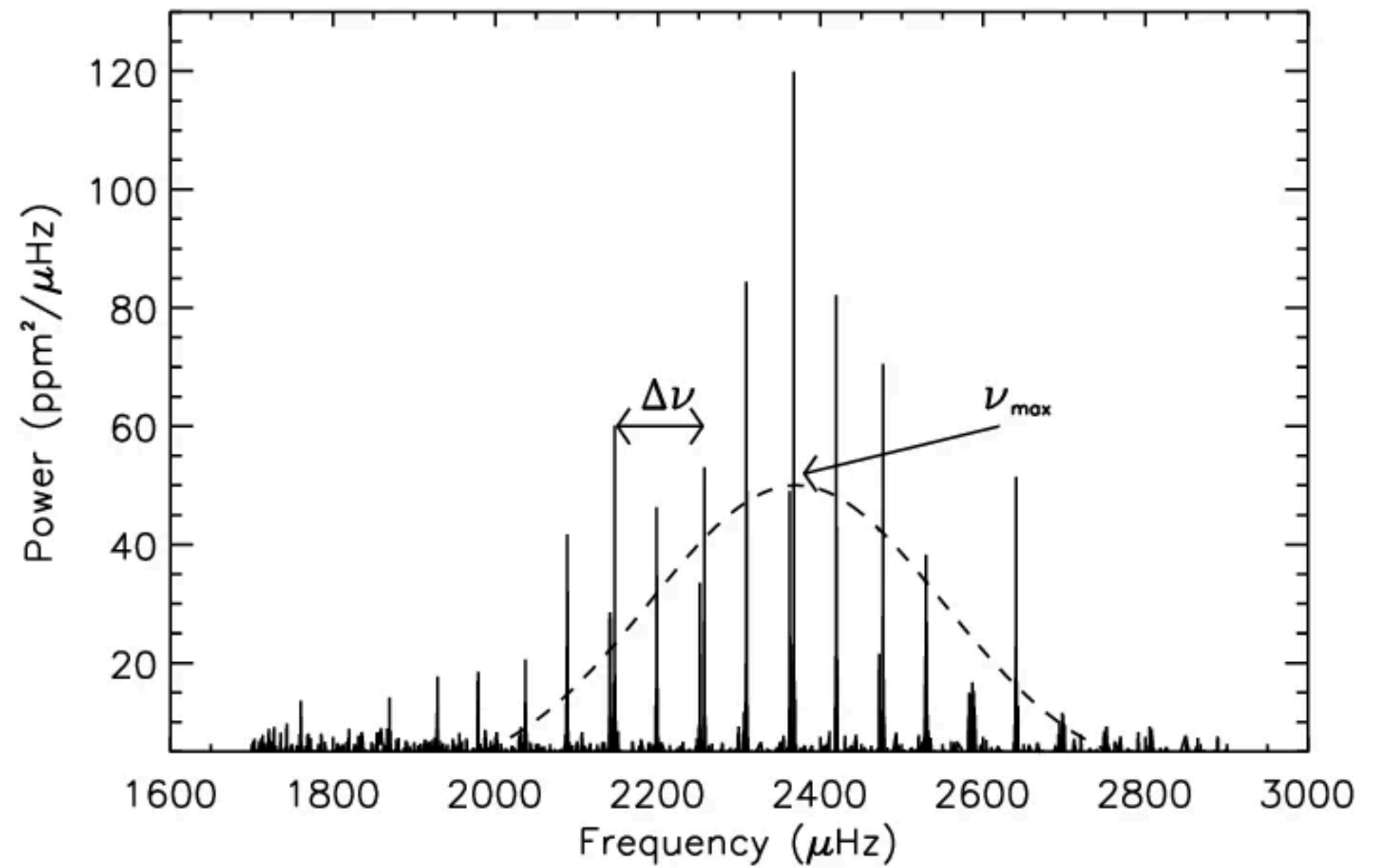
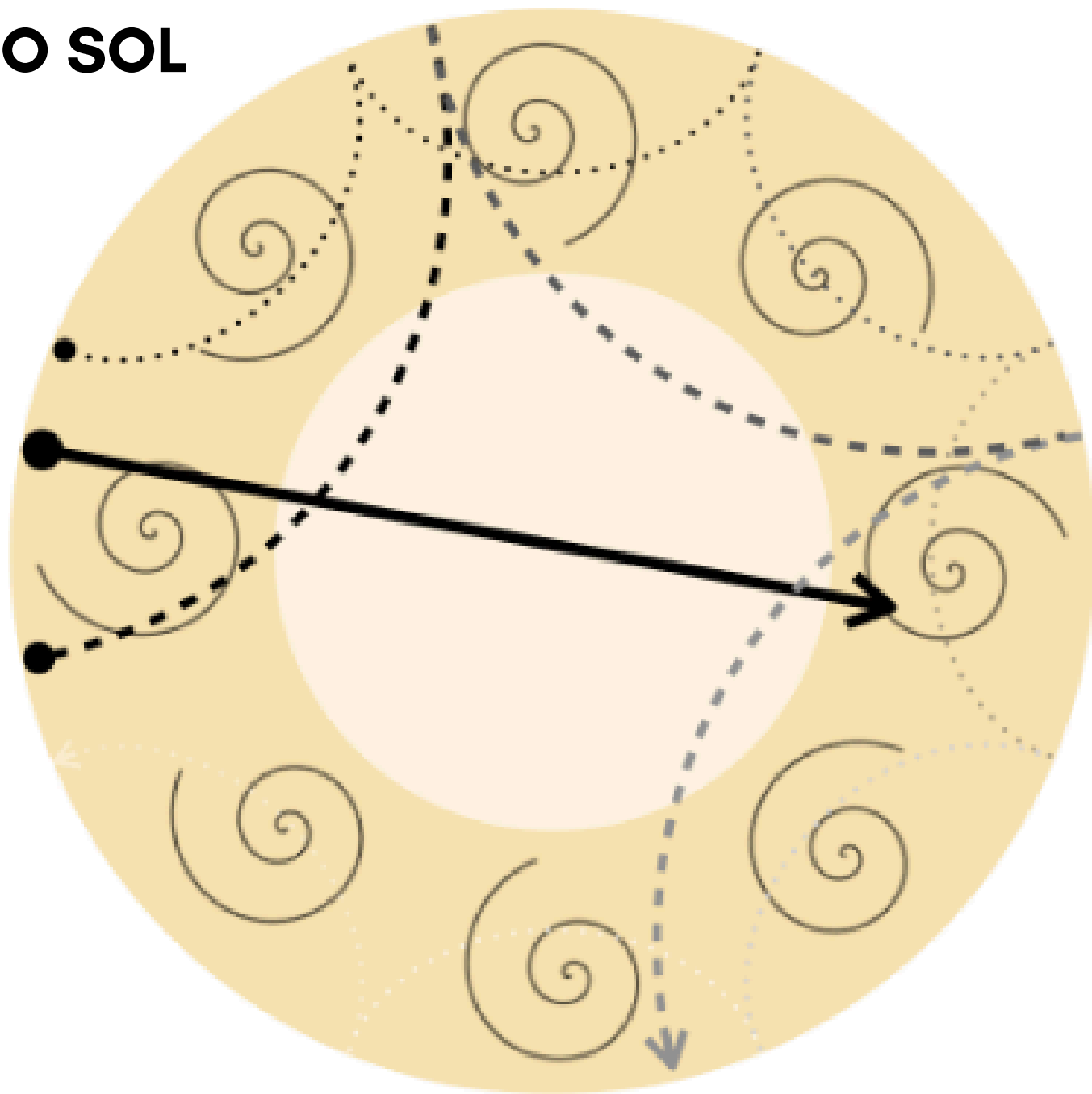


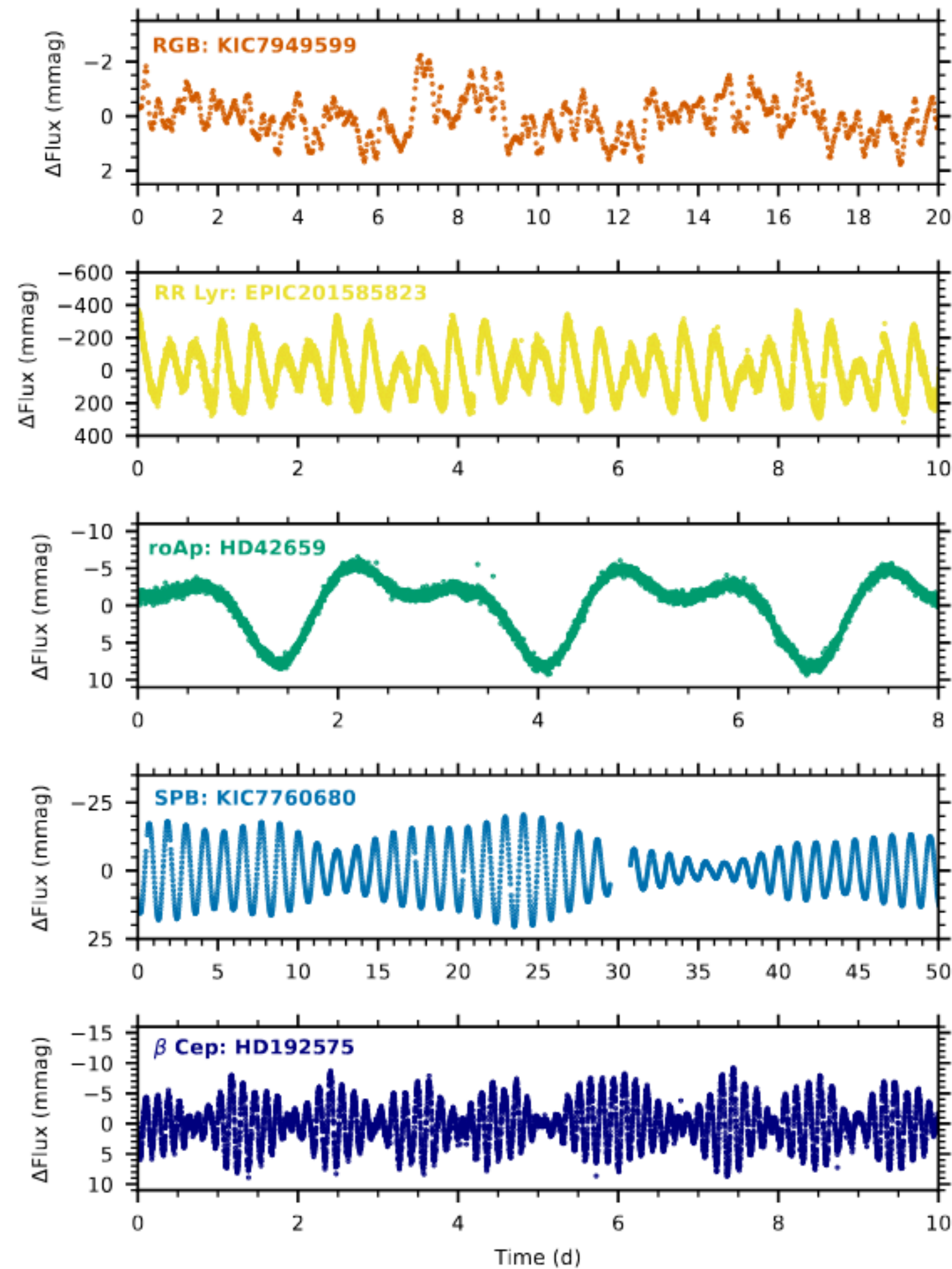
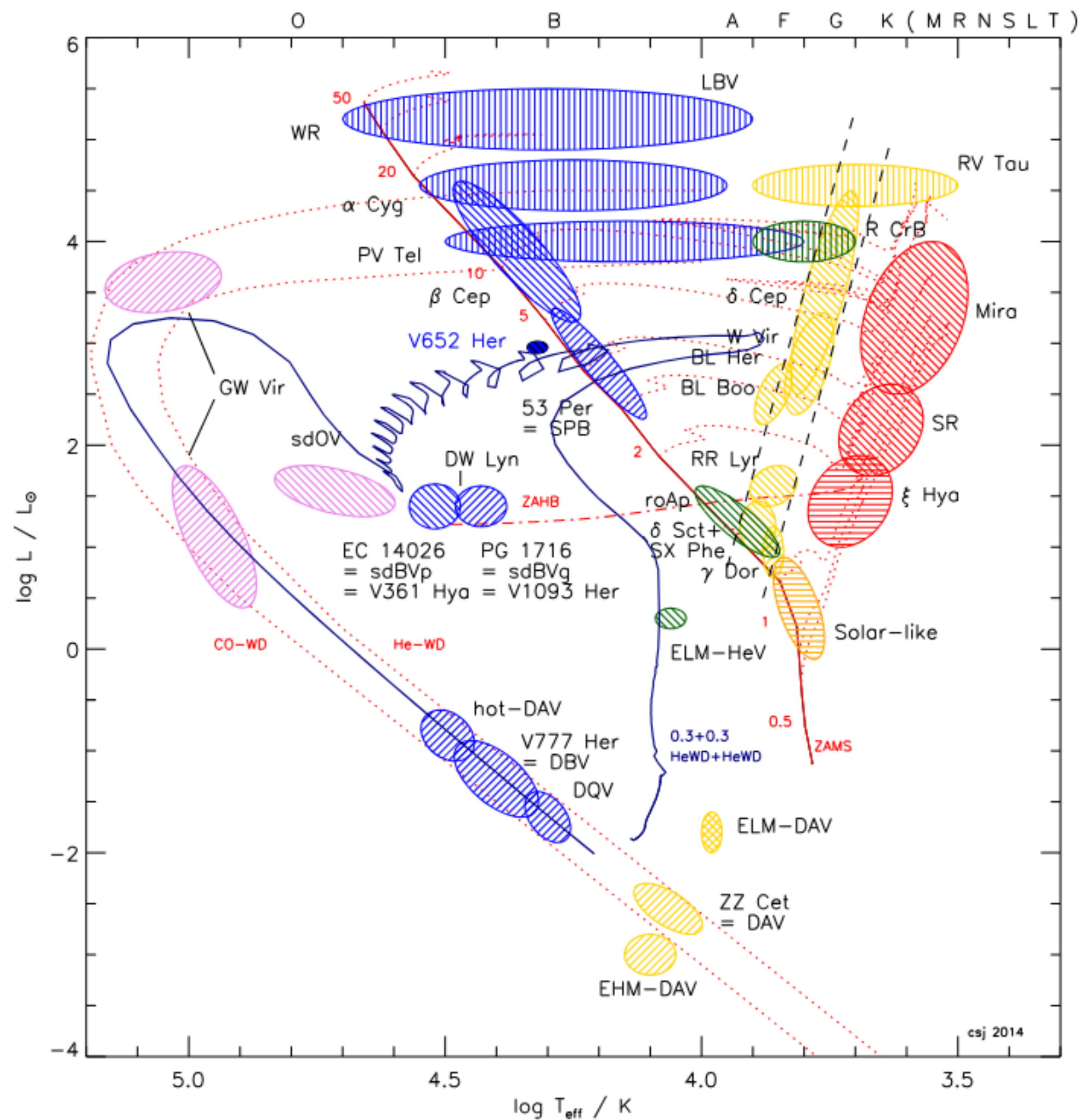
ESTRELA
TIPO A

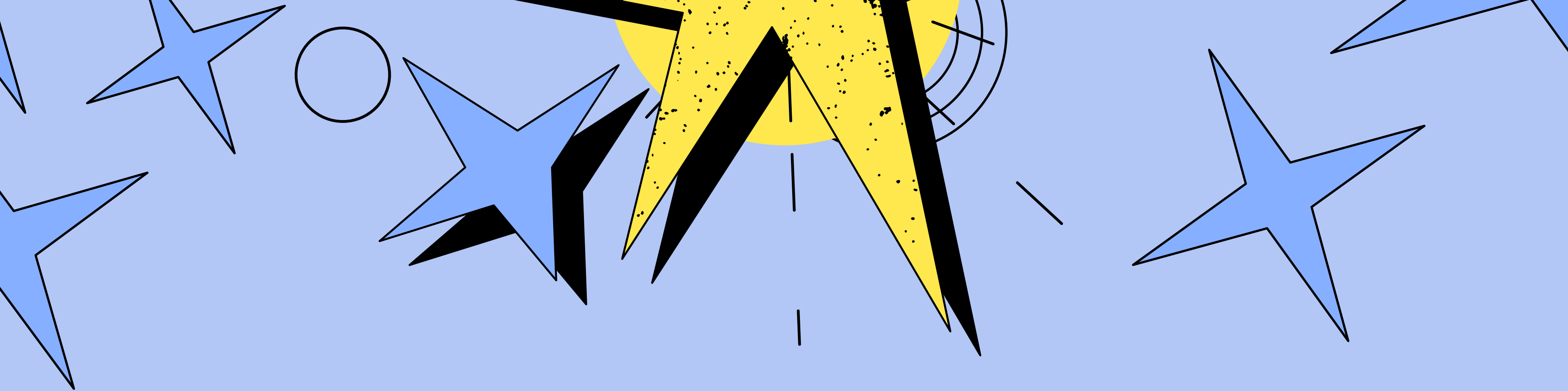


AS OSCILAÇÕES DO SOL

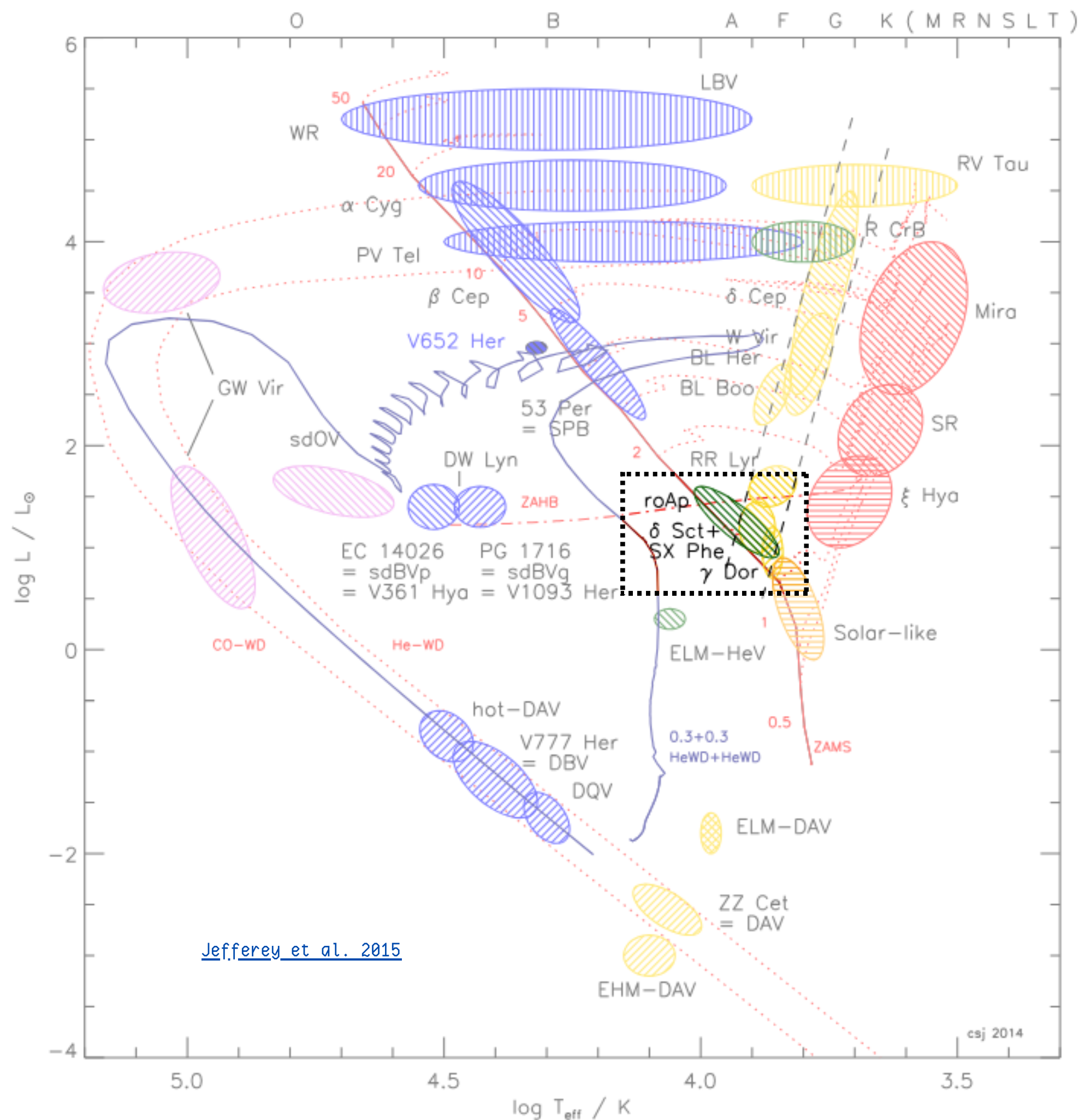
O SOL







Parte II - Estado da Arte



AS ESTRELAS roAp

As estrelas do tipo A quimicamente peculiares e de oscilação rápida (**roAp**) são **raras**, representando apenas cerca de **1% de todas as estrelas do tipo A**.

Propriedades das estrelas roAp

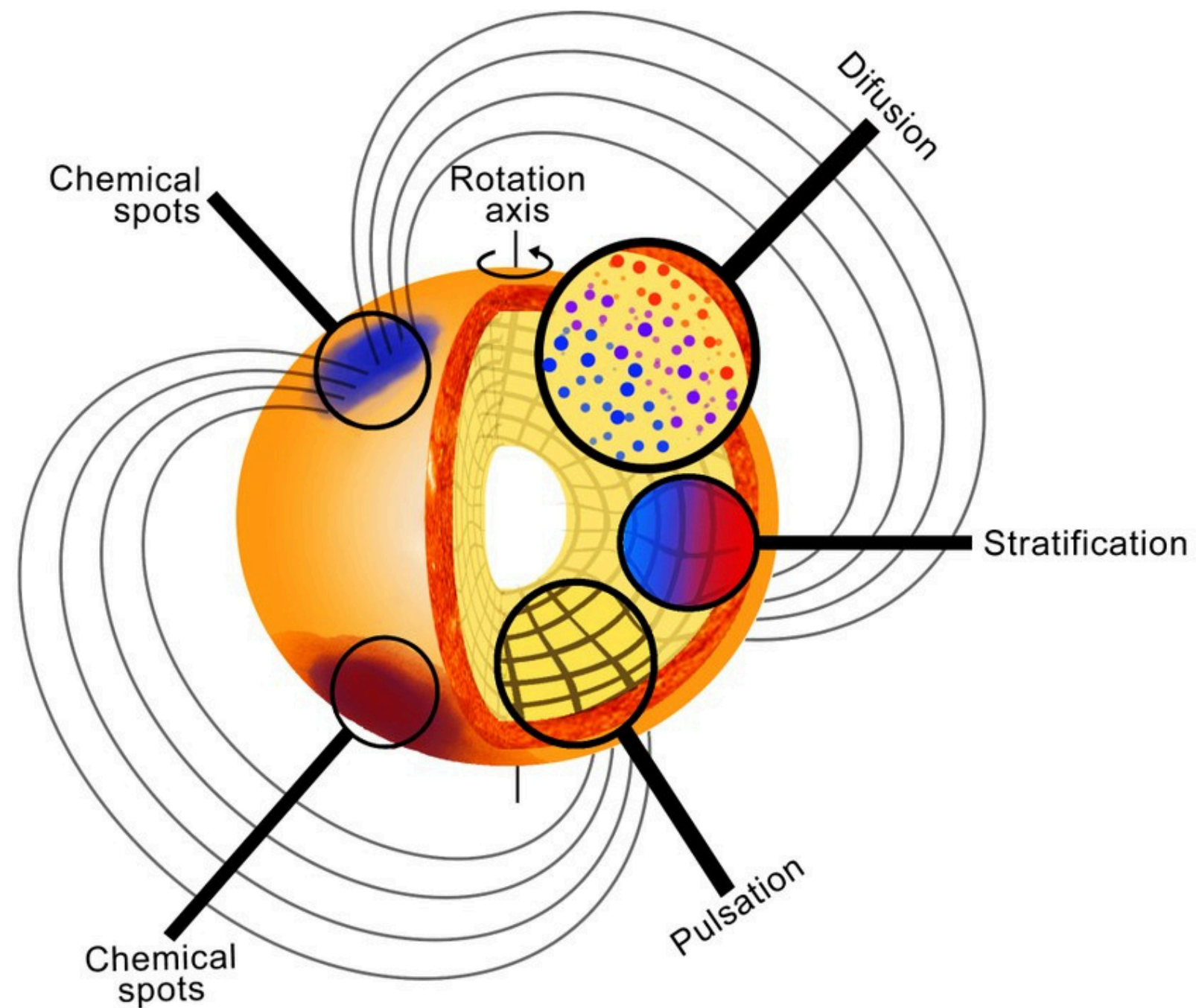


Image credits: Victoria Antoci

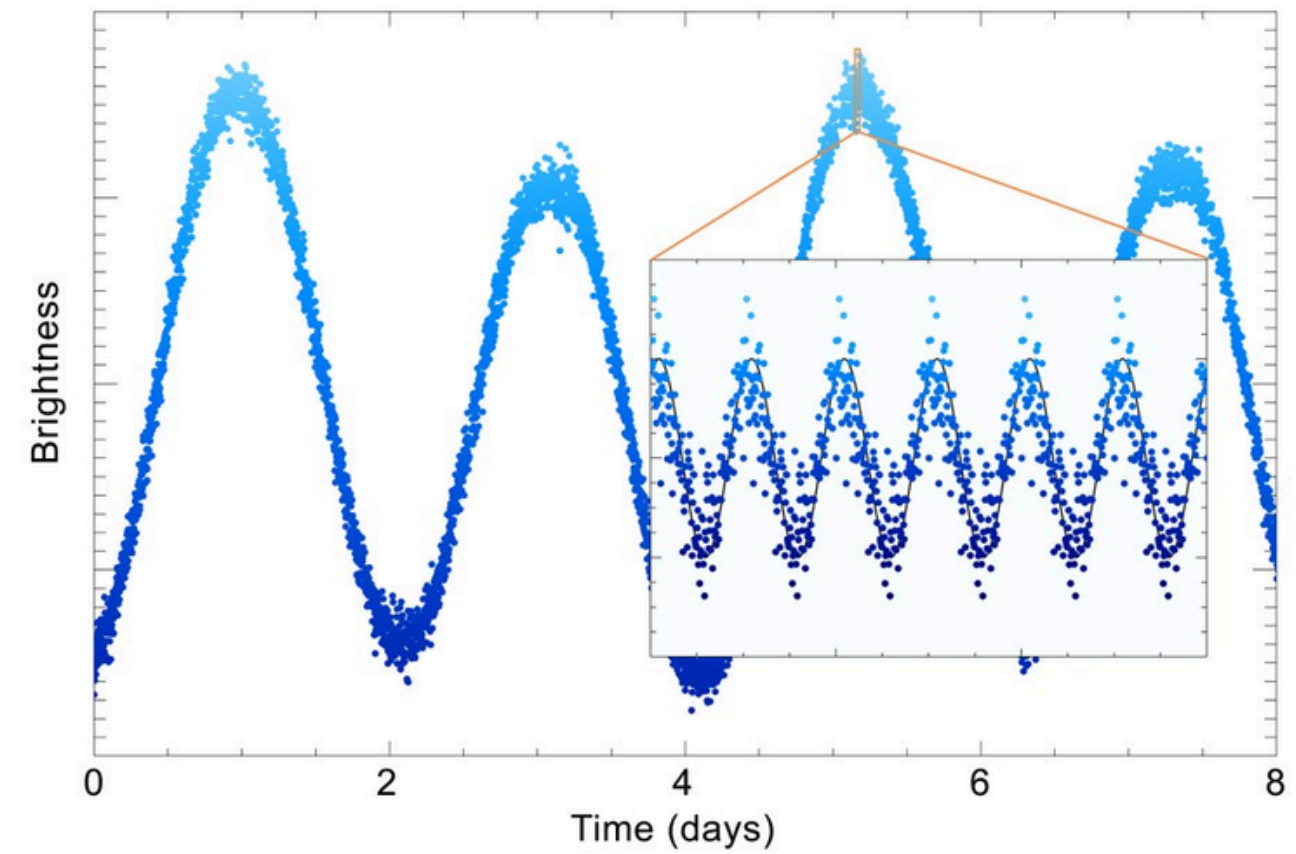
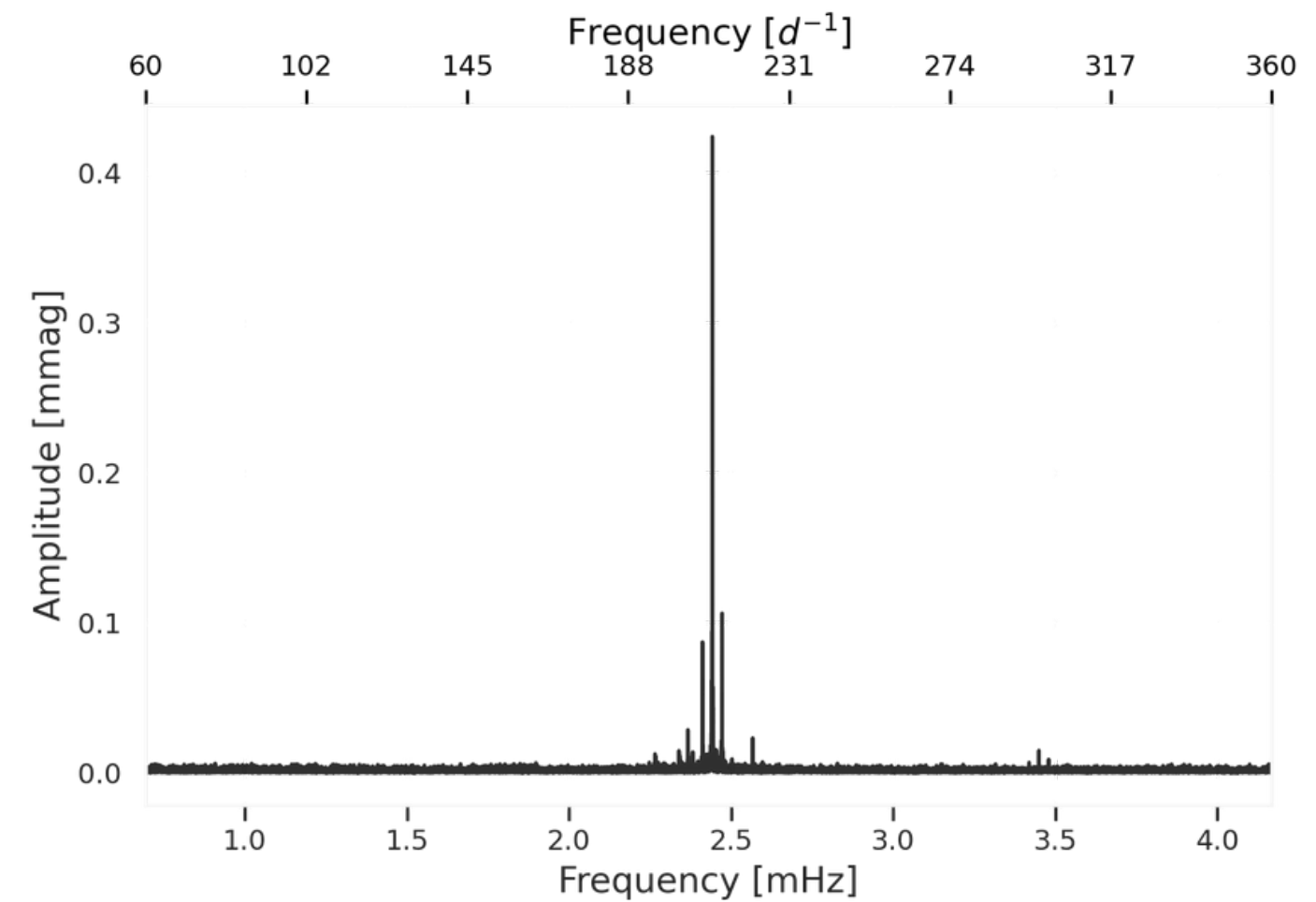
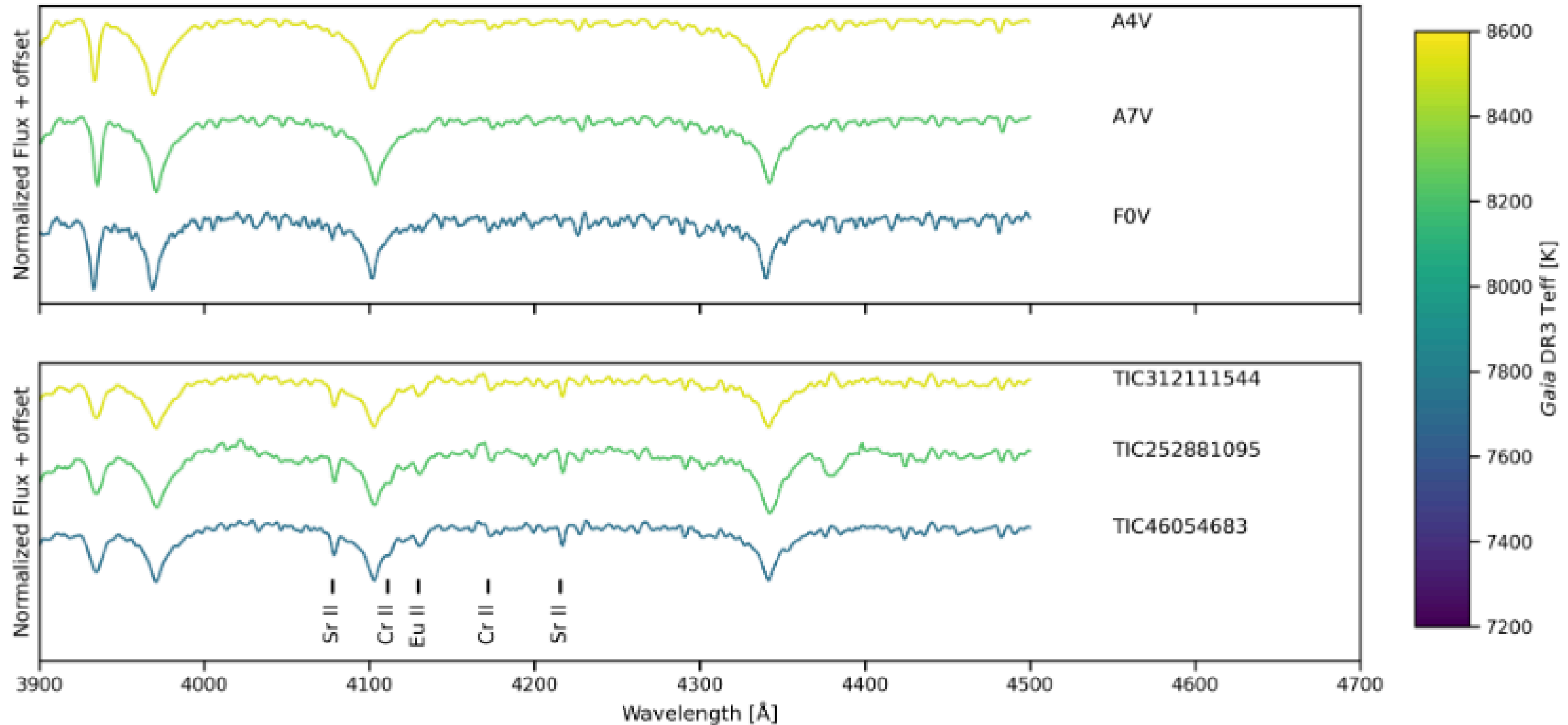
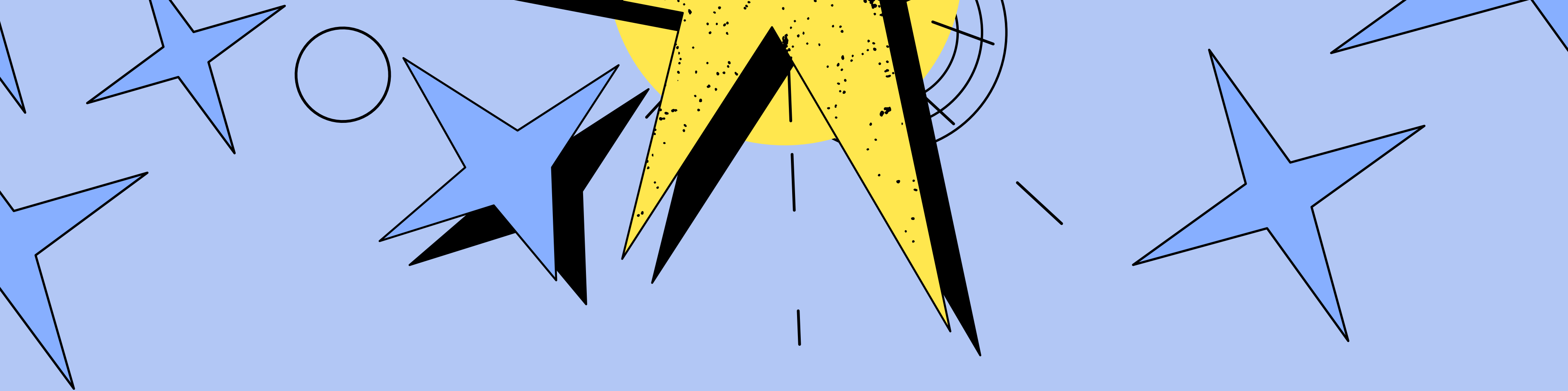


Image credits: Daniel Holdsworth



Propriedades das estrelas roAp





Parte II - Observar estrelas roAp

NASA'S TESS MISSION

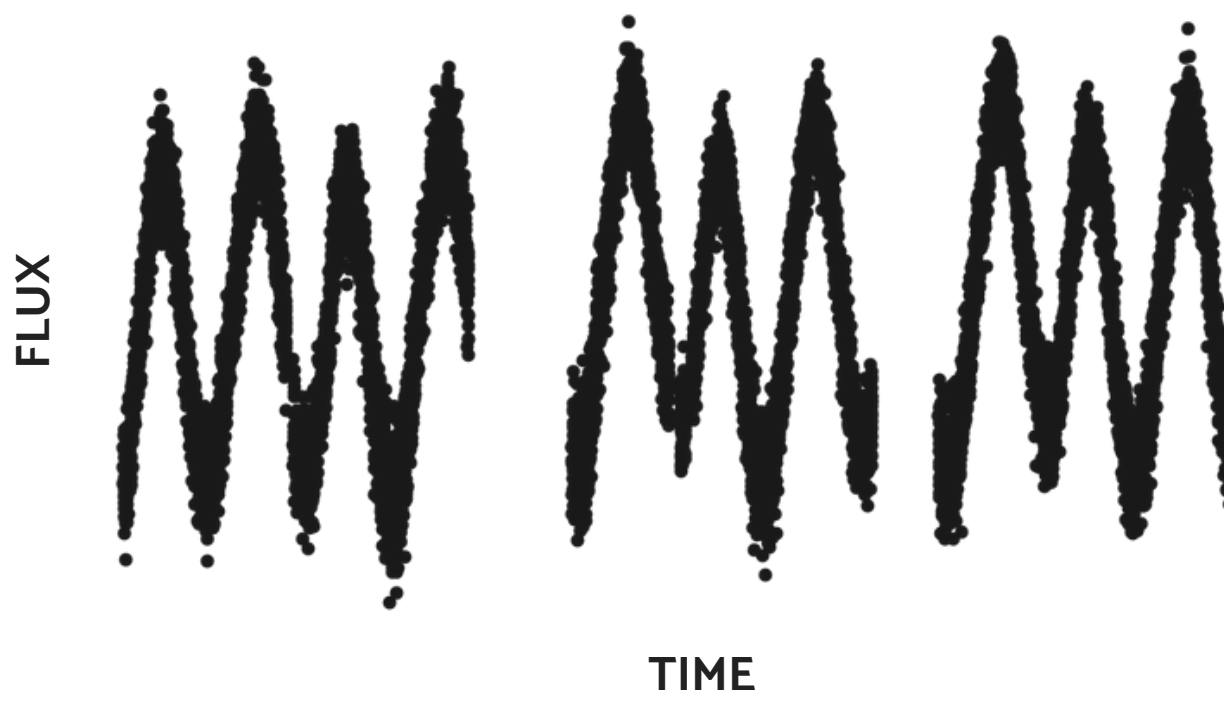
- 200 sec. cadence
- 120 sec. cadence
- 20 sec. cadence



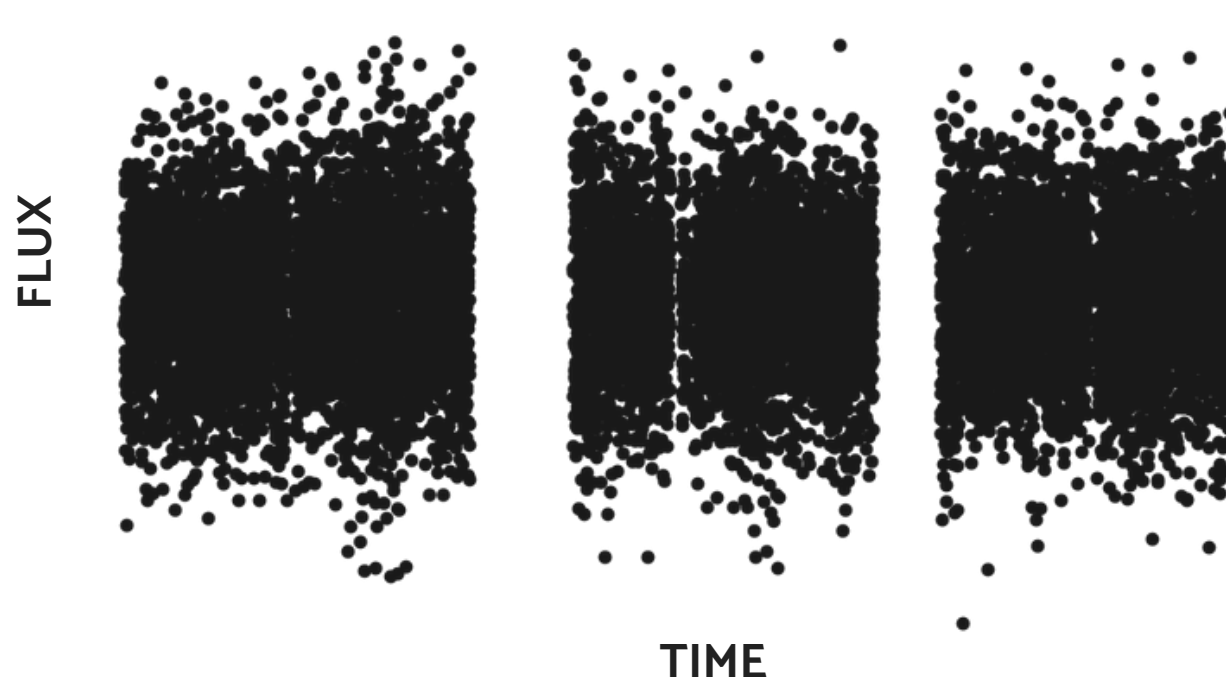
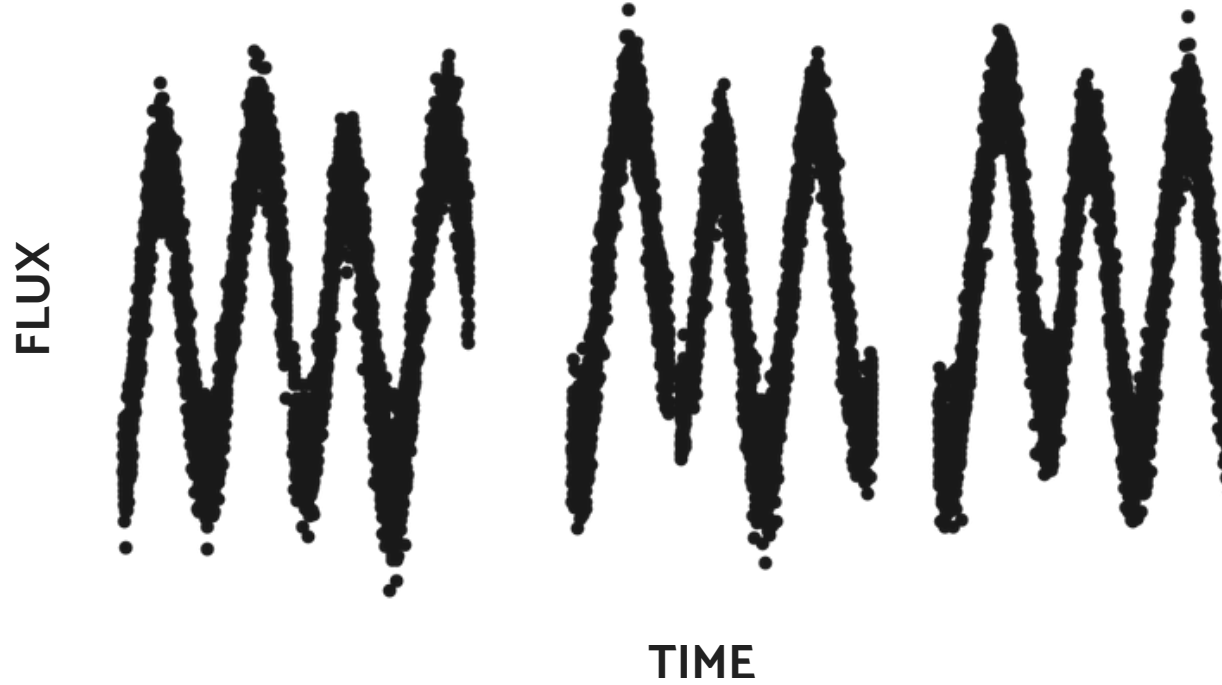
Code in [*Rolo et al. 2026*](#)



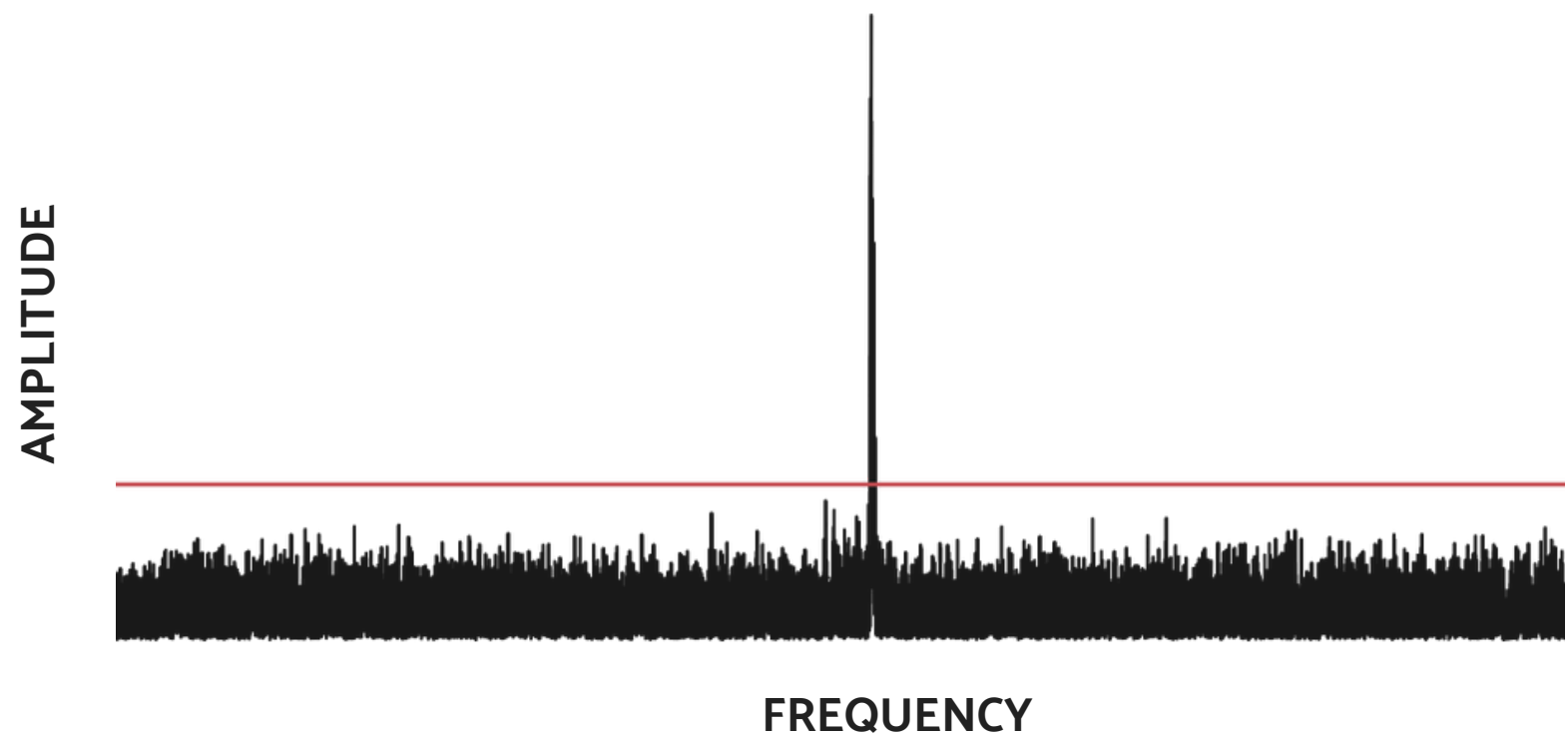
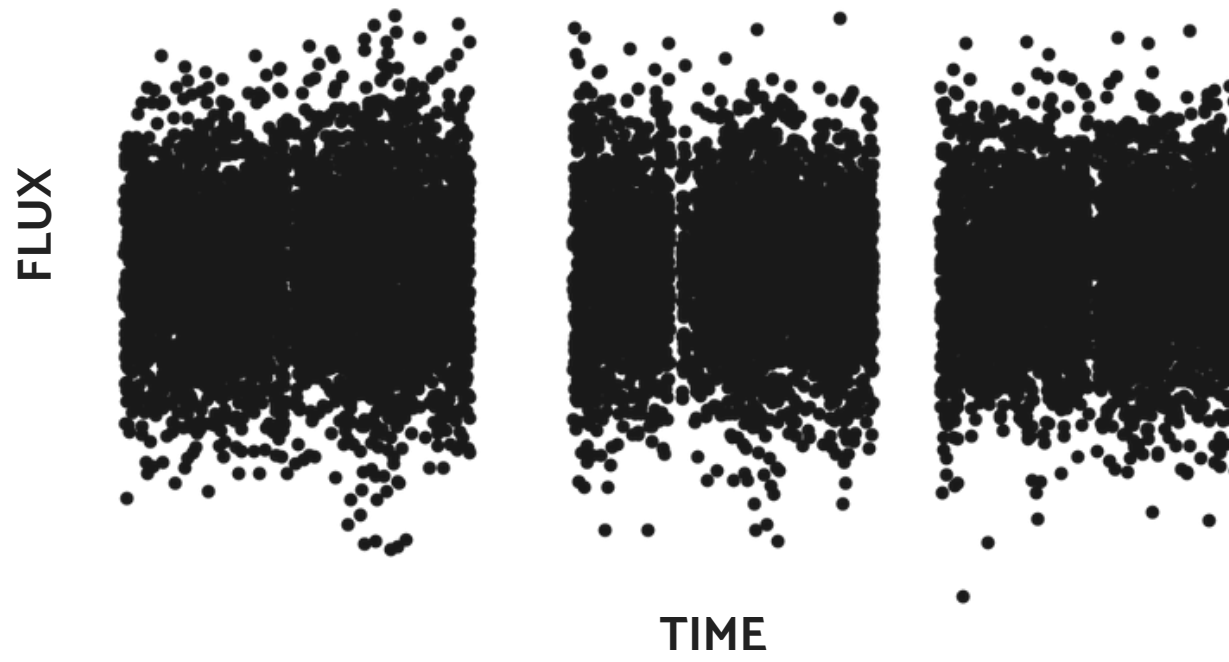
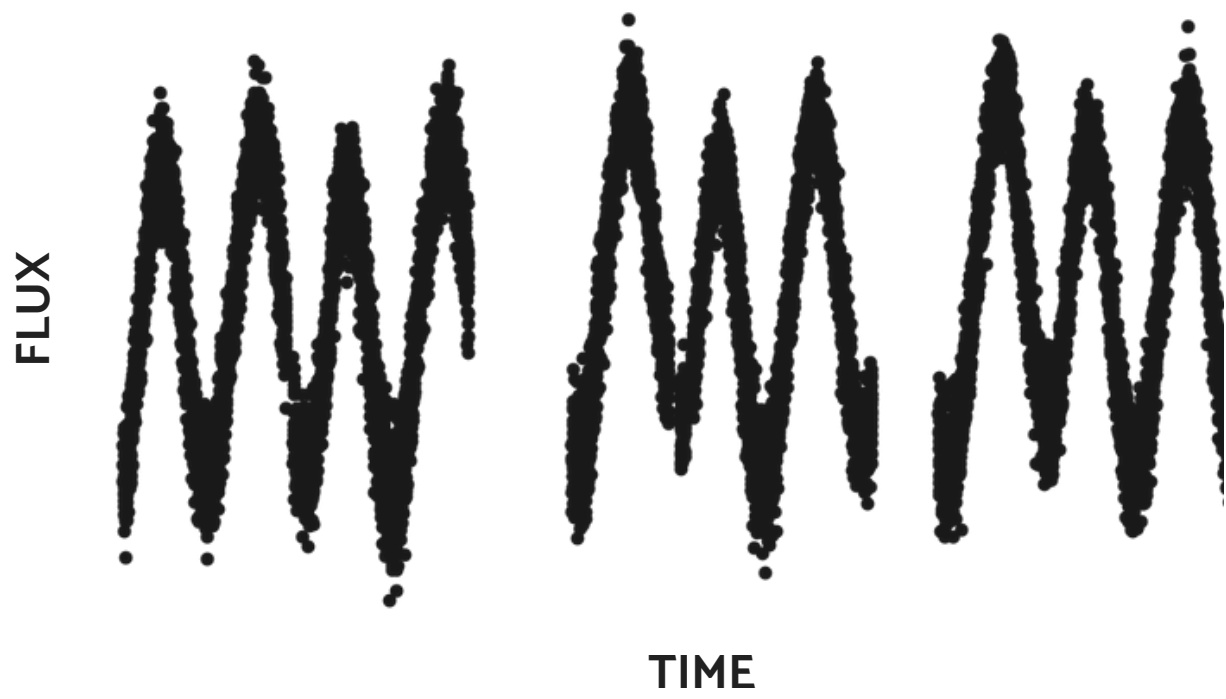
1. DOWNLOAD DOS DADOS



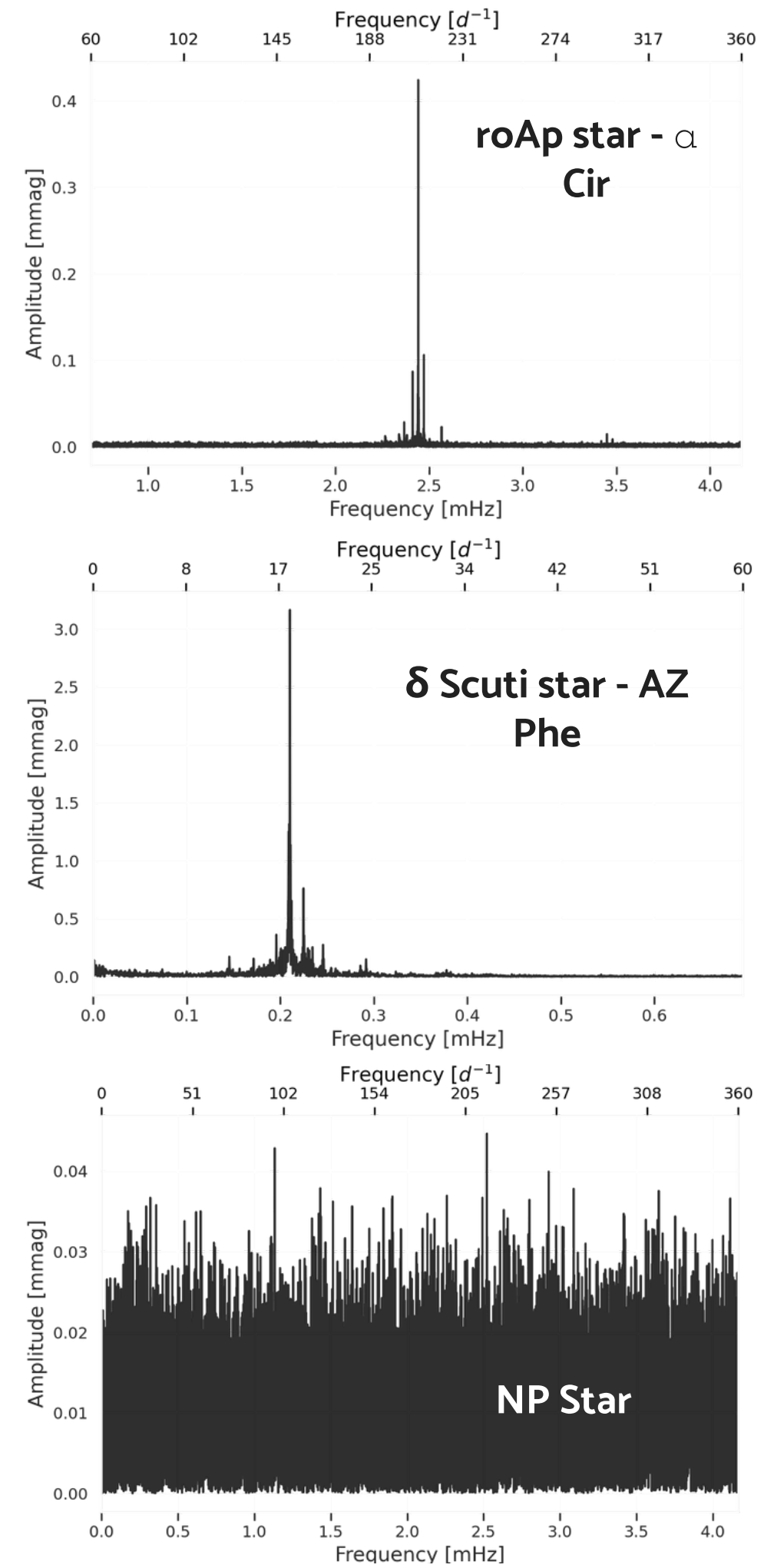
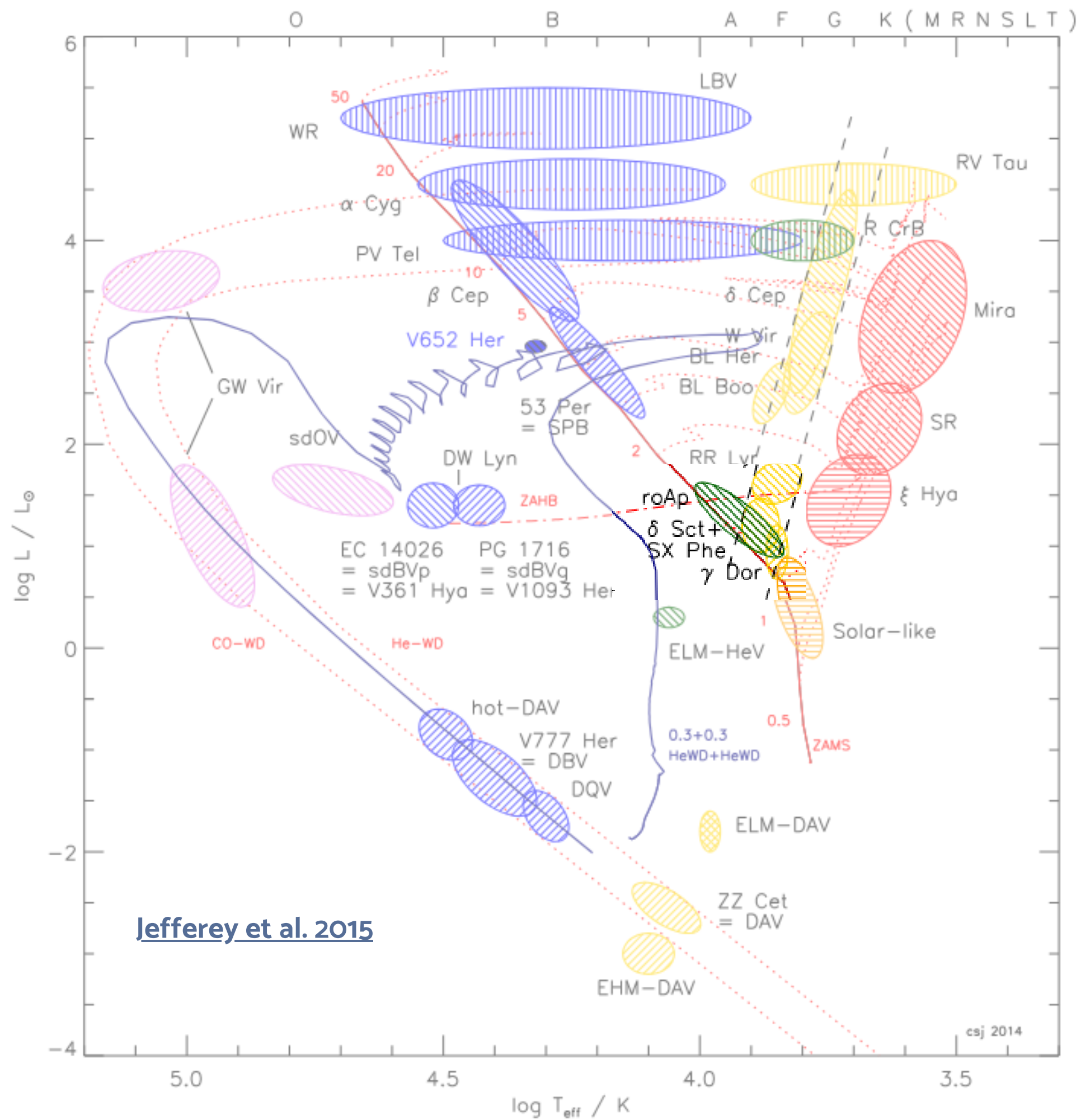
2.LIMPAR OS DADOS



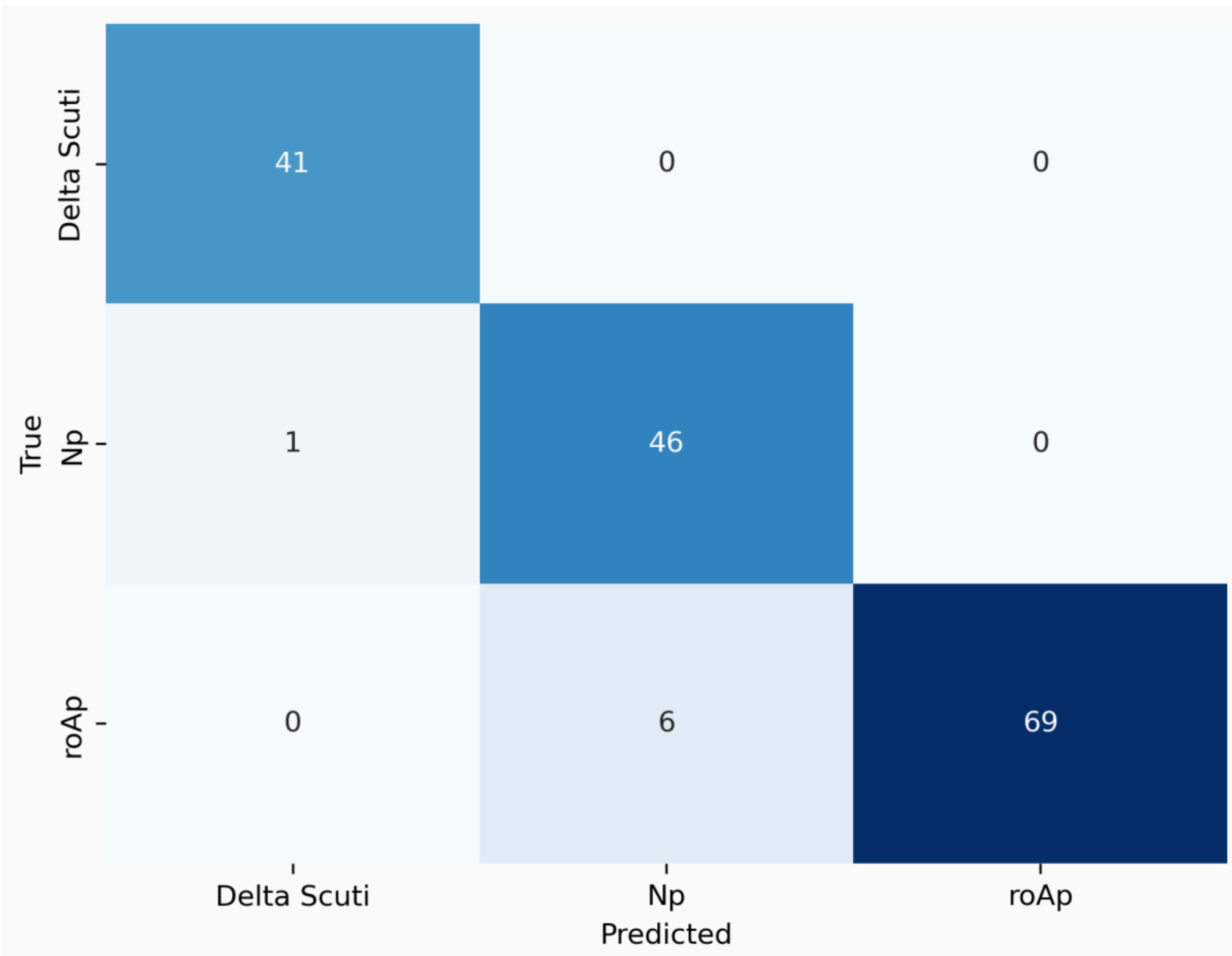
3.DETERMINAR FREQUÊNCIAS



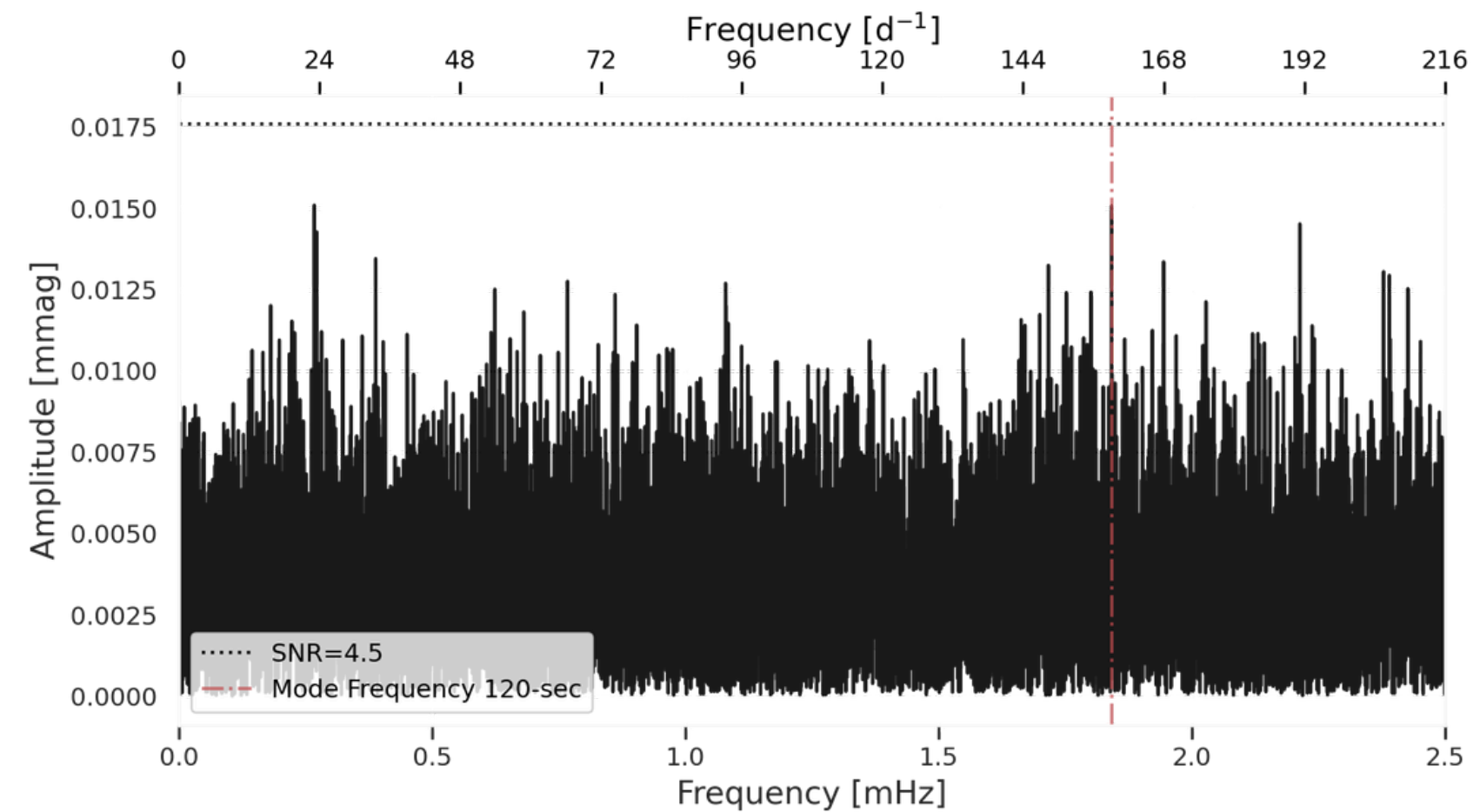
4.CLASSIFICAÇÃO



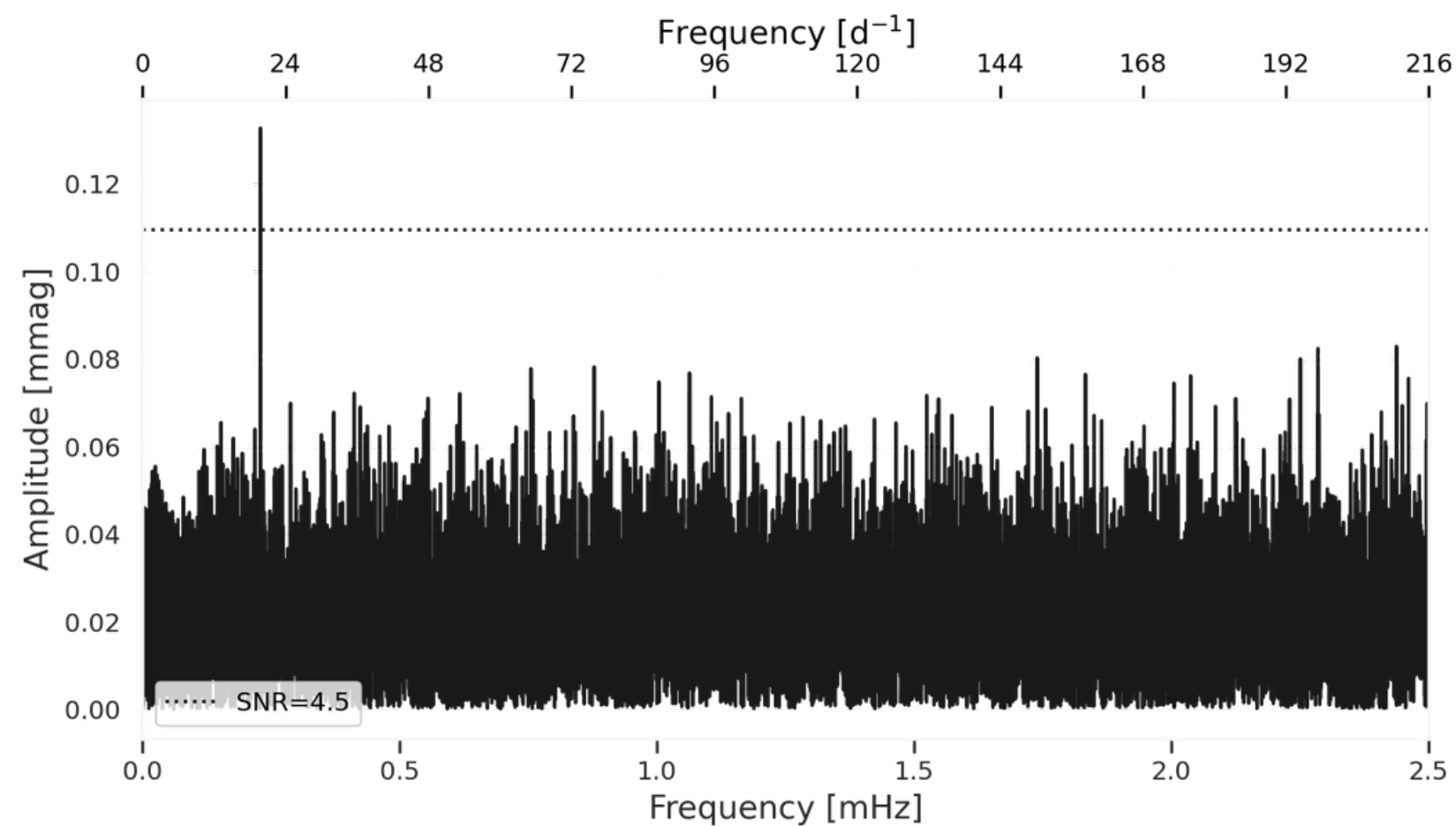
À PROCURA DE ESTRELAS roAp



FALSOS POSITIVOS

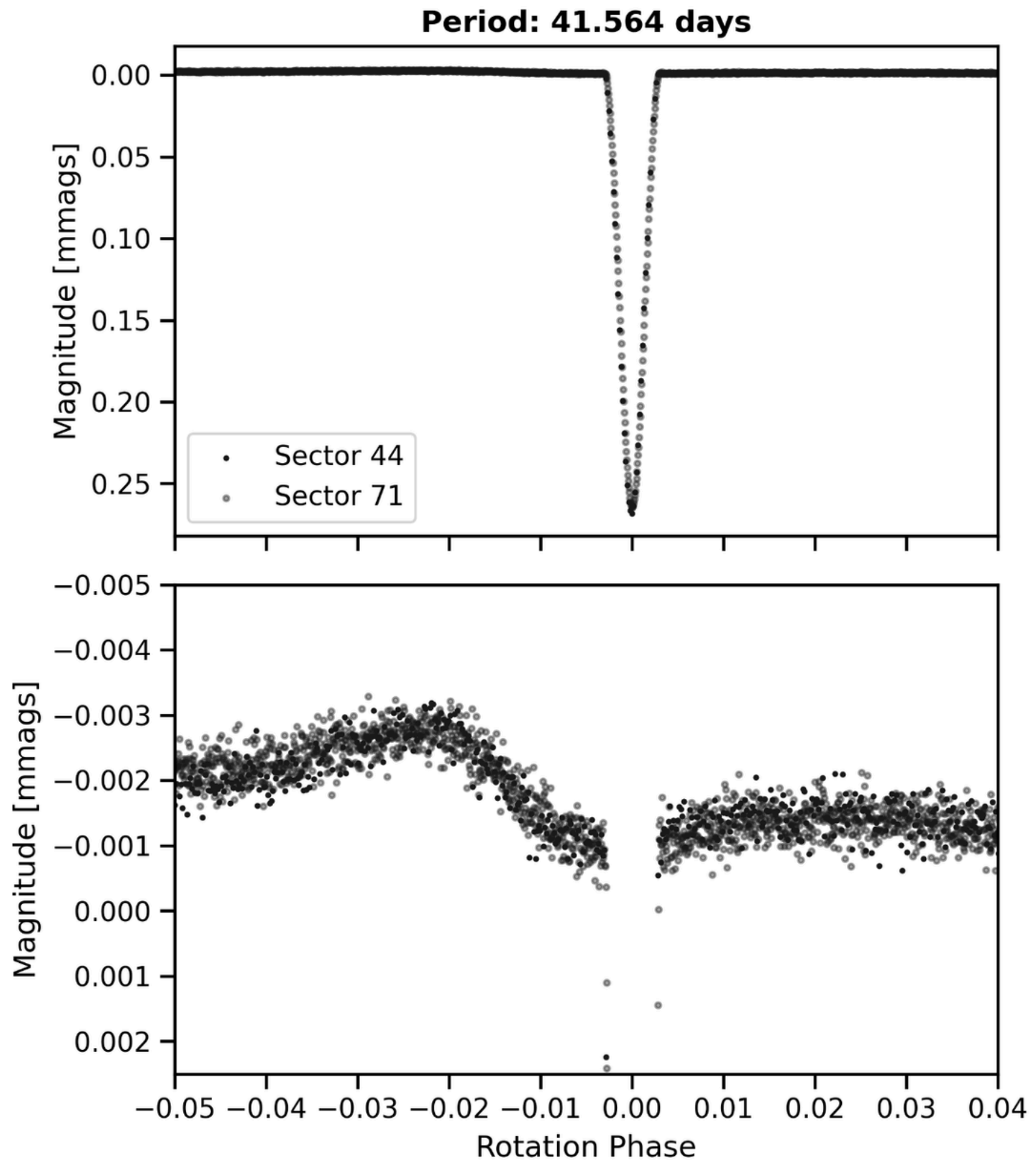


TIC189996908 é
uma estrela
roAp!
(Holdsworth et al. 2021)



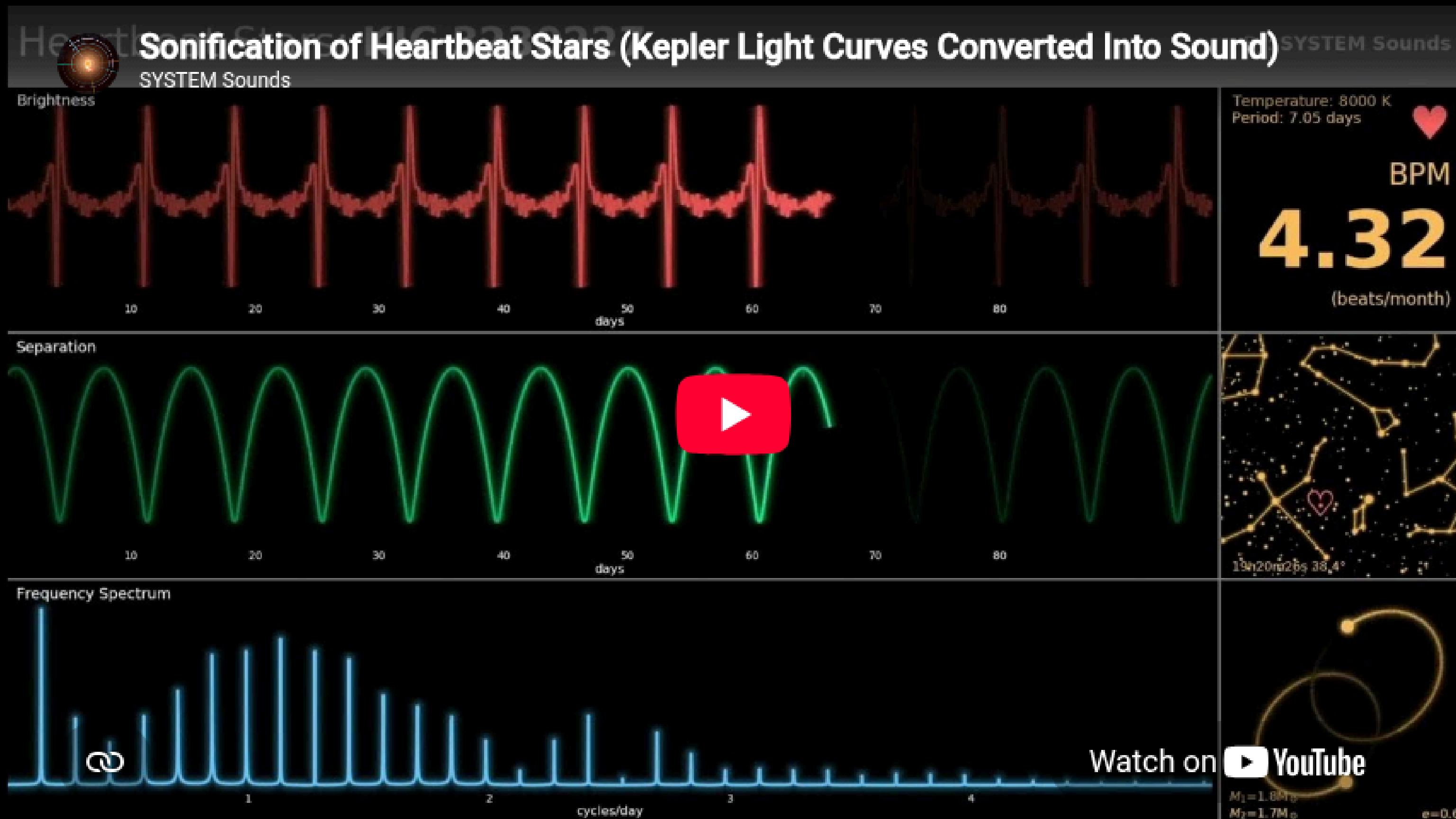
TIC430458926
não é uma
estrela δ Sct!

FALSOS POSITIVOS

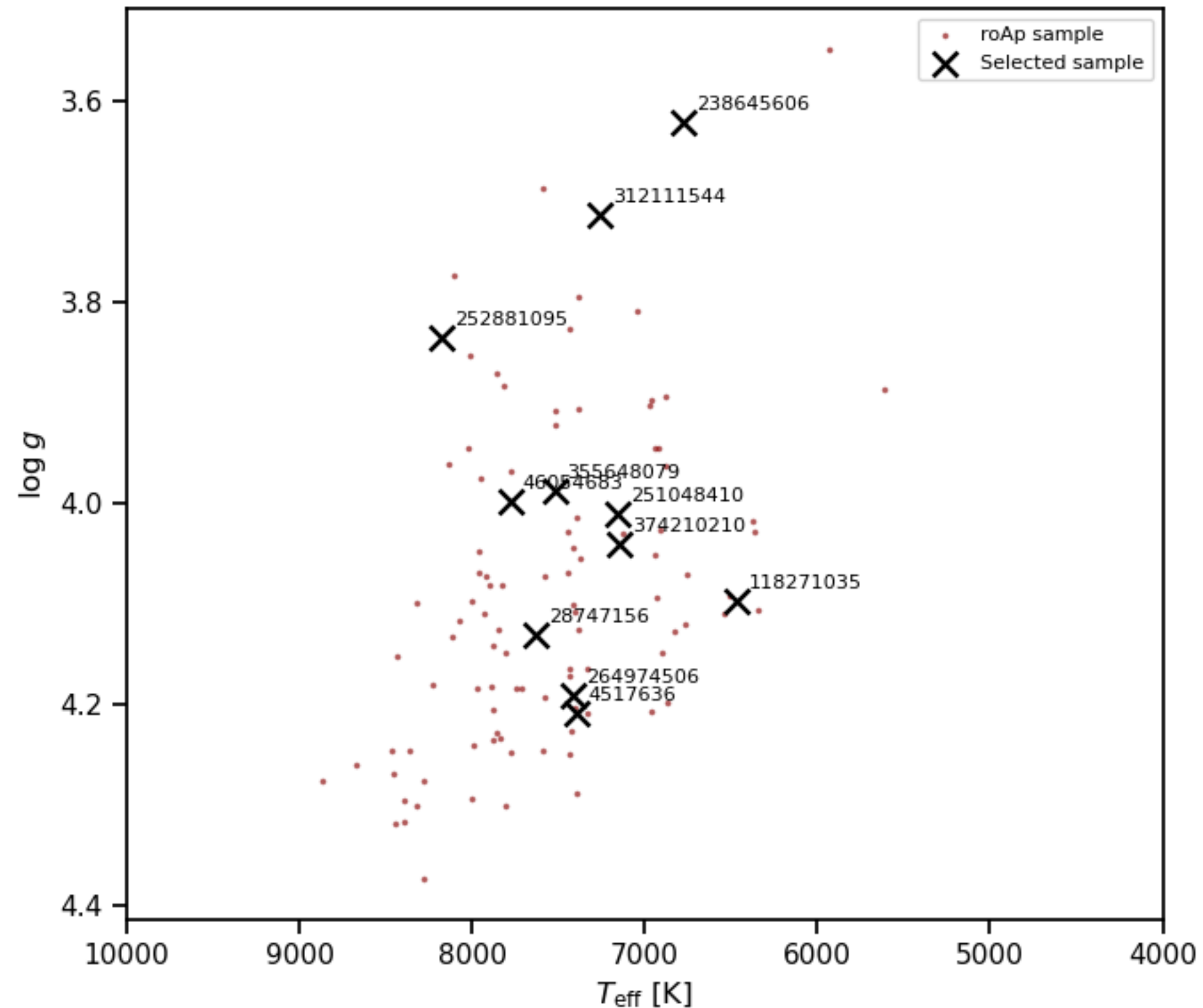


TIC91145541 pode
ser um sistema de
estrelas de
**batimento
cardíaco!**

FALSO POSITIVOS

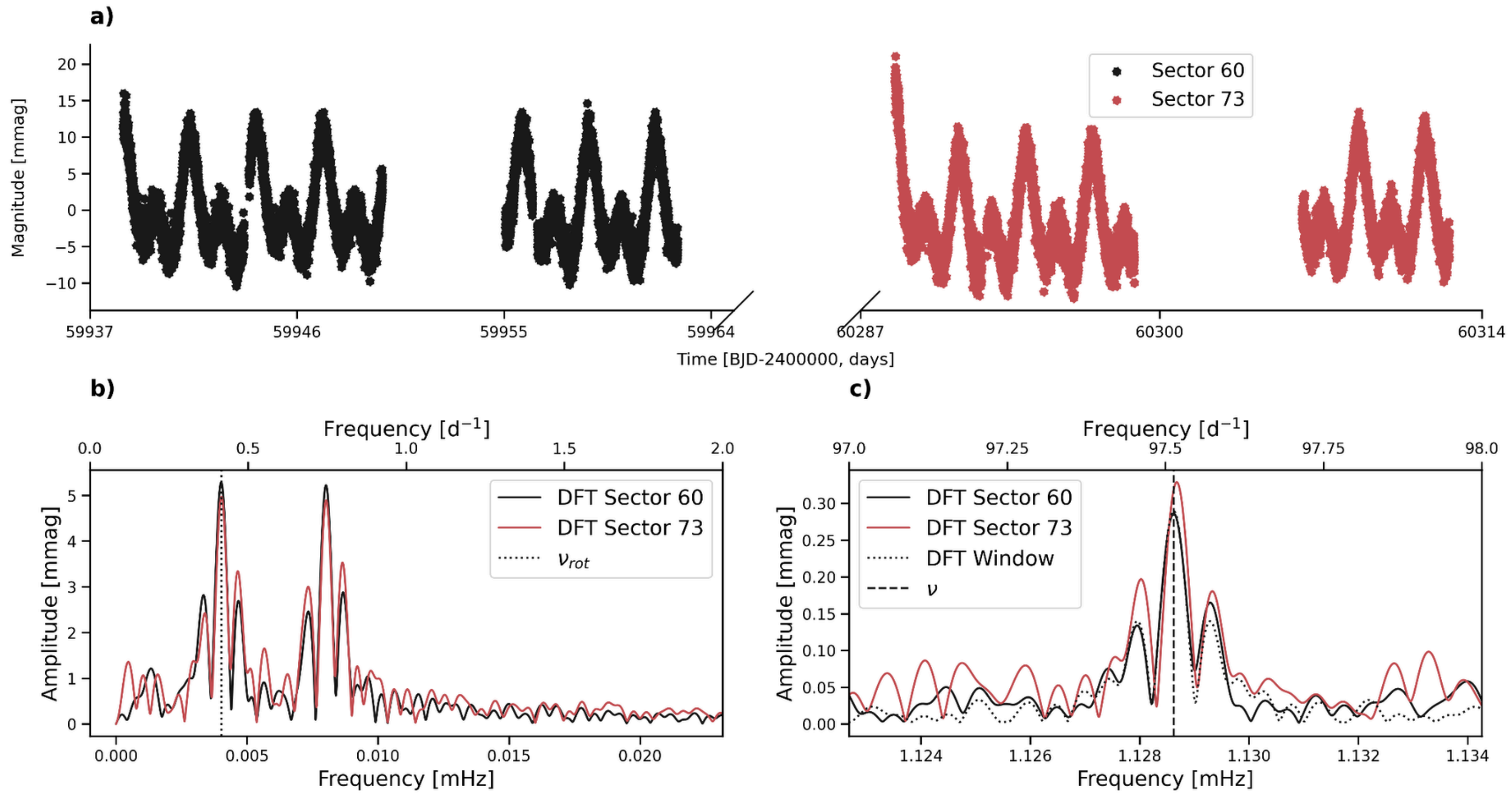


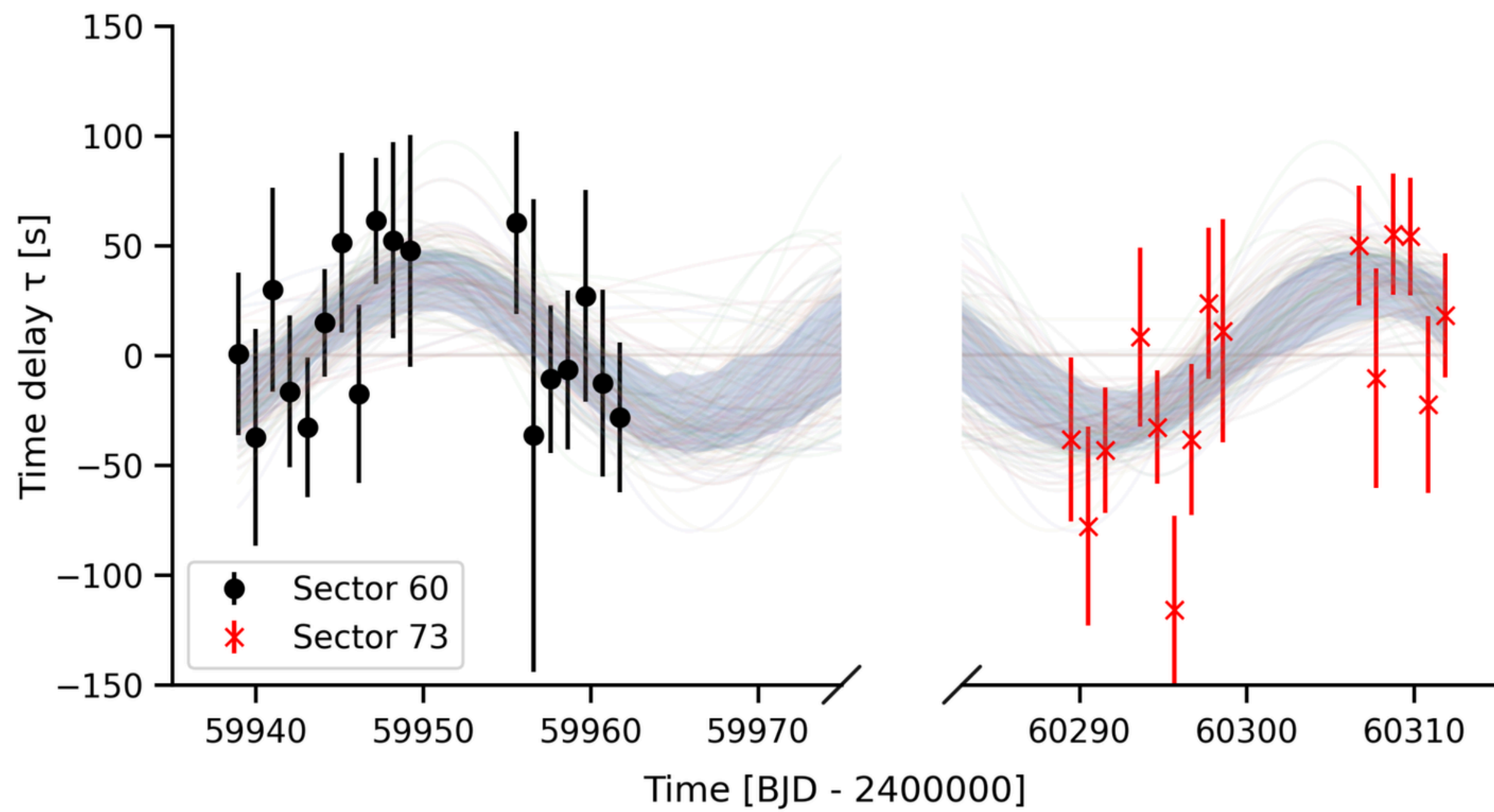
Ao explorar dados com uma cadência de 200 segundos de uma amostra de estrelas Ap conhecidas, classificadas espectroscopicamente com o LAMOST, identificámos **11 novas estrelas roAp**.



O QUE ENCONTRAMOS

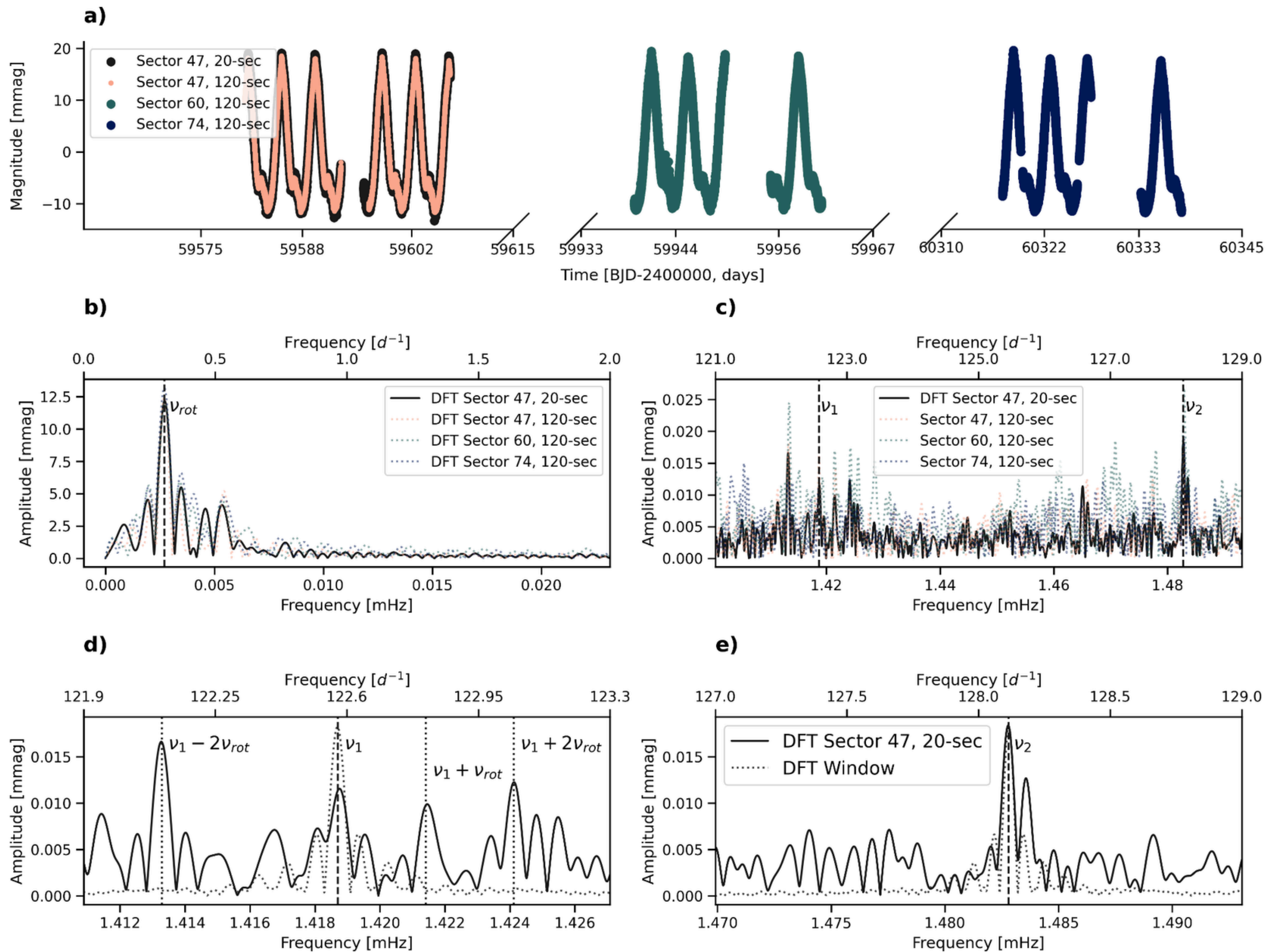
RESULTS - TIC 252881095



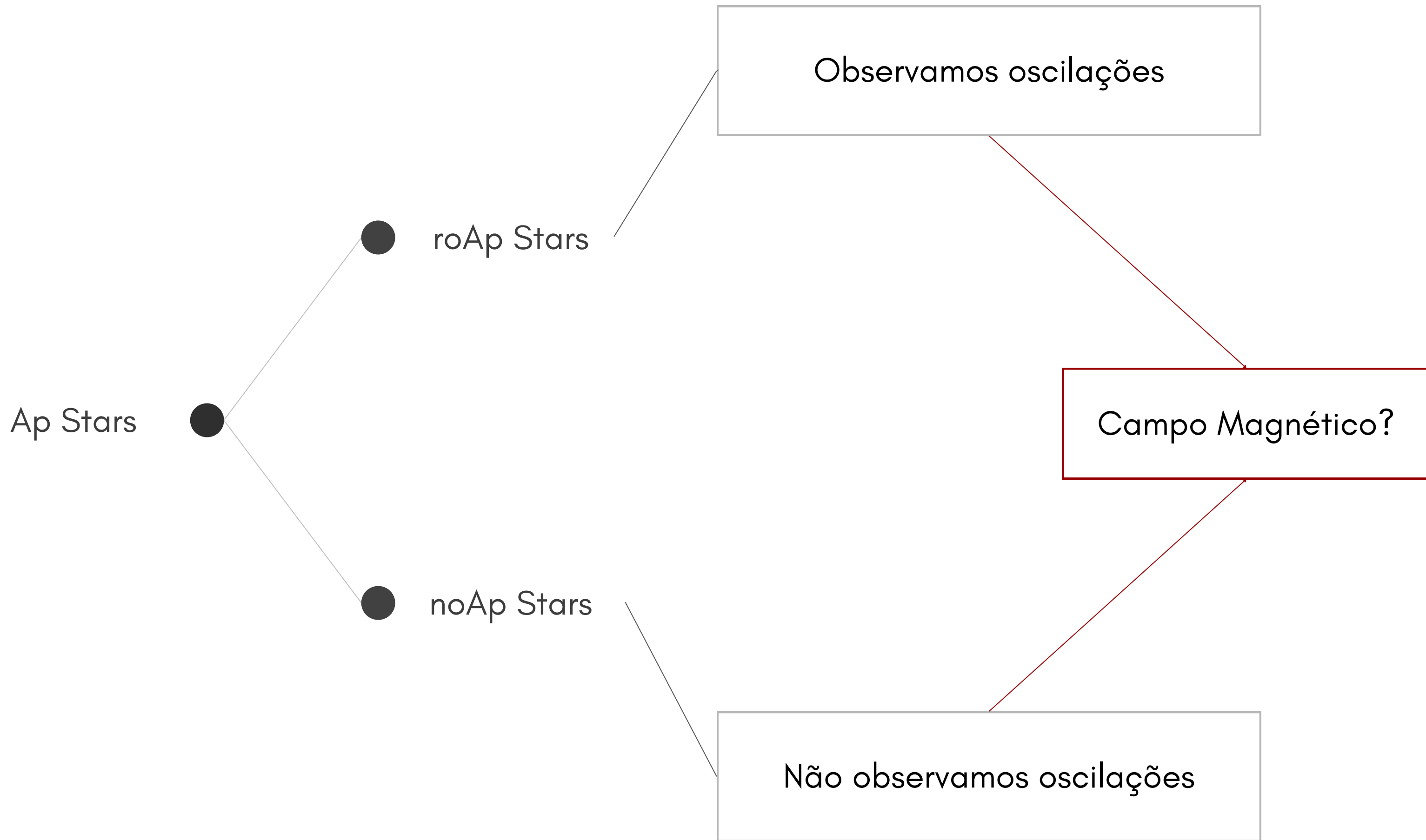


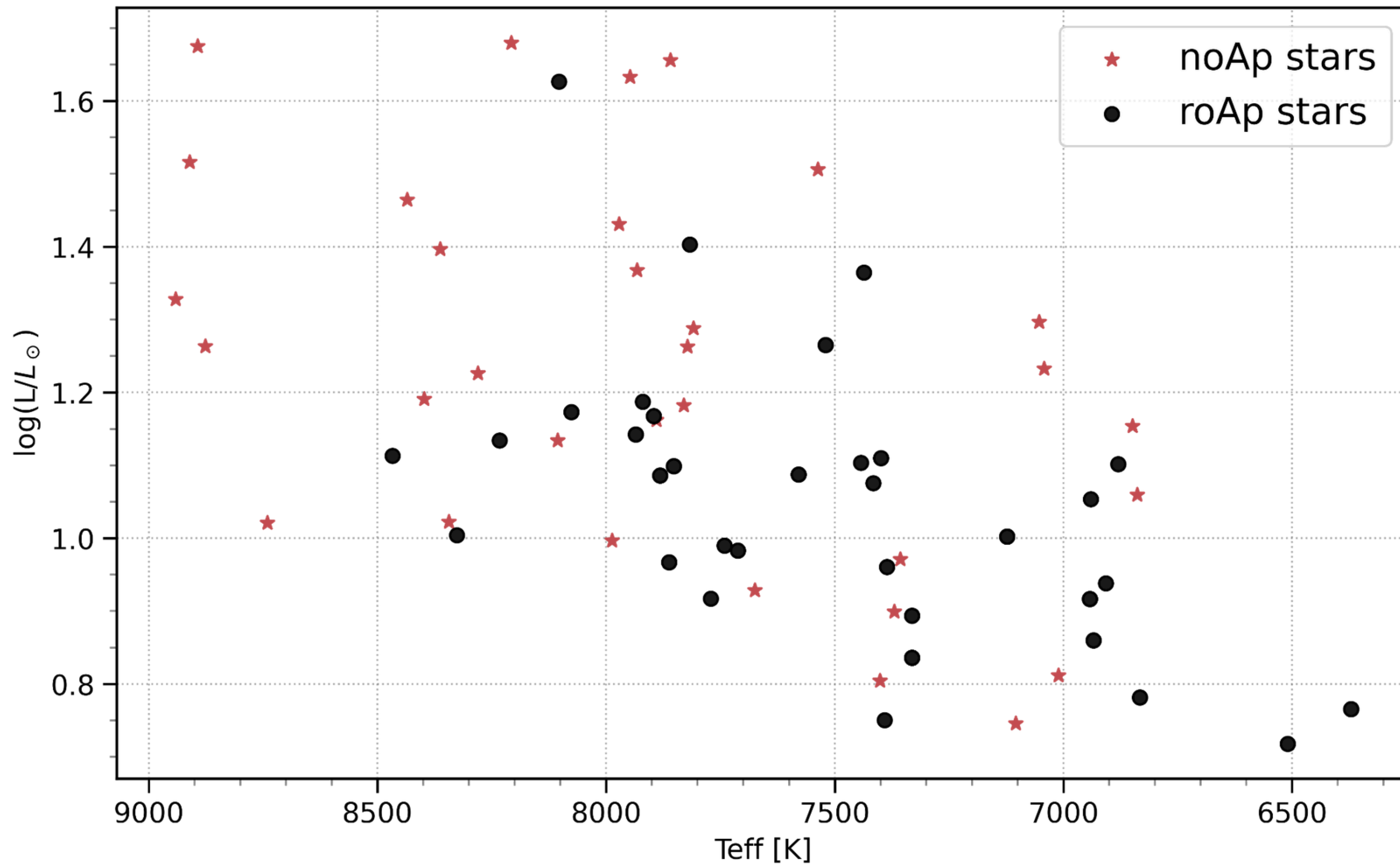
RESULTS - TIC 252881095

RESULTS - 49 Cam



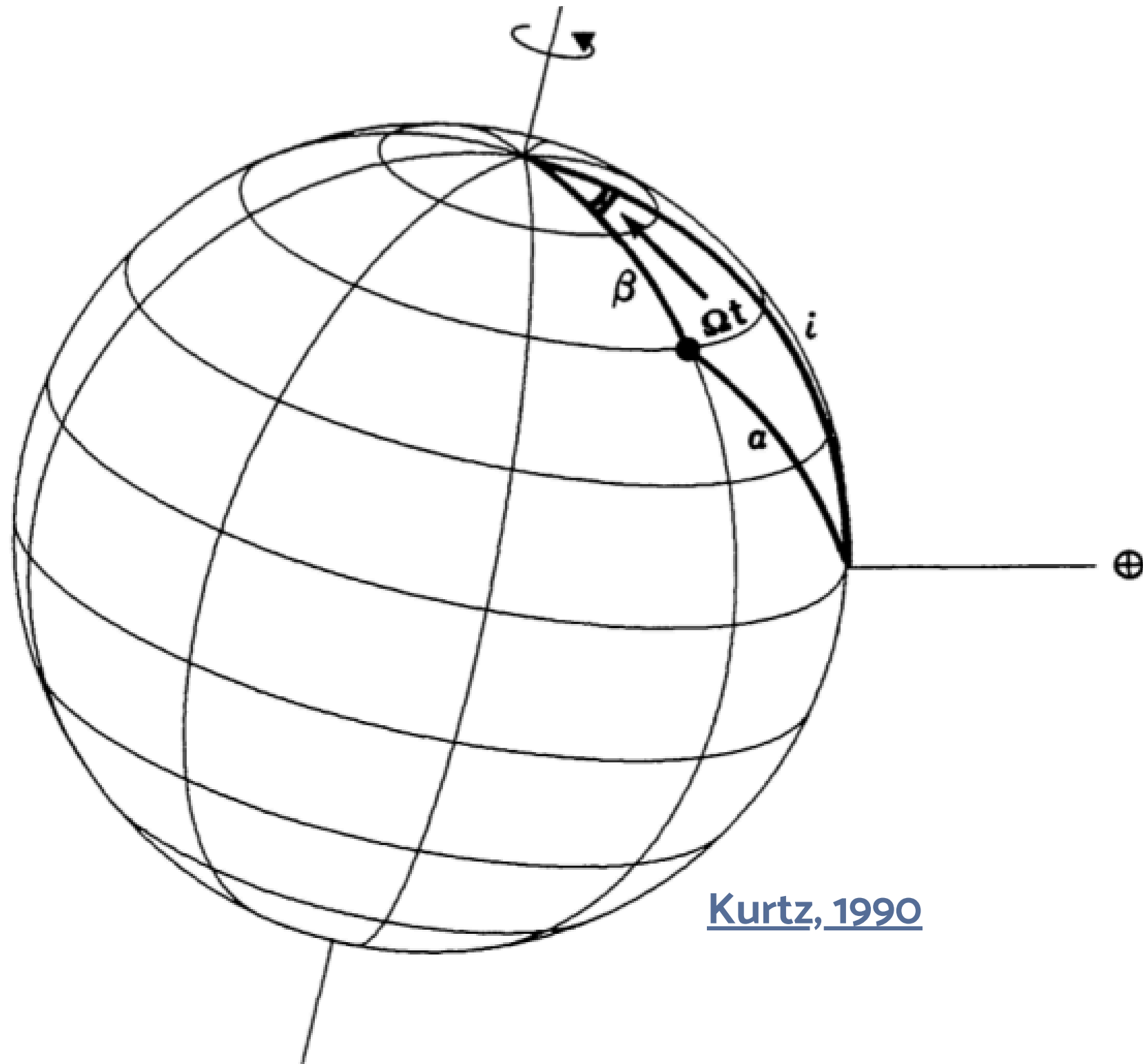
OBJETIVO





A INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO B_d

C1, C2 e C3 são funções do **limb darkening**

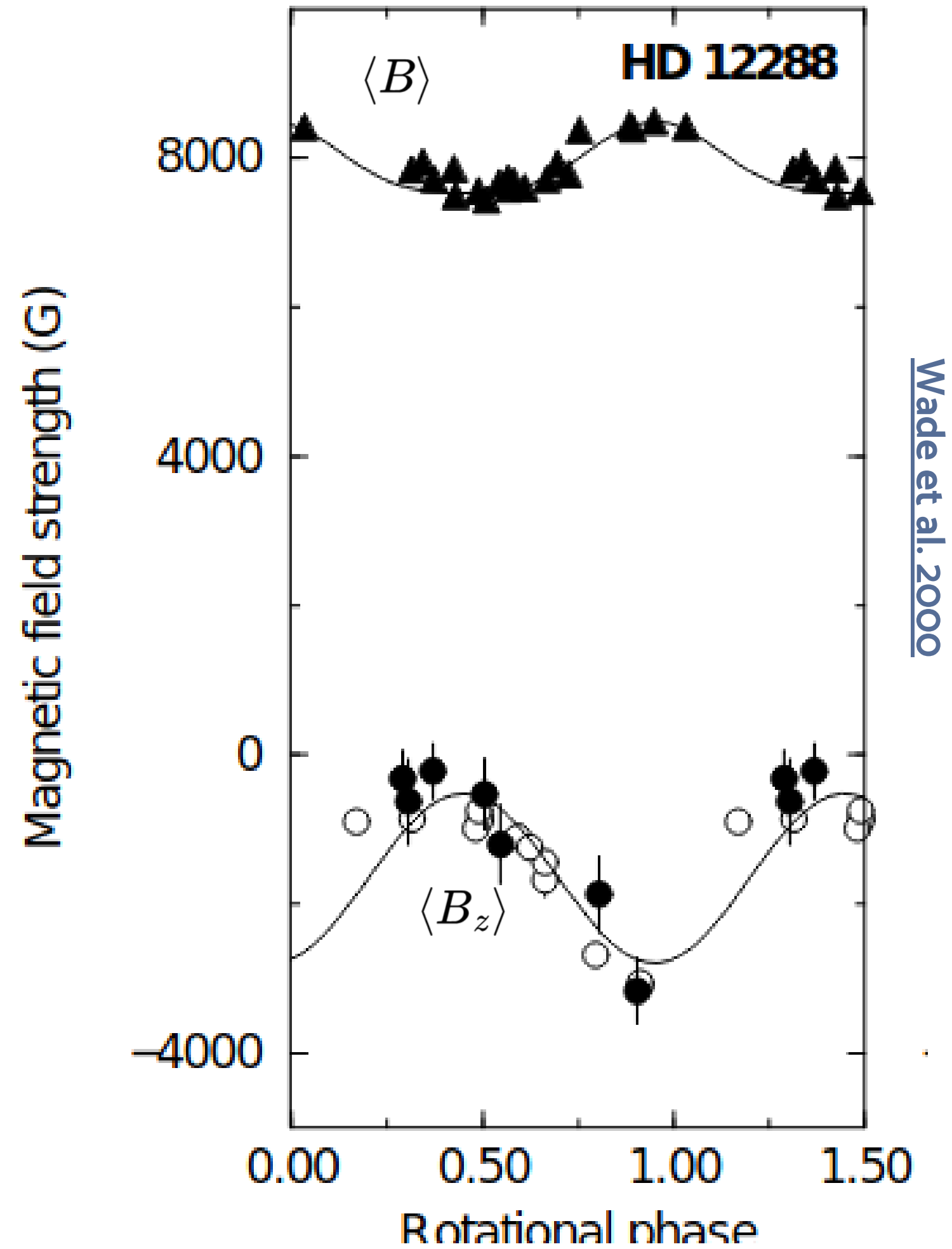
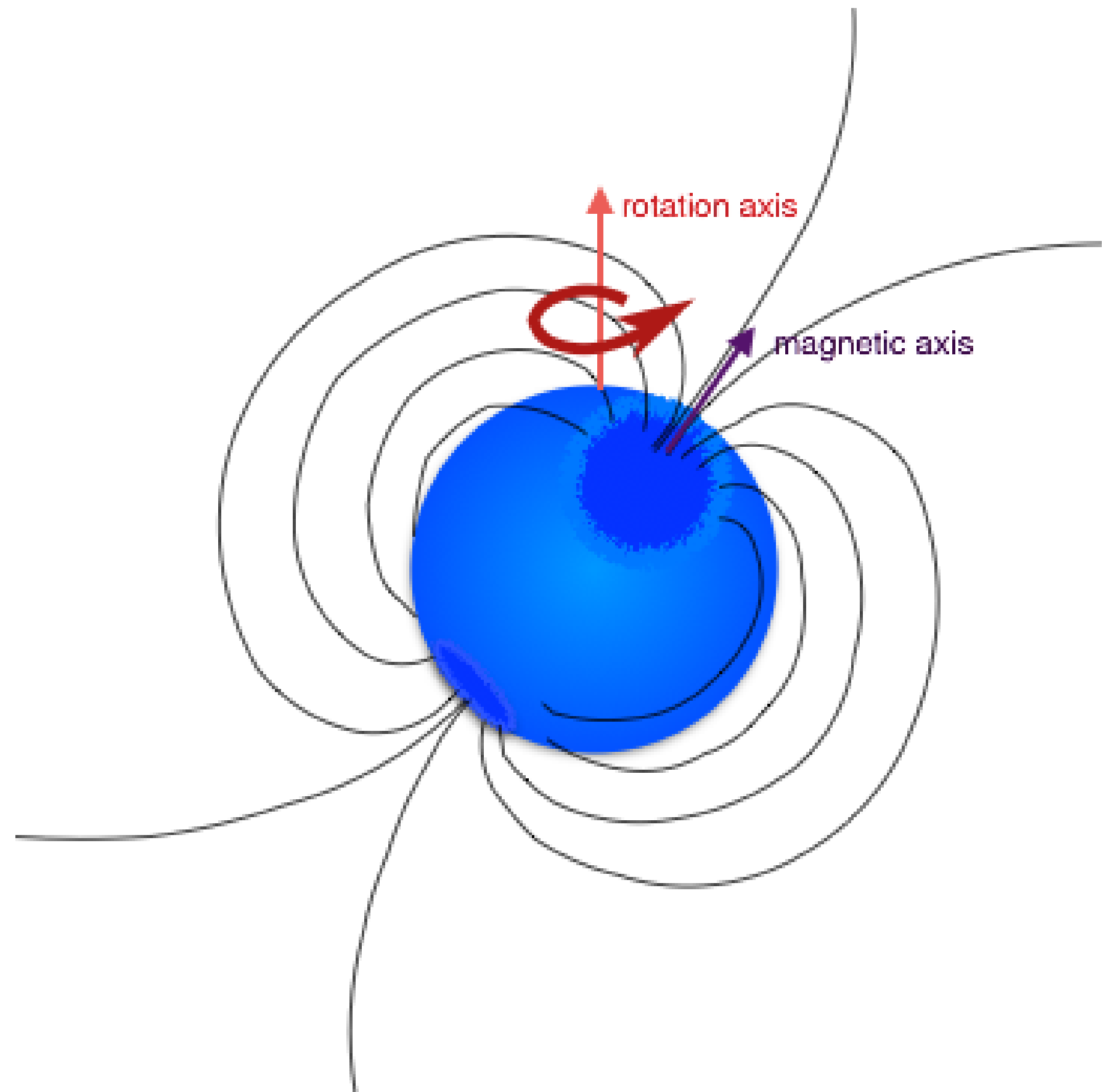


$$\langle B_z \rangle = B_d C_1 \cos \alpha$$

$$\langle B \rangle = B_d [C_2 \cos^2 \alpha + C_3 \sin^2 \alpha]$$

Queremos determinar a intensidade do **campo magnético nos polos** através de simulações numéricas.

O MODELO DO ROTADOR OBLÍQUO



1. GERARIE



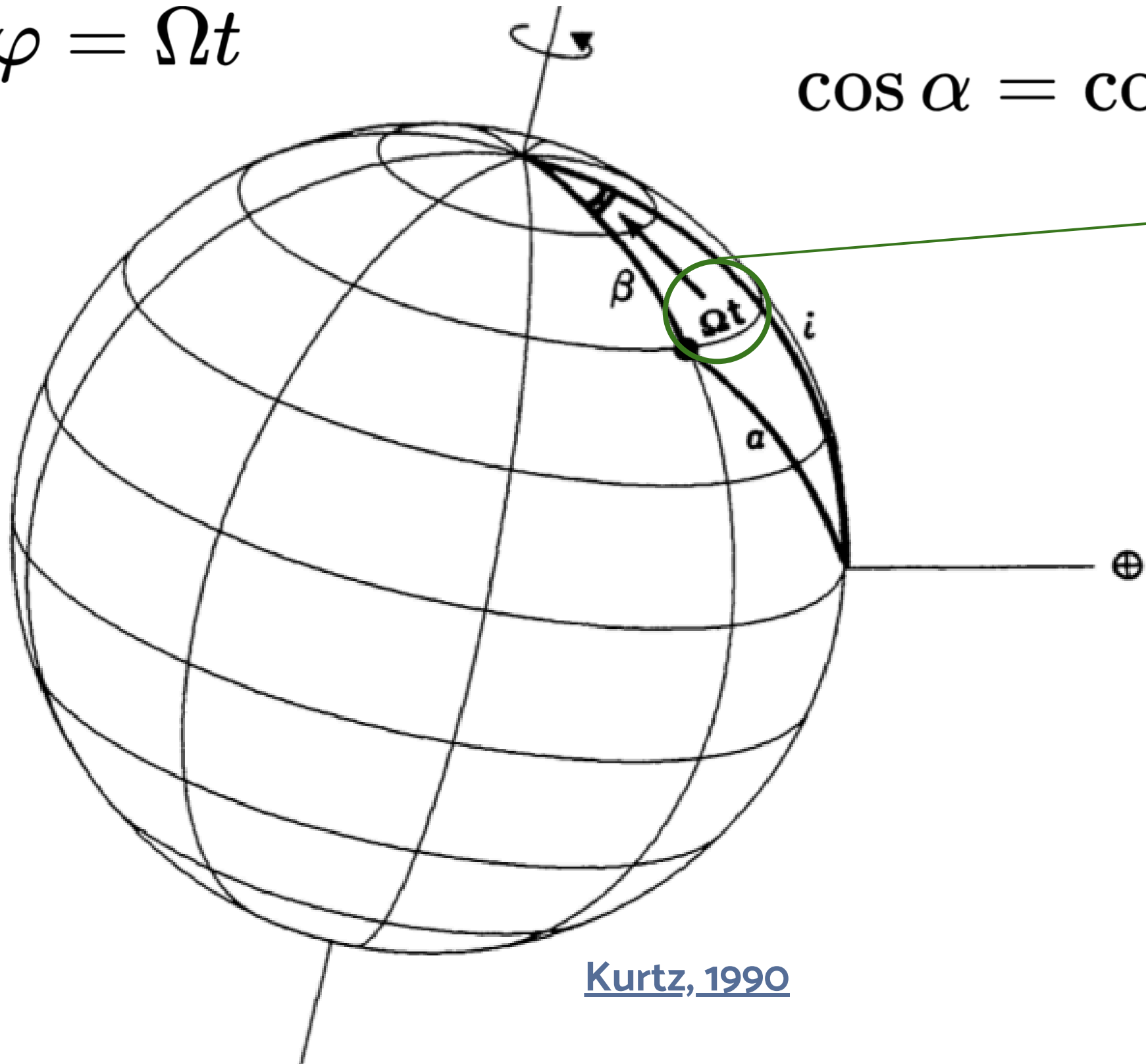
Kurtz, 1990

N observations = N phases φ

2. Gerar φ

$$\varphi = \Omega t$$

$$\cos \alpha = \cos i \cos \beta + \sin i \sin \beta \cos \varphi$$



Kurtz, 1990

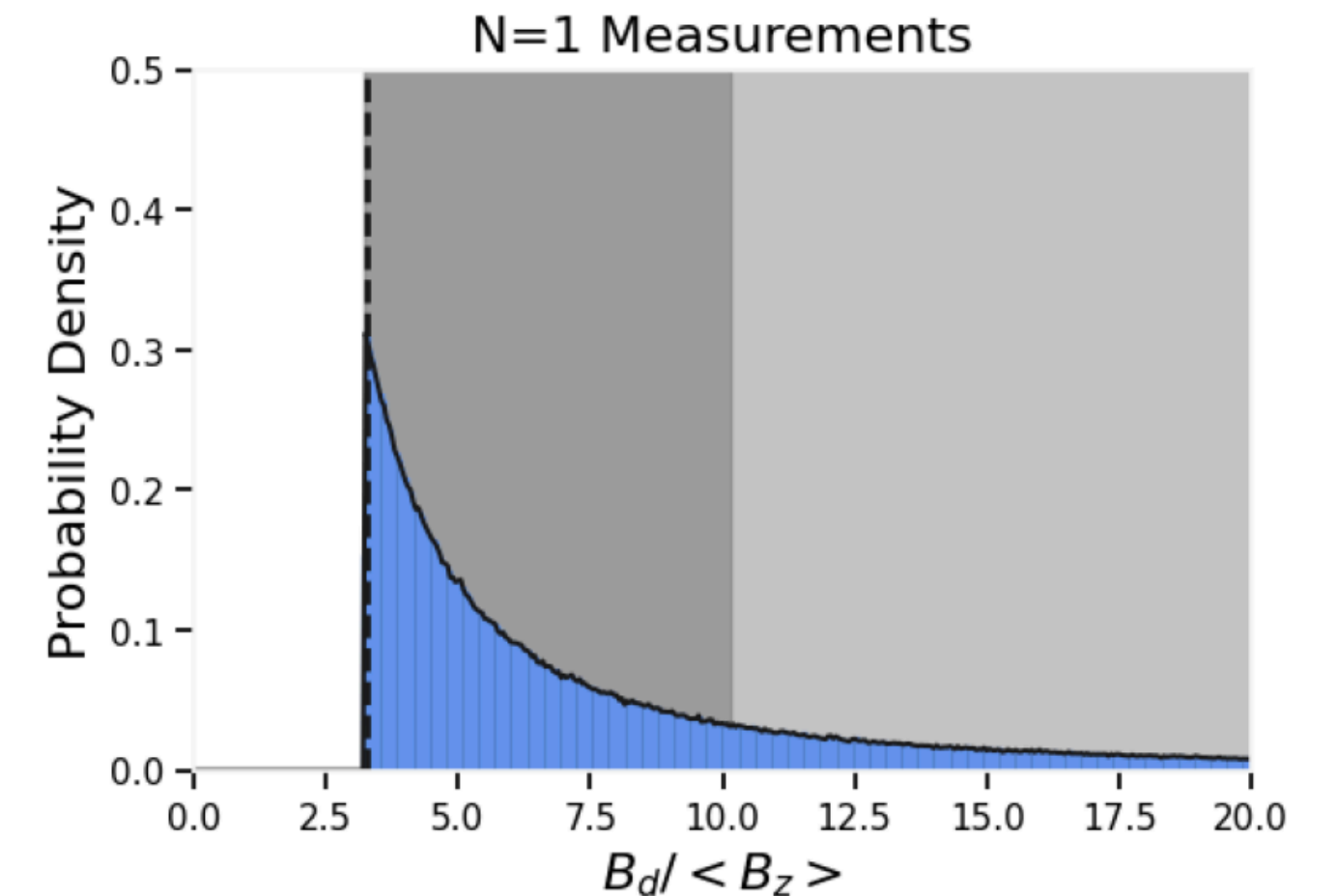
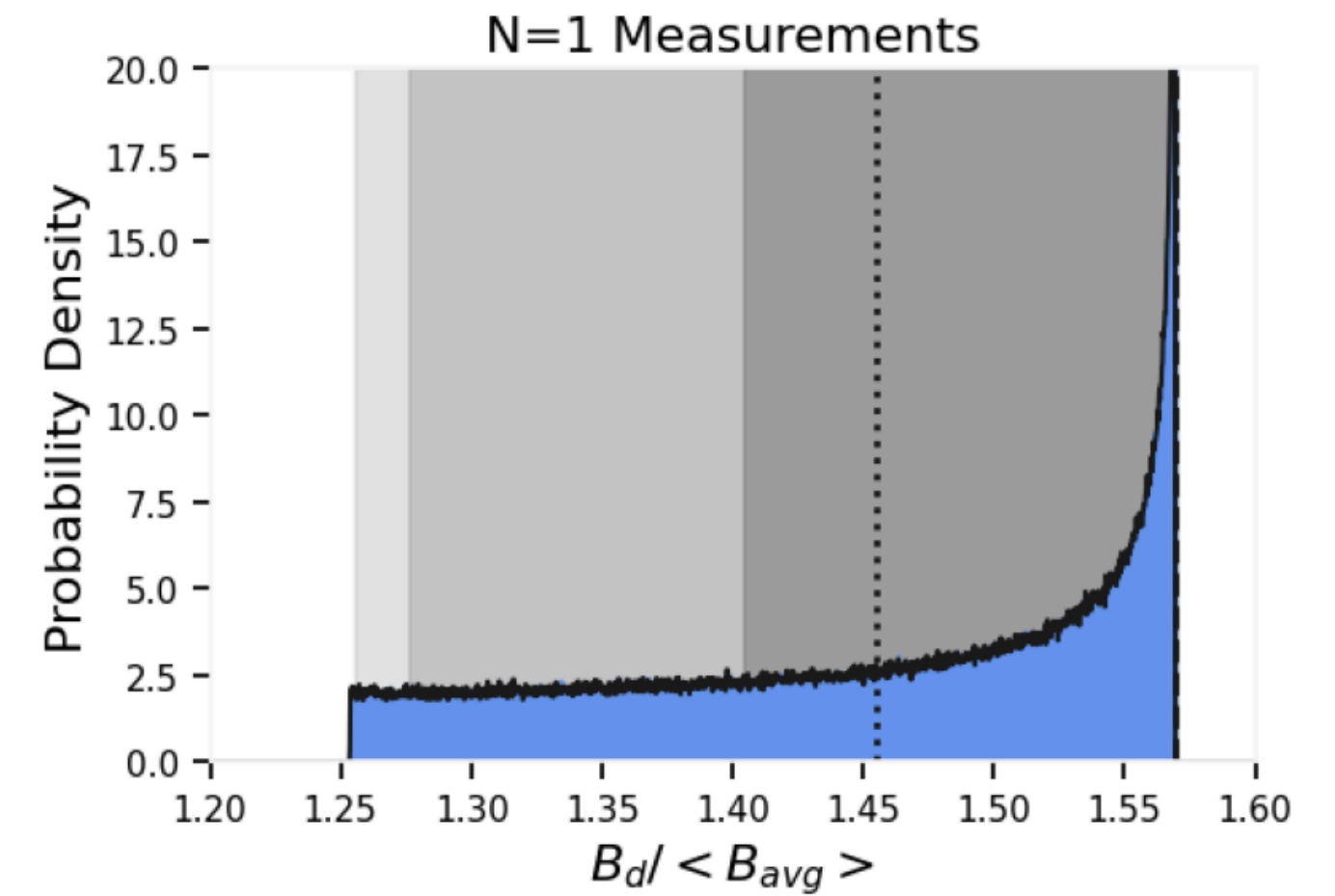
Como descrito em [Kochukhov 2024](#)

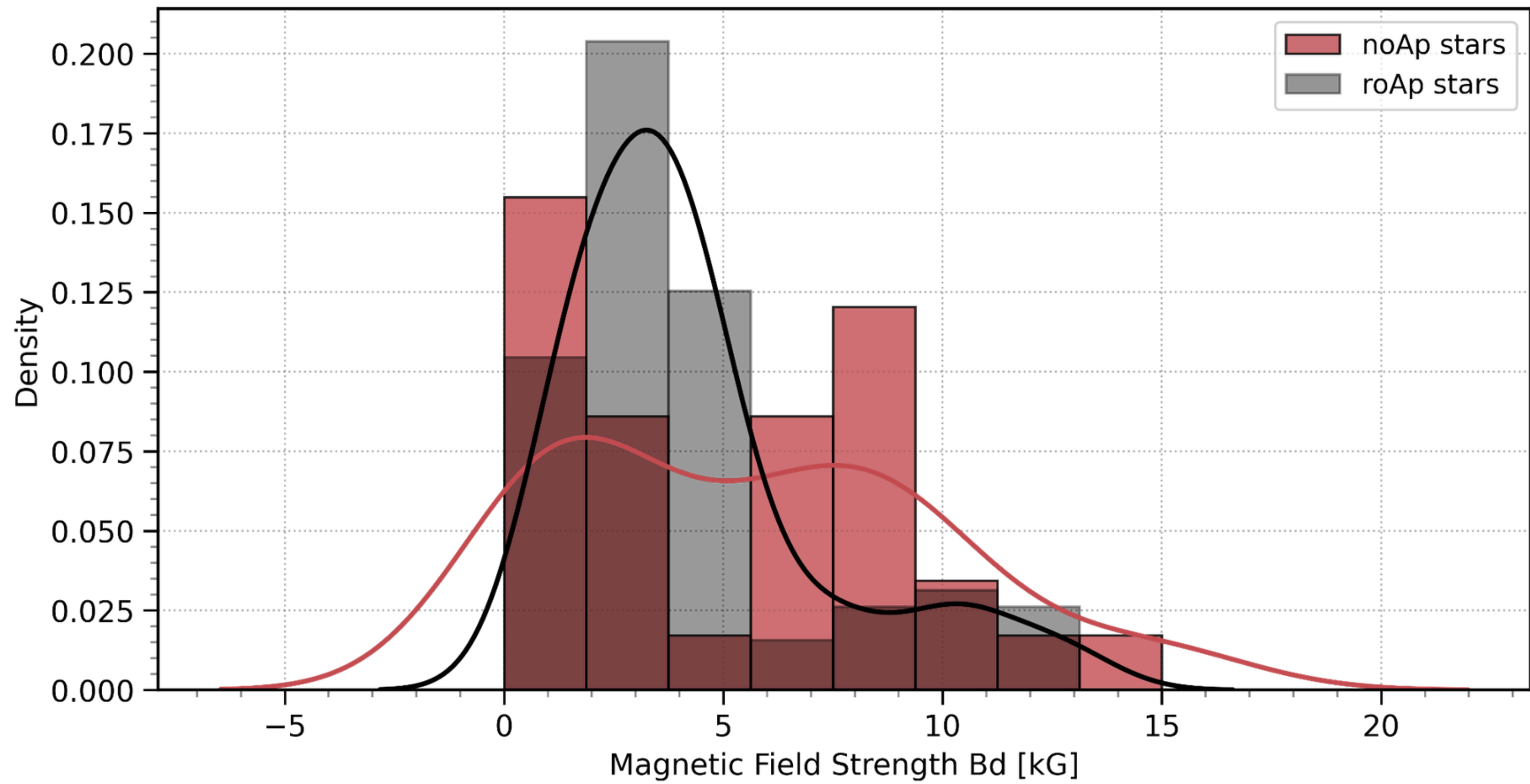
DETERMINAR A INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO NOS POLOS

$$\langle B_z \rangle_{\text{rms}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle B_z \rangle_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \langle B \rangle_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle B \rangle_i$$

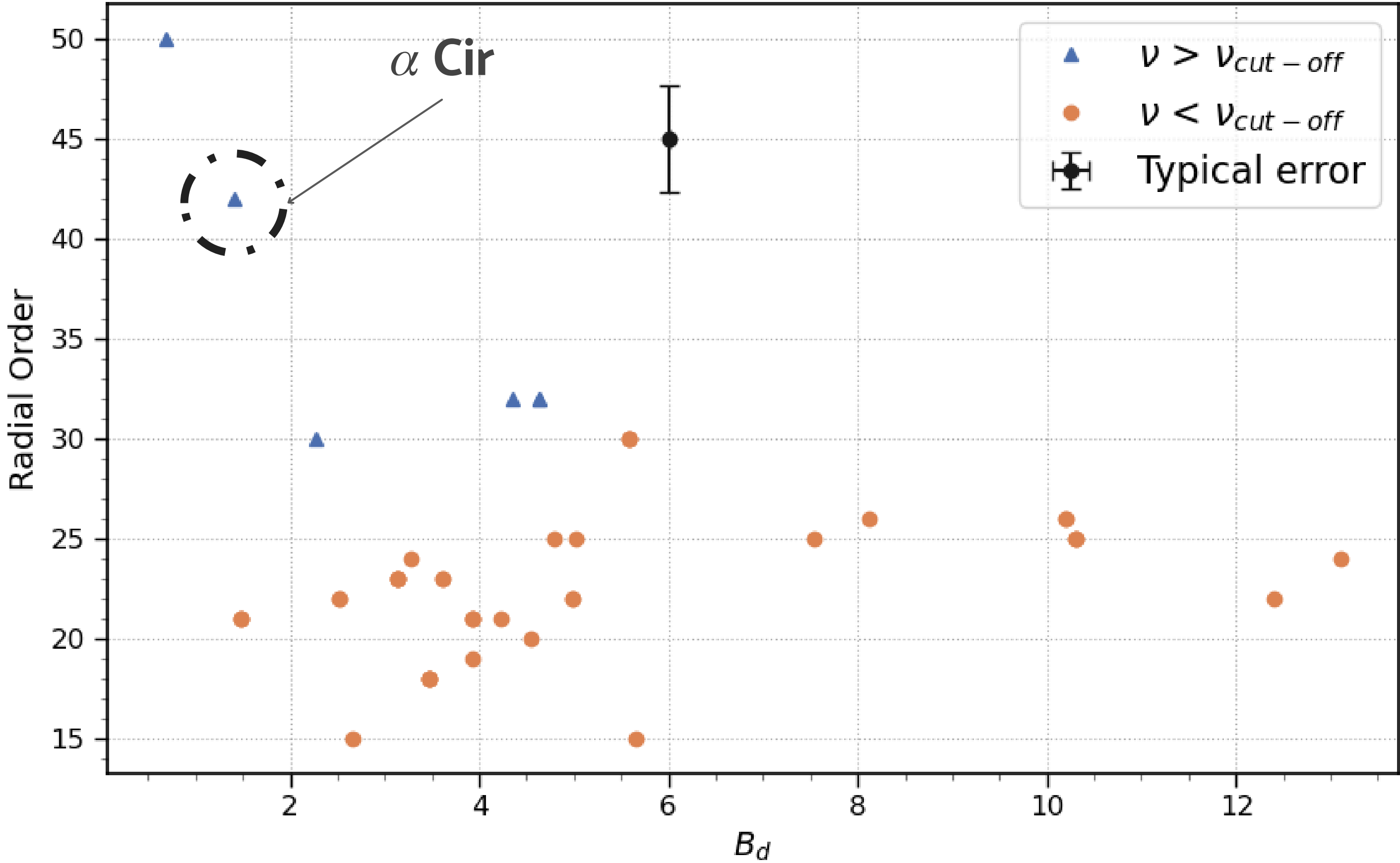
Obtemos distribuições para,

$$B_d / \langle B_z \rangle_{\text{rms}} \text{ and } B_d / \langle B \rangle_{\text{avg}}$$

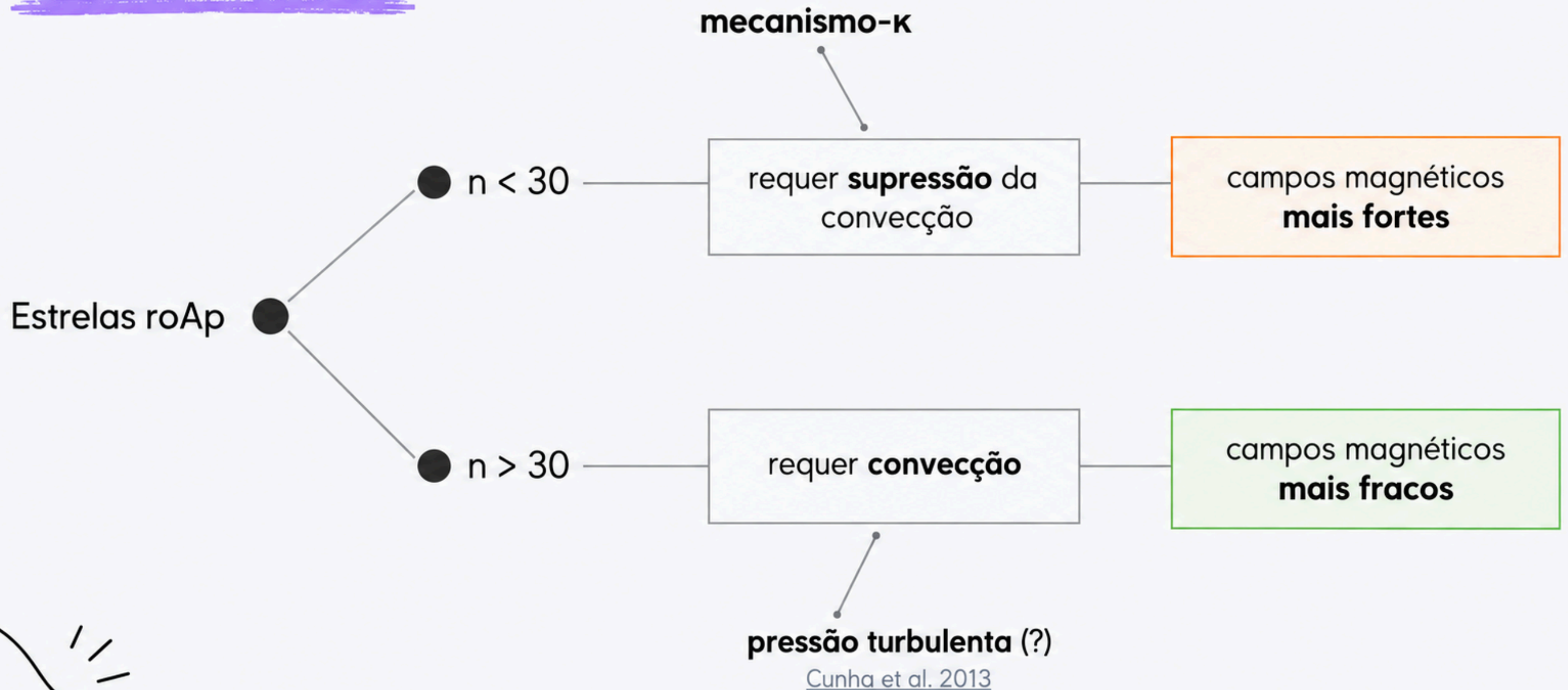


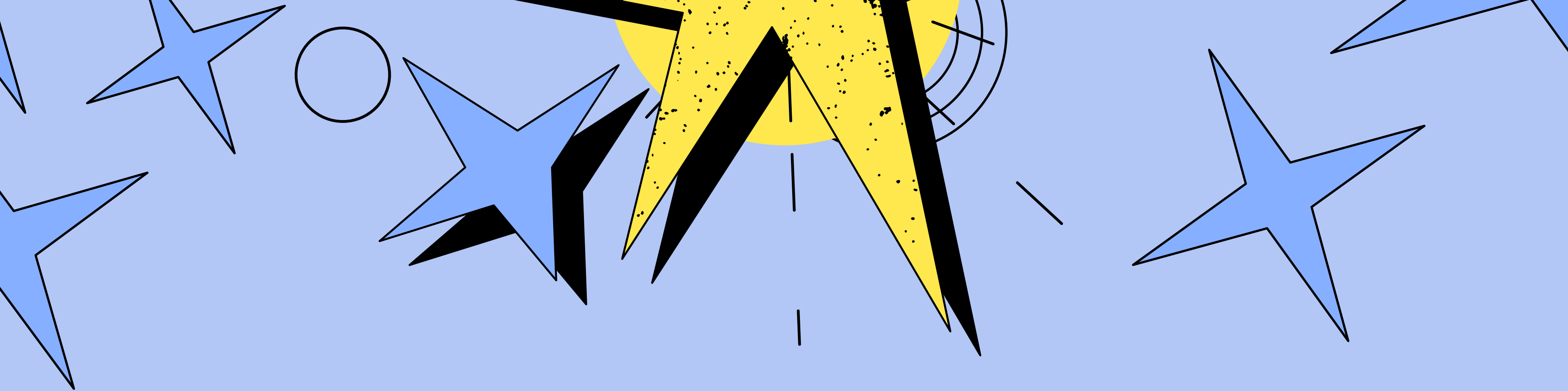


RESULTADOS



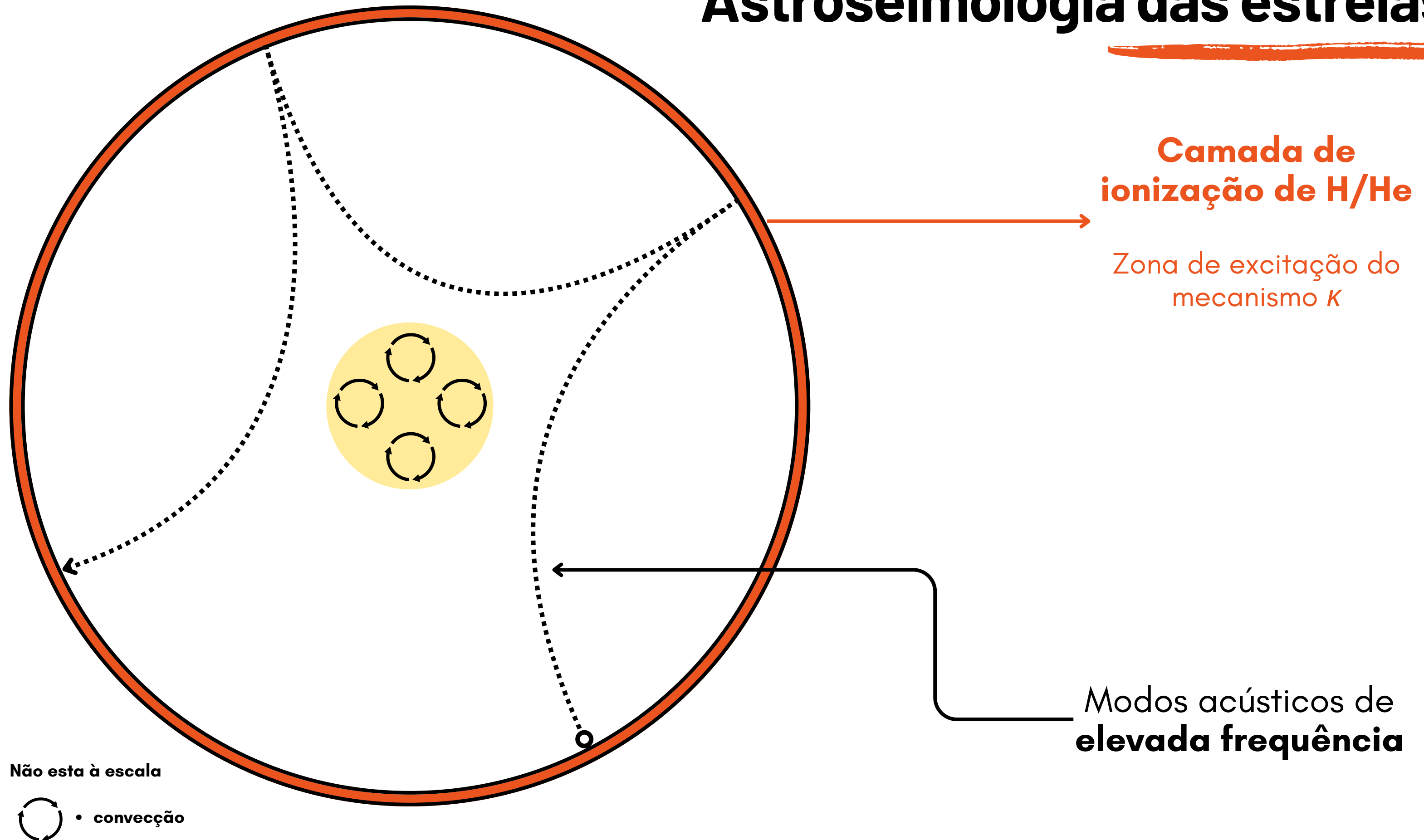
RESULTADOS





Parte II – Fazer modelos de estrelas roAp

Astroseimologia das estrelas roAp



O equilíbrio é perturbado: o mecanismo κ excita a pulsação

1. Equilíbrio

2. Contração

3. Expansão

Camada de ionização de H/He

P, T, κ

$L \downarrow$

$P \uparrow, T \uparrow \uparrow, \kappa \uparrow$

(A radiação fica aprisionada/
energia é armazenada)

$L \uparrow$

$P \downarrow, T \downarrow, \kappa \downarrow$

(A radiação escapa/
energia é libertada)

Numa zona de ionização parcial, a compressão aumenta a opacidade

=

O mecanismo κ fornece energia à pulsação

=

Trabalho positivo sobre o modo

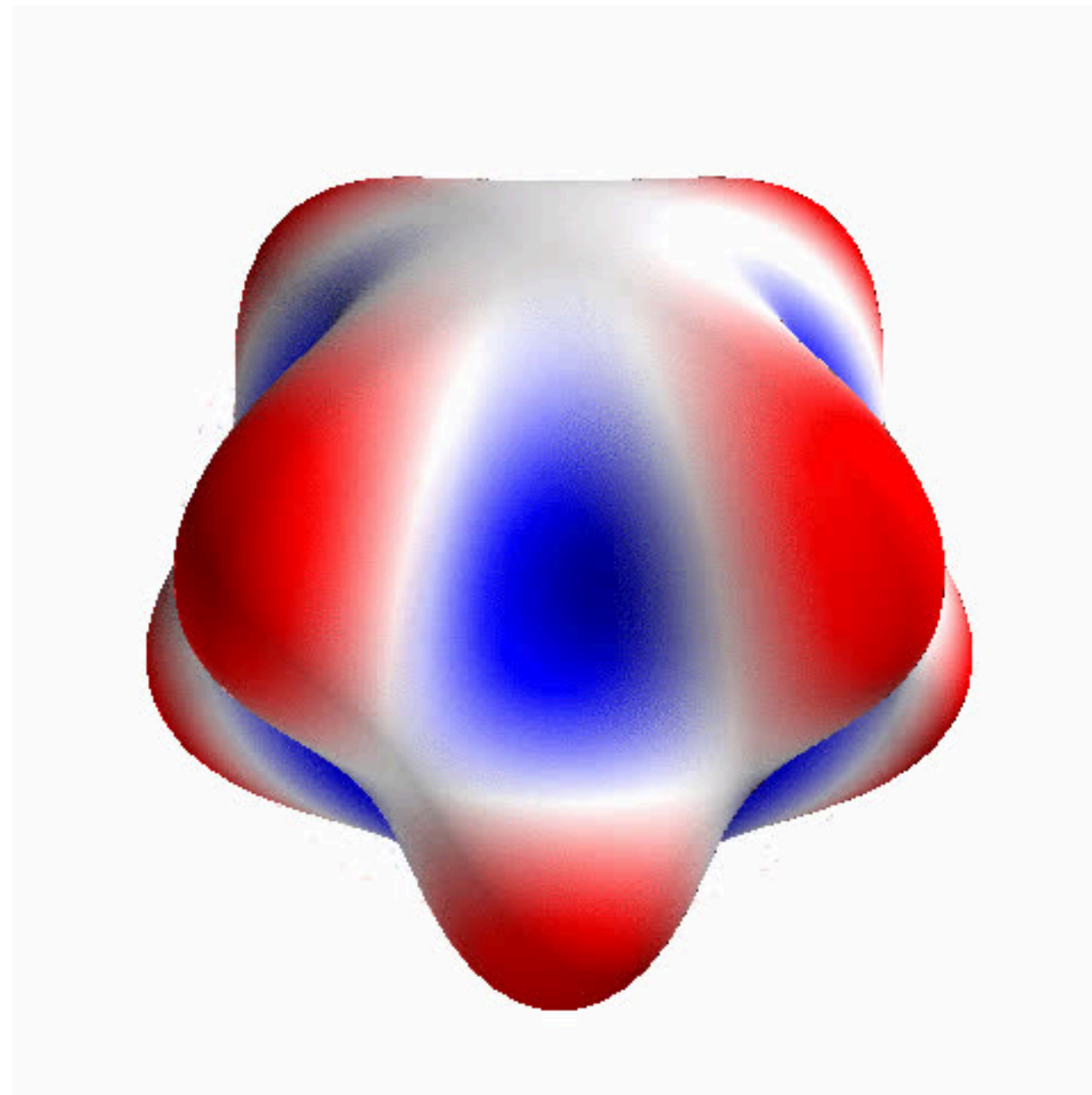
=

a pulsação é **excitada**

Envelope radiativo



O que acontece à estrela?



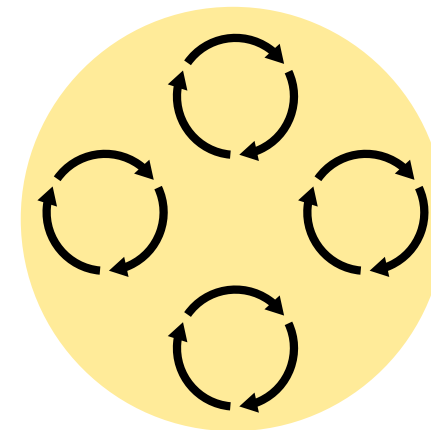
Os nossos modelos



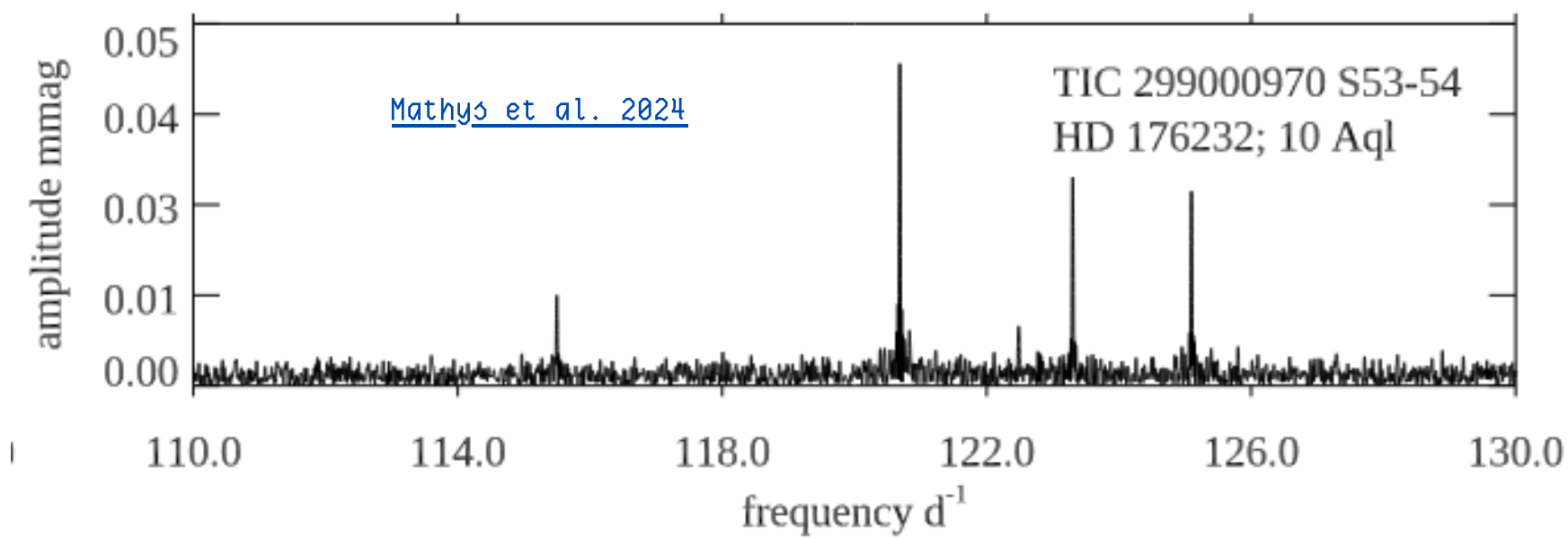
INPUTS:

$T, L, M, H, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, C, N, O, \dots$

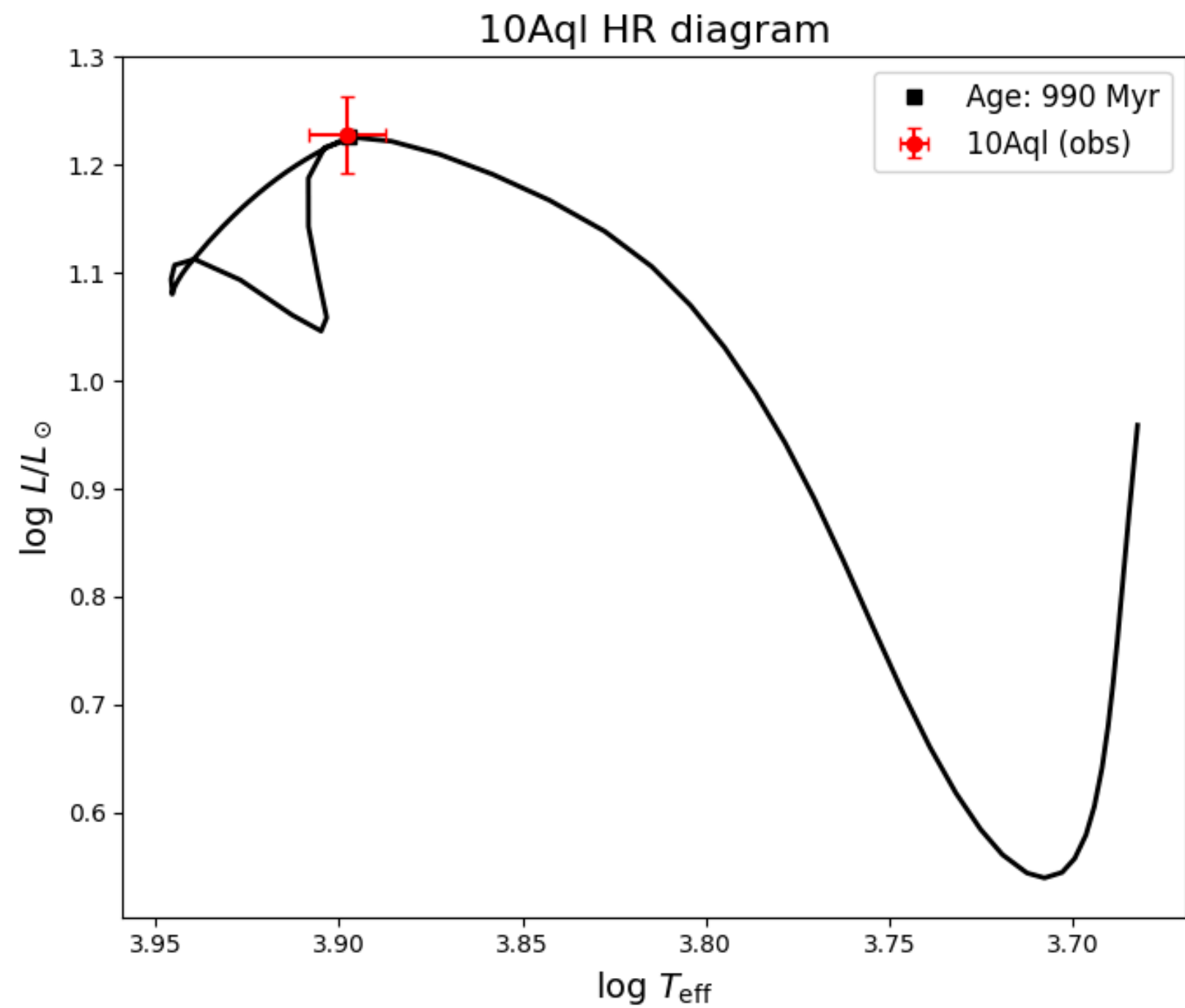
Para simular o envelope exterior,
precisamos de caracterizar a estrela.



A estrela roAp 10 Aql



$L/L_{\odot}$	T_{eff} [K]	$\Delta\nu$ [μHz]
18.5 ± 1.6	7900 ± 200	≈ 50



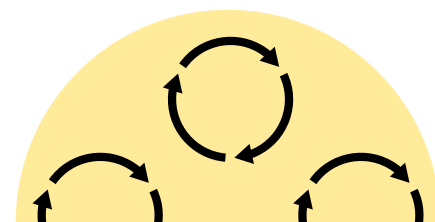
Os nossos modelos



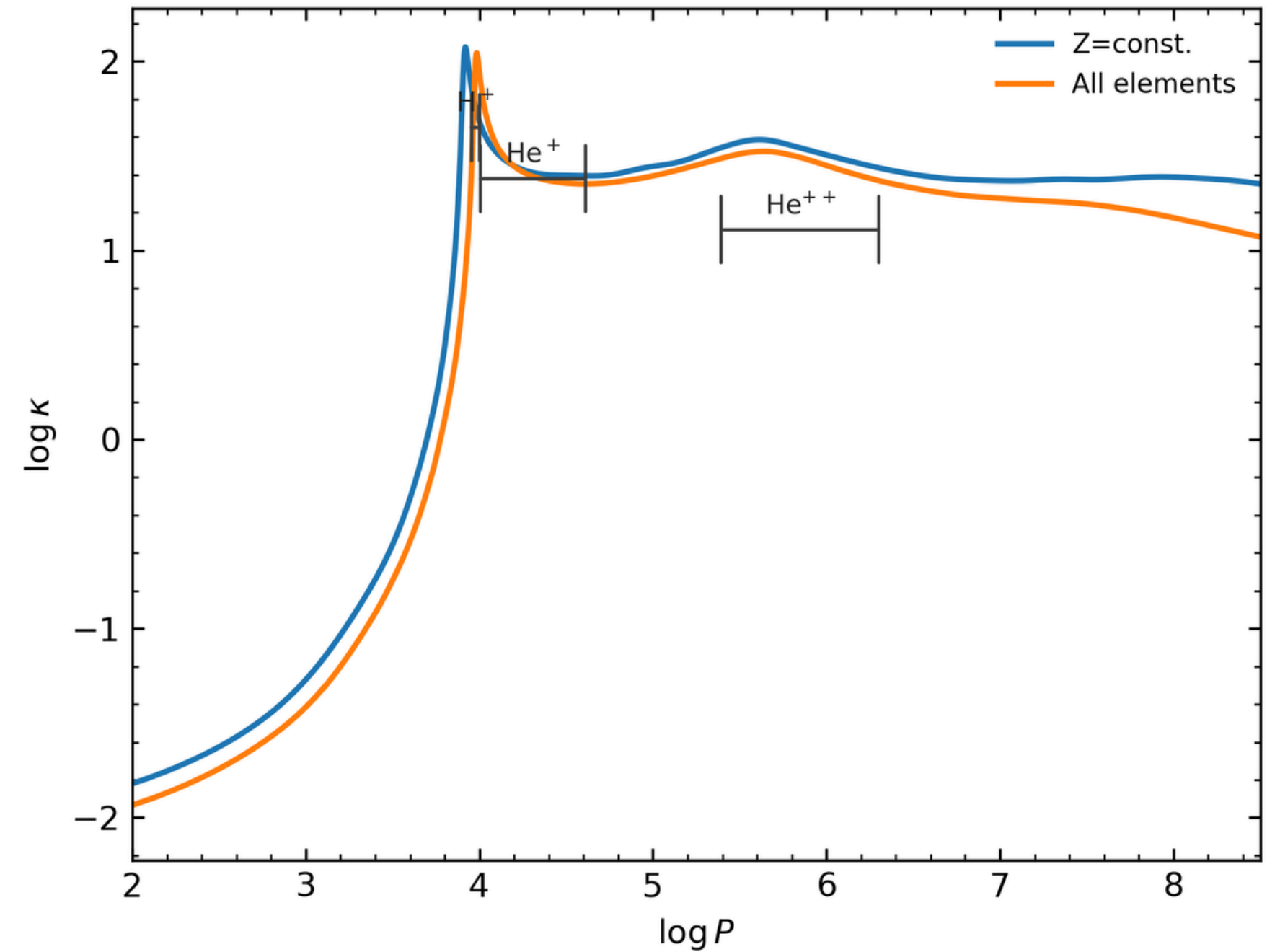
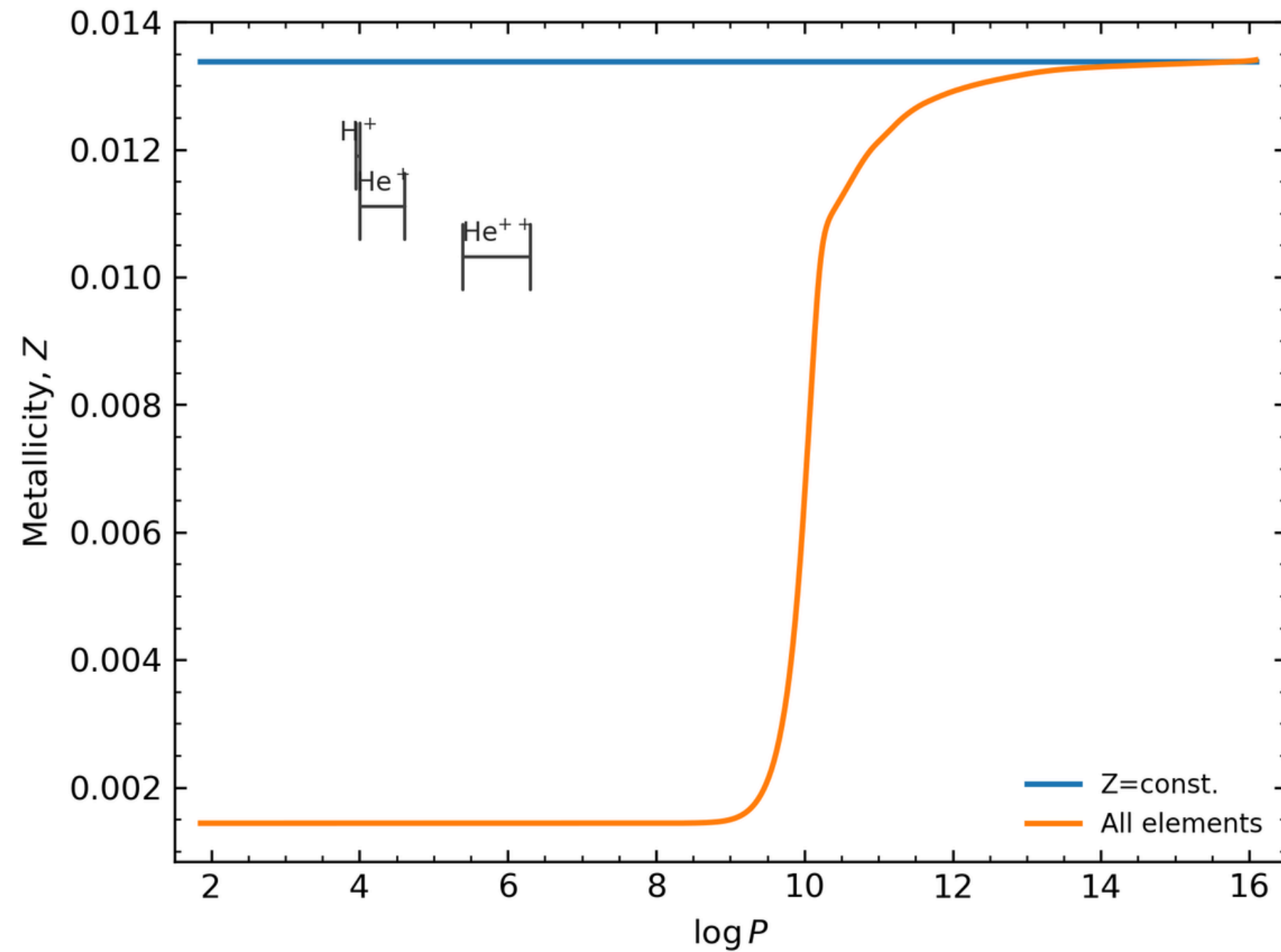
$$Z(T) = \sum_{i > He} X_i(T) = 1 - X(T) - Y(T)$$

$$\kappa_T, \kappa_\rho, \kappa_R$$

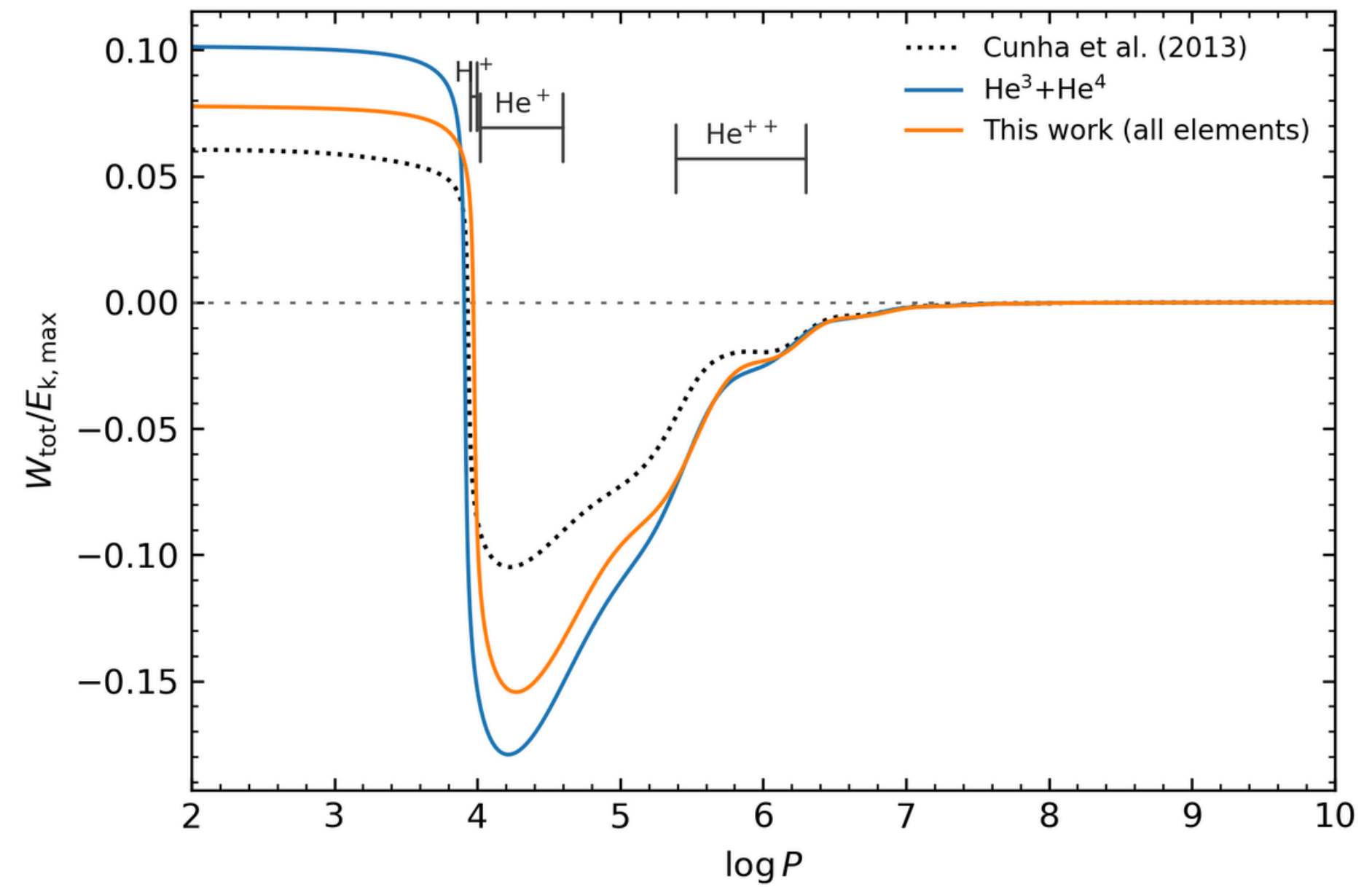
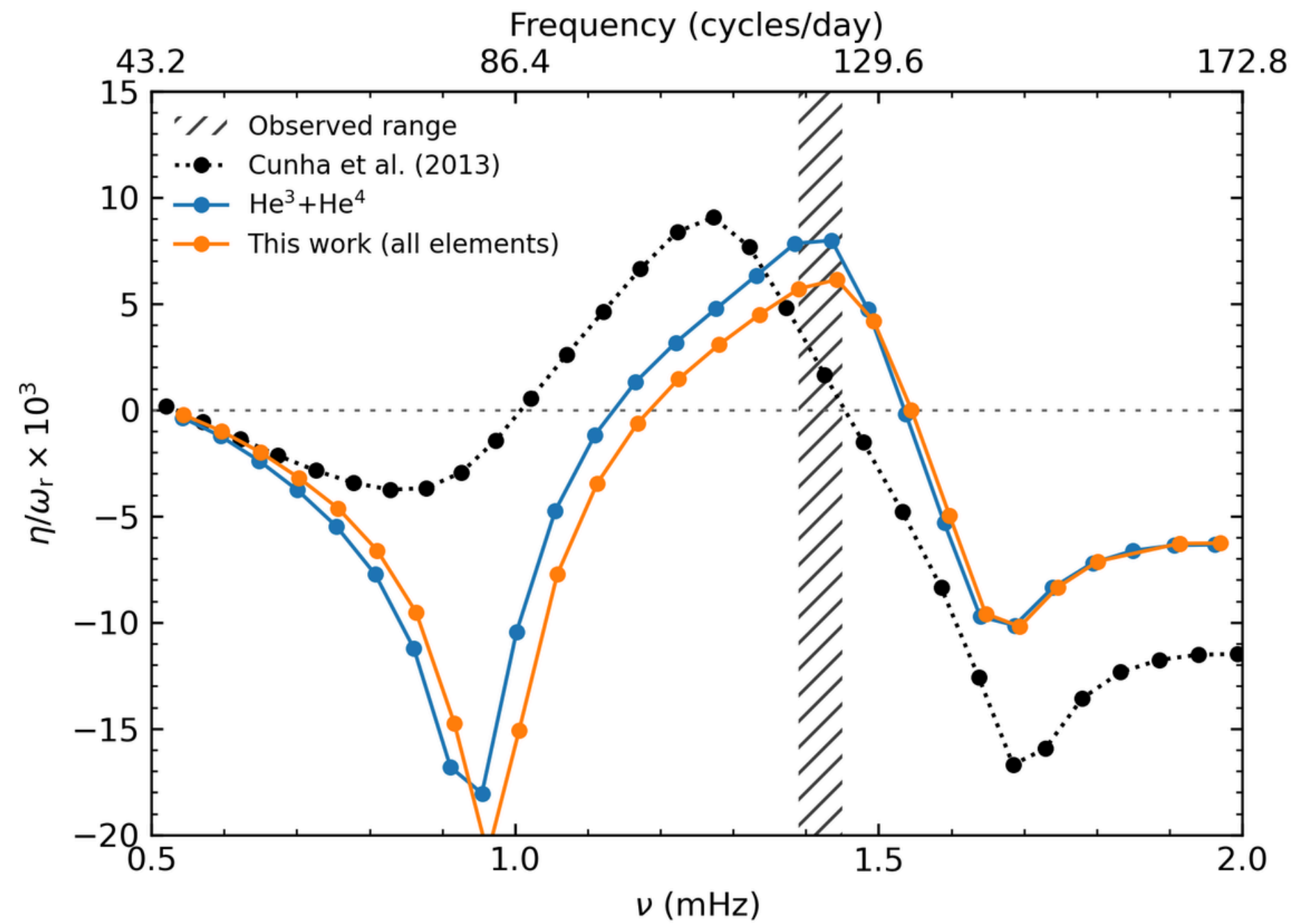
A **composição química local** determina o perfil de opacidade, que por sua vez controla a **excitação pelo mecanismo K**.

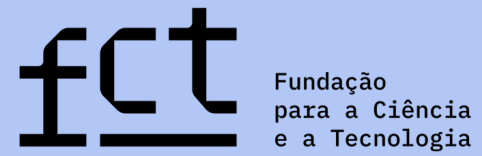


Ingredientes para a excitação de oscilações



Os modelos da 10 Aql





Obrigada!

INÊS MARTINS ROLO

*Supervision of Margarida Cunha, Victoria
Antoci and Ângela Santos*

**We acknowledge the support of Fundação para a Ciência e
Tecnologia FCT/MCTES, Portugal, through national funds
(Grant: 2024.01287.BD)**

