

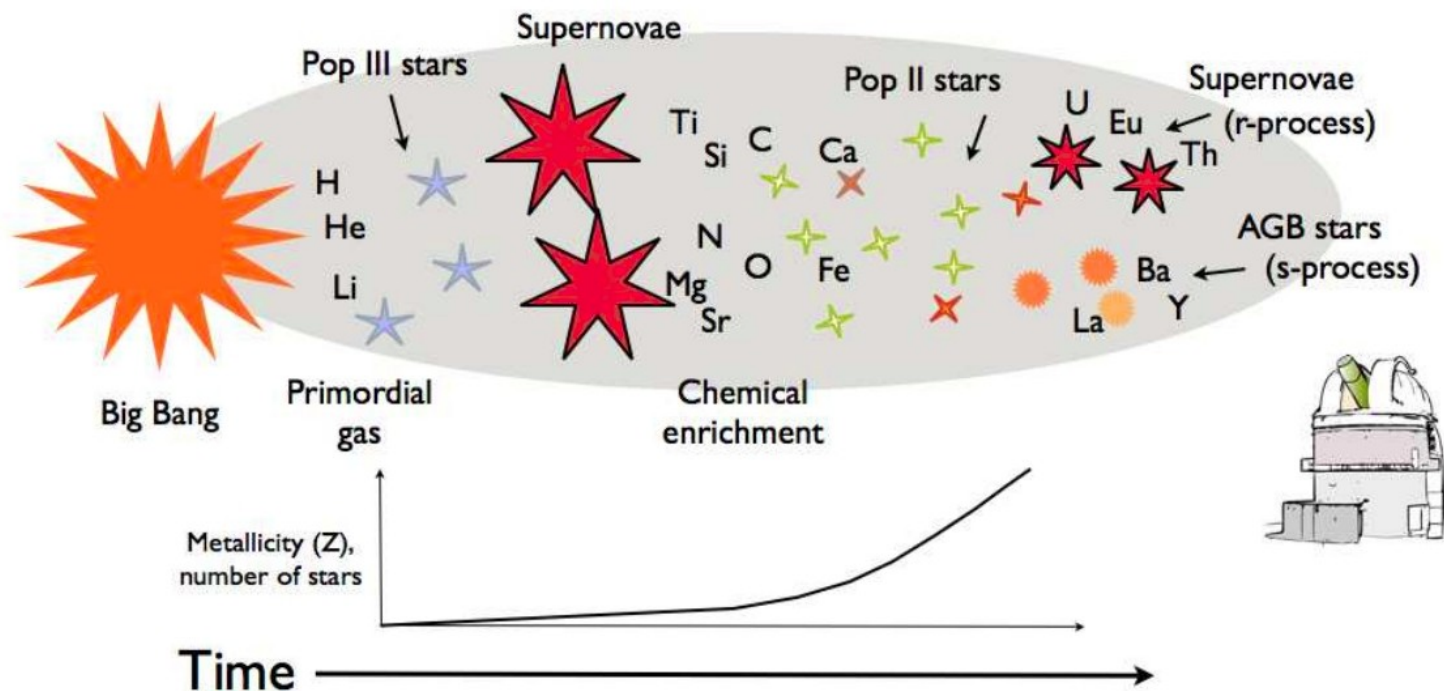
Composições químicas estelares com alta precisão e acurácia

Escola de Inverno em Astronomia 2025

Marília Carlos
Pesquisadora
Observatório Nacional

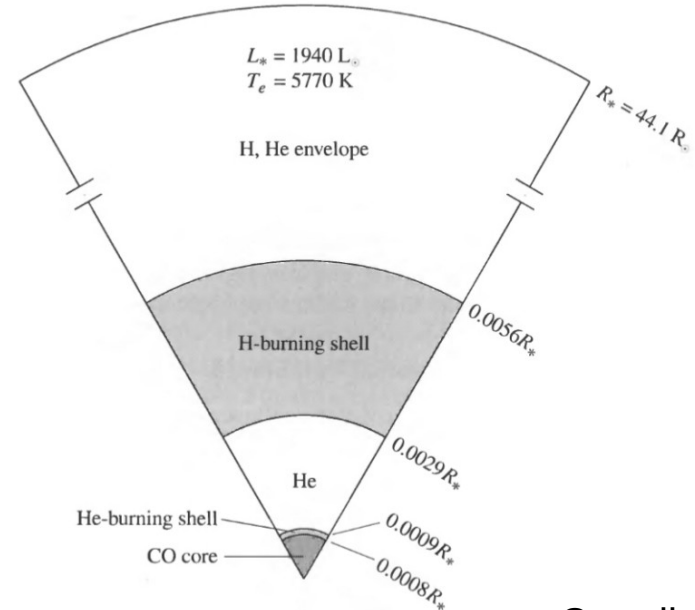
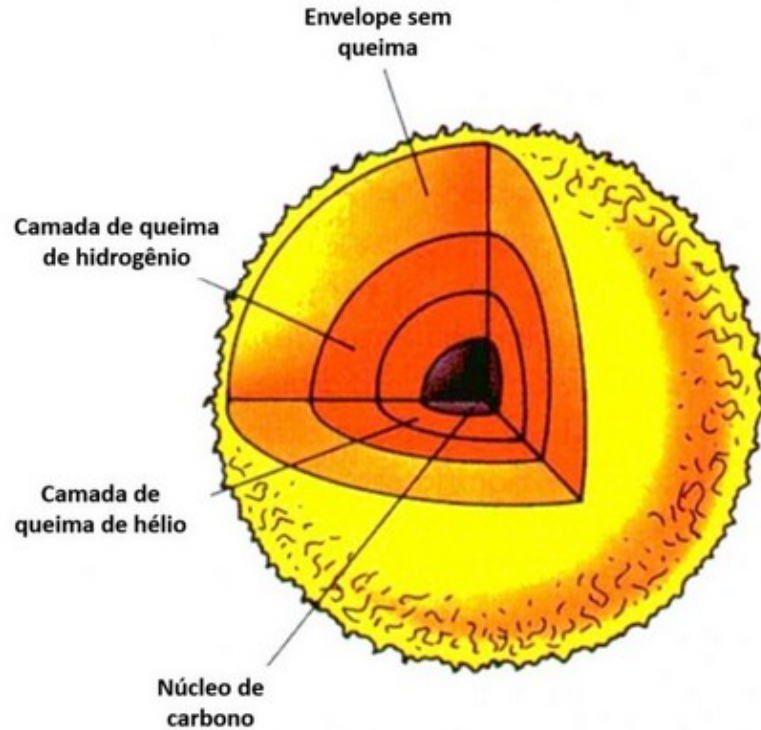
Sumário

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

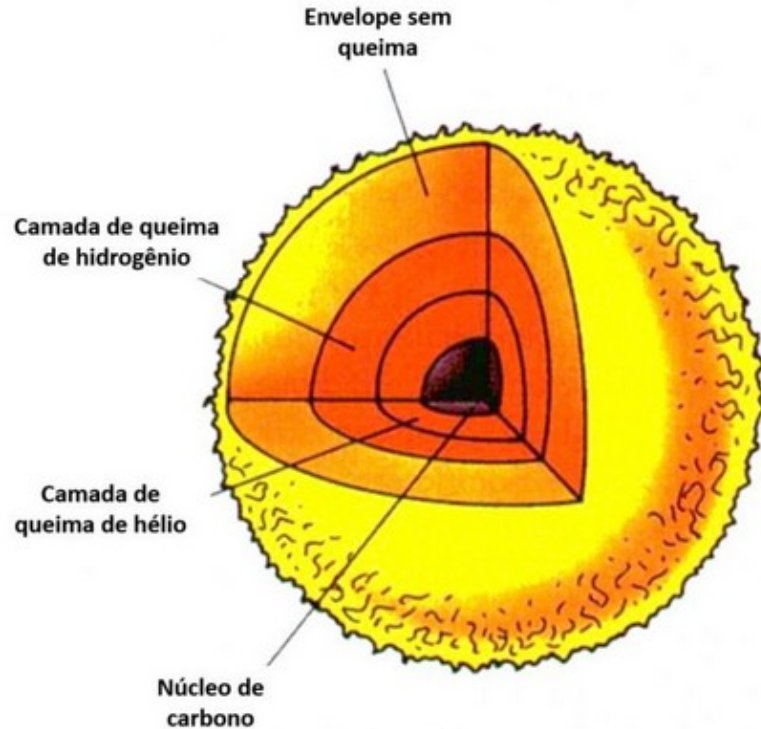


→ Estrelas de diferentes massas têm diferentes evoluções e, logo, contribuem de forma distinta para a poluição do meio.

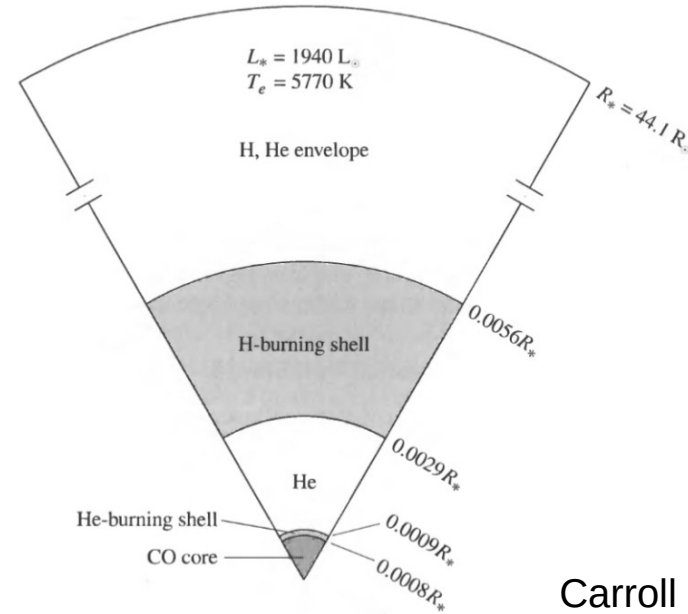
Estrelas de baixa massa e massa intermediária:



Estrelas de baixa massa e massa intermediária:

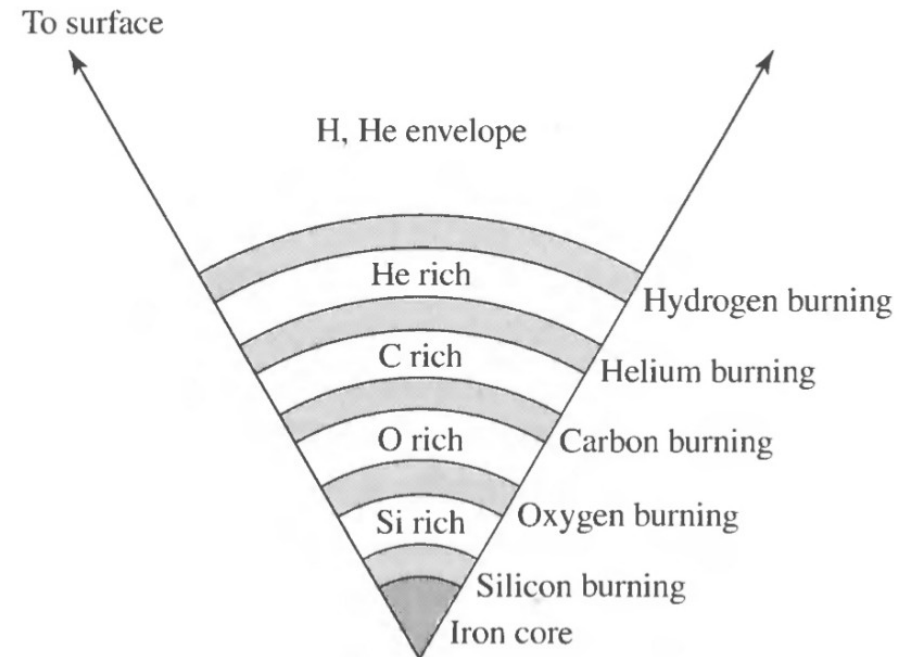
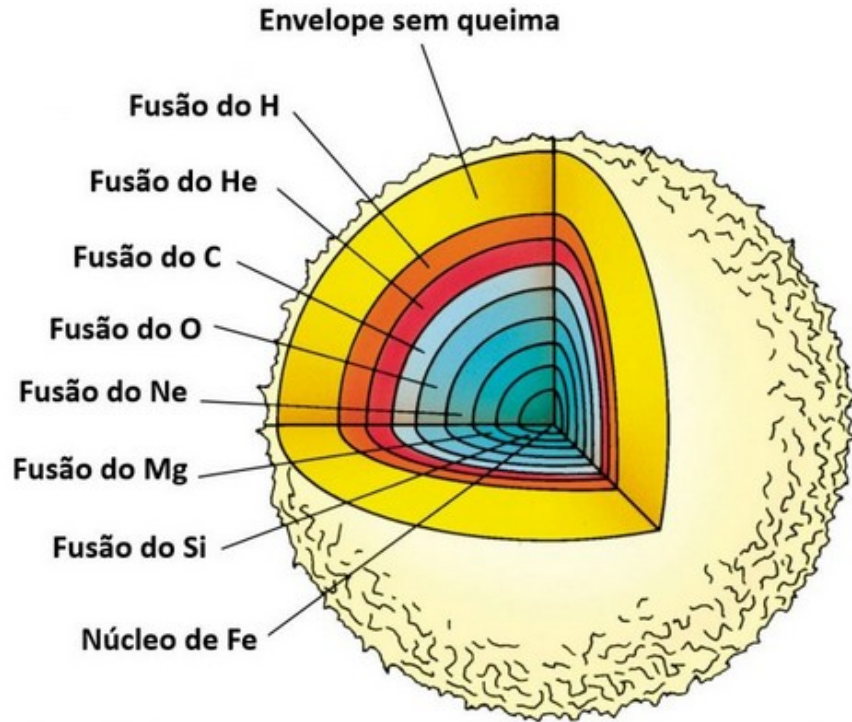


Produtoras de C, N, F e elementos do processo s (por exemplo: Ba e Y)



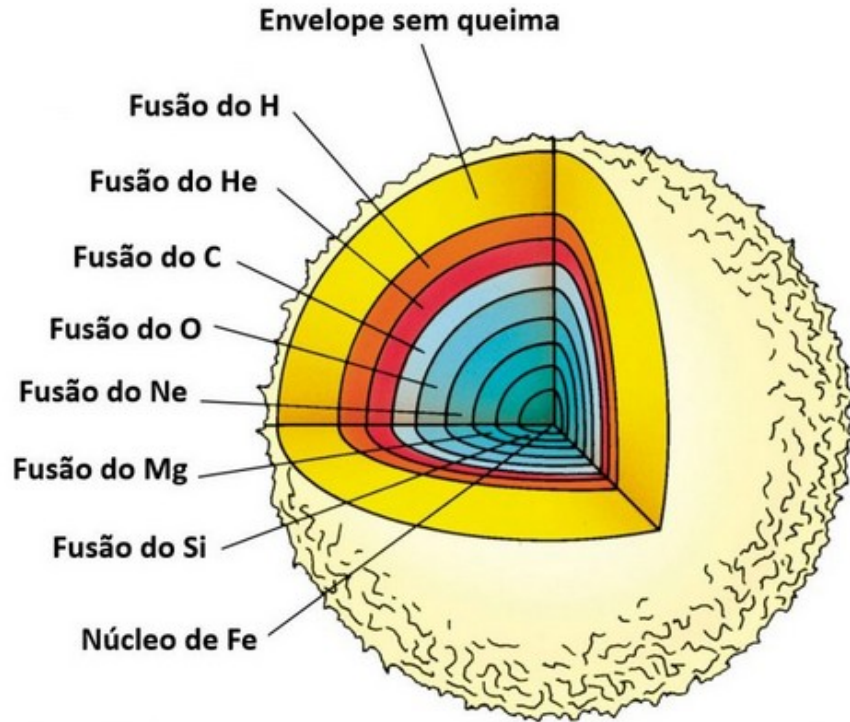
Carroll & Ostlie (2007)

Estrelas de alta massa:

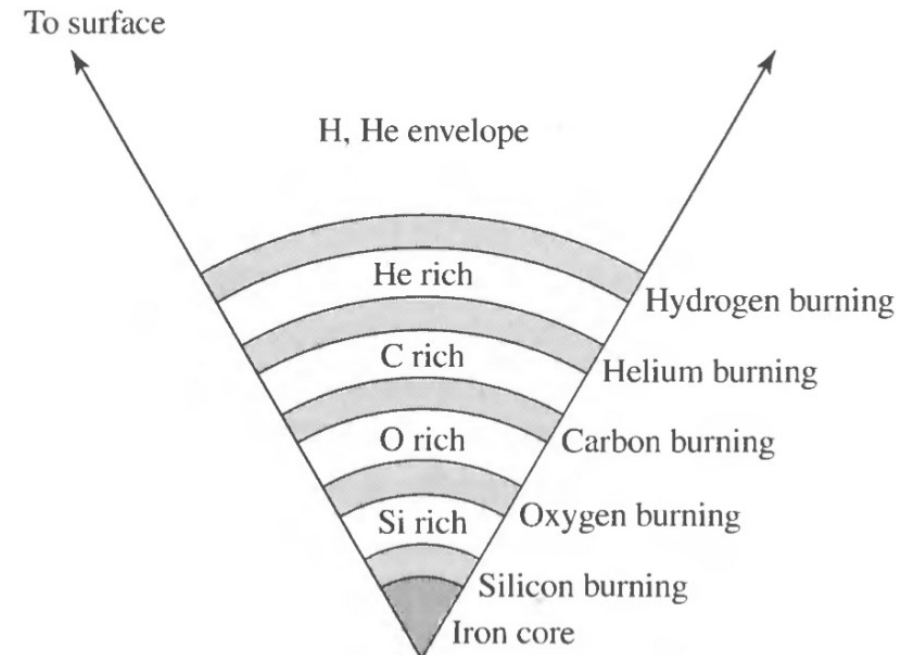


Carroll & Ostlie (2007)

Estrelas de alta massa:

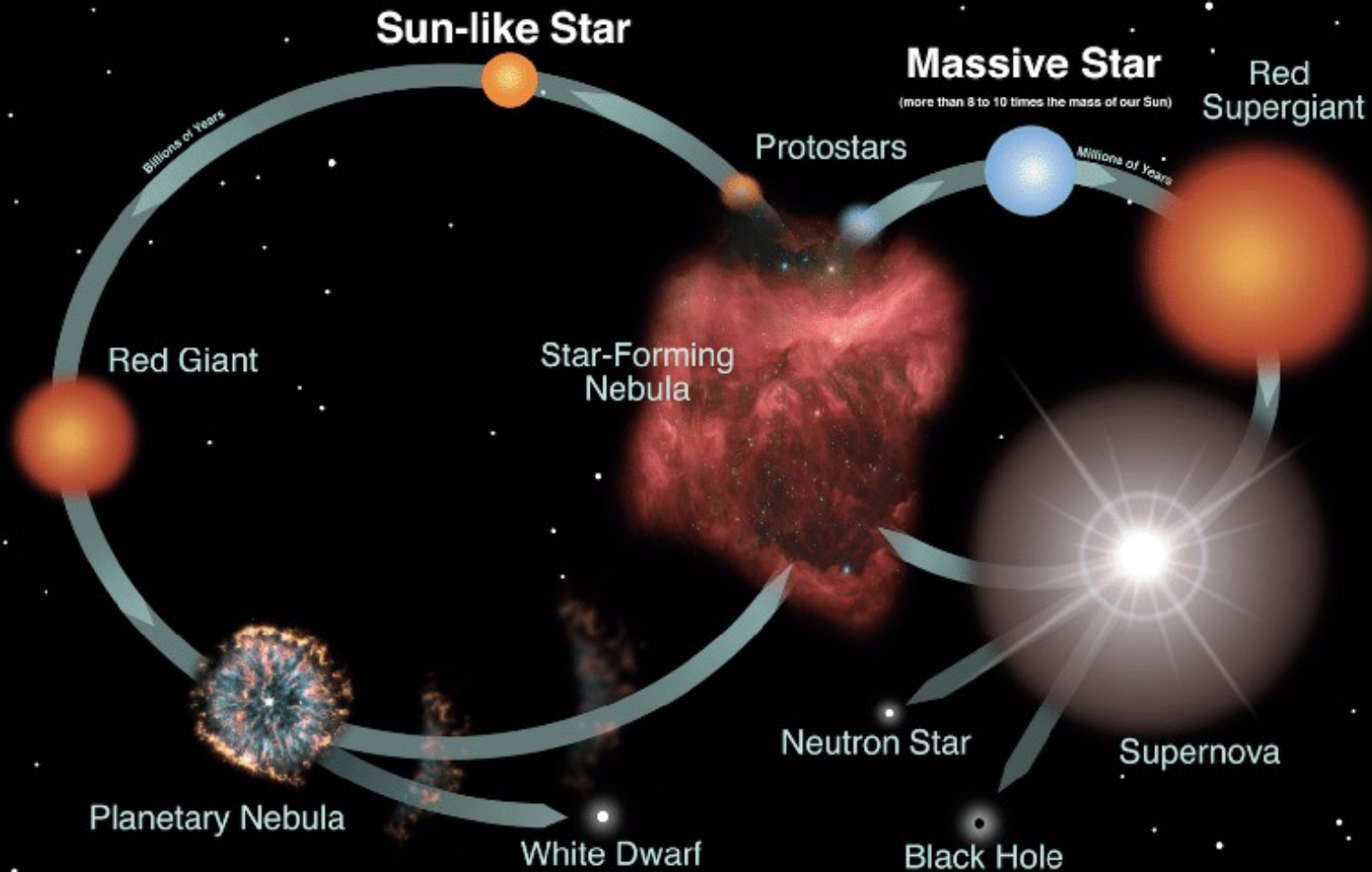


Produtoras de elementos α (O, Mg, Si, etc.); e também de elementos do processo r (Eu, Gd, Dy, etc.), durante a explosão de supernovas do tipo II e fusão de estrelas de nêutrons.



Carroll & Ostlie (2007)

Ciclo de vida gás-estrela:

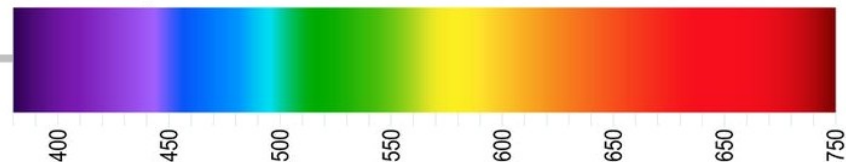


- Assim, estudar a composição química das estrelas nos ajuda a compreender melhor como estas se formaram e como contribuíram para a evolução química da nossa galáxia.
- Mas como podemos determinar a composição química de estrelas?

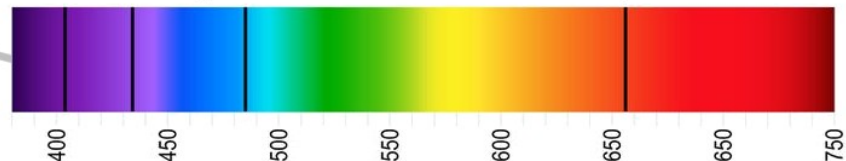


Espectroscopia e as leis de Kirchhoff:

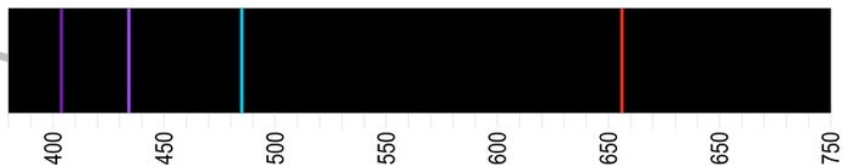
Espectro contínuo



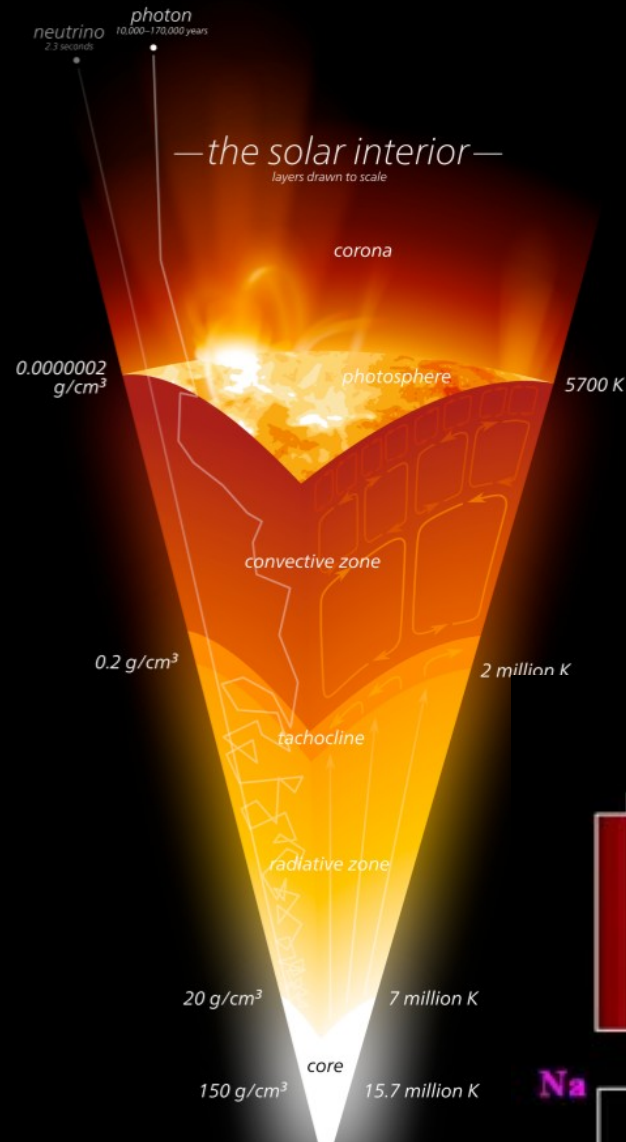
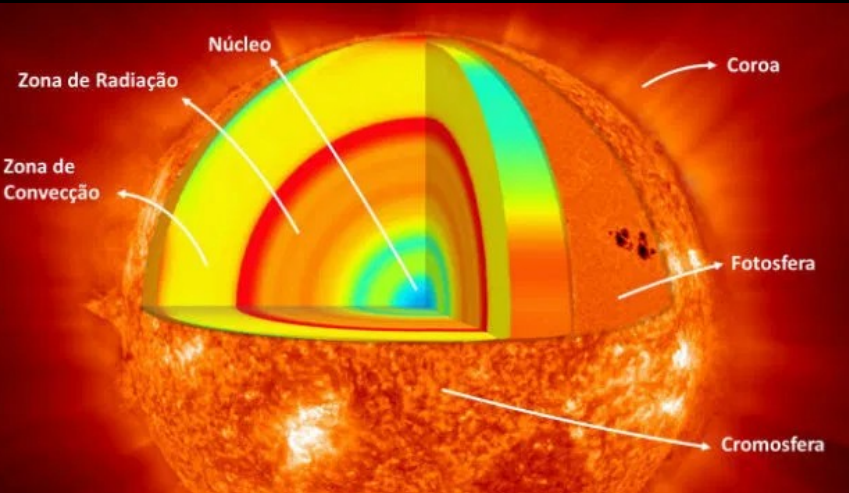
Espectro de absorção



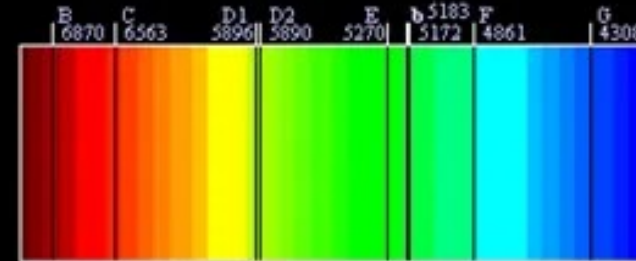
Espectro de emissão



O Sol



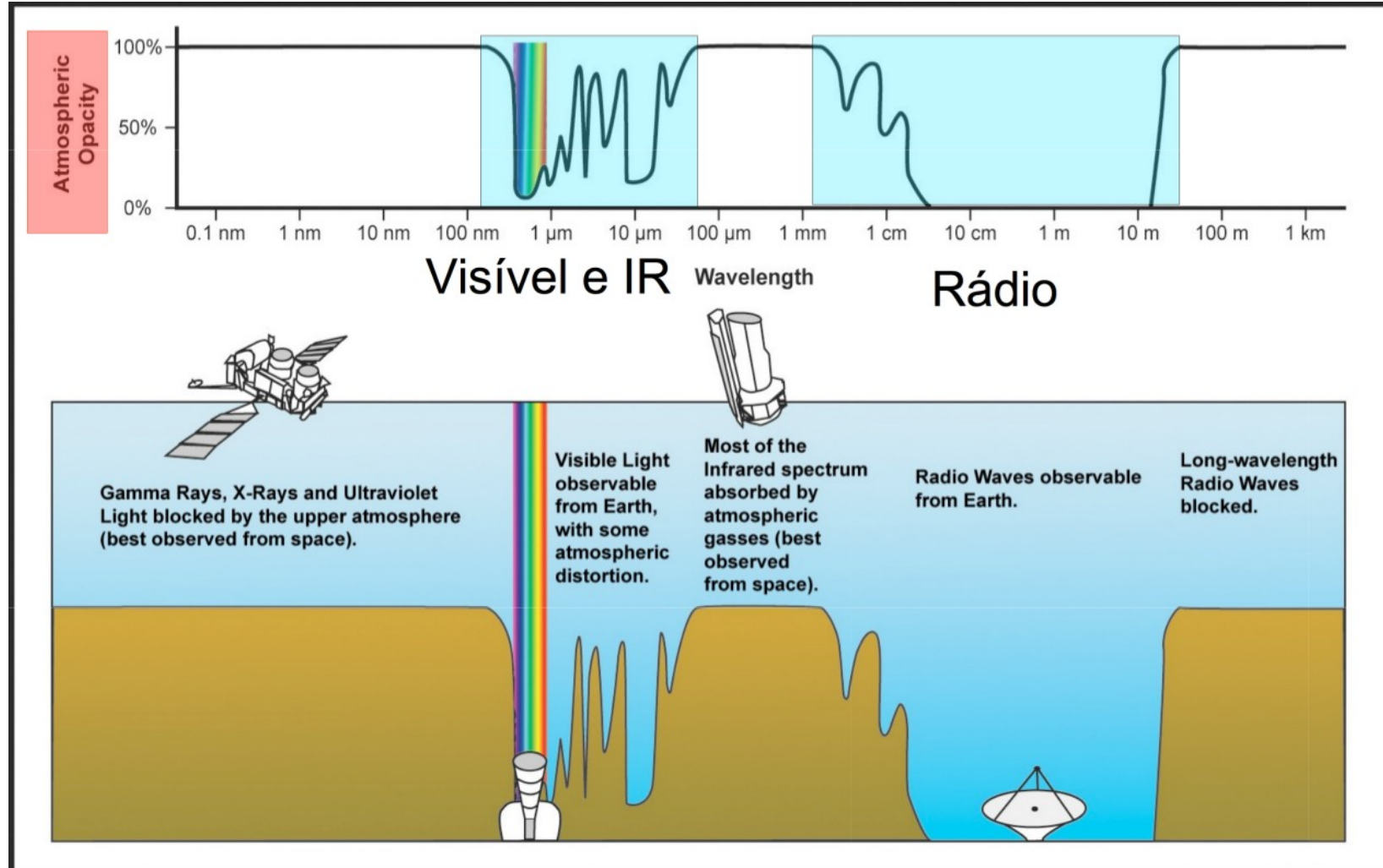
Espectro Solar



Na

5896 5890

- Atenuação atmosférica:



Observações terrestres em alta resolução



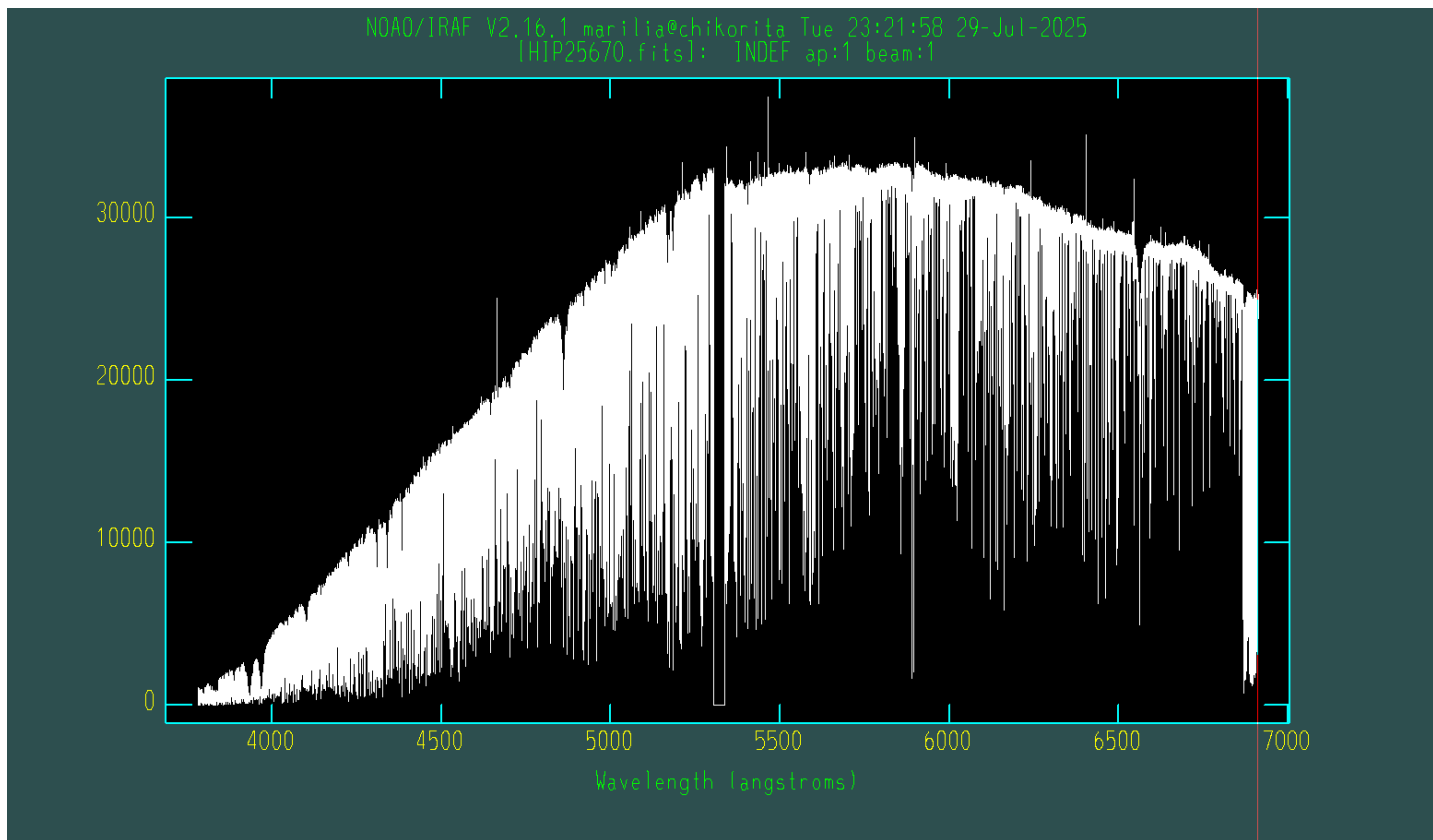
Maunakea - Havaí

Observações terrestres em alta resolução

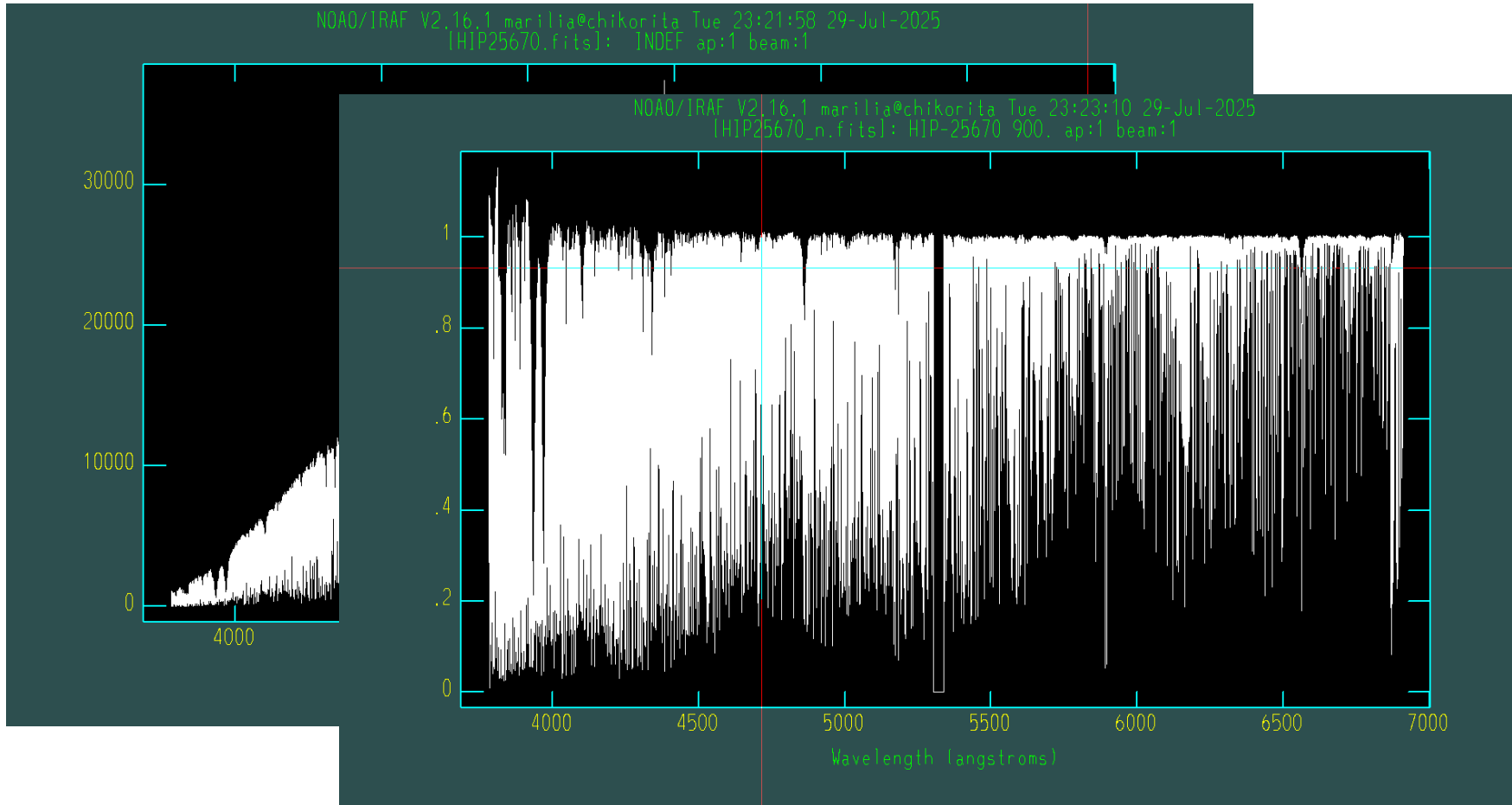


Cerro Paranal - Chile

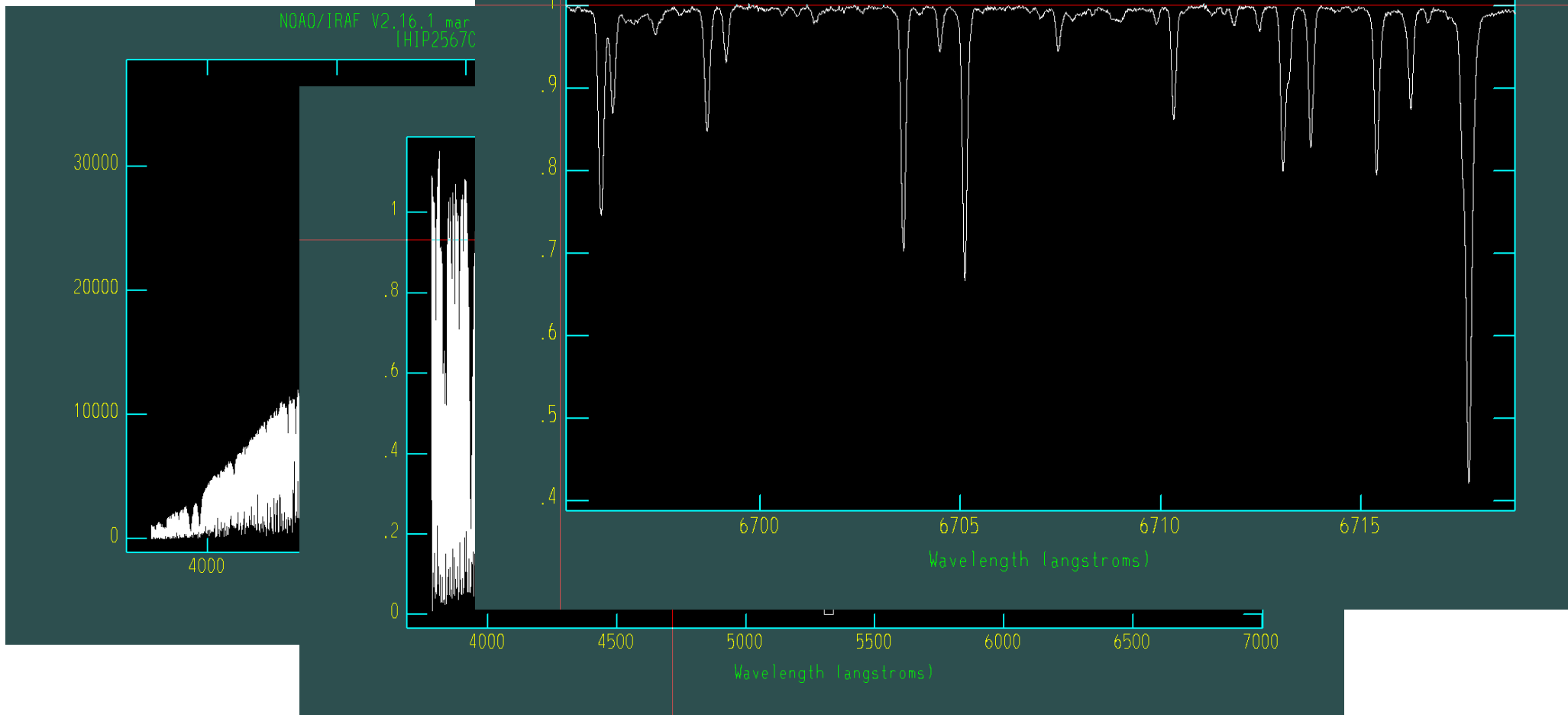
Espectro observado:



Espectro observado:

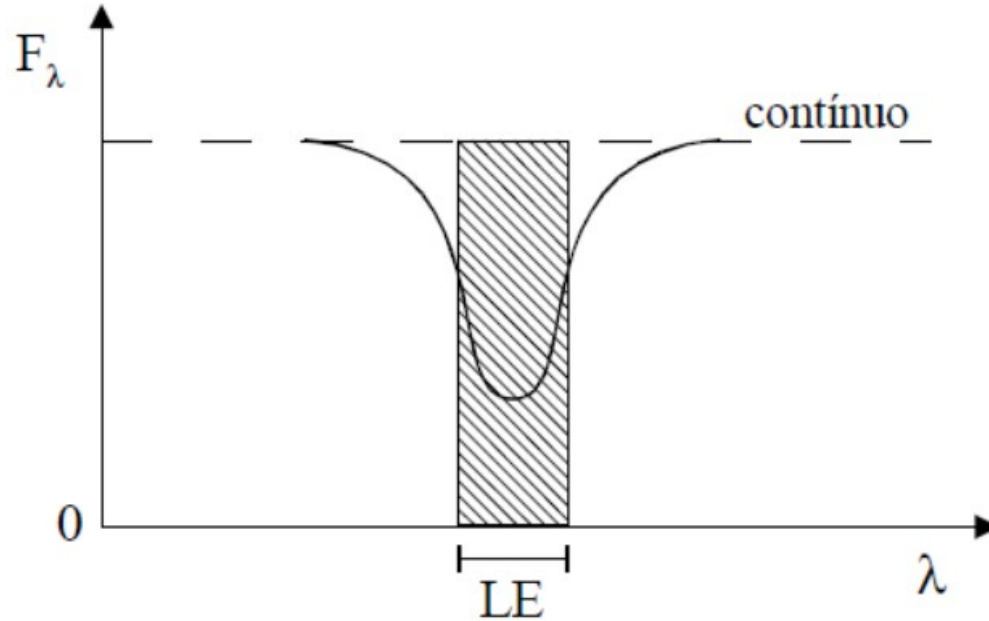


Espectro observado:



Métodos:

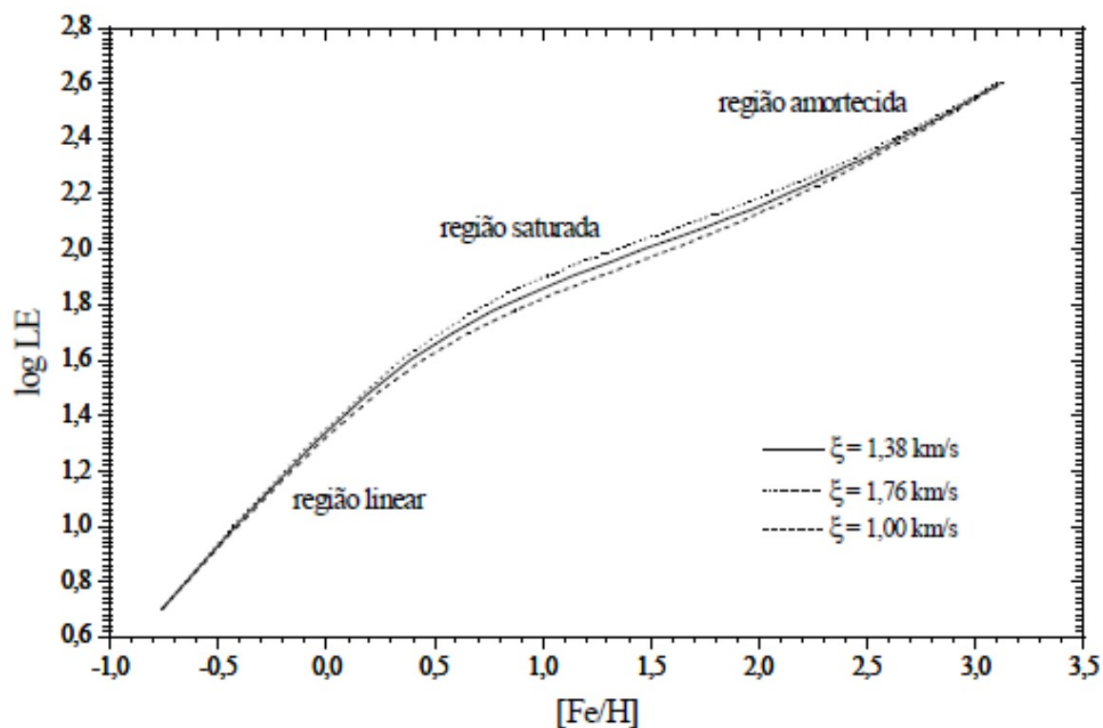
1. Largura equivalente



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

Métodos:

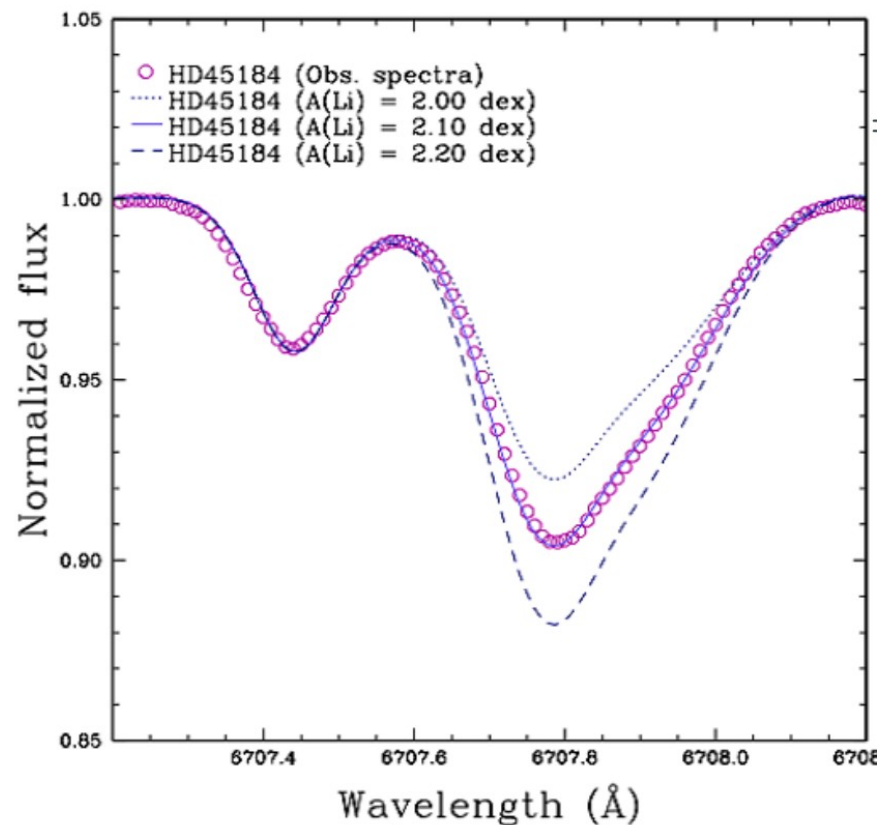
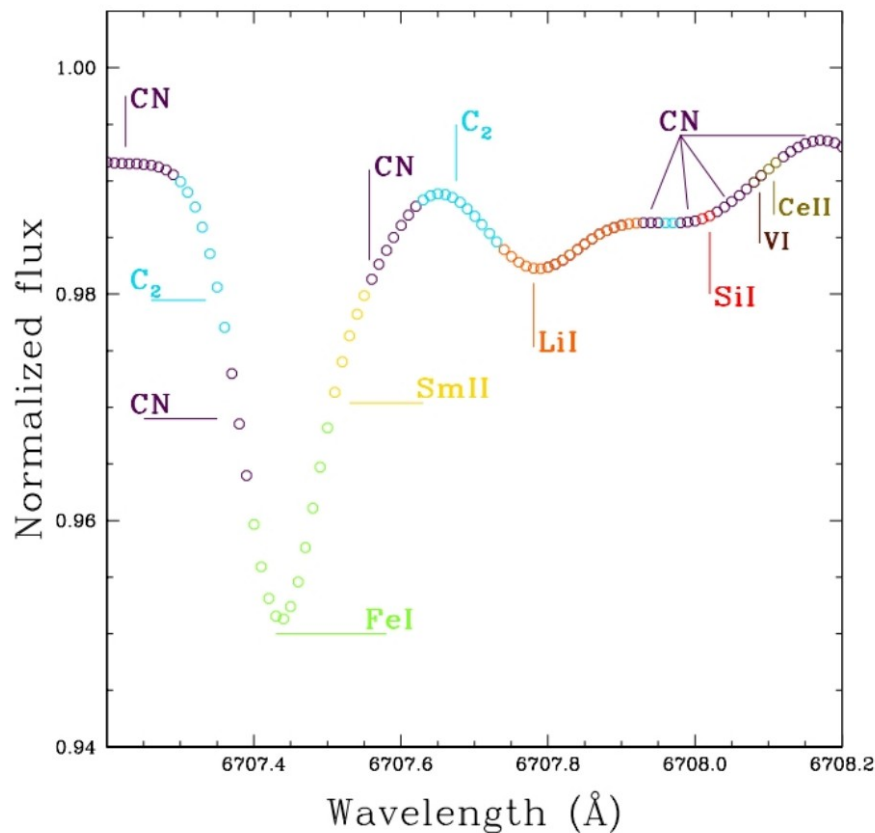
1. Largura equivalente



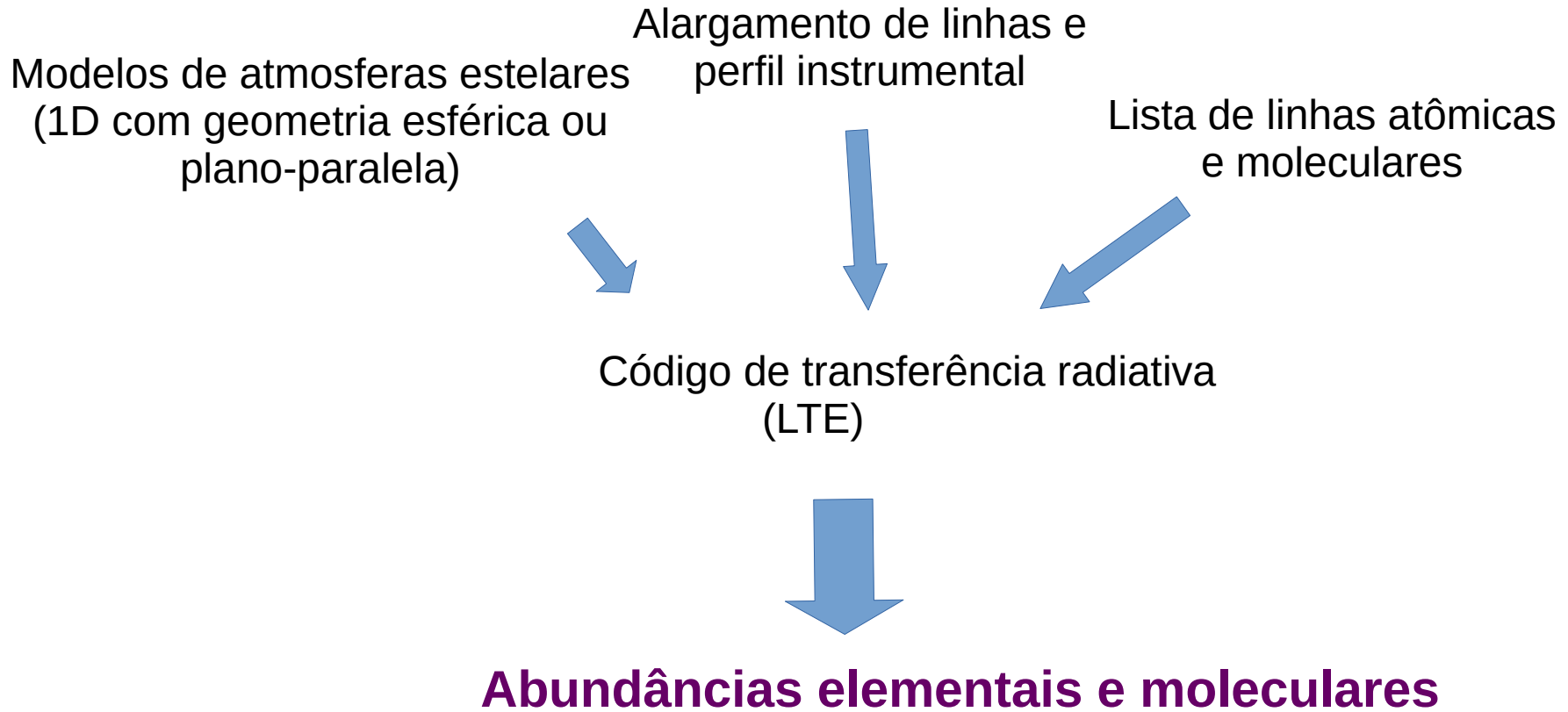
$$\log \left(\frac{w}{\lambda} \right) = \log \left(\frac{\pi e^2}{mc^2} \frac{N_r/N_E}{u(T)} N_H \right) + \log \left(\frac{N_E}{N_H} \right) + \log g f \lambda - \theta \chi - \log \kappa_{cont, \lambda}$$

Métodos:

2. Síntese espectral



Carlos et al. (2016)



Algumas definições:

N_H = densidade numérica do hidrogênio

N_X = densidade numérica do elemento X

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

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

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

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

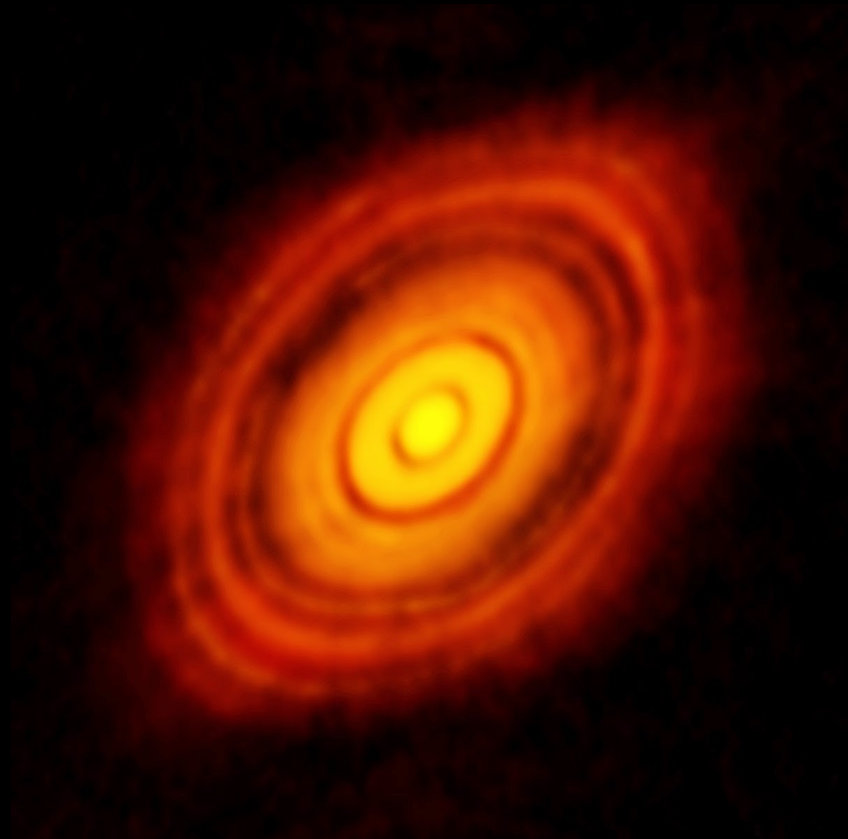
$$Z = \frac{\sum_i A_i(N_i/N_H)}{1 + 4(N_{\text{He}}/N_H) + \sum_i A_i(N_i/N_H)} \longrightarrow \text{Fração de massa de metais}$$

Estrelas do tipo solar

(com e sem planetas)

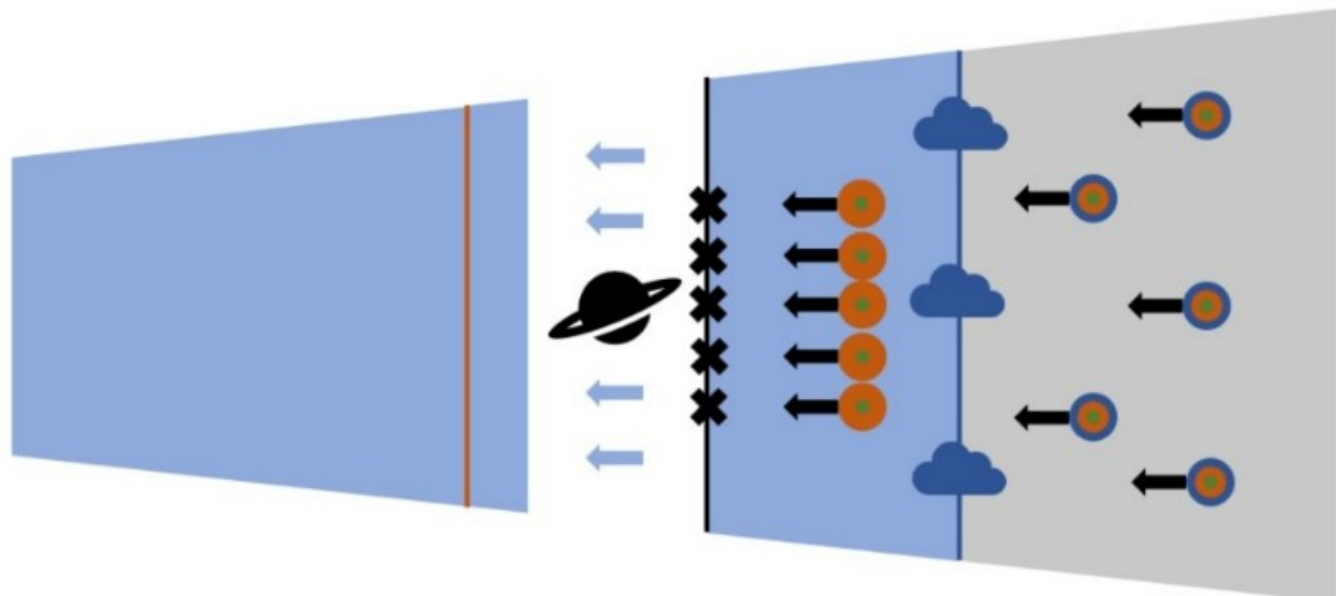
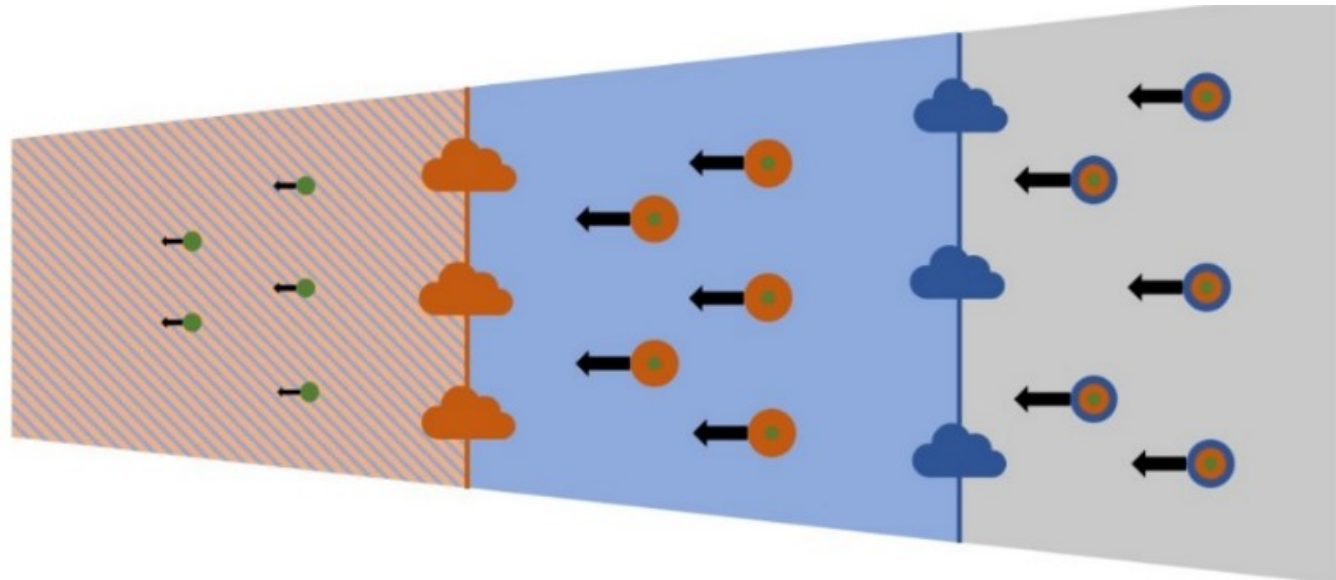


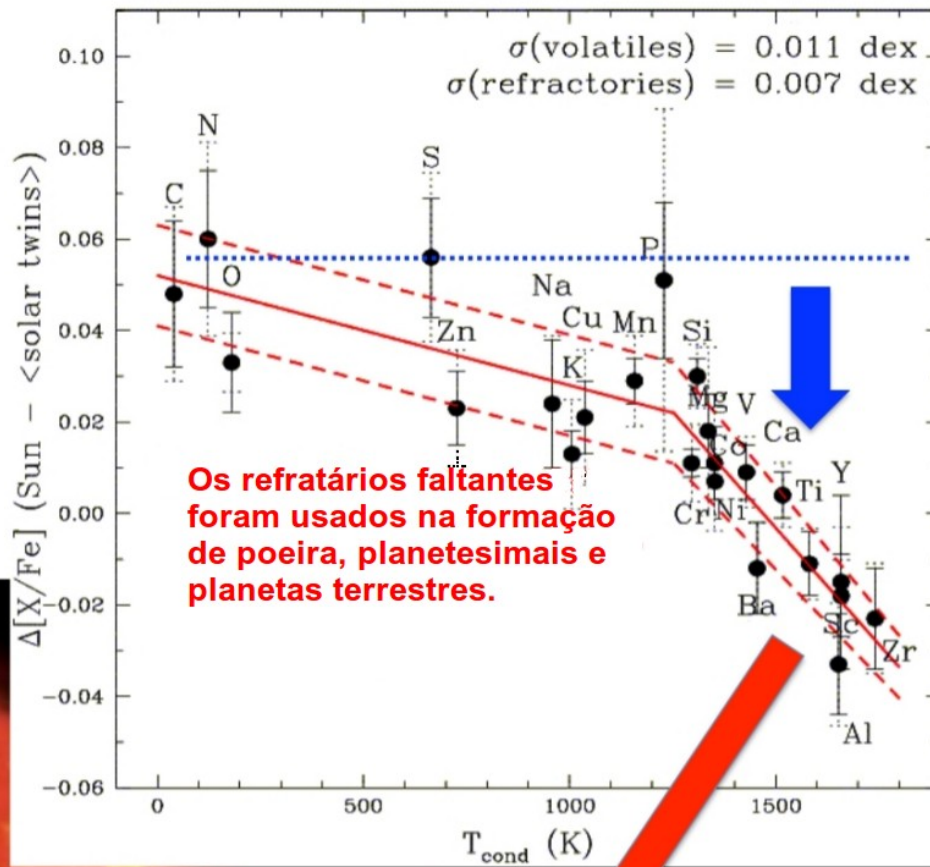
Estrelas e seus planetas são formados à partir da mesma nuvem, compartilhando material primordial – assim, abundâncias químicas acuradas de estrelas hospedeiras restringem a composição química de seus planetas, ajudando no entendimento sobre processos de formação planetária.



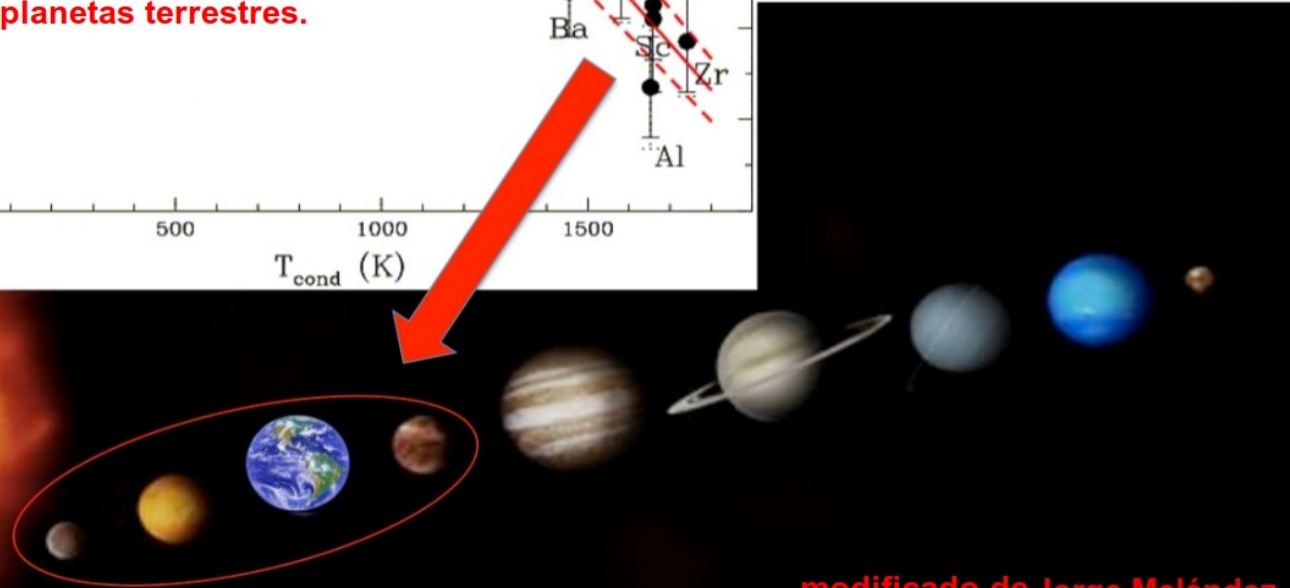


- Highly refractory
- Moderately refractory
- Volatile
- H+He



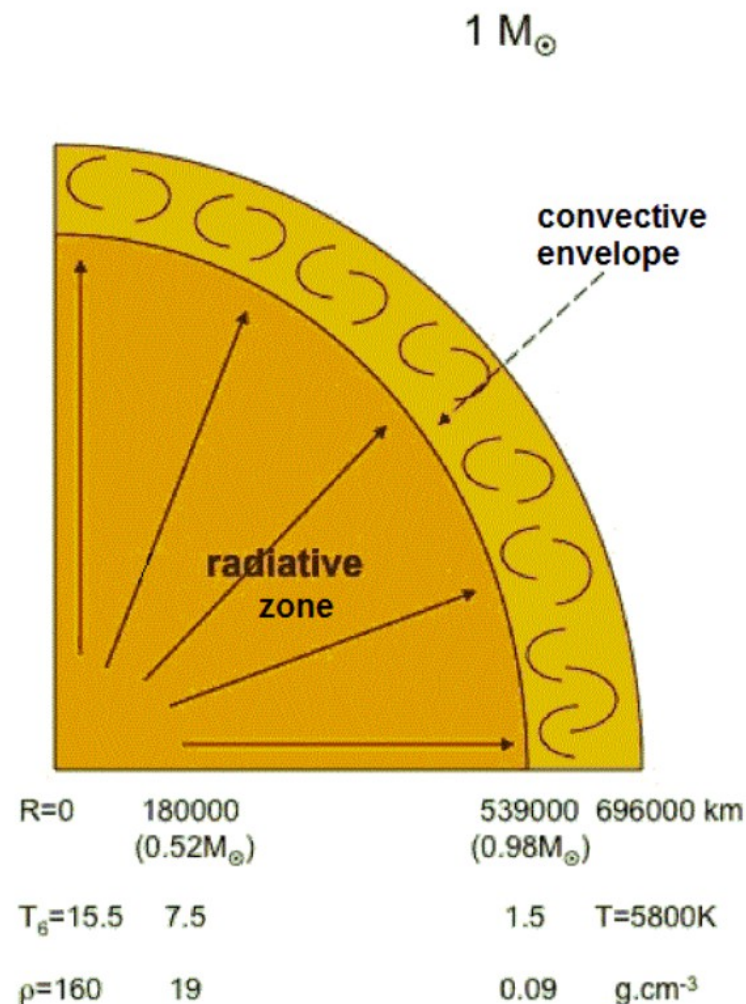


O gás posteriormente acretado pela estrelas era deficiente em elementos refratários.



modificado de Jorge Meléndez

As peculiaridades do elemento Li:

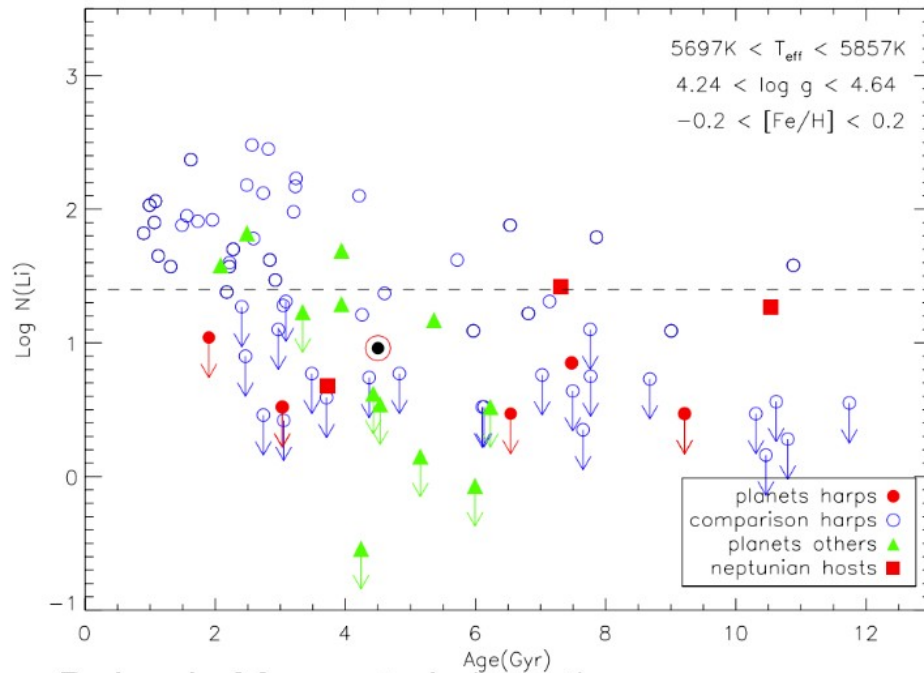


- O lítio é destruído nas camadas mais internas das estrelas via captura de prótons em temperaturas próximas à 2.5×10^6 K através da reação ${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$.
- O lítio da superfície estelar é transportado para regiões mais internas através de movimentos convectivos e por inércia e “overshooting”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

As peculiaridades do elemento Li:

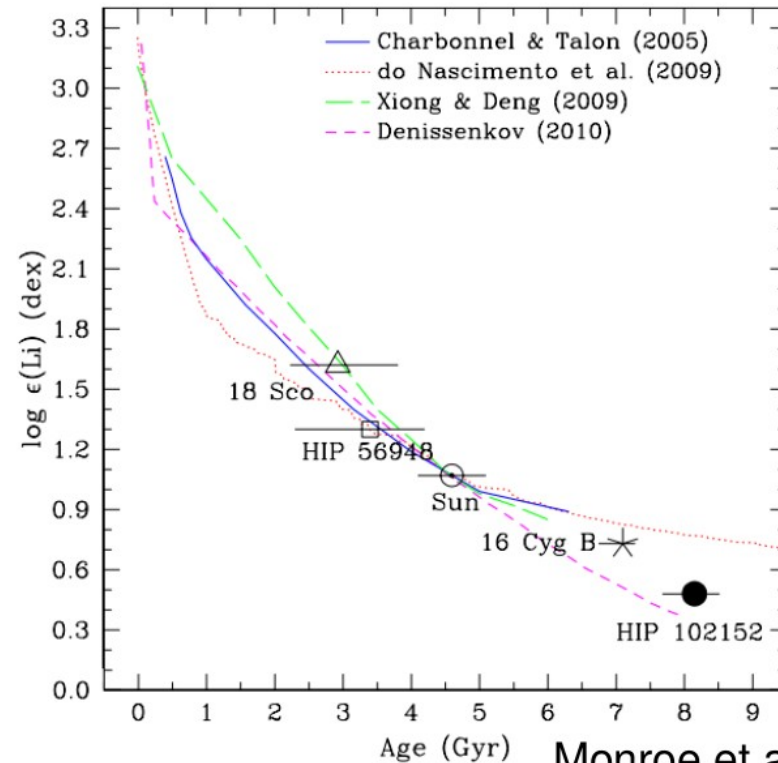
⇒ A quantidade de lítio destruída em uma estrela depende da espessura de sua camada convectiva, massa e metalicidade. Mas também pode depender da idade da estrela ou a presença de planetas...

Presença de planetas?



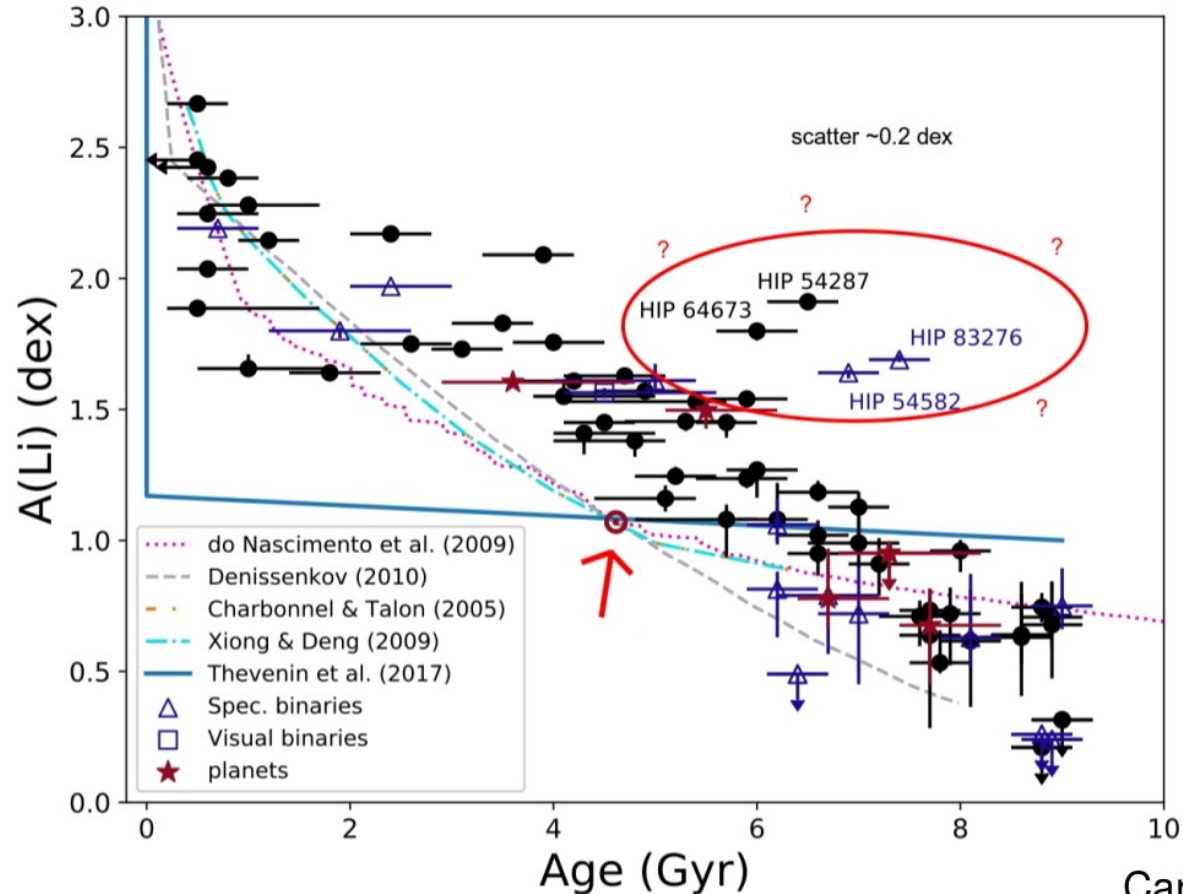
Delgado Mena et al. (2014)

Idade?



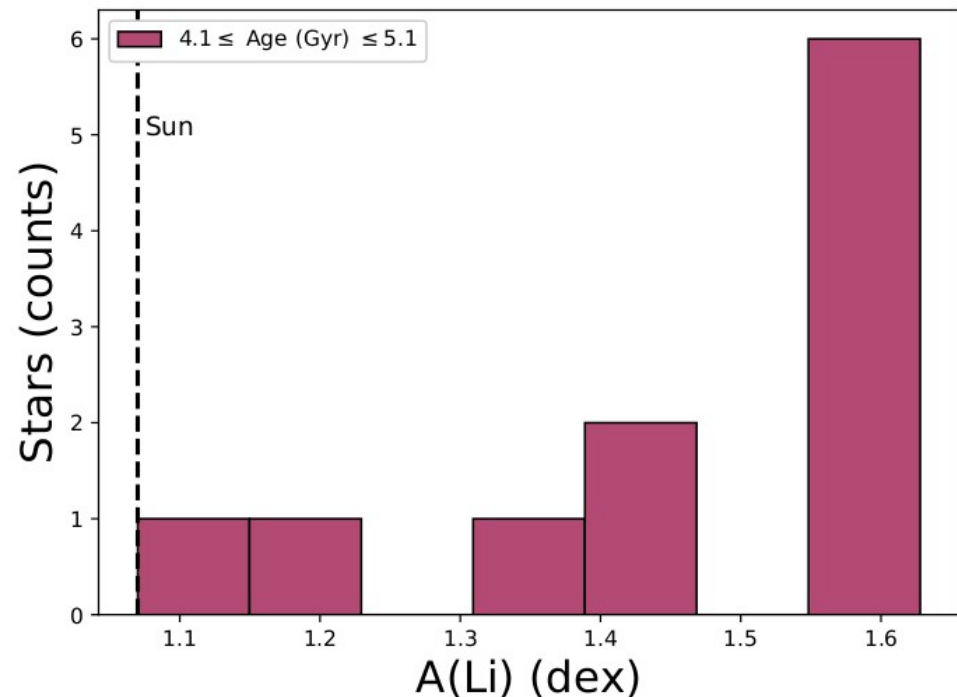
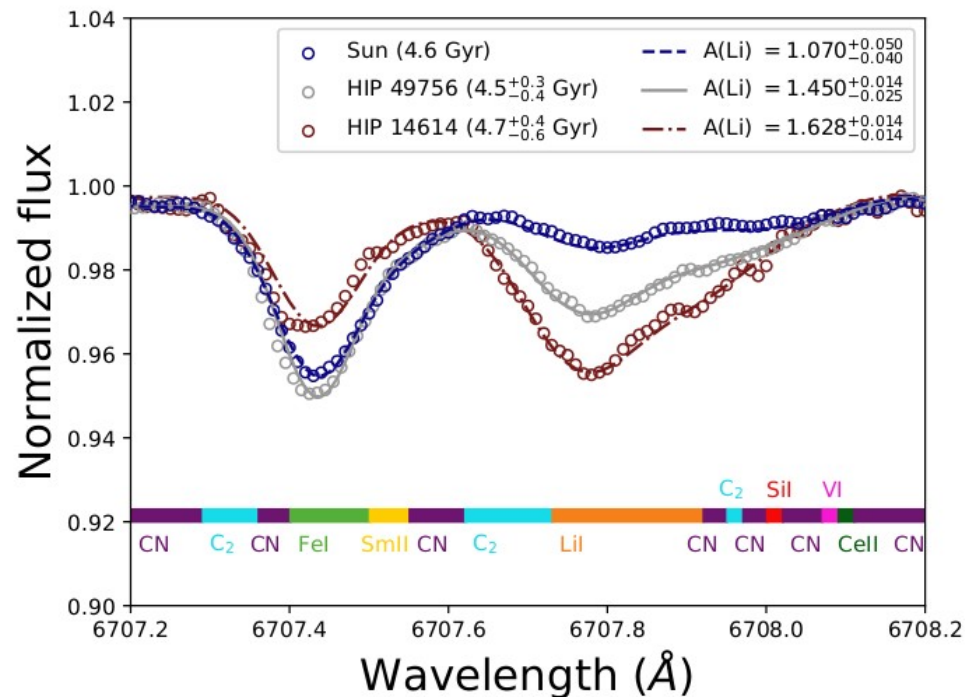
Monroe et al. (2013)

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



Carlos et al. (2019)

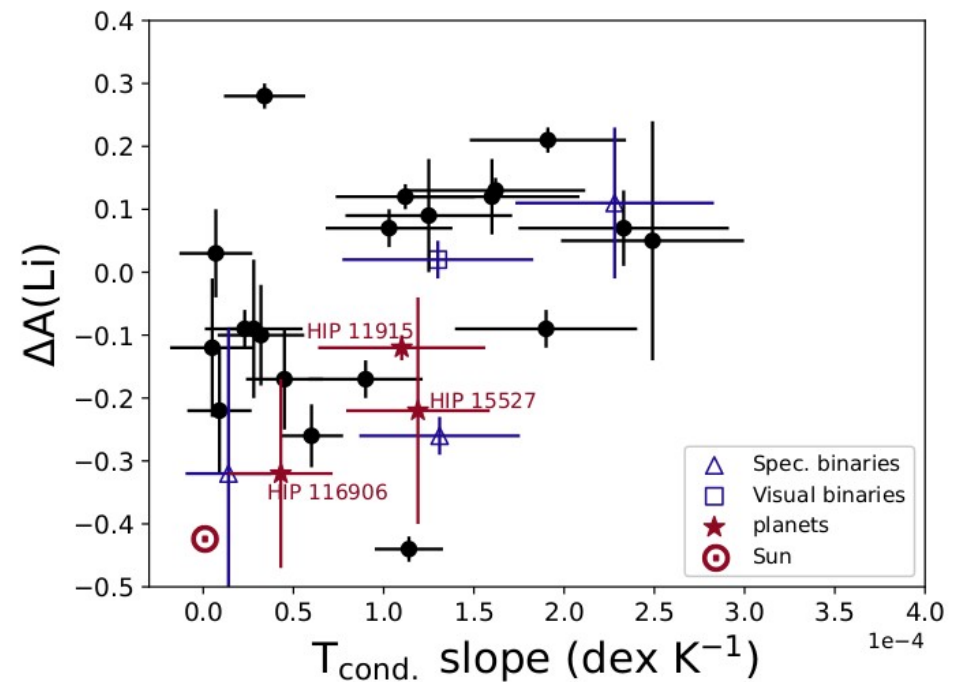
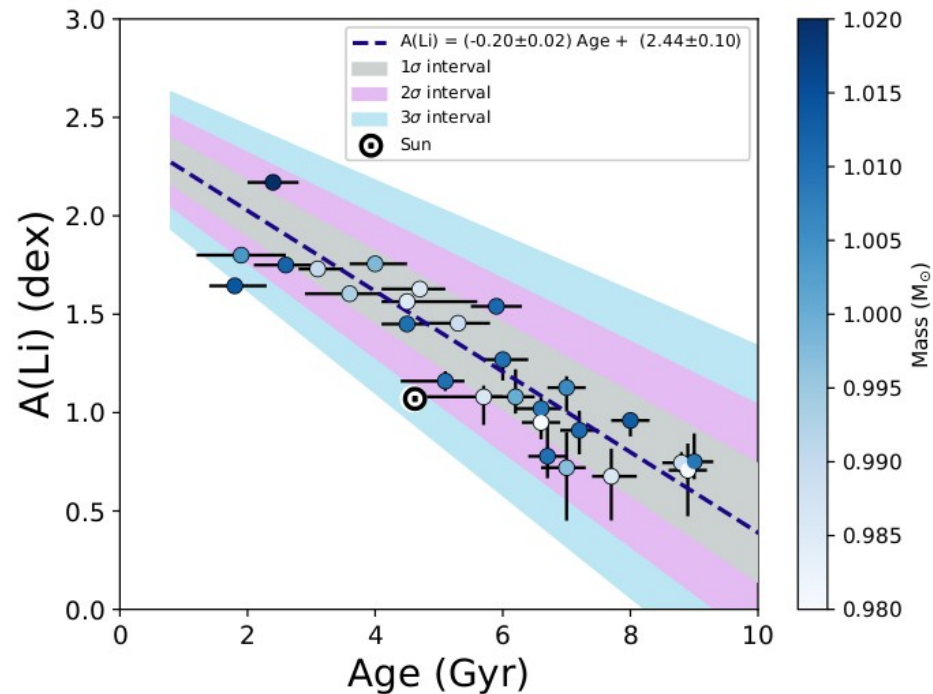
→ O Sol é pobre em lítio quando comparado com estrelas da mesma idade.



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 $\sim 2\sigma$.**

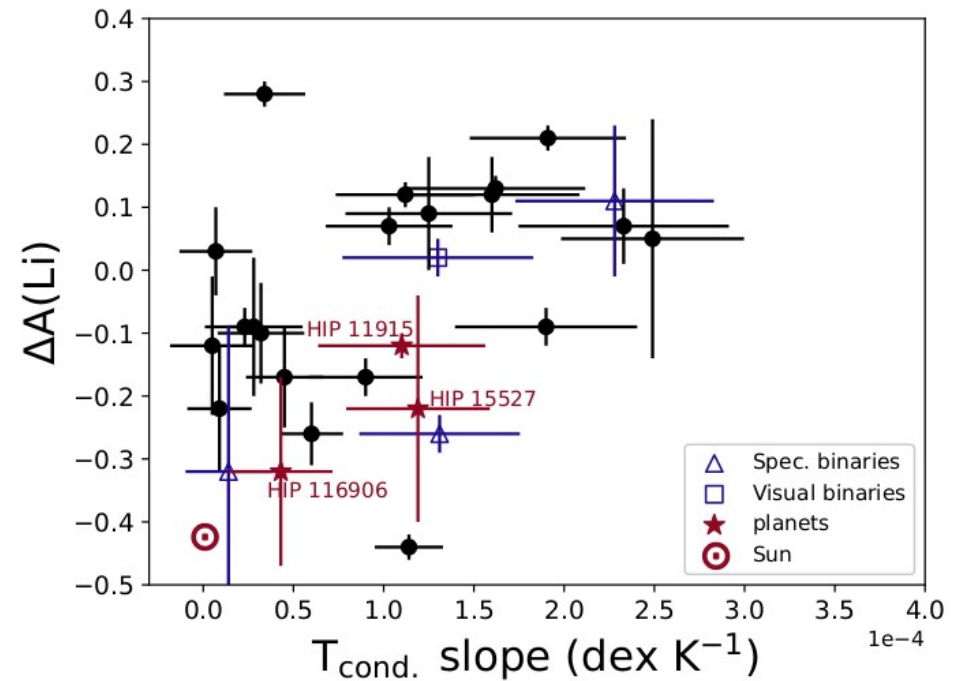
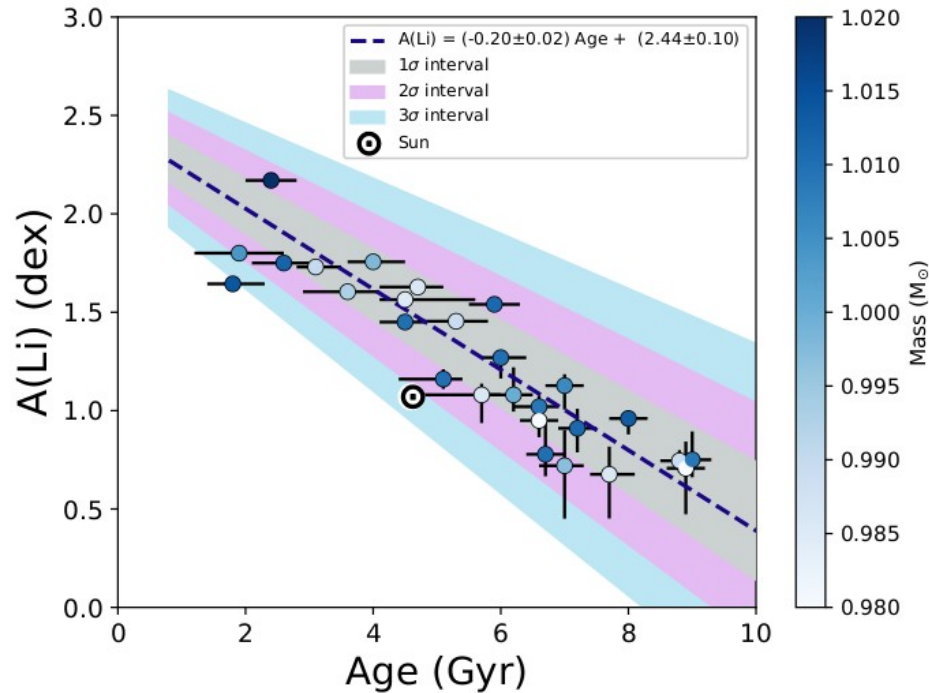
→ $\Delta A(\text{Li}) = A(\text{Li})_{\text{obs.}} - A(\text{Li})_{\text{mod.}}$ e $T_{\text{cond.}}$ slope de Bedell et al. (2018).



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).



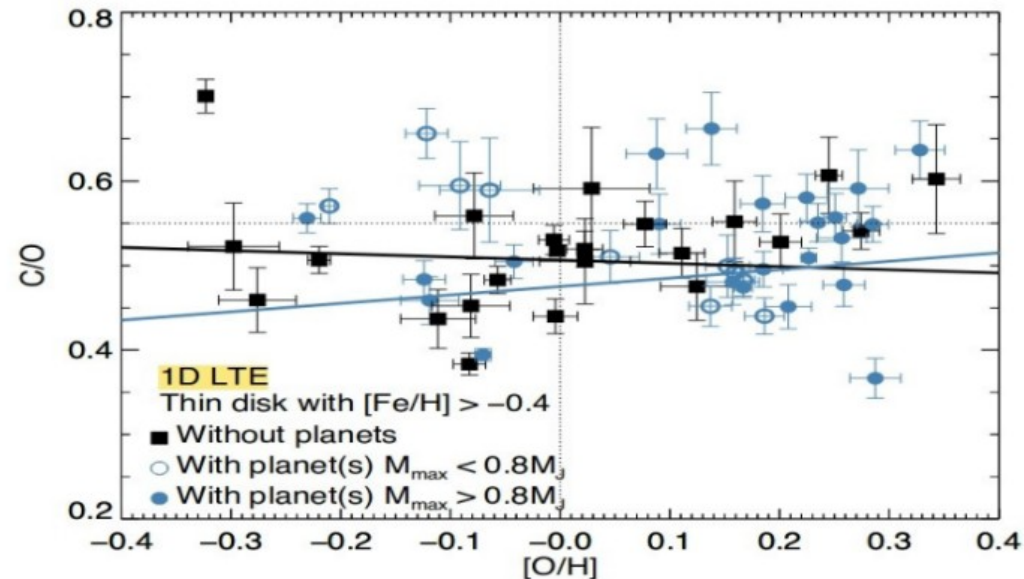
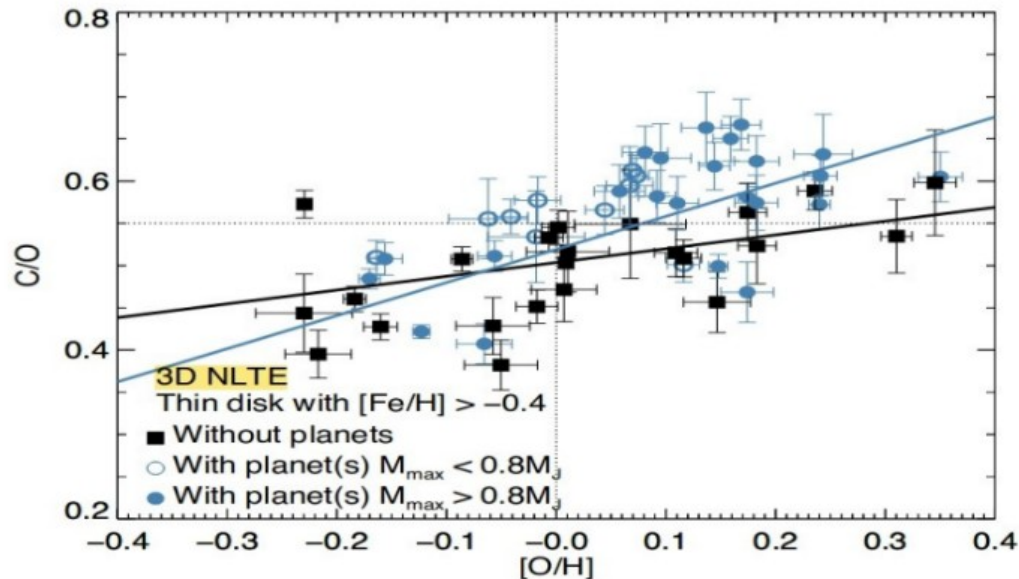
Seria o Sol pobre em Li e outros refratários devido à presença de planetas?

Carlos et al. (2019)

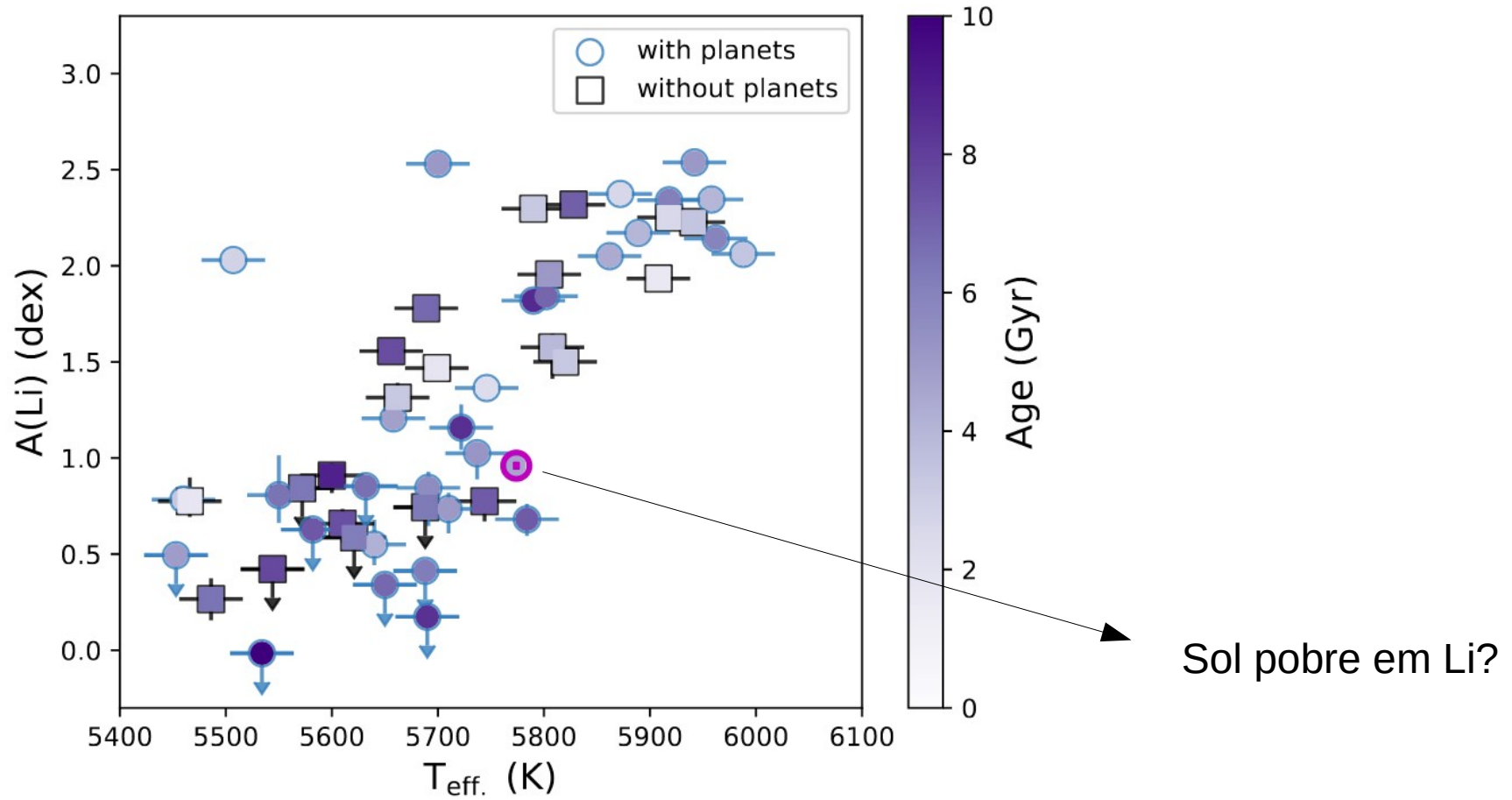
Composição química detalhada de estrelas do tipo solar (parte 2)

- 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).

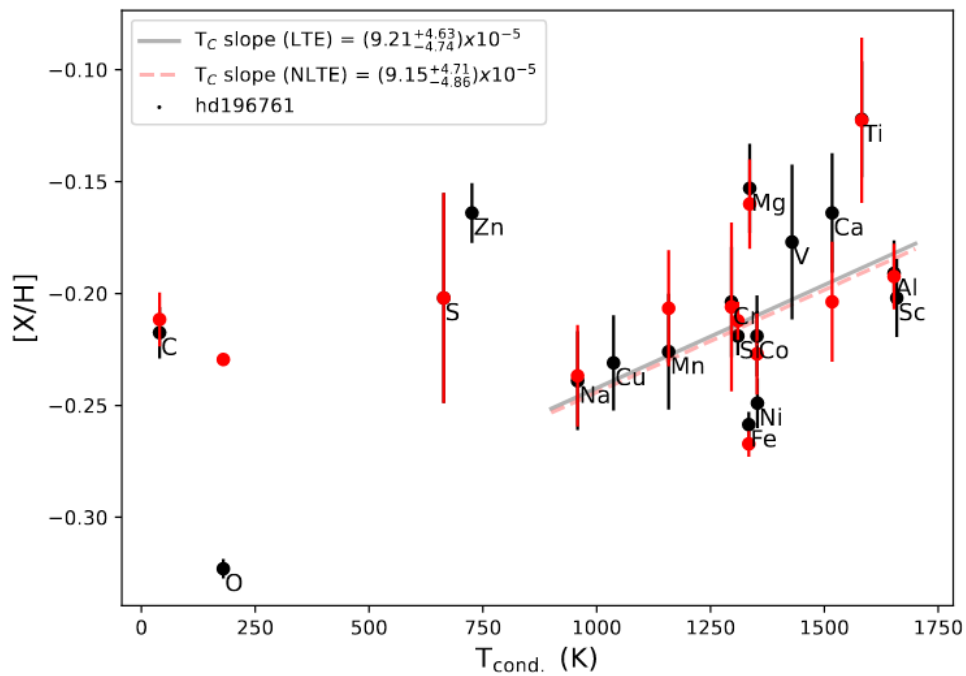
Amarsi+2019



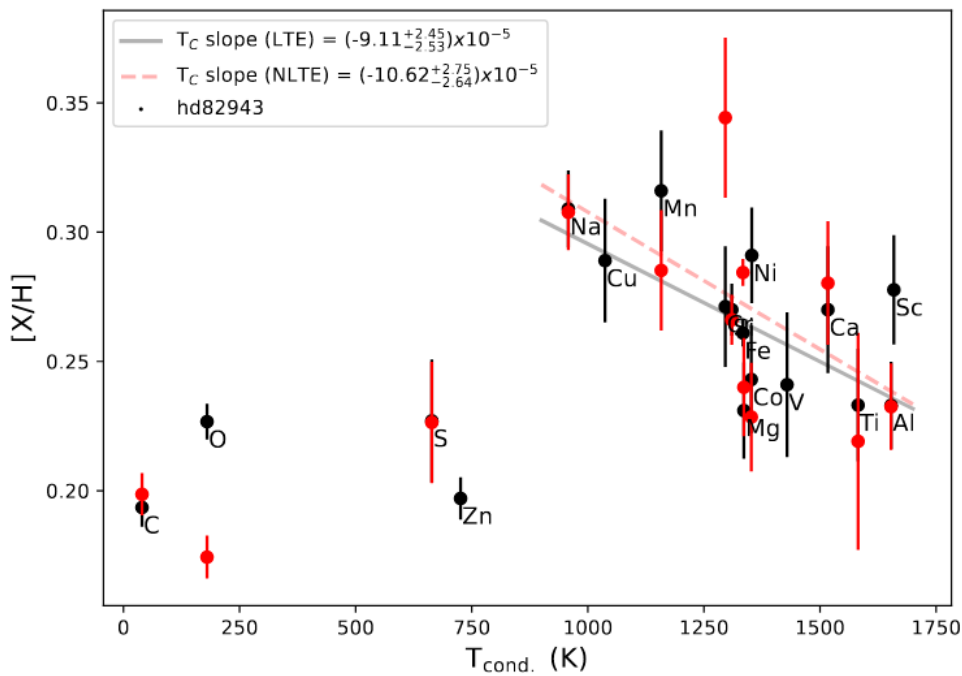
Li novamente:



Abundâncias elementais vs. Tcond:

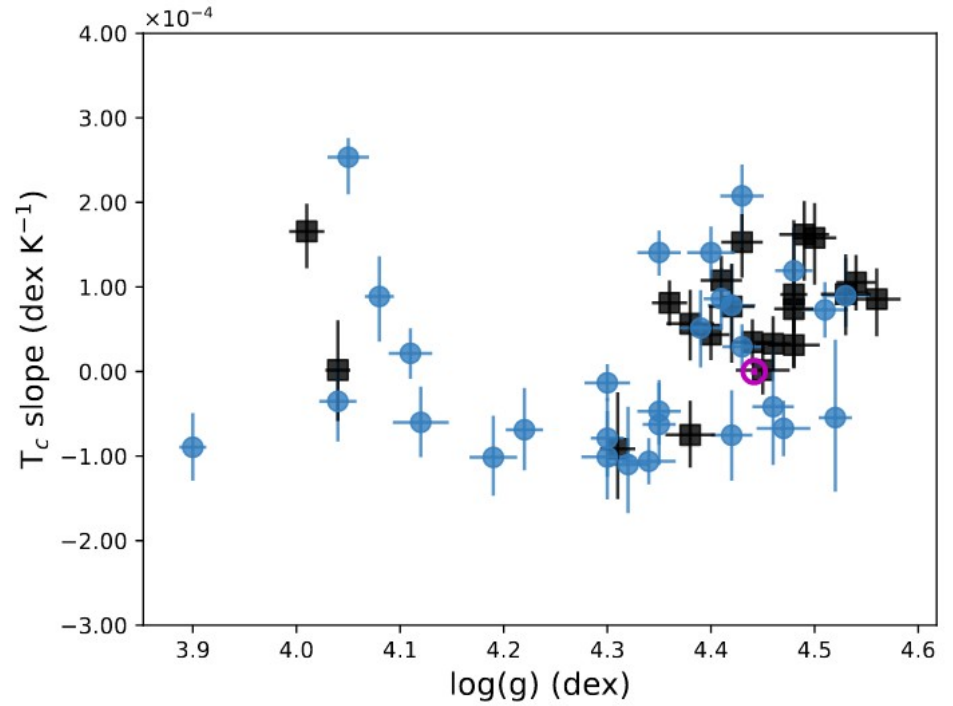
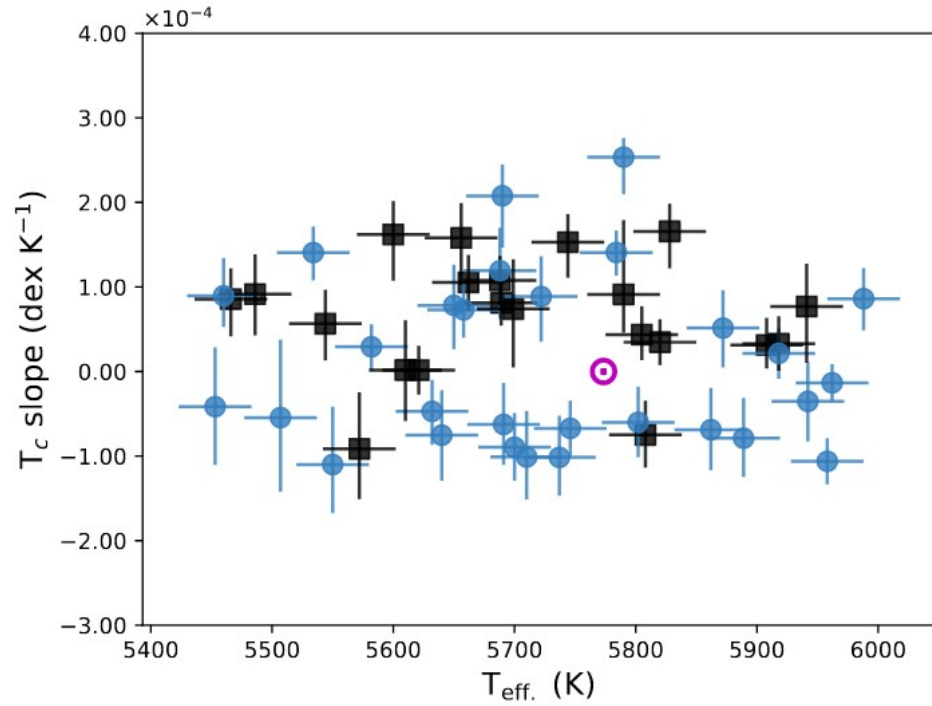


**Todas as estrelas da amostra
em comparação ao Sol!**



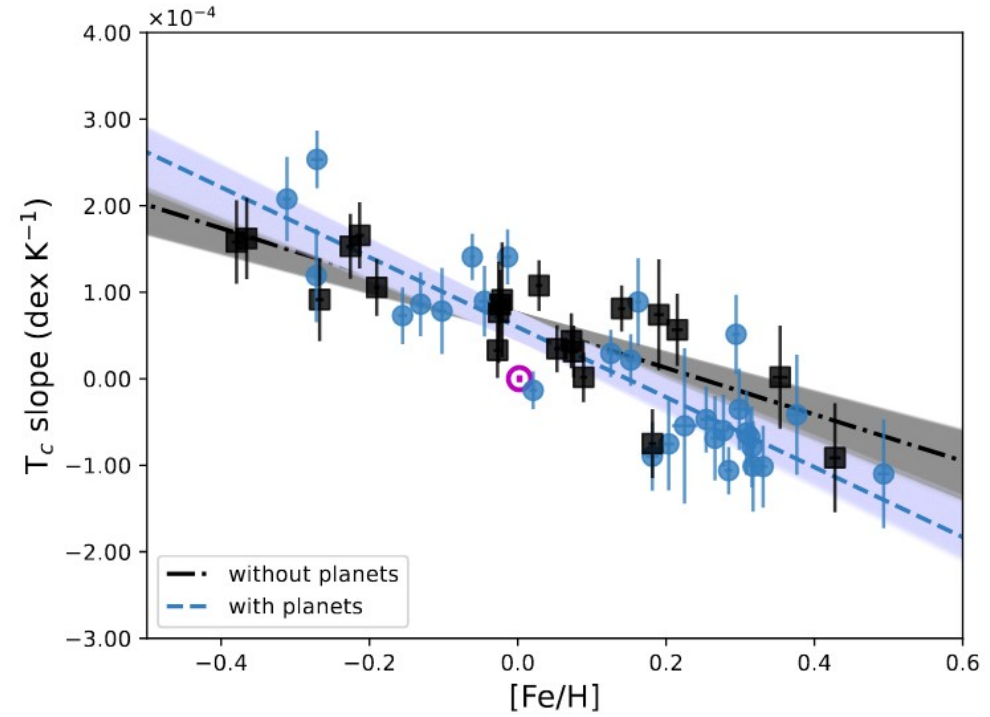
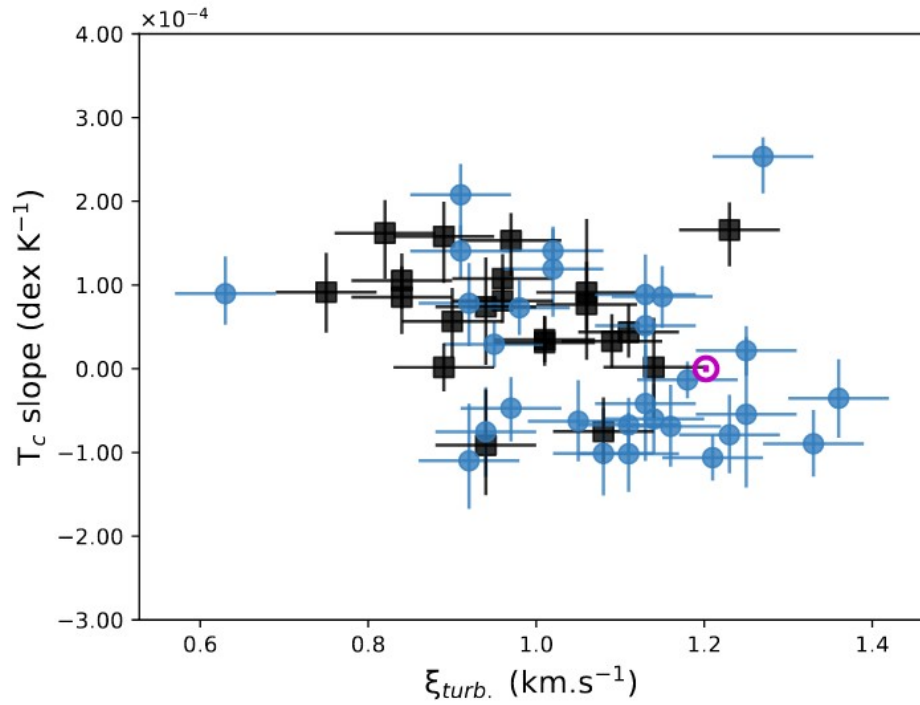
Carlos et al. (2025)

T_c slope vs. parâmetros atmosféricos:



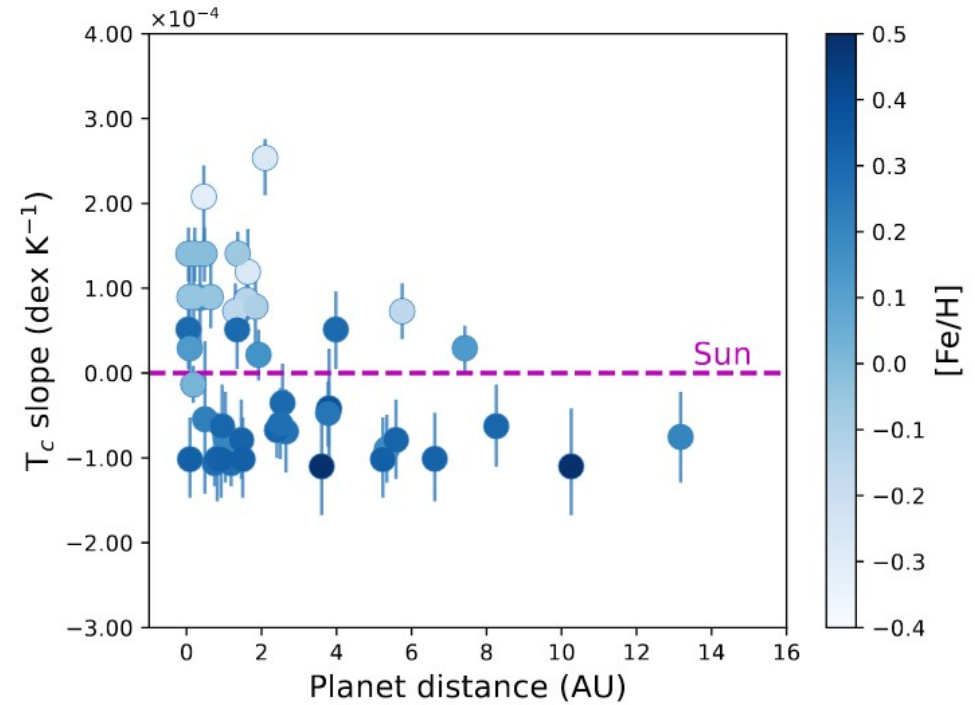
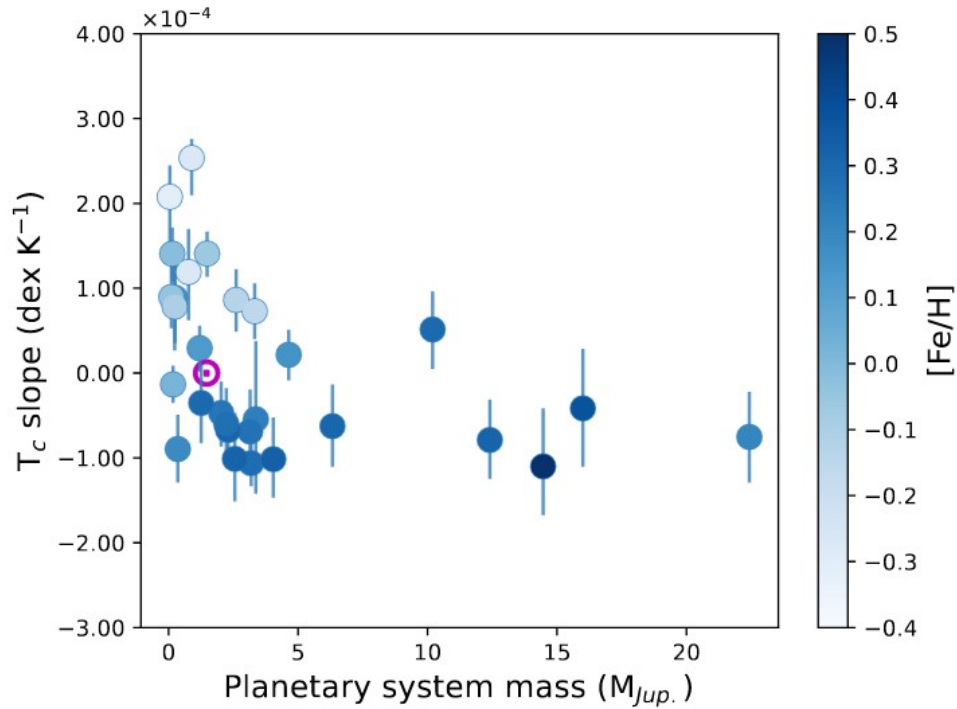
Carlos et al. (2025)

T_c slope vs. parâmetros atmosféricos:



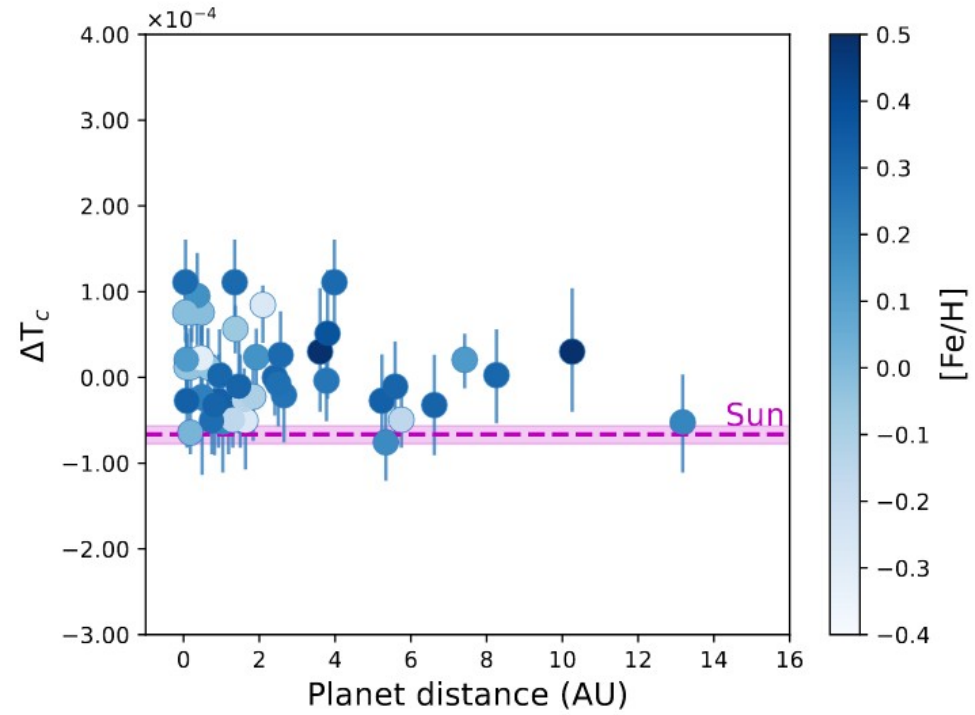
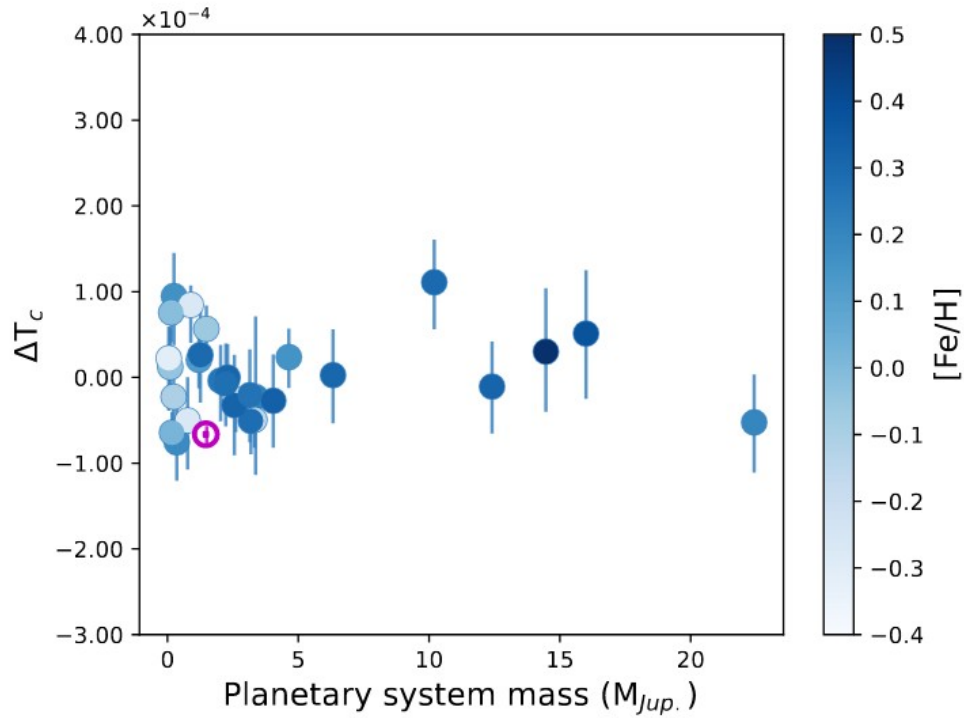
Carlos et al. (2025)

T_c slope vs. características planetárias:



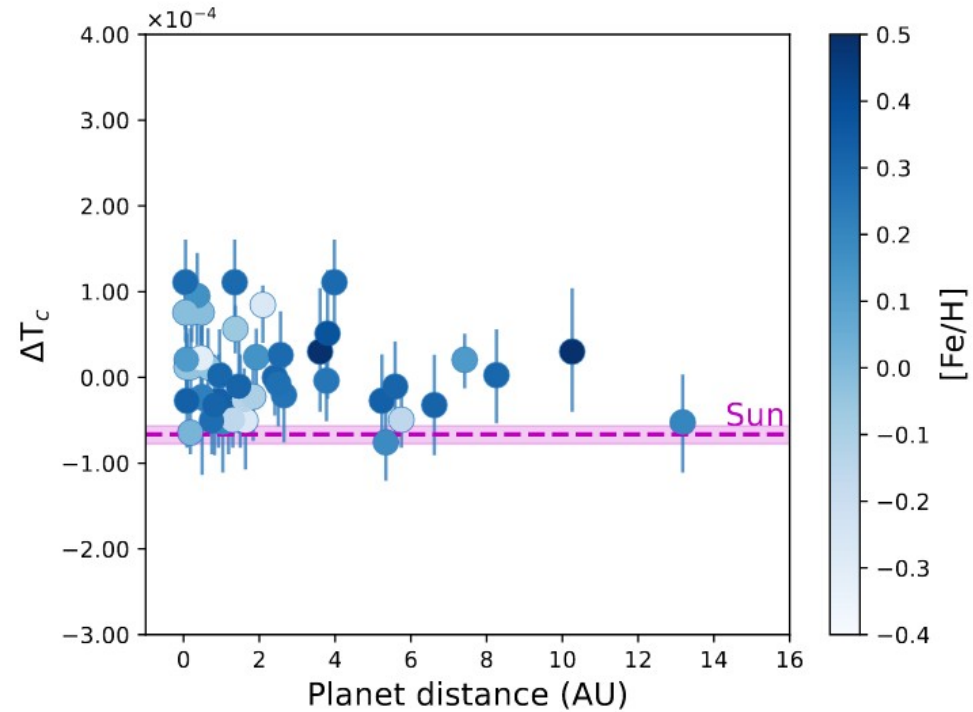
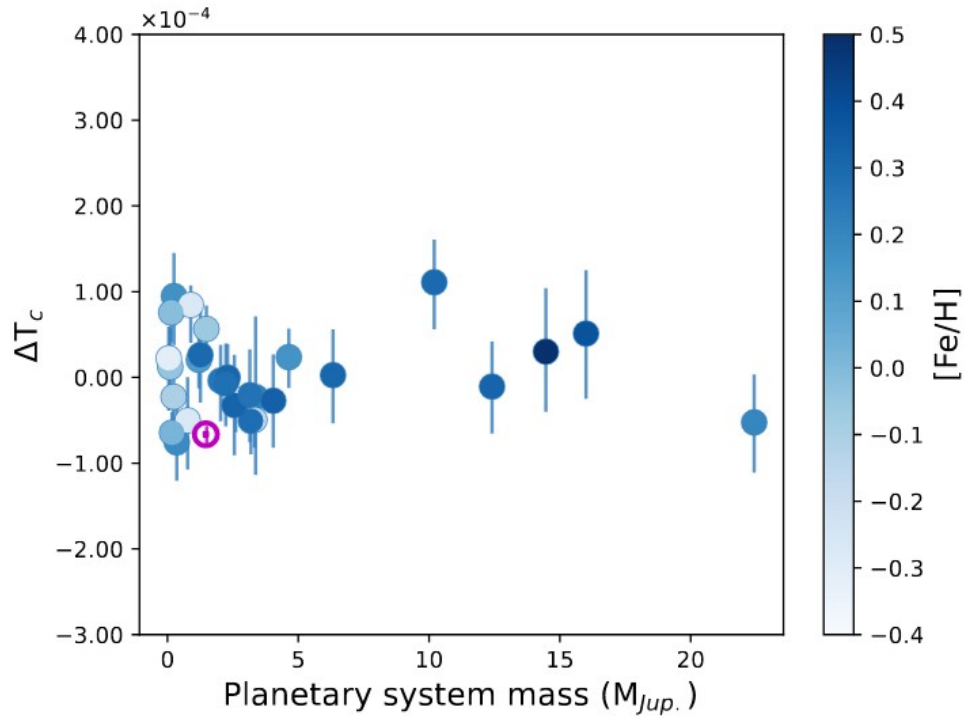
Carlos et al. (2025)

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.

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.
- Ainda não entendemos completamente porque o Sol é pobre em elementos refratários (incluindo o Li).

Muito obrigada!