

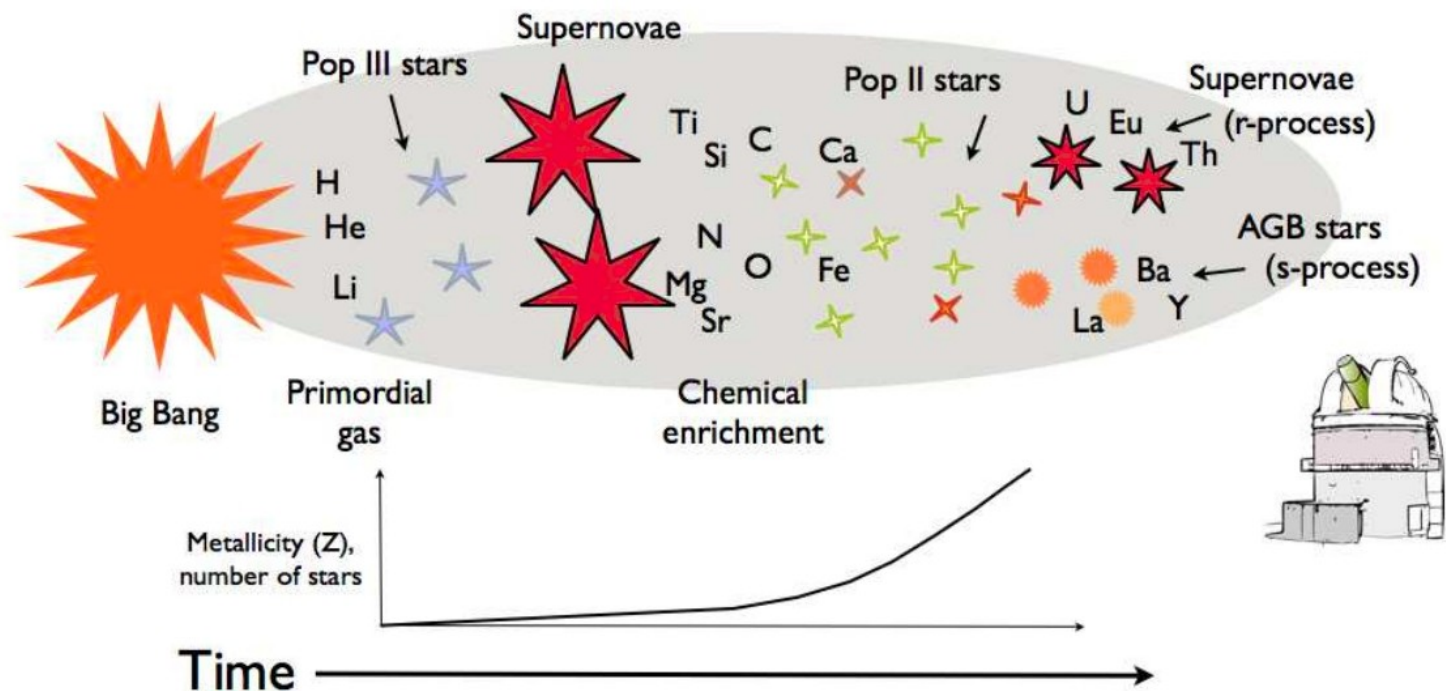
# Composições químicas estelares com alta precisão e acurácia

Escola de Inverno em Astronomia 2025

Marília Carlos  
Pesquisadora Adjunta I  
Observatório Nacional

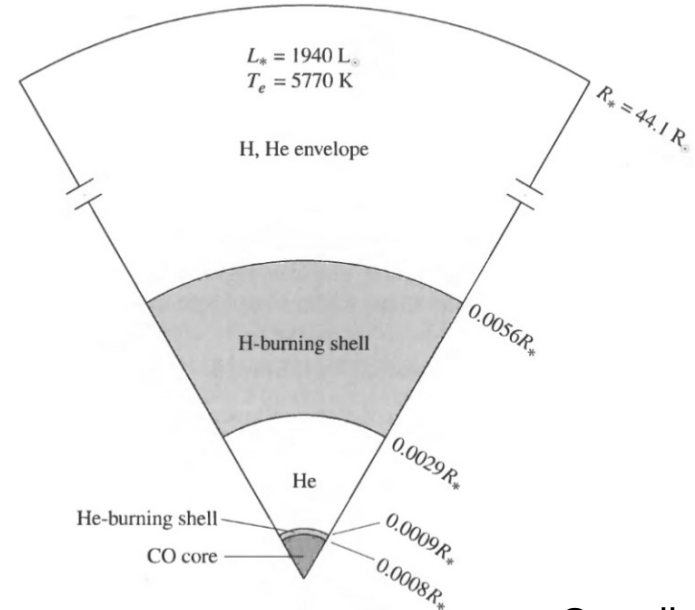
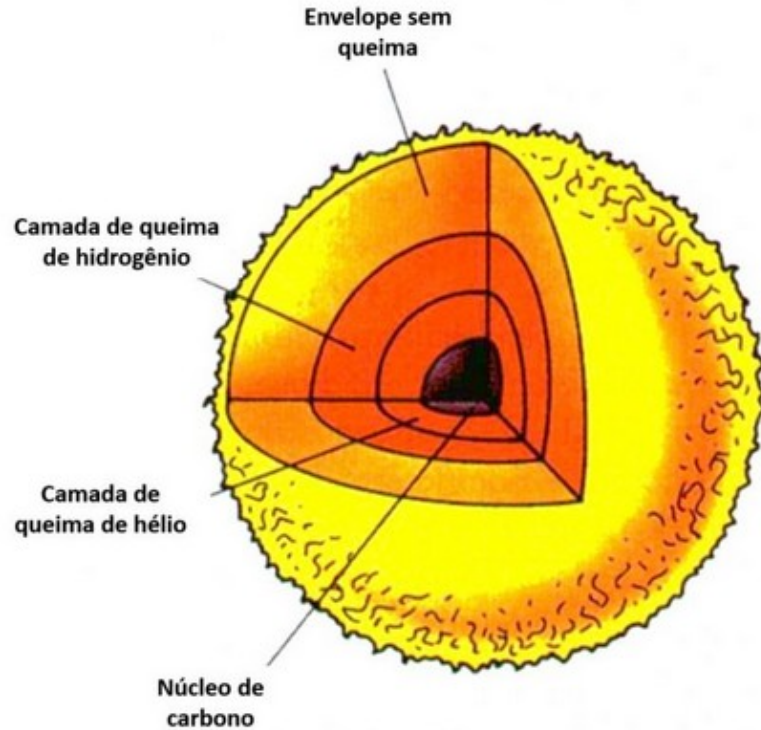
# Sumário

- Por que estudamos estrelas?
- Como determinamos composições químicas estelares
- O que podemos concluir dessas análises

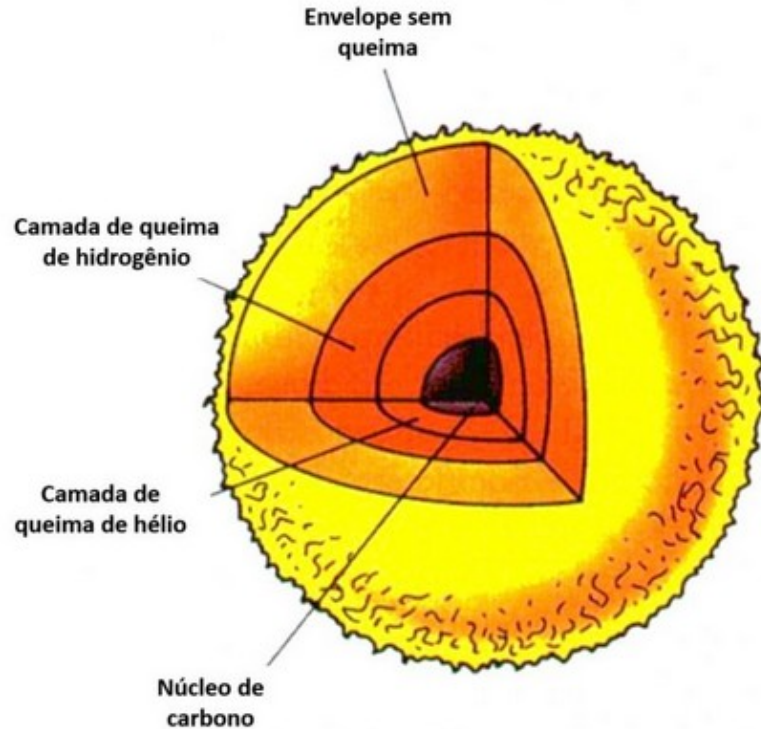


→ Estrelas de diferentes massas têm diferentes evoluções e, logo, contribuem de forma distinta para a poluição do meio.

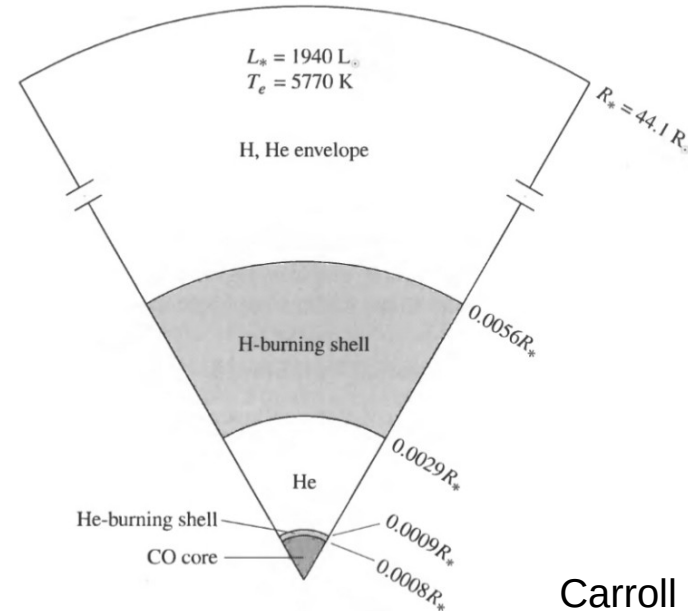
# Estrelas de baixa massa e massa intermediária:



# Estrelas de baixa massa e massa intermediária:

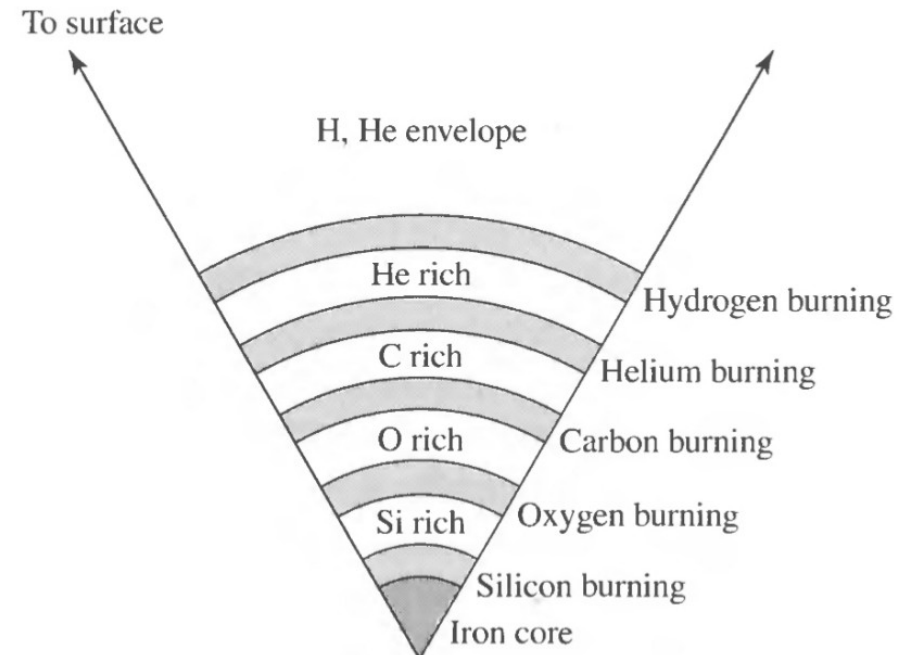
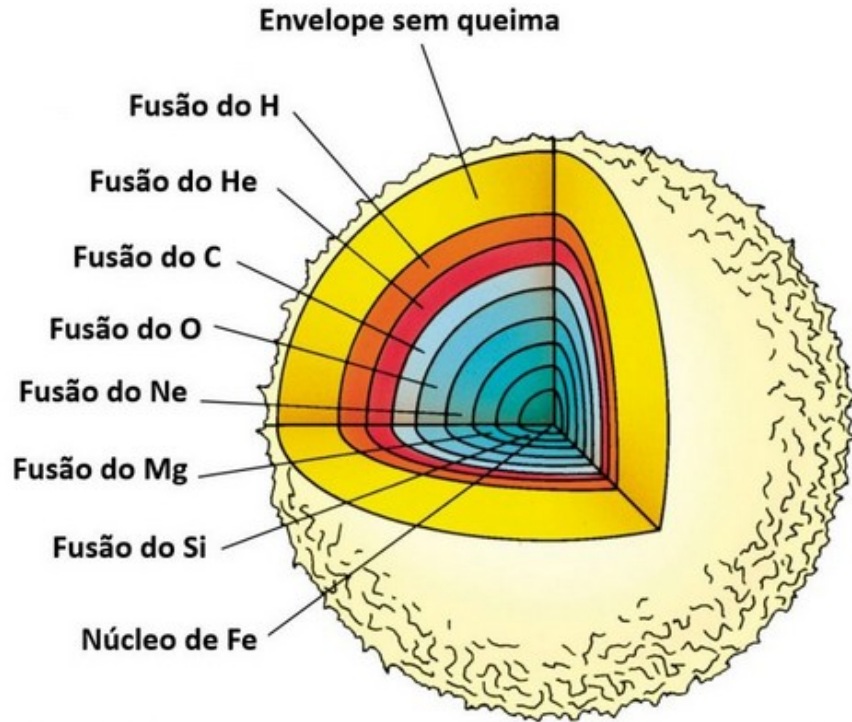


**Produtoras de C, N, F e elementos do processo s (por exemplo: Ba e Y)**



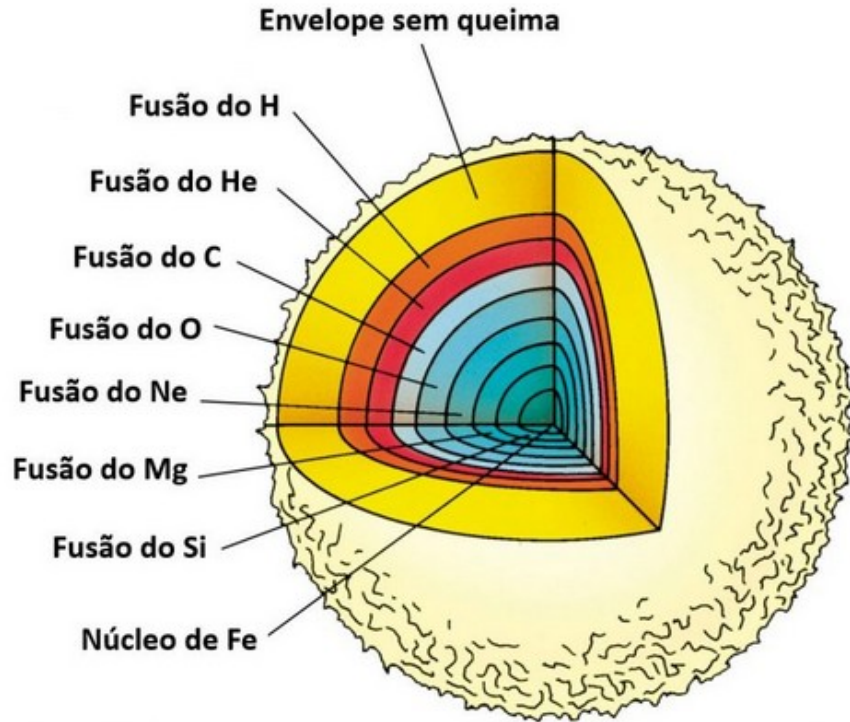
Carroll & Ostlie (2007)

# Estrelas de alta massa:

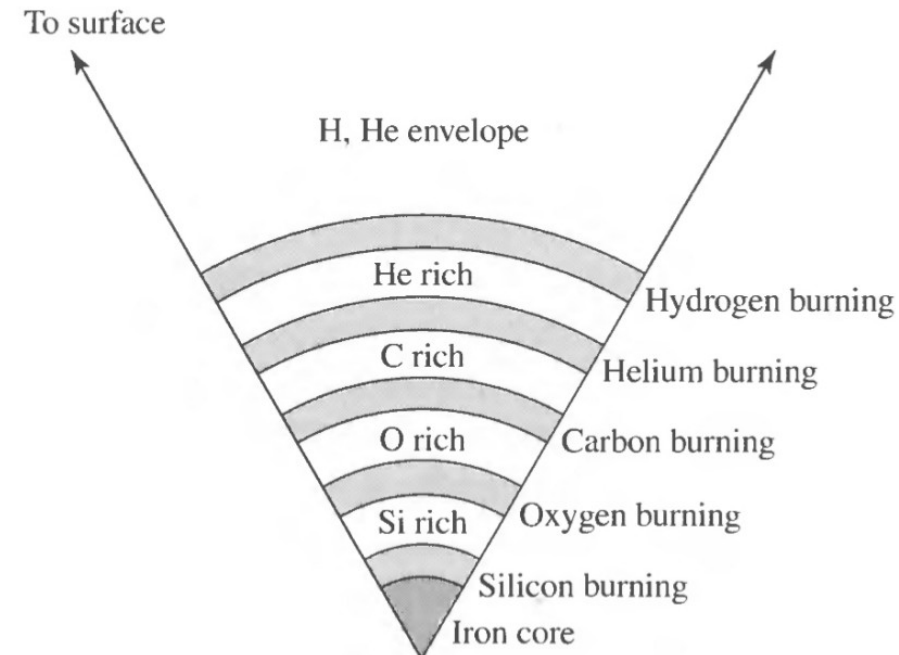


Carroll & Ostlie (2007)

# Estrelas de alta massa:



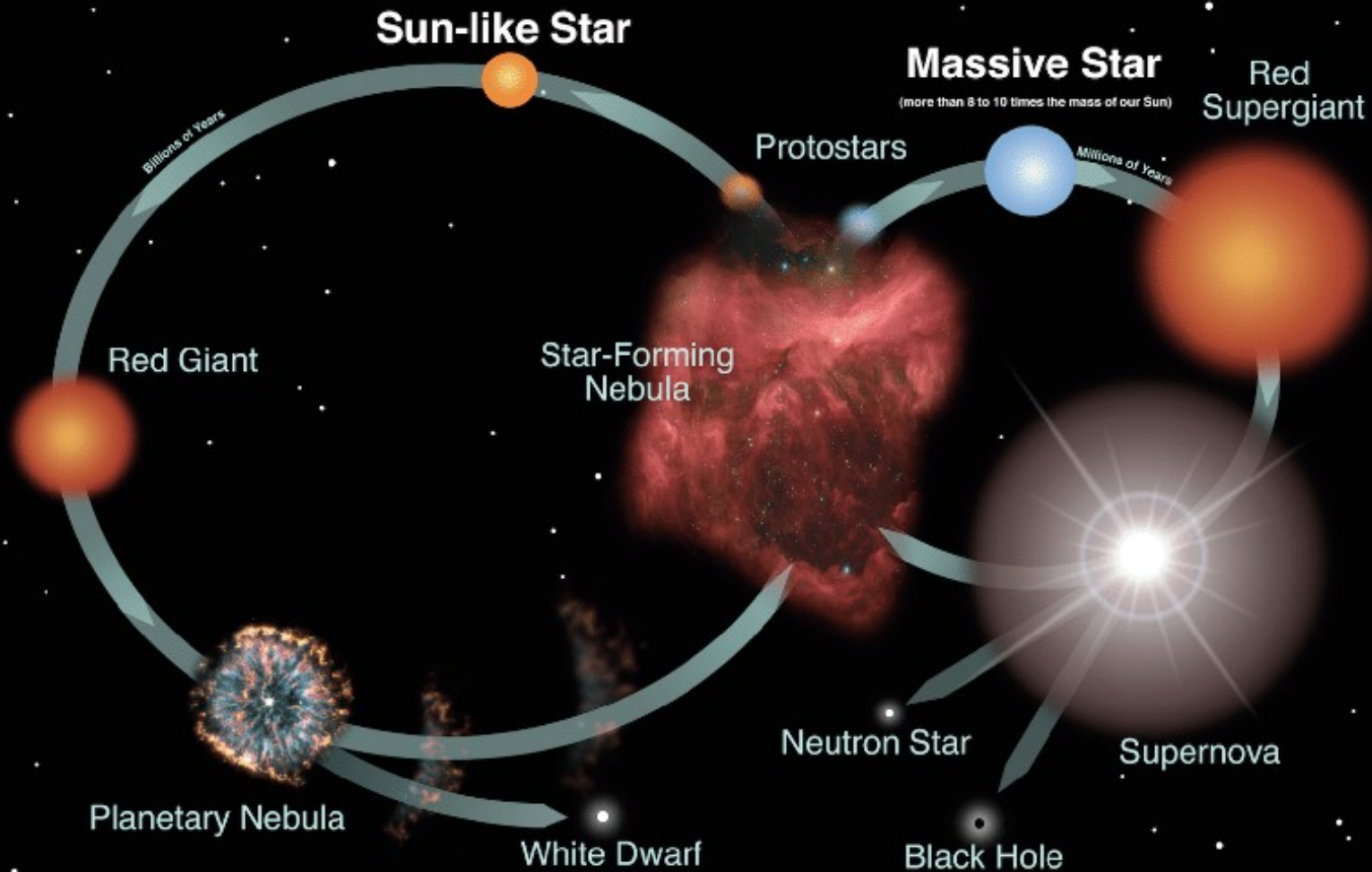
Produtoras de elementos  $\alpha$  (O, Mg, Si, etc.); e também de elementos do processo r (Eu, Gd, Dy, etc.), durante a explosão de supernovas do tipo II e fusão de estrelas de nêutrons.



Carroll & Ostlie (2007)



# Ciclo de vida gás-estrela:



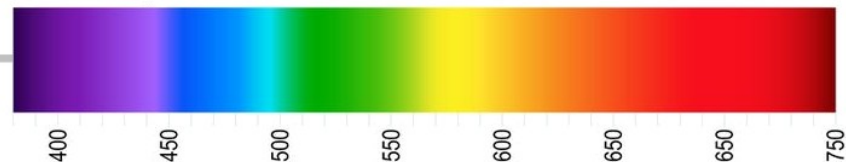


- Assim, estudar a composição química das estrelas nos ajuda a compreender melhor como estas se formaram e como contribuíram para a evolução química da nossa galáxia.
- Mas como podemos determinar a composição química de estrelas?

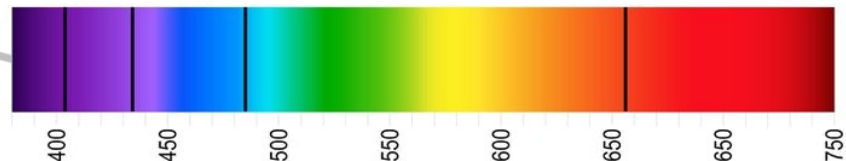


# Espectroscopia e as leis de Kirchhoff:

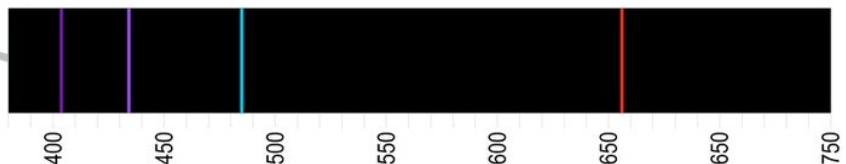
Espectro contínuo



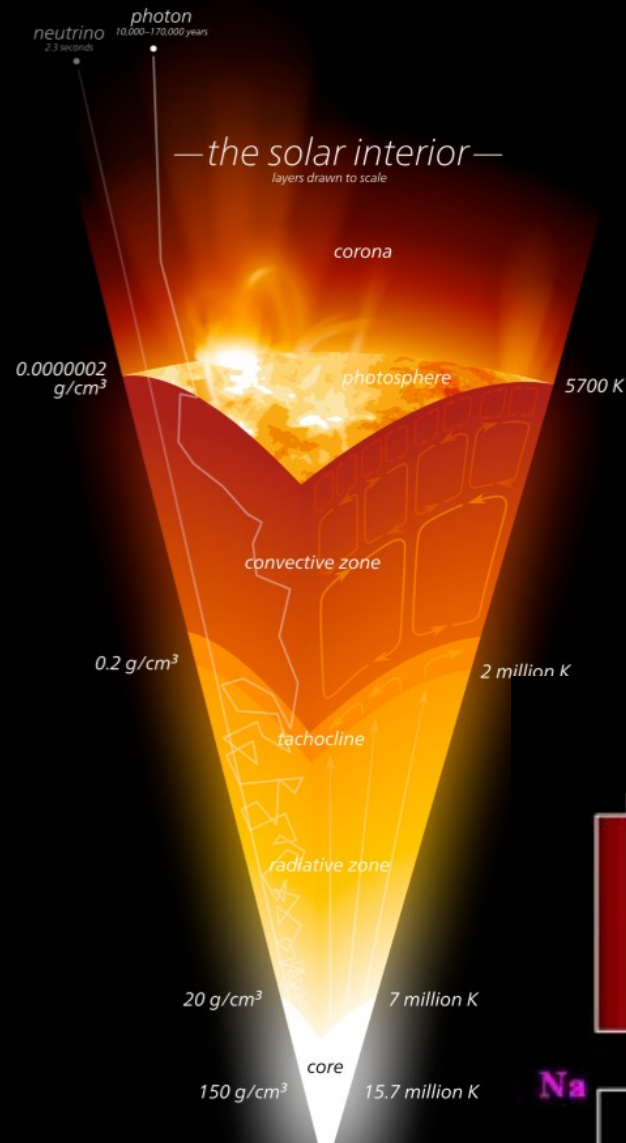
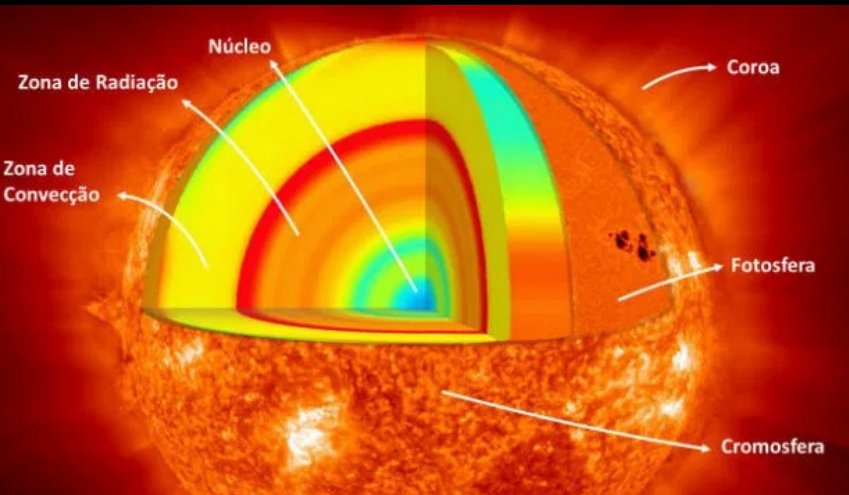
Espectro de absorção



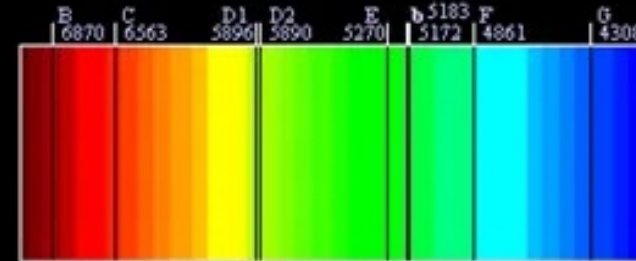
Espectro de emissão



# O Sol

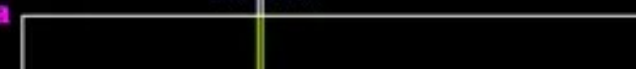


## Espectro Solar

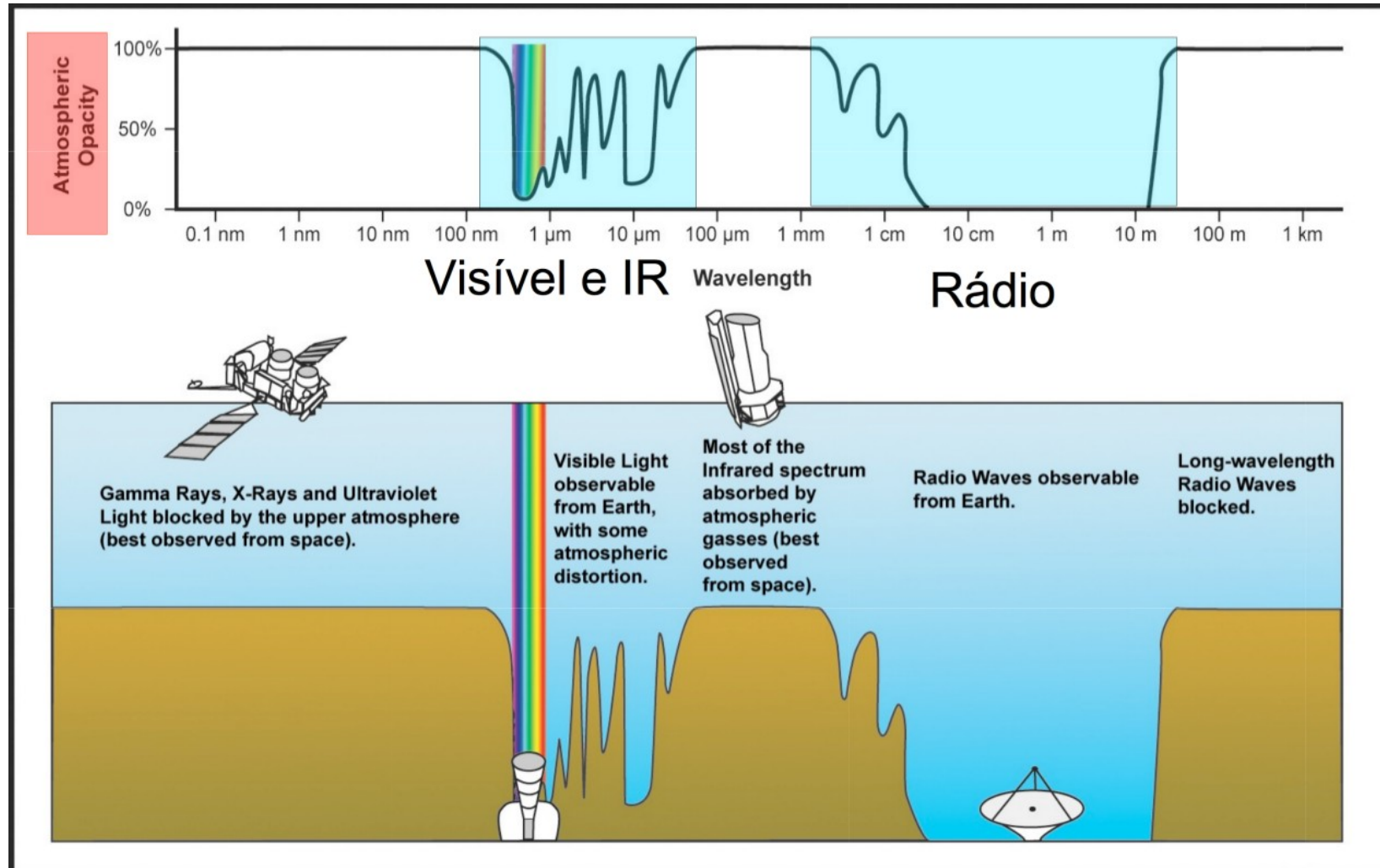


Na

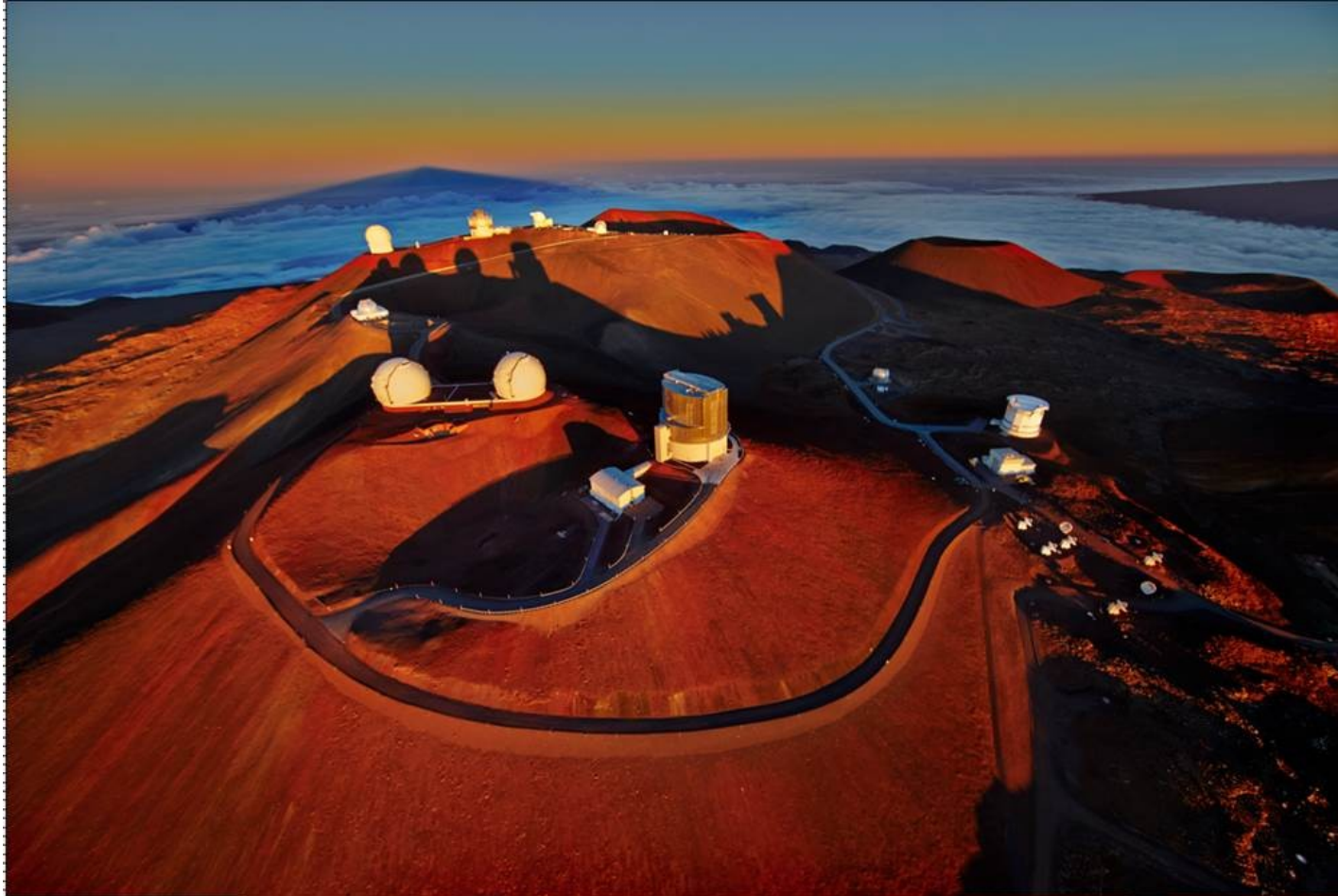
5896 5890



- Atenuação atmosférica:



# Observações terrestres em alta resolução



Maunakea - Havaí



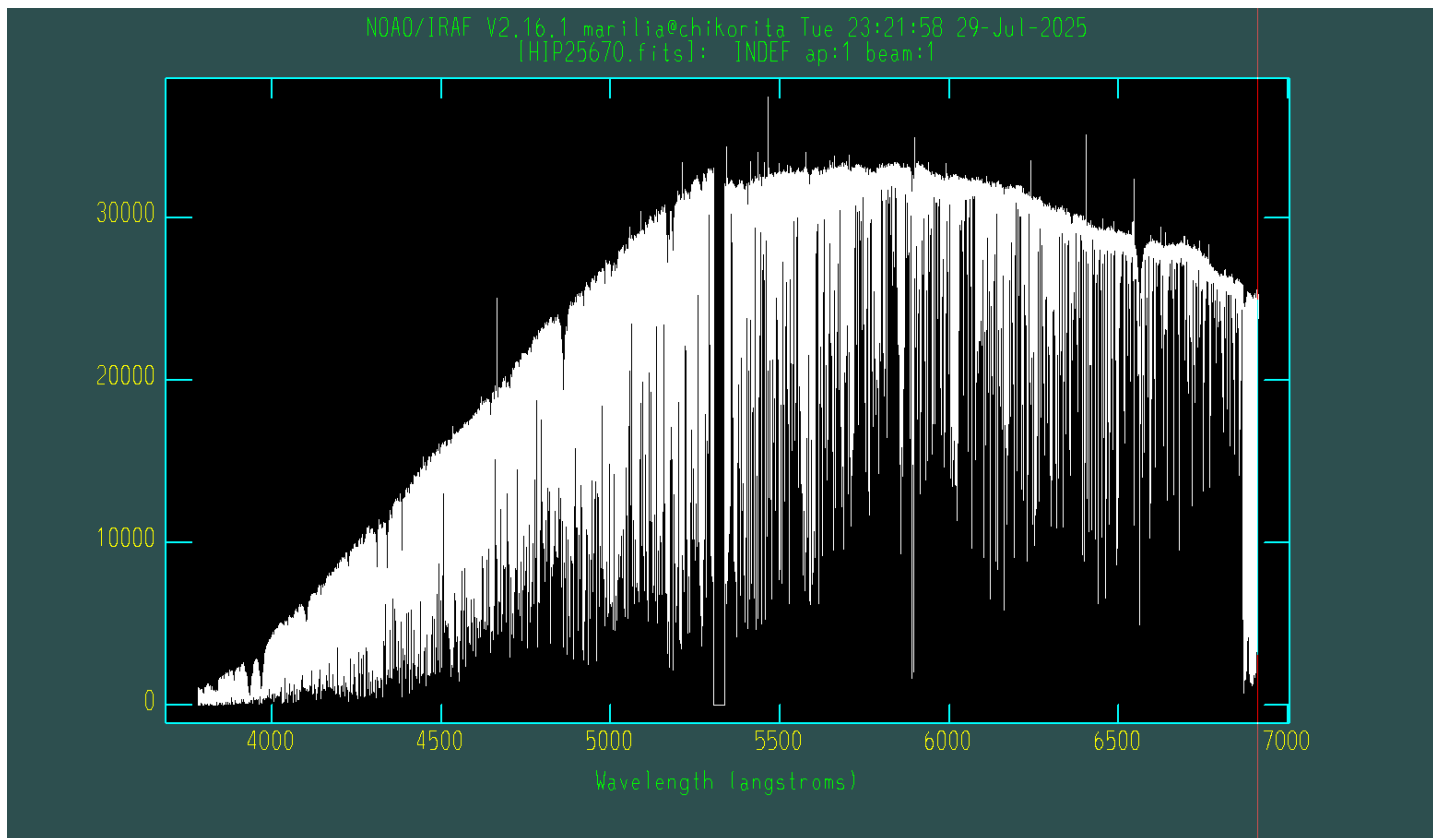
# Observações terrestres em alta resolução



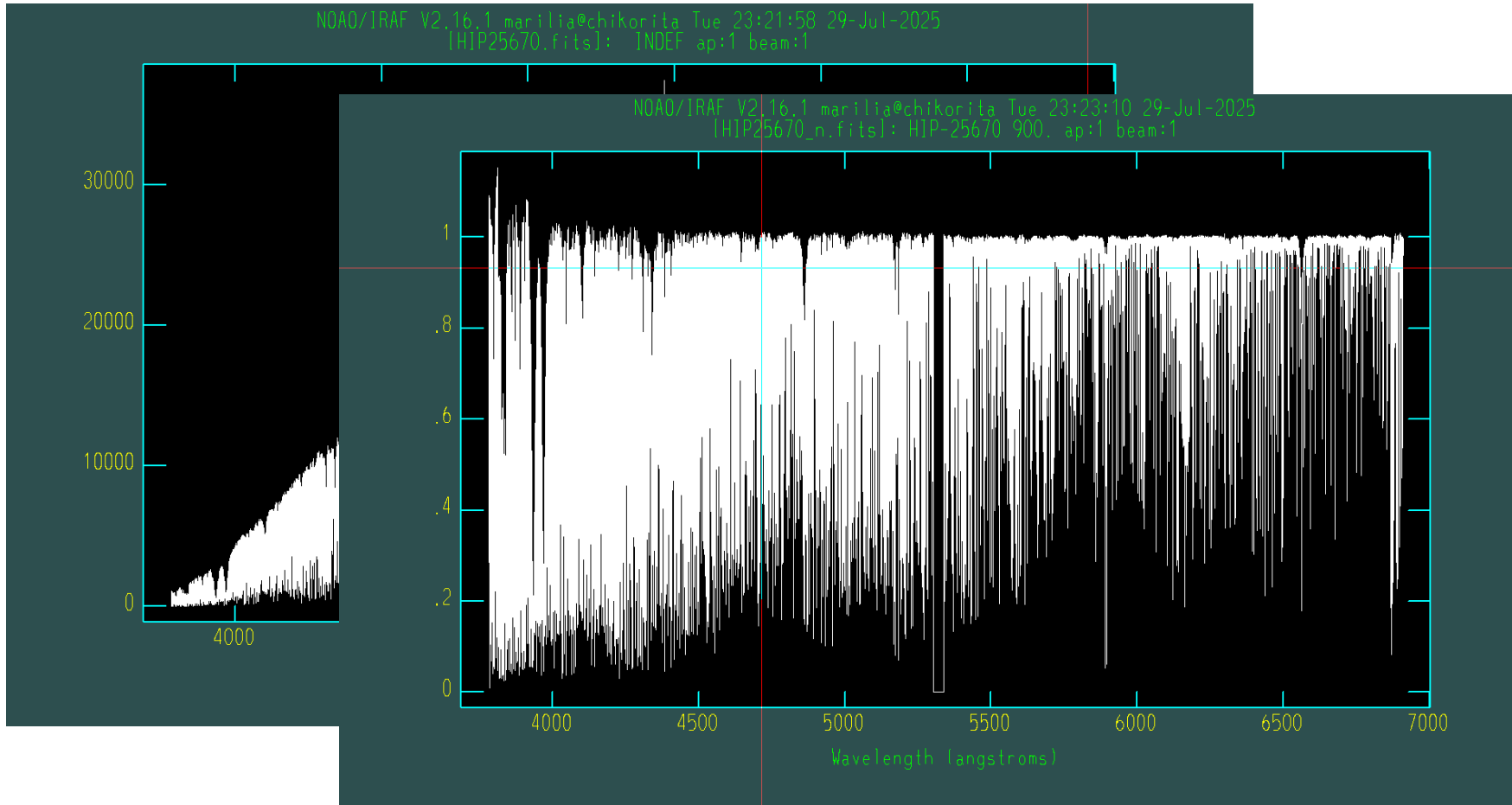
Cerro Paranal - Chile



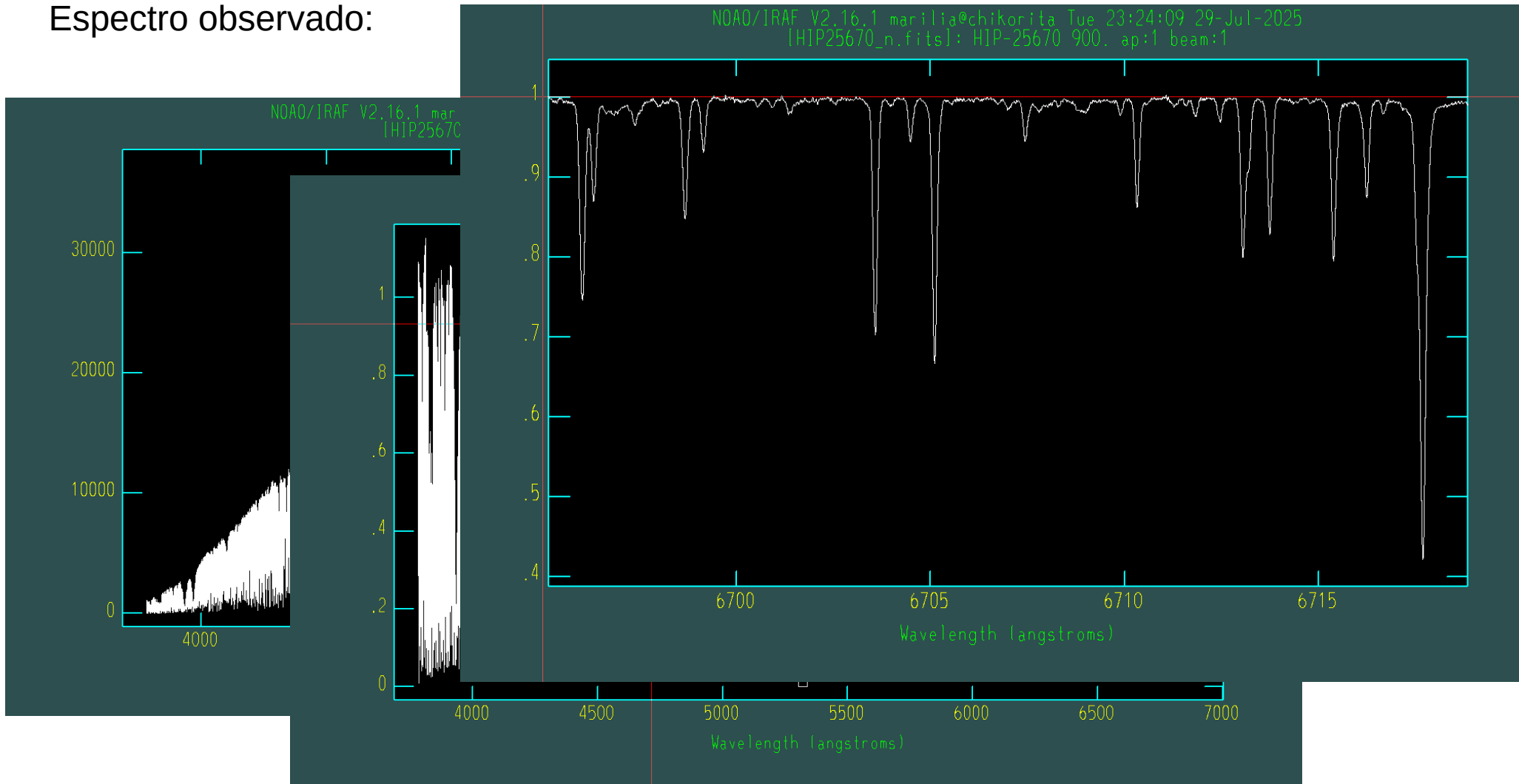
## Espectro observado:



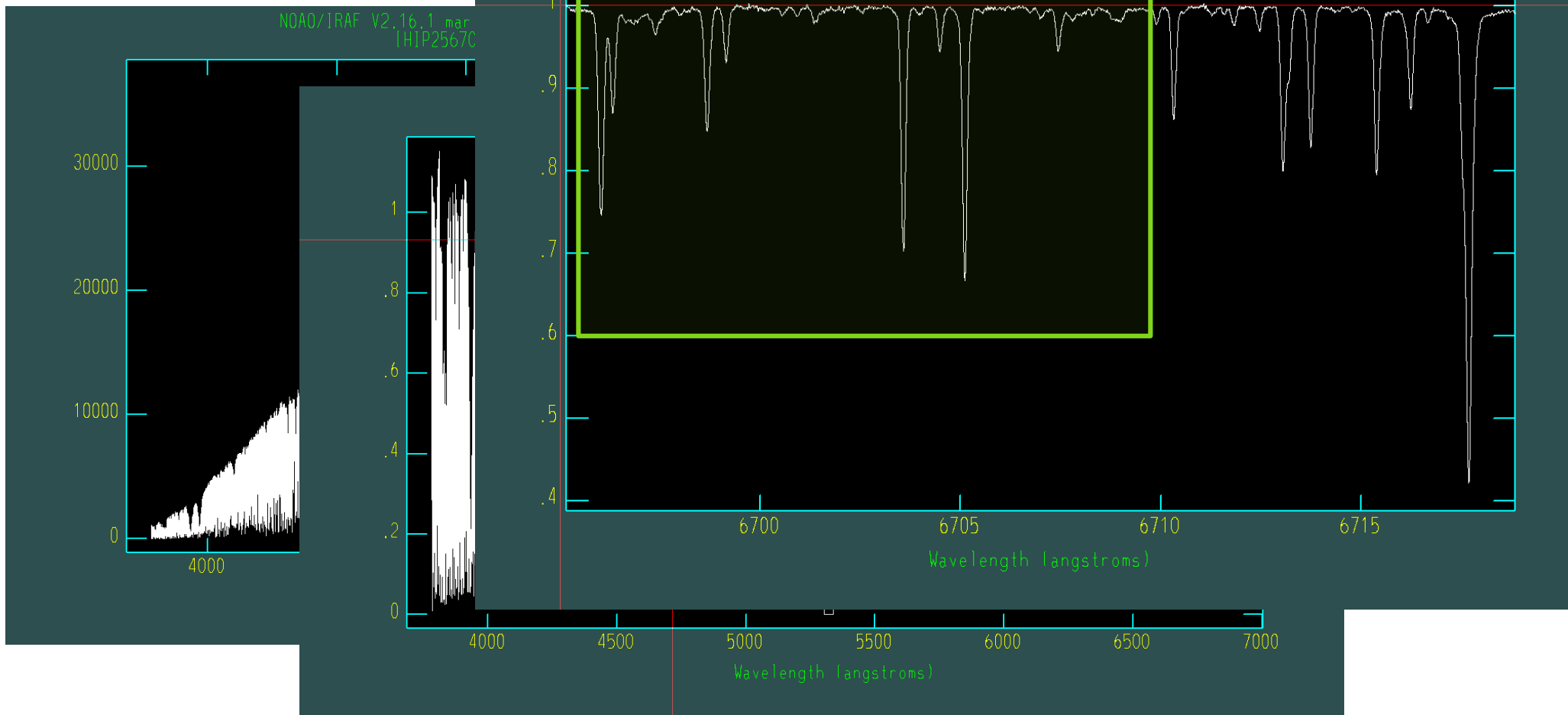
## Espectro observado:



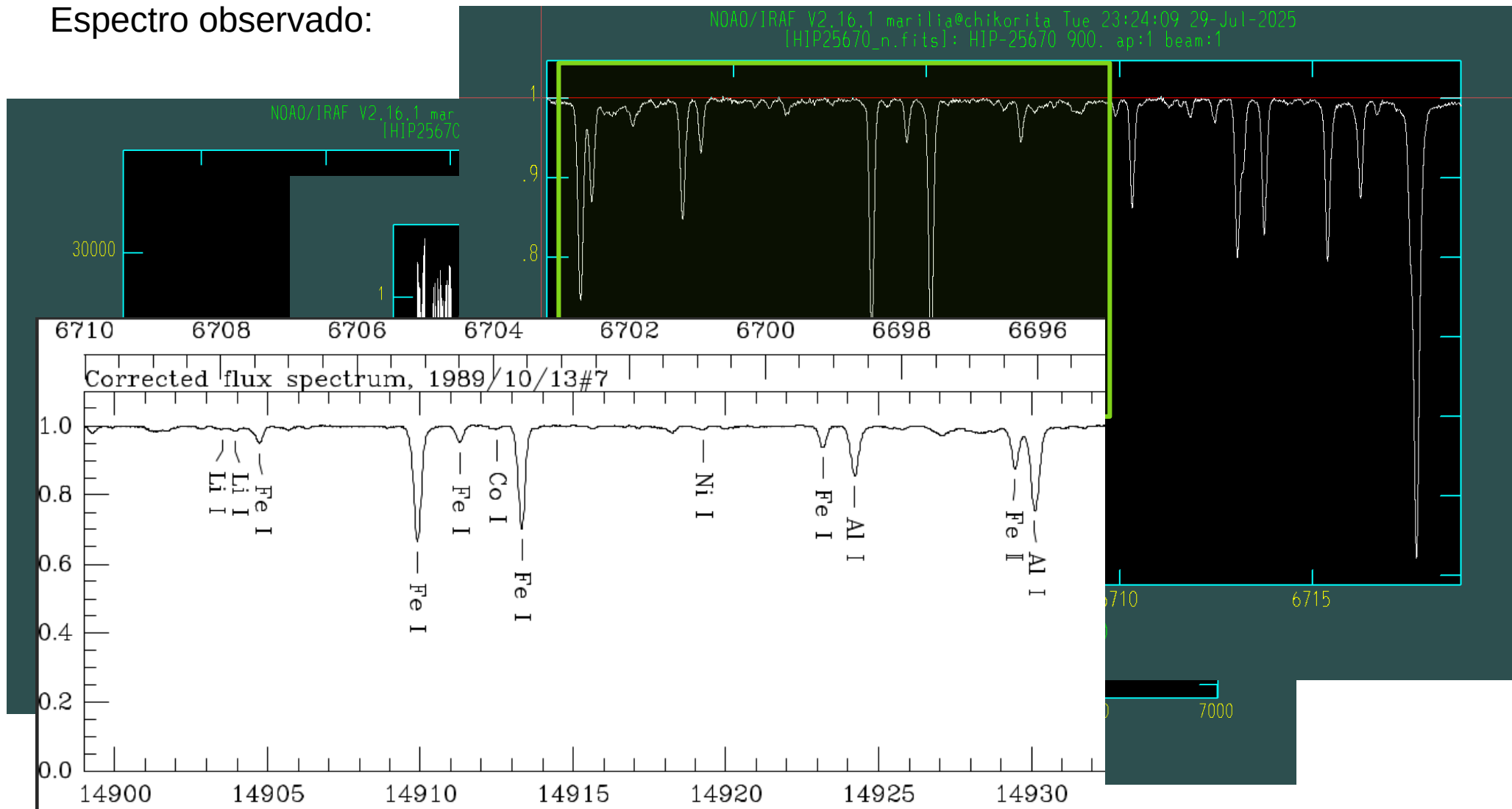
## Espectro observado:



# Espectro observado:

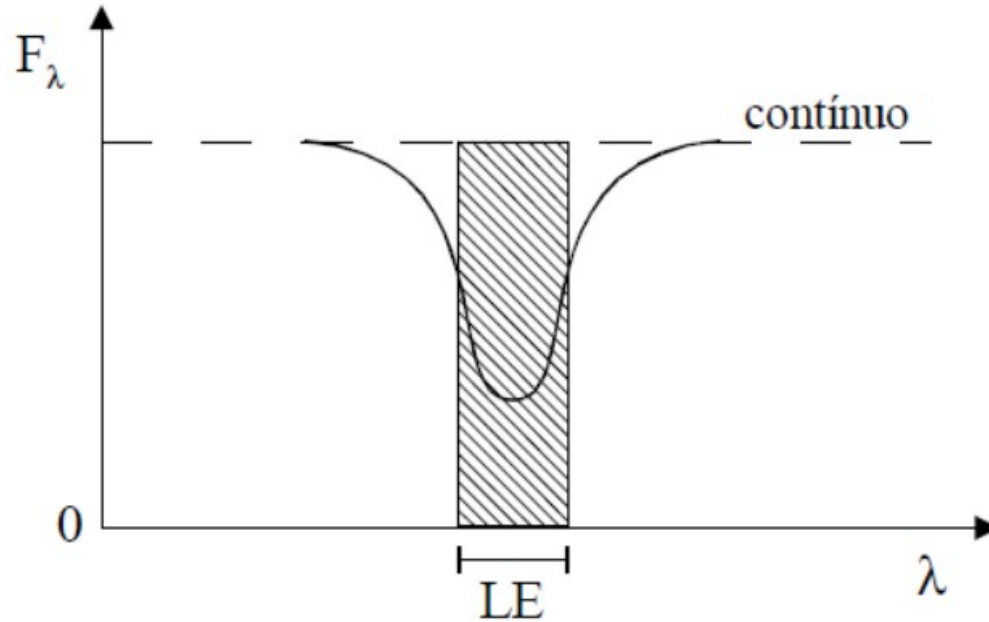


# Espectro observado:



## Métodos:

### 1. Largura equivalente

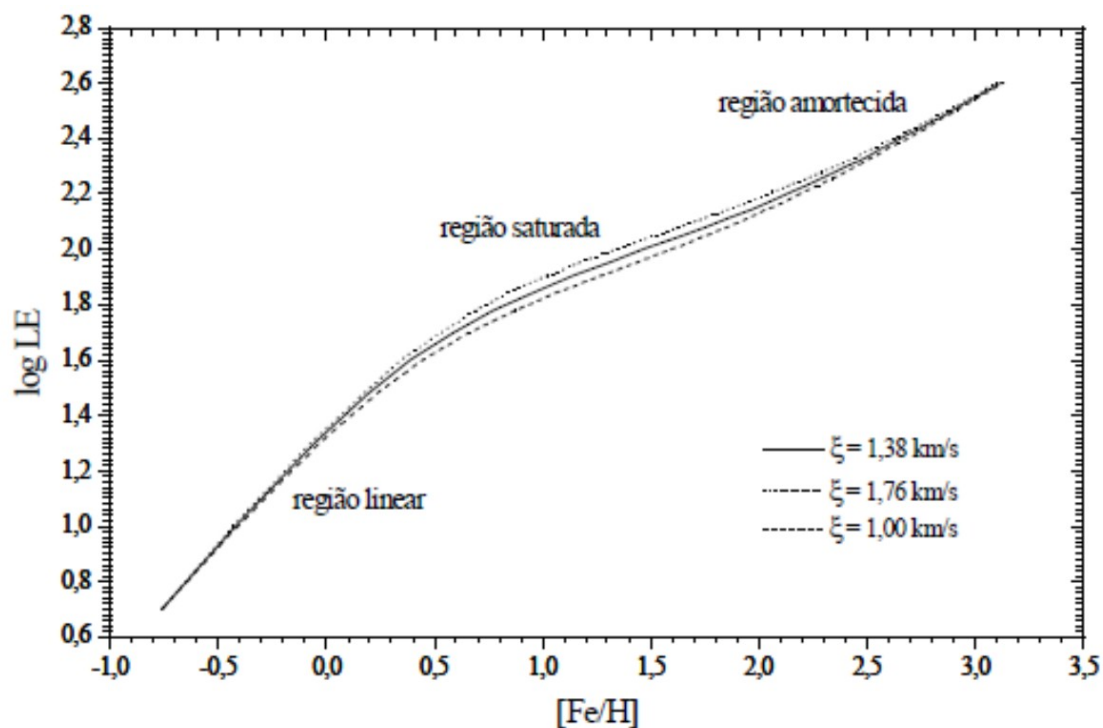


$$\log \left( \frac{w}{\lambda} \right) = \log \left( \frac{\pi e^2}{mc^2} \frac{N_r/N_E}{u(T)} N_H \right) + \log \left( \frac{N_E}{N_H} \right) + \log g f \lambda - \theta \chi - \log \kappa_{cont, \lambda}$$



# Métodos:

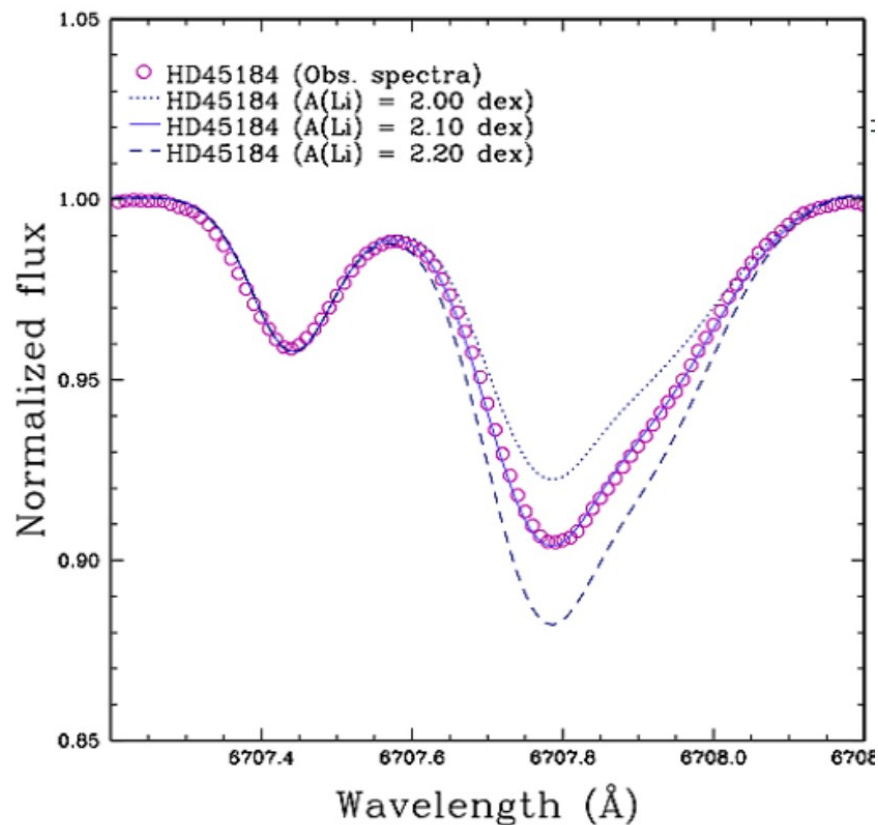
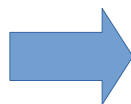
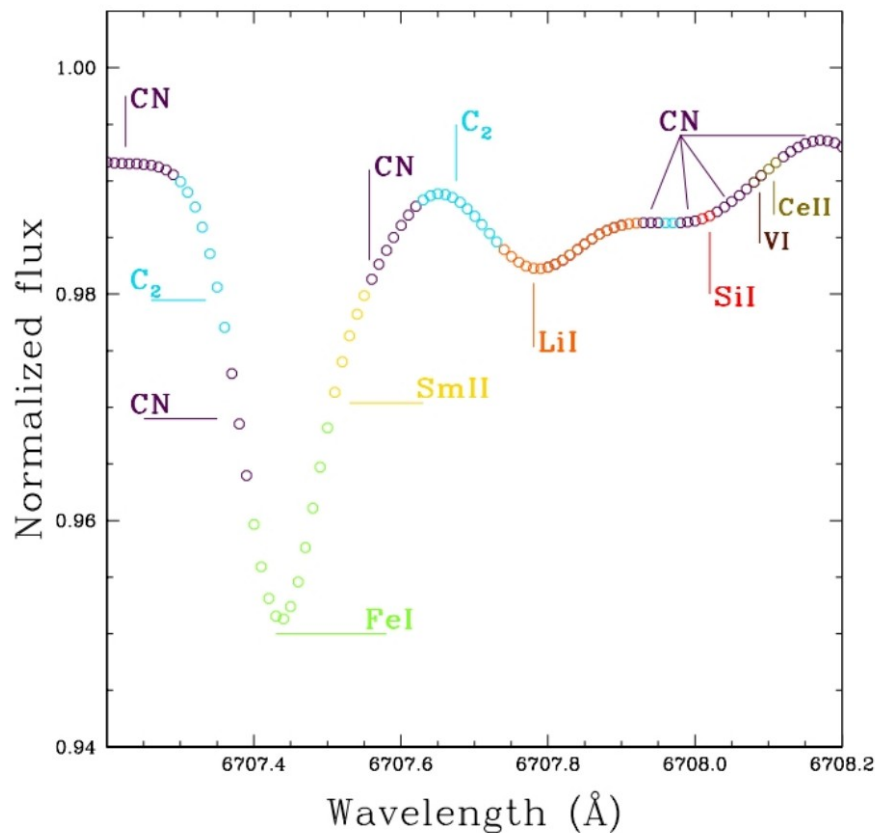
## 1. Largura equivalente



$$\log \left( \frac{w}{\lambda} \right) = \log \left( \frac{\pi e^2}{mc^2} \frac{N_r/N_E}{u(T)} N_H \right) + \log \left( \frac{N_E}{N_H} \right) + \log g f \lambda - \theta \chi - \log \kappa_{cont, \lambda}$$

# Métodos:

## 2. Síntese espectral



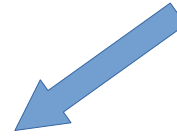
Parâmetros atmosféricos



Modelos de atmosferas estelares  
(1D com geometria esférica ou  
plano-paralela)

Alargamento de linhas e  
perfil instrumental

Lista de linhas atômicas  
e moleculares



Código de transferência radiativa  
(LTE)



**Abundâncias elementais e moleculares**

## Algumas definições:

$N_H$  = densidade numérica do hidrogênio

$N_X$  = densidade numérica do elemento X

$$A(X) = \log(N_X/N_H) + 12 \longrightarrow \text{Abundância absoluta de X}$$

$$[X/H] = A(X)_\star - A(X)_\odot \longrightarrow \text{Abundância de X em relação à abundância solar}$$

$$X = \frac{1}{1 + 4(N_{\text{He}}/N_H) + \sum_i A_i(N_i/N_H)} \longrightarrow \text{Fração de massa de H}$$

$$Y = \frac{4(N_{\text{He}}/N_H)}{1 + 4(N_{\text{He}}/N_H) + \sum_i A_i(N_i/N_H)} \longrightarrow \text{Fração de massa de He}$$

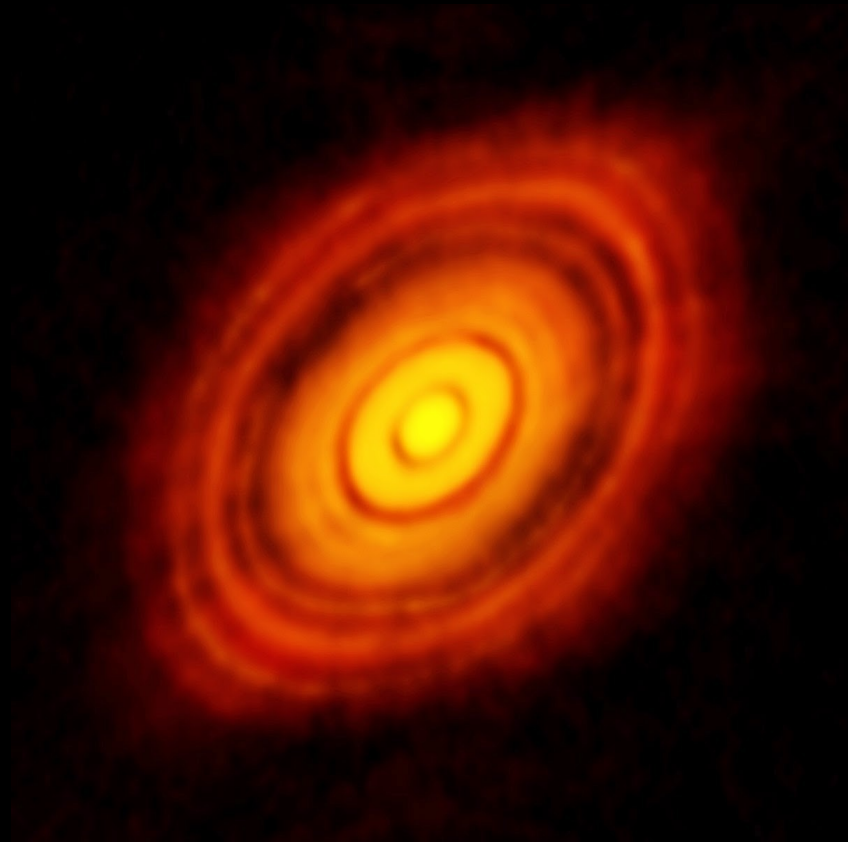
$$Z = \frac{\sum_i A_i(N_i/N_H)}{1 + 4(N_{\text{He}}/N_H) + \sum_i A_i(N_i/N_H)} \longrightarrow \text{Fração de massa de metais}$$

# Estrelas do tipo solar

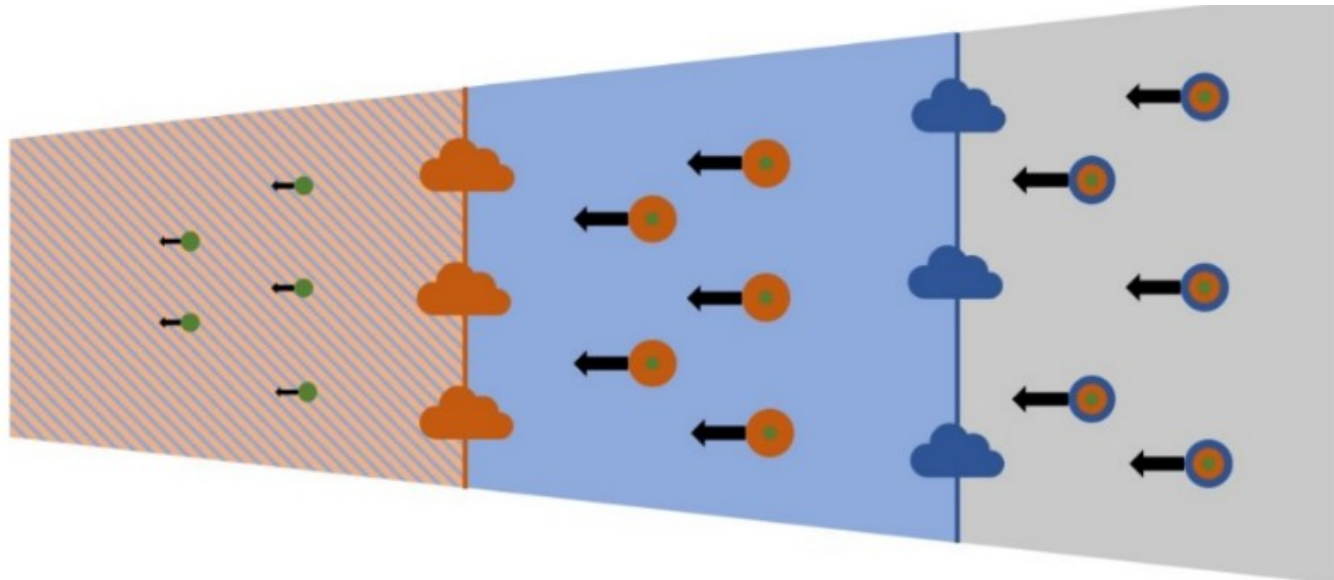
(com e sem planetas)



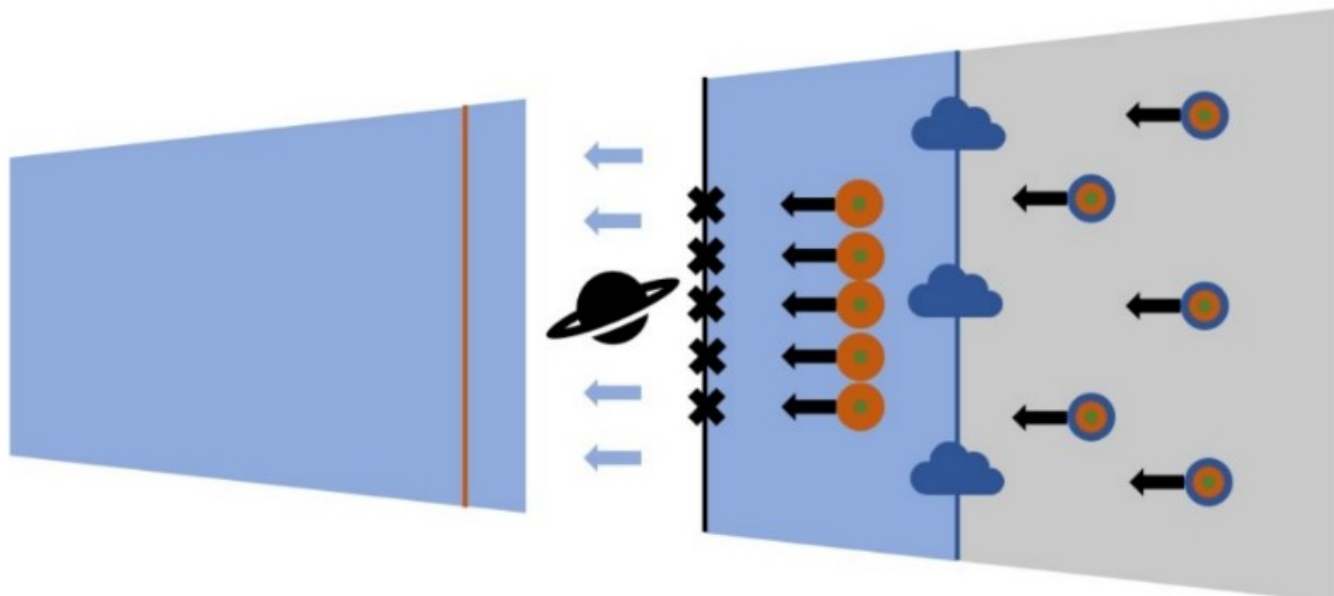
**Estrelas e seus planetas são formados à partir da mesma nuvem, compartilhando material primordial – assim, abundâncias químicas acuradas de estrelas hospedeiras restringem a composição química de seus planetas, ajudando no entendimento sobre processos de formação planetária.**

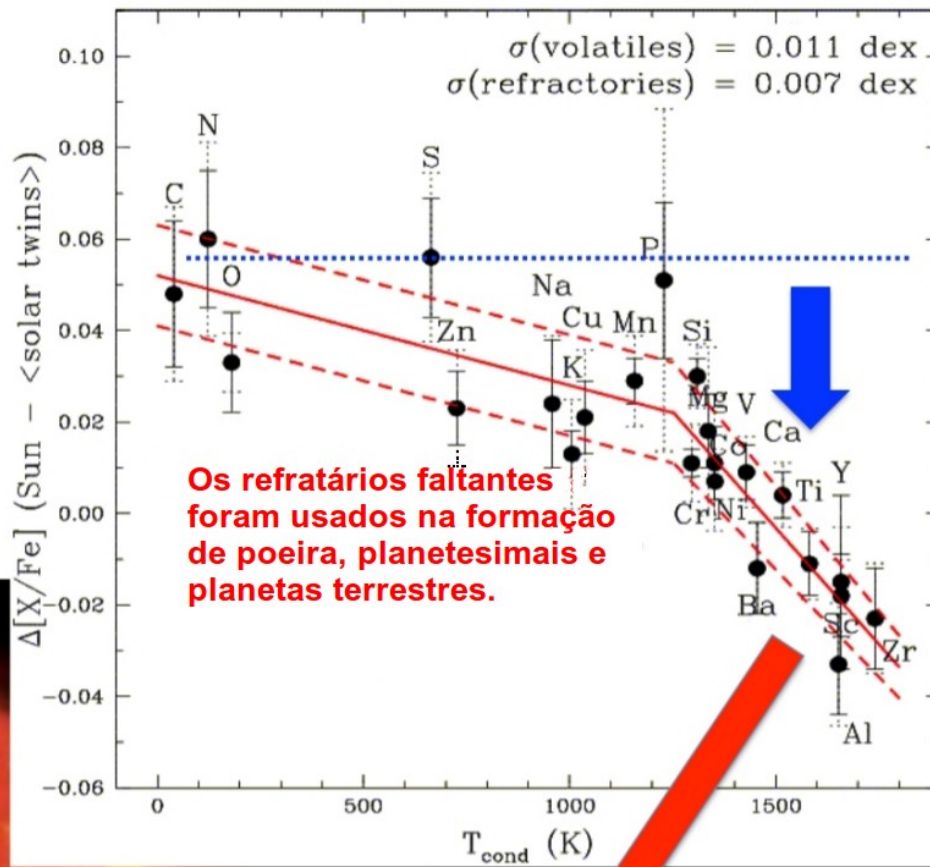




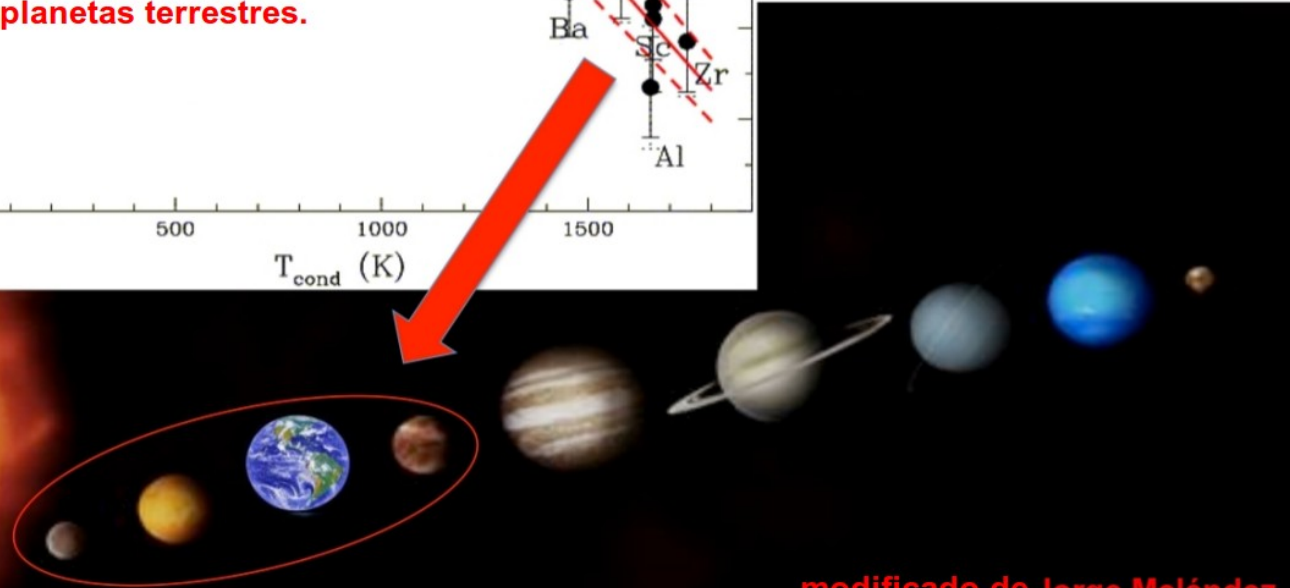


- Highly refractory
- Moderately refractory
- Volatile
- H+He



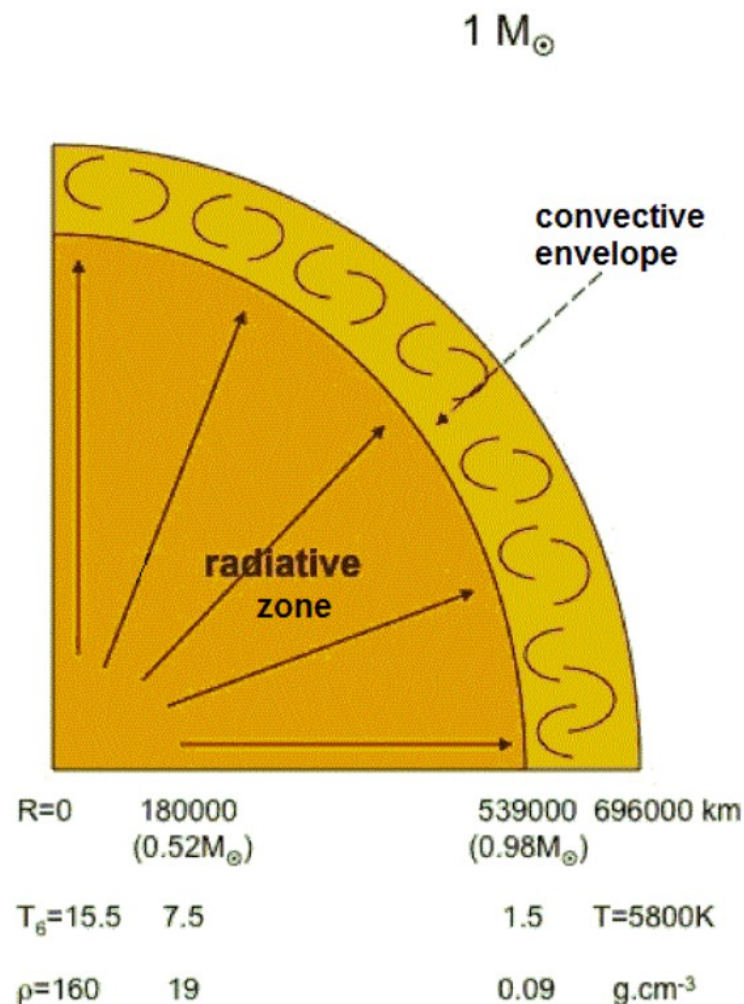


O gás posteriormente acretado pela estrelas era deficiente em elementos refratários.



modificado de Jorge Meléndez

## As peculiaridades do elemento Li:

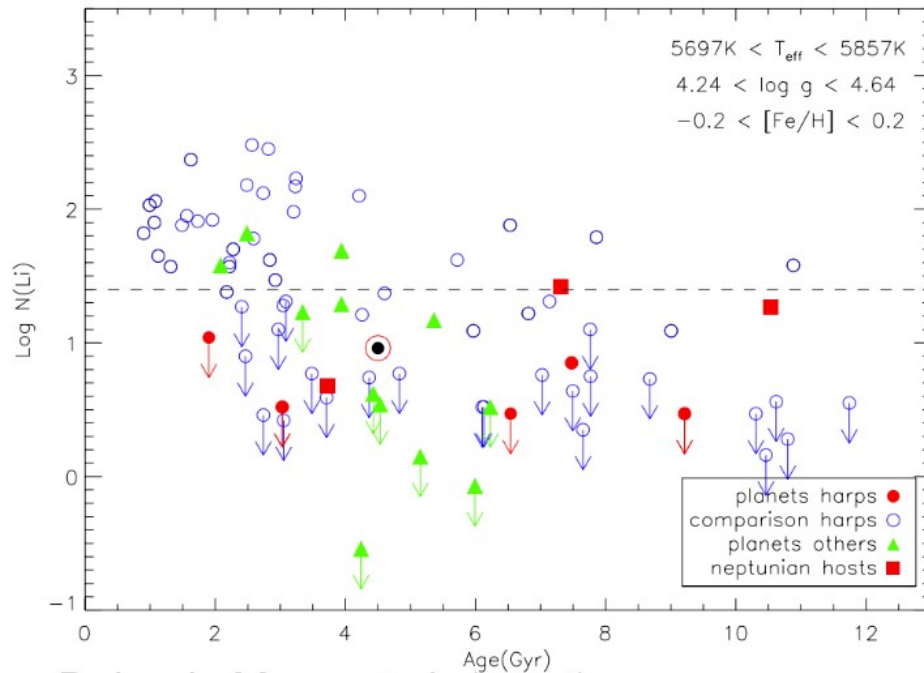


- O lítio é destruído nas camadas mais internas das estrelas via captura de prótons em temperaturas próximas à  $2.5 \times 10^6$  K através da reação  ${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$ .
- O lítio da superfície estelar é transportado para regiões mais internas através de movimentos convectivos e por inércia e “overshooting” para então ser destruído no interior estelar.
- Assim, estudar o lítio nos ajuda a entender como interiores estelares funcionam.

As peculiaridades do elemento Li:

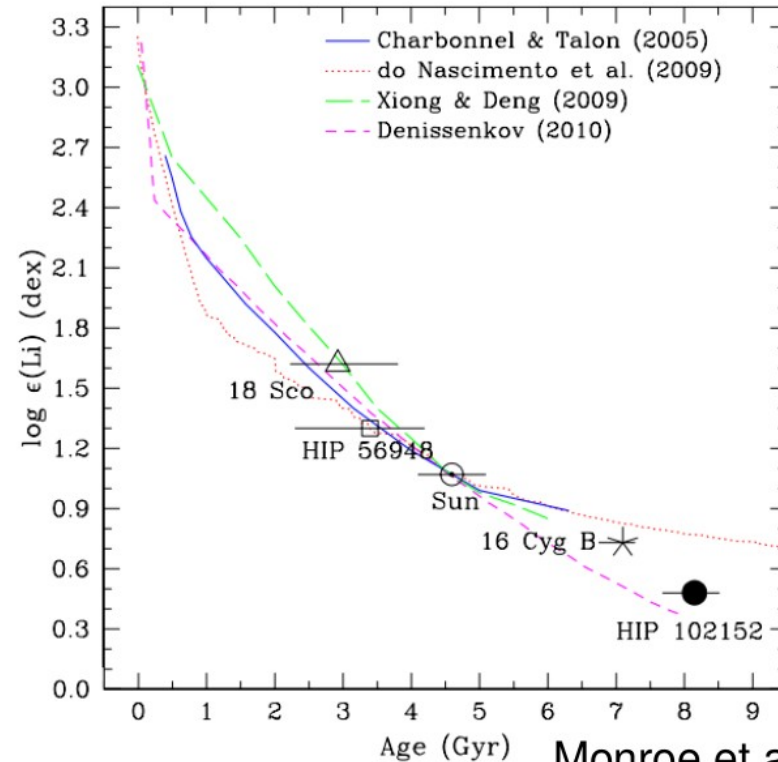
⇒ A quantidade de lítio destruída em uma estrela depende da espessura de sua camada convectiva, massa e metalicidade. Mas também pode depender da idade da estrela ou a presença de planetas...

Presença de planetas?



Delgado Mena et al. (2014)

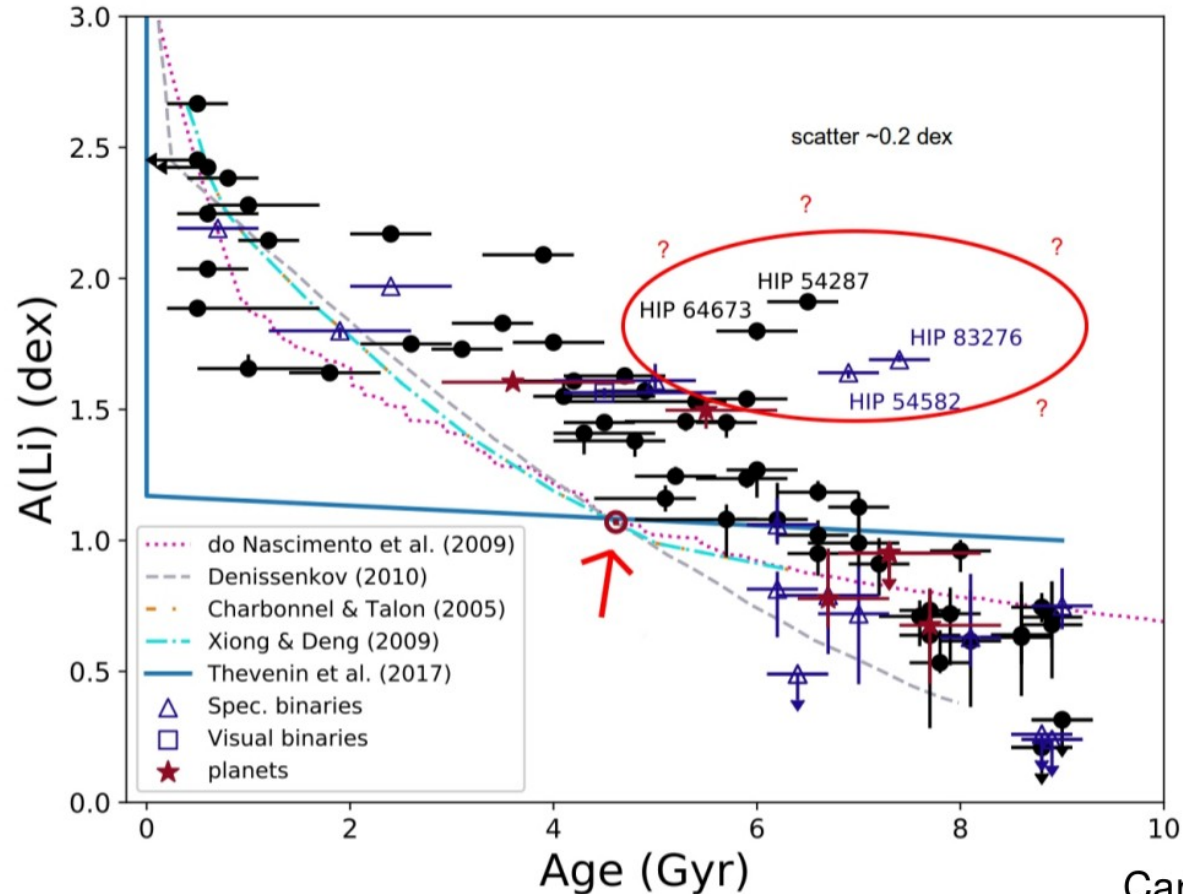
Idade?



Monroe et al. (2013)

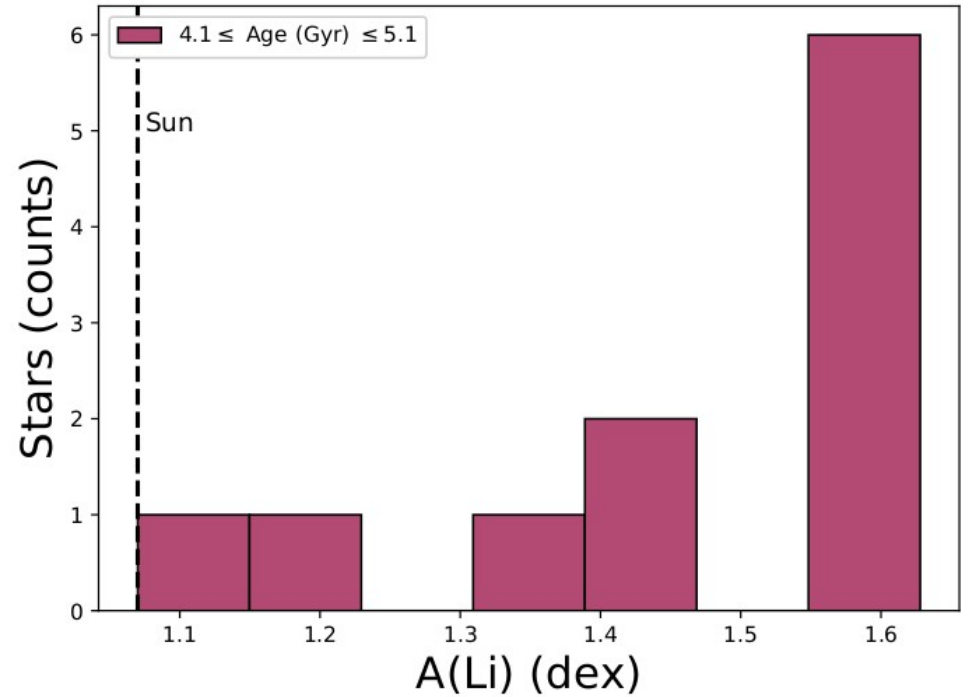
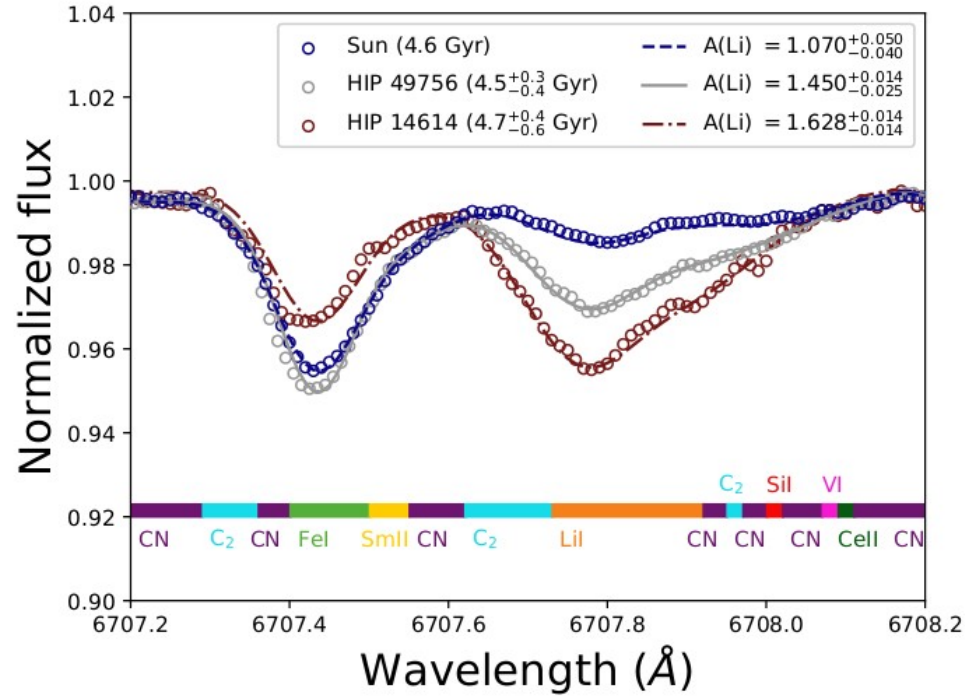


→ 77 gêmeas solares, 4 hospedeiras de planetas (parte 1)  
(HARPS,  $R \sim 115000$  e  $600 < S/N < 2400$ )



Carlos et al. (2019)

→ O Sol é pobre em lítio quando comparado com estrelas da mesma idade.

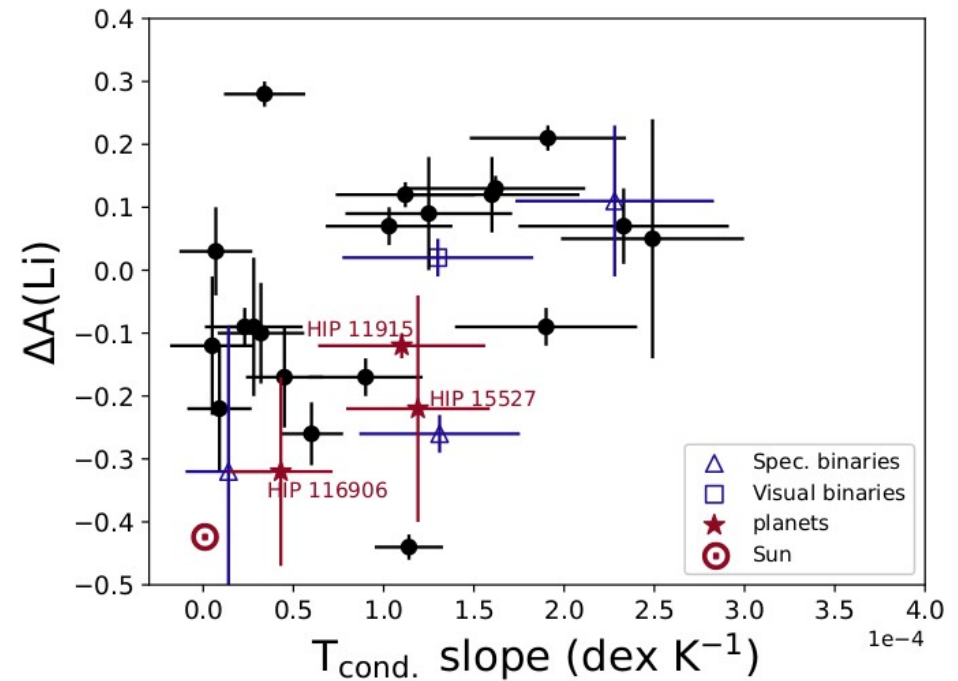
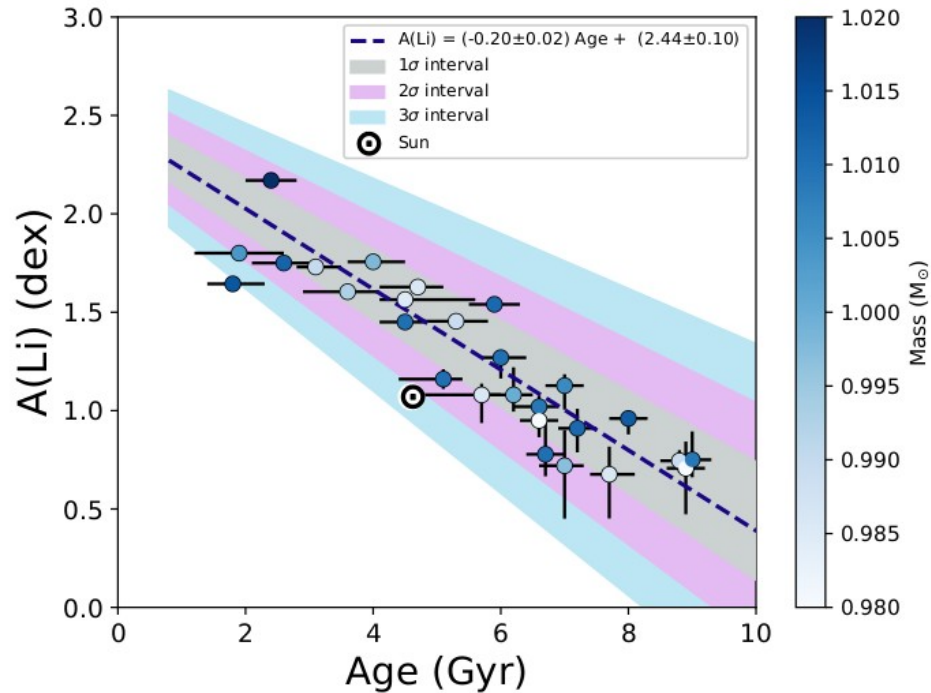


Carlos et al. (2019)



→ Sub-amostra no intervalo  $0.98 \leq M/M_{\odot} \leq 1.02$ , excluindo outliers. **O Sol é pobre em Li em  $\sim 2\sigma$ .**

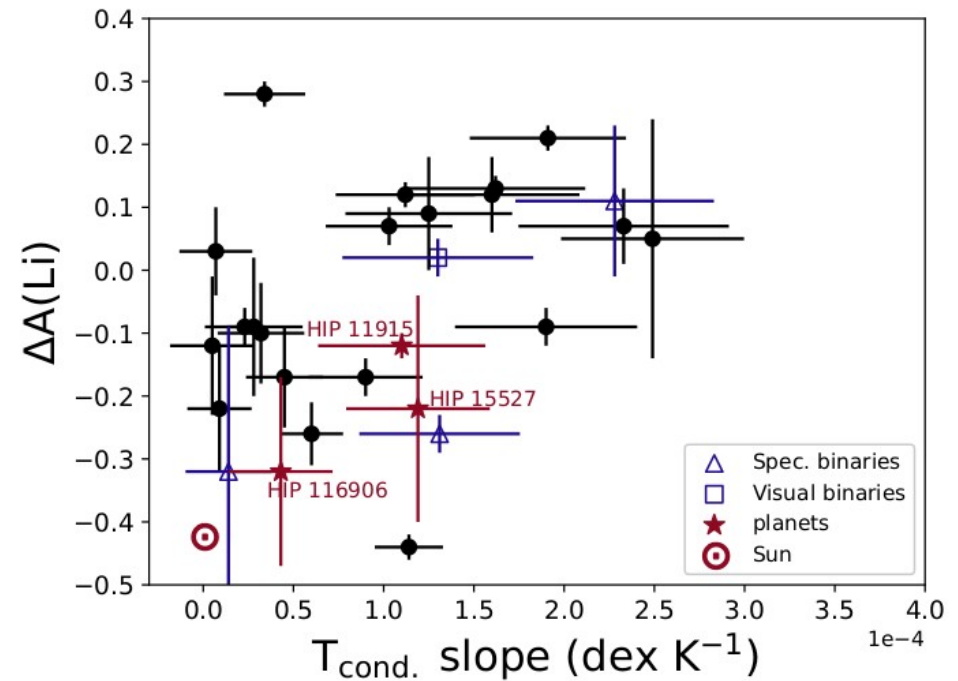
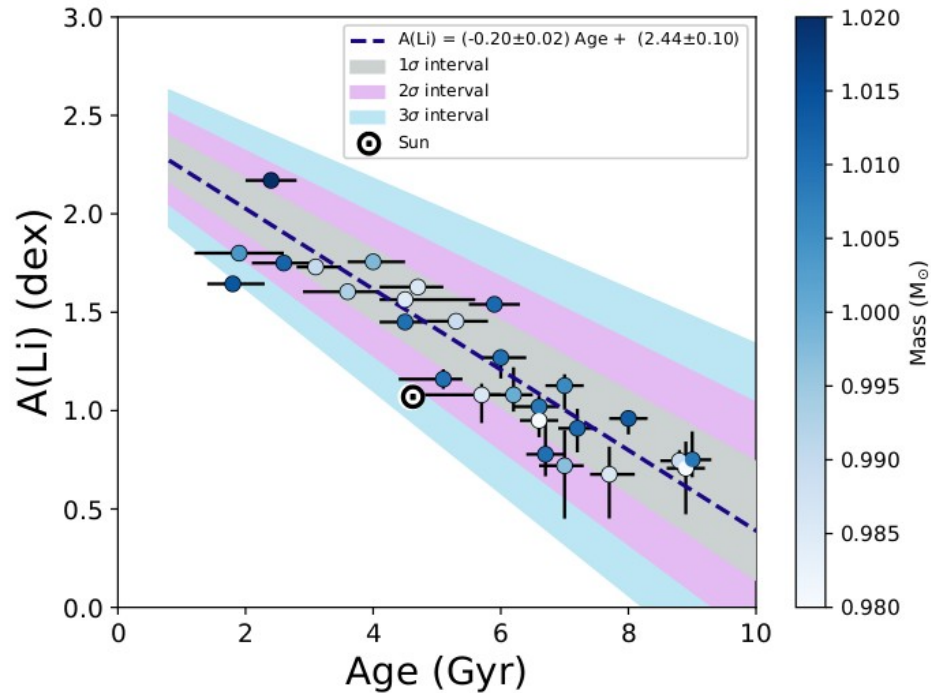
→  $\Delta A(\text{Li}) = A(\text{Li})_{\text{obs.}} - A(\text{Li})_{\text{mod.}}$  e  $T_{\text{cond.}}$  slope de Bedell et al. (2018).



Carlos et al. (2019)

→ Sub-amostra no intervalo  $0.98 \leq M/M_{\odot} \leq 1.02$ , excluindo outliers. **O Sol é pobre em Li em  $\sim 2\sigma$ .**

→  $\Delta A(\text{Li}) = A(\text{Li})_{\text{obs.}} - A(\text{Li})_{\text{mod.}}$  e  $T_{\text{cond.}}$  slope de Bedell et al. (2018).



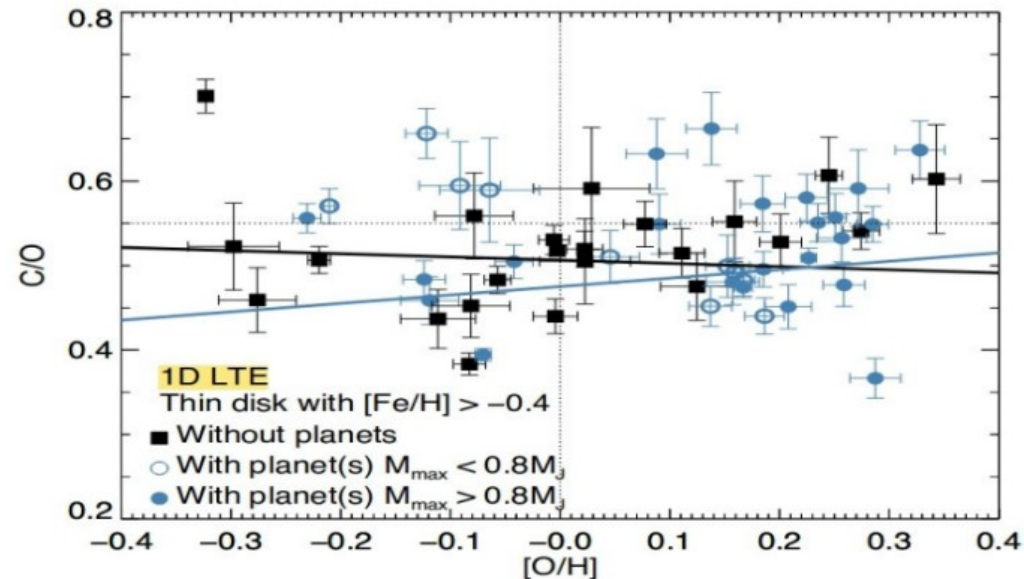
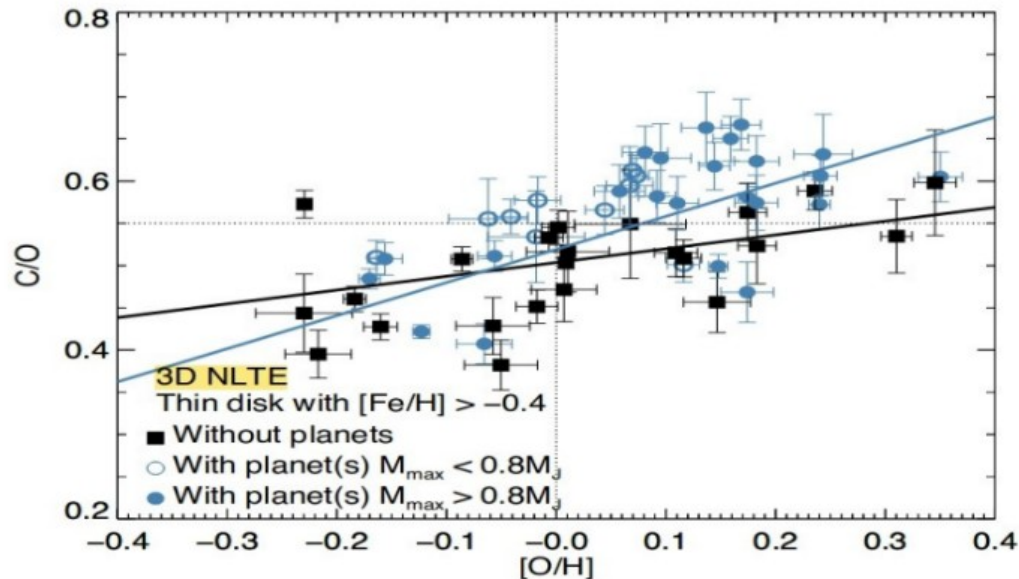
**Seria o Sol pobre em Li e outros refratários devido à presença de planetas?**

Carlos et al. (2019)

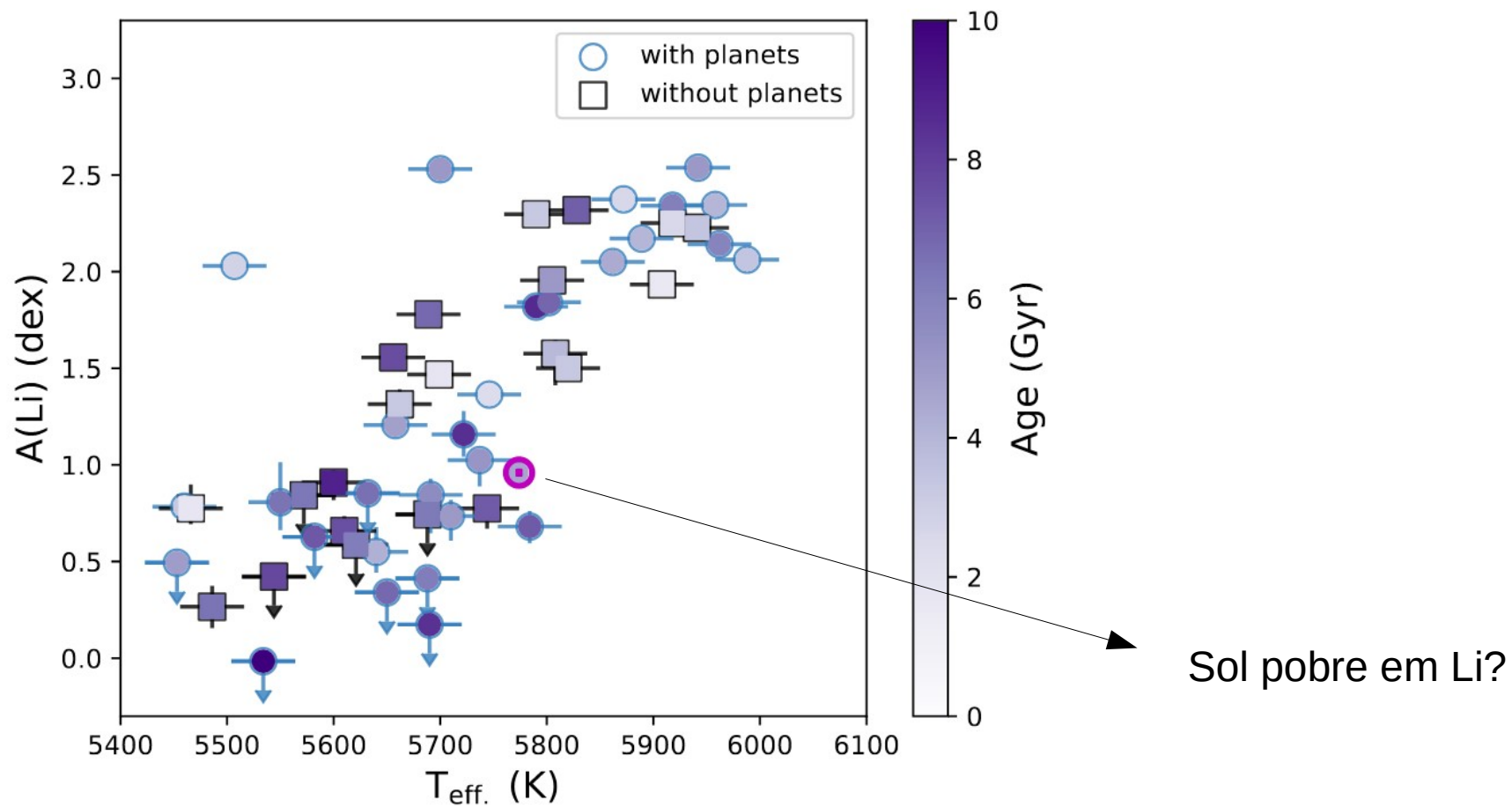
## Composição química detalhada de estrelas do tipo solar (parte 2)

- 50 estrelas do tipo solar (HARPS,  $R \sim 115000$  e  $S/N > 200$ )
  - 21 estrelas sem planetas detectados
  - 29 hospedeiras de planetas gigantes
- Abundâncias elementais desde o C até o Zn (1D LTE, 1D NLTE, 3D LTE e 3D NLTE).

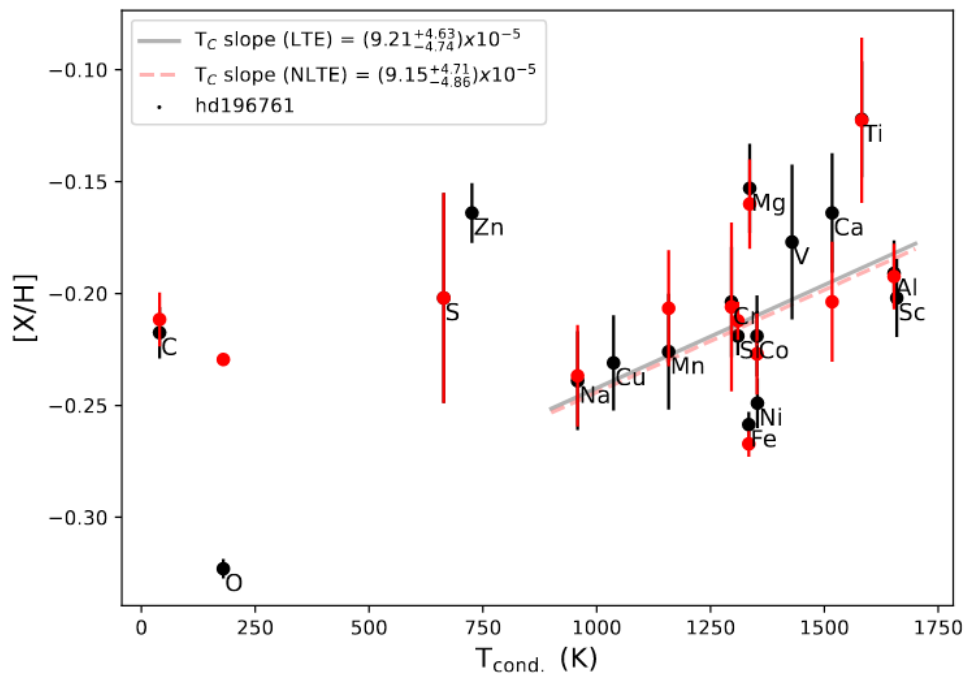
Amarsi+2019



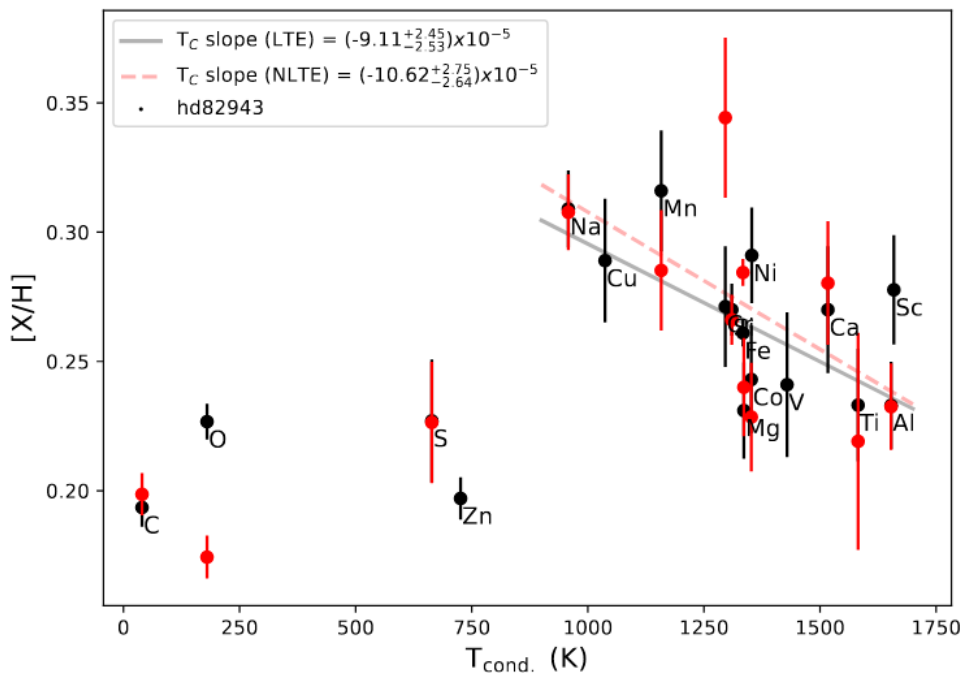
Li novamente:



## Abundâncias elementais vs. Tcond:

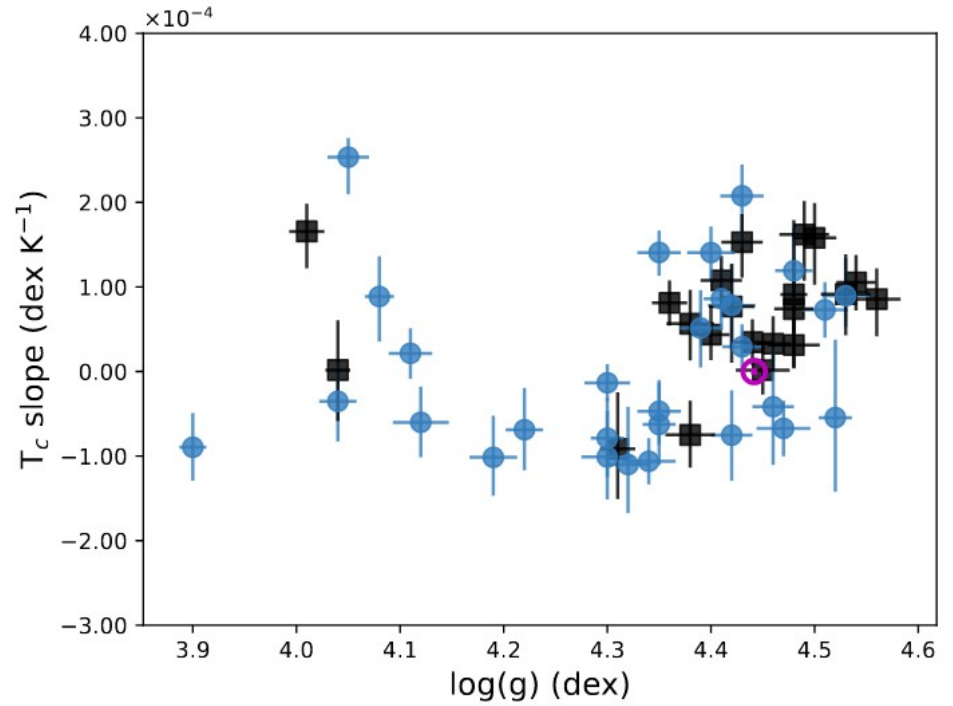
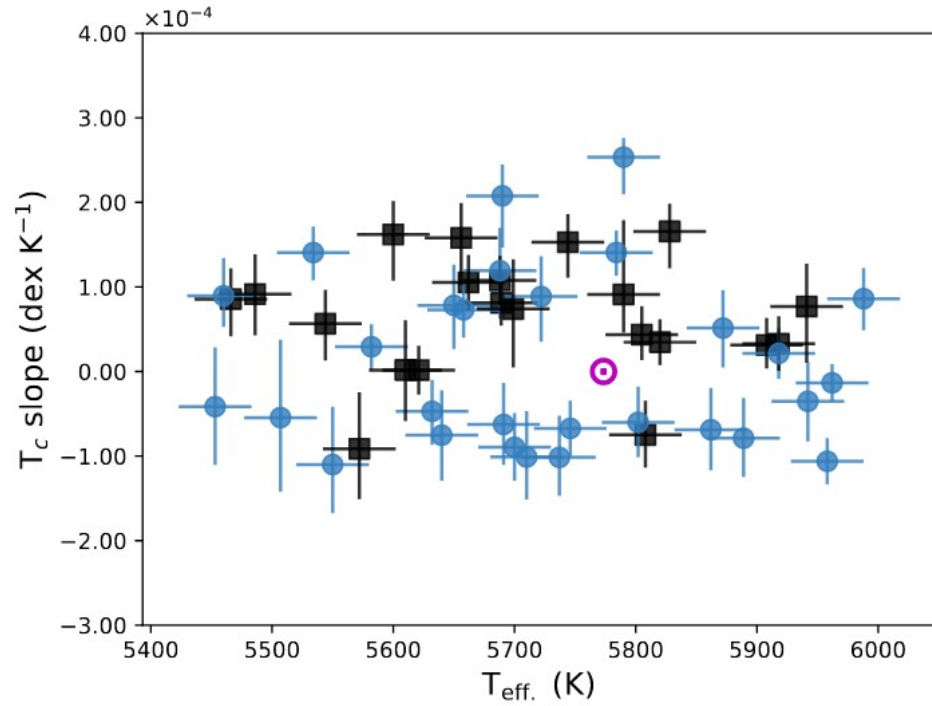


**Todas as estrelas da amostra  
em comparação ao Sol!**



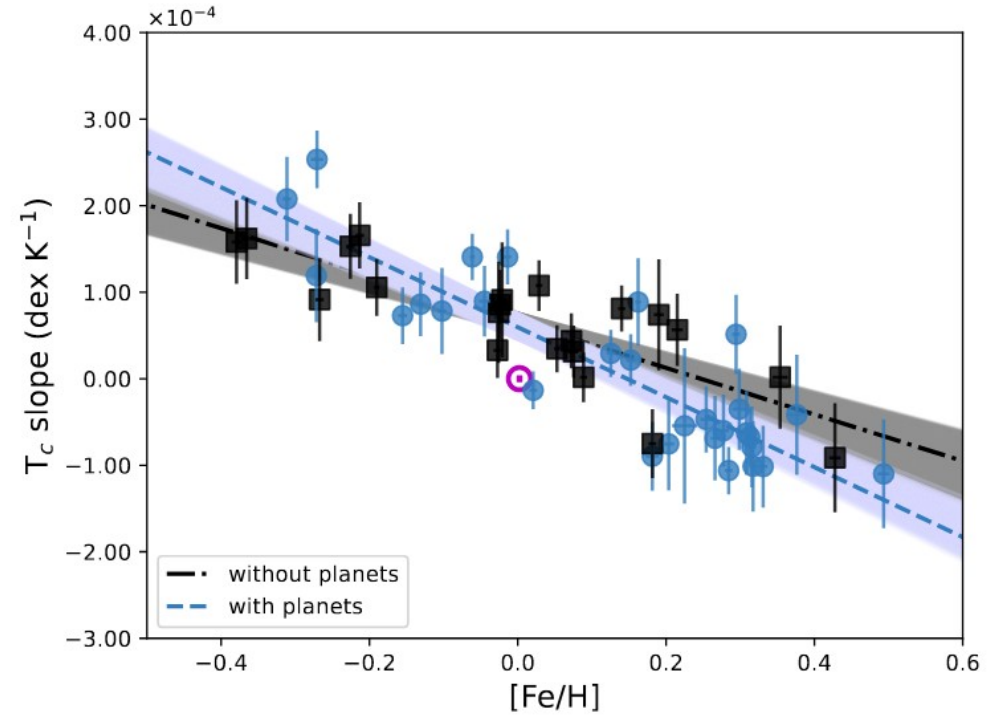
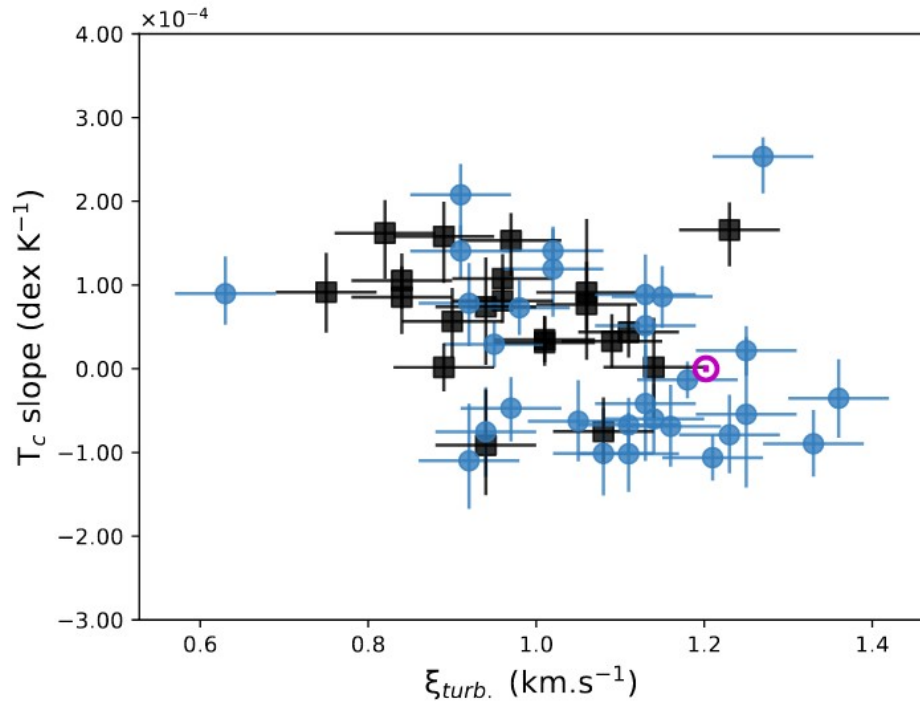
Carlos et al. (2025)

## T<sub>c</sub> slope vs. parâmetros atmosféricos:



Carlos et al. (2025)

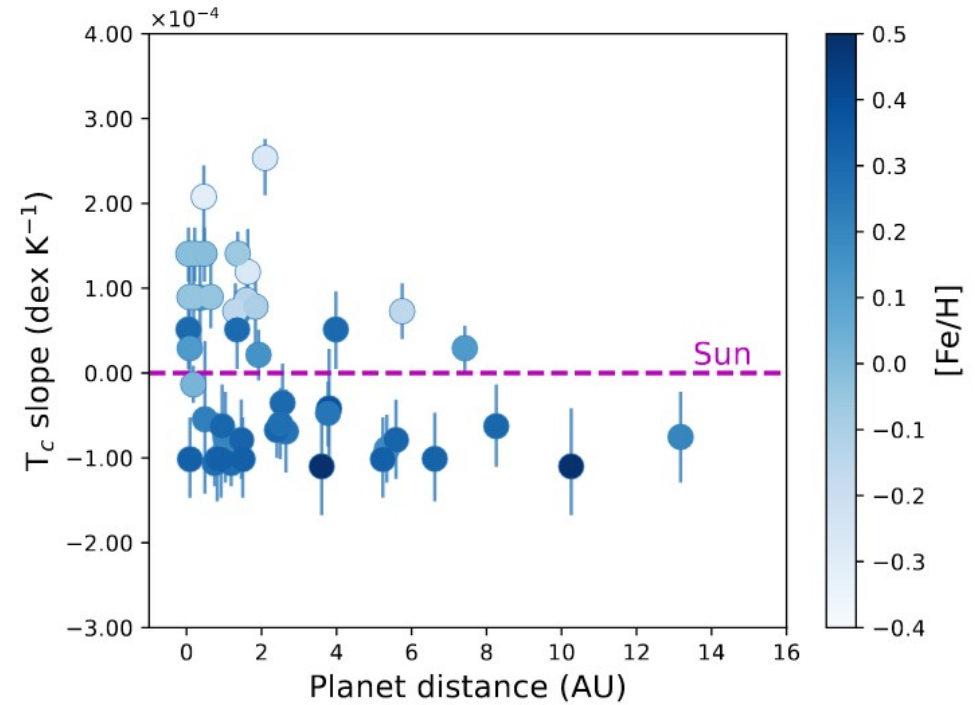
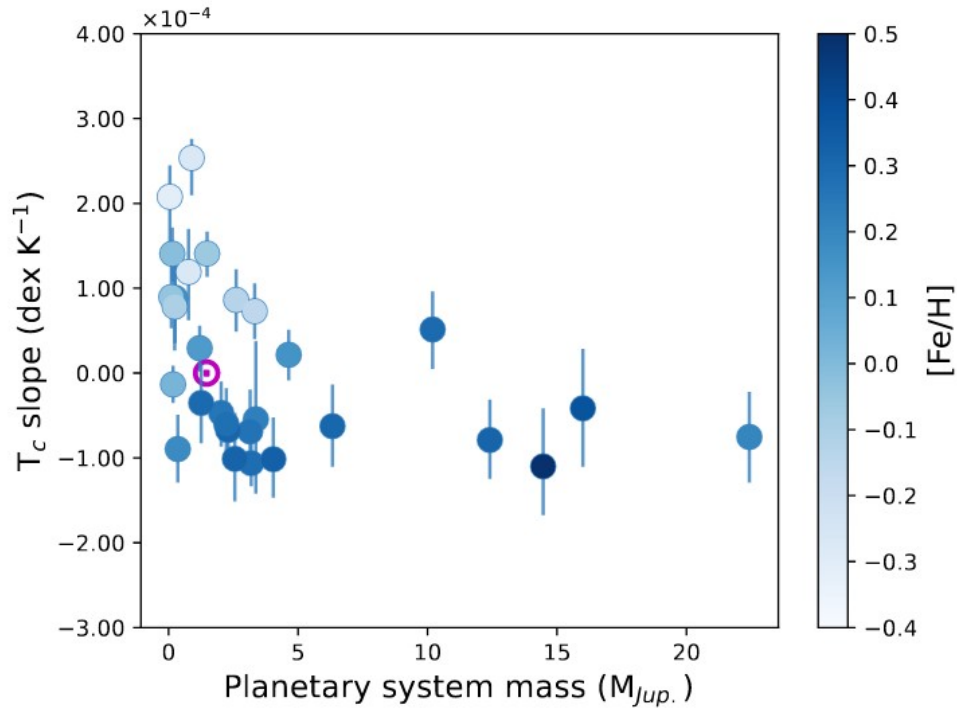
## T<sub>c</sub> slope vs. parâmetros atmosféricos:



Carlos et al. (2025)



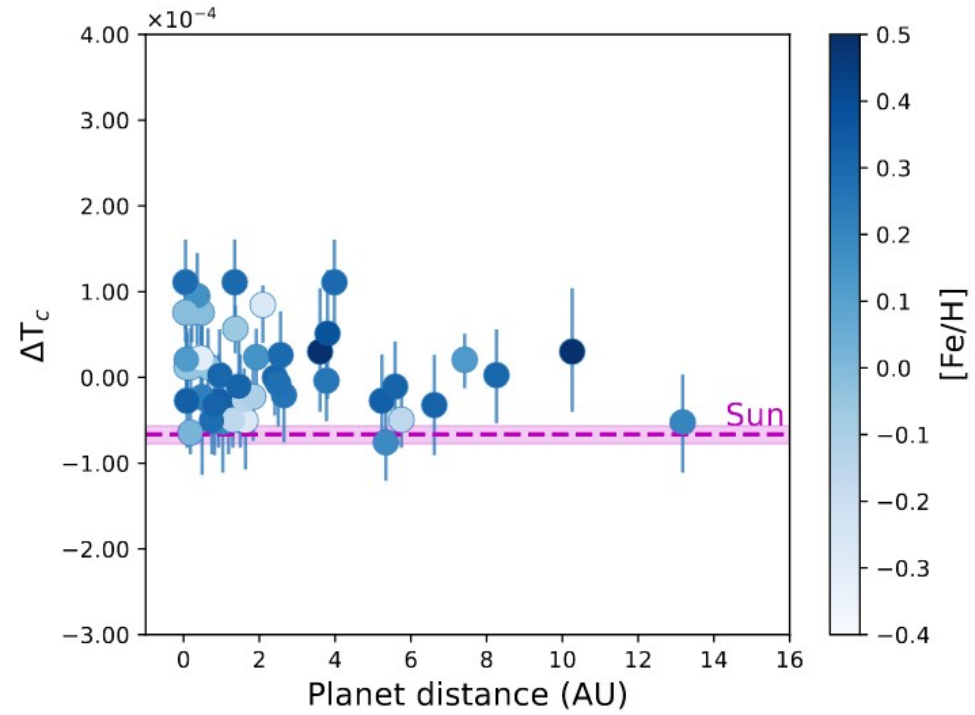
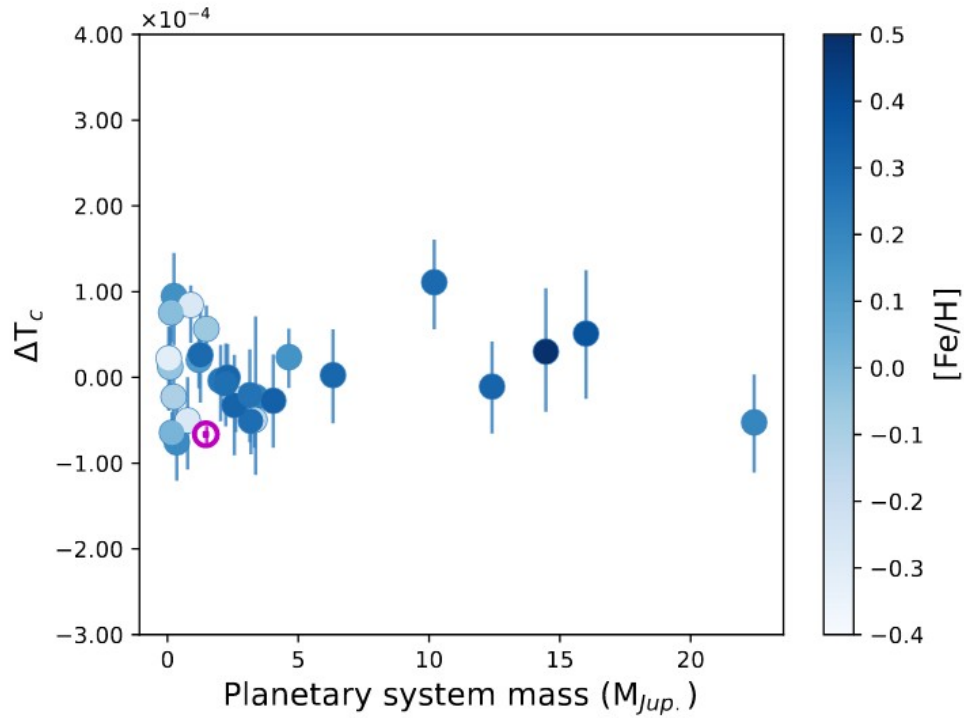
## T<sub>c</sub> slope vs. características planetárias:



Carlos et al. (2025)

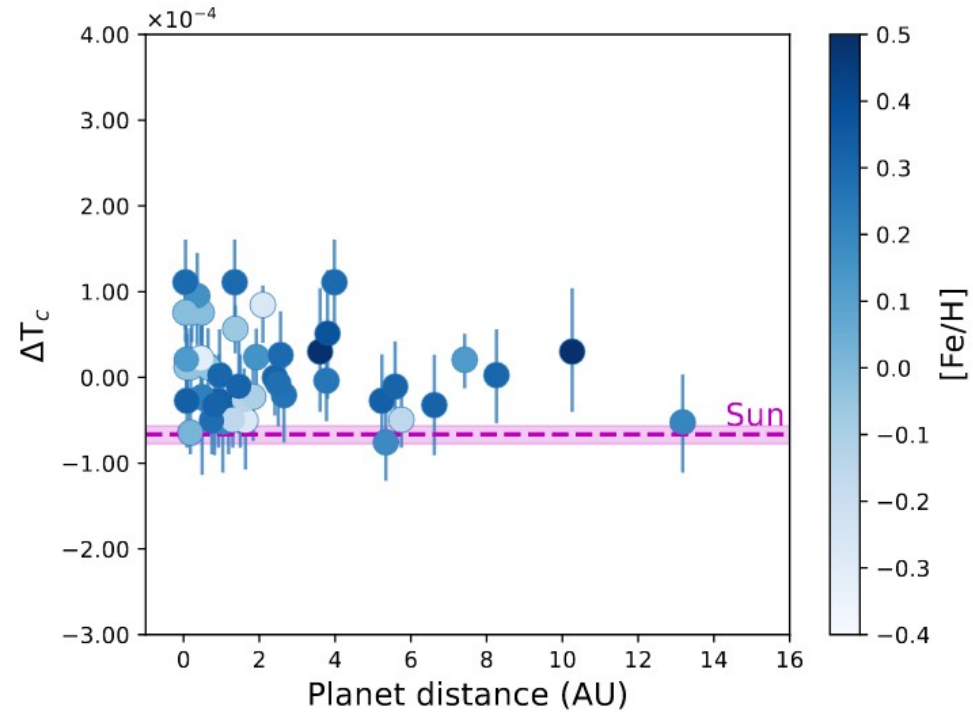
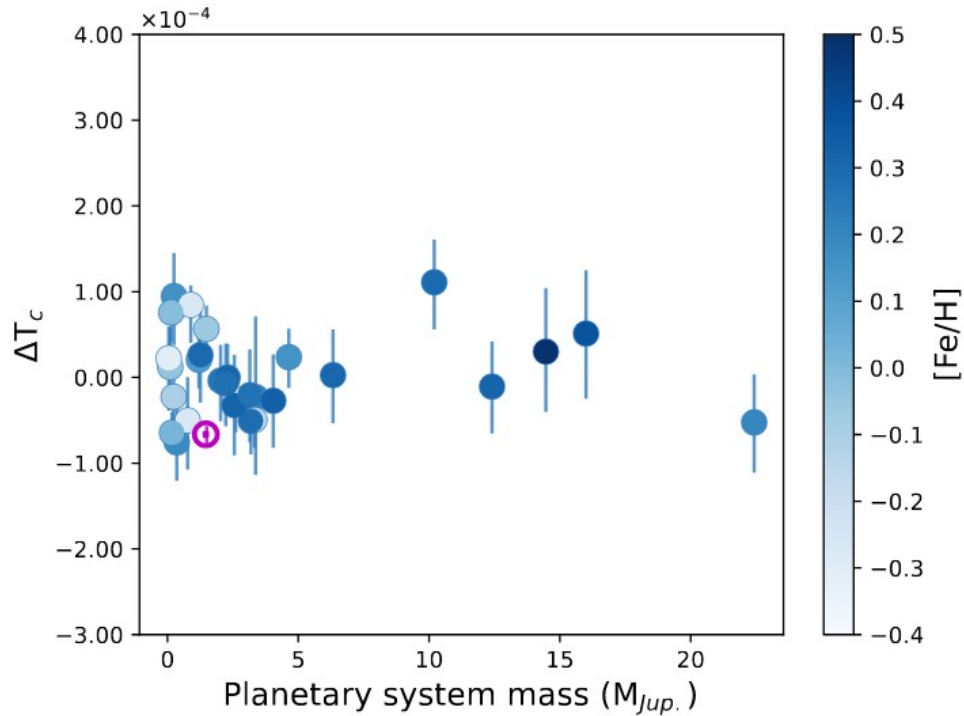


## Tc slope vs. características planetárias:



Carlos et al. (2025)

## Tc slope vs. características planetárias:



**Esse resultado indica que o Sol não é pobre em elementos refratários por causa da presença de planetas gasosos, mas provavelmente por outra razão.**

Carlos et al. (2025)

# Conclusões

- Abundâncias químicas de alta precisão nos ajudam a entender melhor como estrelas se formaram.
- O Sol não é pobre em elementos refratários devido à presença de planetas gasosos em nosso sistema solar, mas provavelmente por outro motivo.
- Ainda não entendemos completamente porque o Sol é pobre em elementos refratários (incluindo o Li).

**Muito obrigada!**