

Investigating the Plasma Coupling Parameter in Low-Mass Red Giants: Implications for Interior Structure and Impact of Metallicity

Rodrigo Salvado

ist1106057

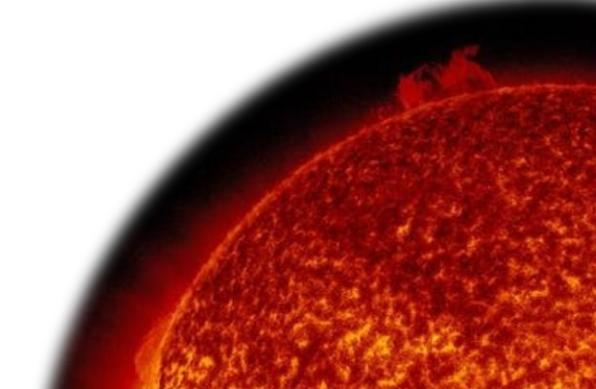
Supervisores:

Prof. Ilídio Lopes
Prof. Ana Brito

1 de julho de 2025



centra
center for astrophysics and gravitation



Contexto e Motivação

Material ionizado no interior das estrelas → Forças + fortes: **Interações de Coulomb**

Essencial para entender a **dinâmica do plasma** na **física estelar**

► Porquê estudar o acoplamento do plasma em estrelas evoluídas?

Brito & Lopes (2024)

Dependência do **grau de acoplamento do plasma**

Metalicidade e idade

Sequência Principal (MS)

Expandir investigação a:
Gigantes Vermelhas

Introdução Teórica

Parâmetro de acoplamento do plasma

$$\Gamma_i = \frac{(\overline{Z}_i e)^2}{a_i k T}$$

a_i é a distância interiónica

$$a_i = \left(\frac{3\overline{Z}_i}{4\pi n_e} \right)^{1/3}$$

- $\gg 1$ \rightarrow Interações eletrostáticas dominam
- $\ll 1$ \rightarrow Termo cinético predomina

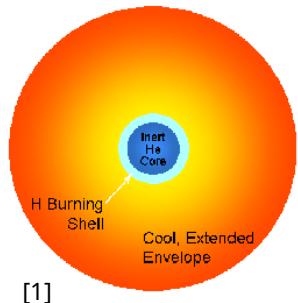
Parâmetro global do plasma estelar

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{M} \int_0^M \Gamma_i dM(r)$$



Simulações no MESA

- ❑ Evolução dos modelos até à fase antecedente ao *Helium Flash*



- Núcleo radiativo
- Envelope convectivo

12 modelos

Massa: $1.1 ; 1.3 ; 1.5 M_{\odot}$

Metalicidade Z : $0.01 \rightarrow 0.04$

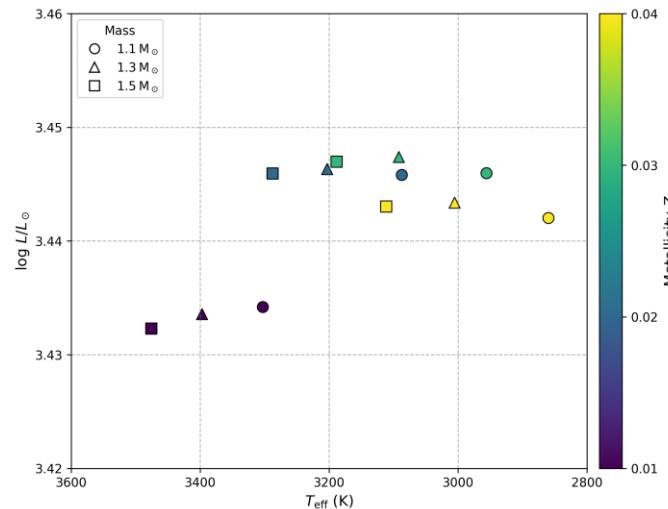
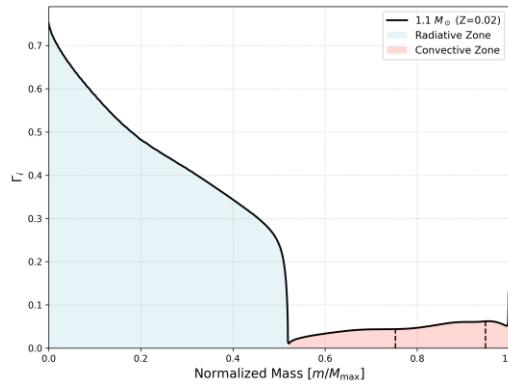


Diagrama Hertzsprung–Russel

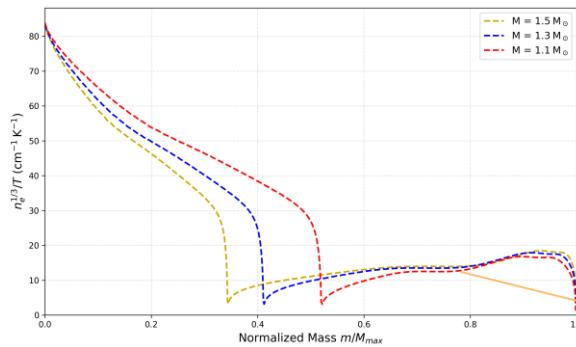
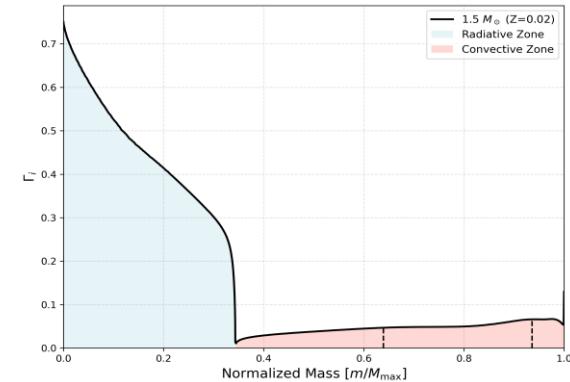
[1]<https://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/redgiant.html>

Física no interior das estrelas e efeito em Γ_i



Parâmetro de acoplamento
do plasma ($Z = 0.02$)

$$\Gamma_i = \frac{(\bar{Z}_i)^{\frac{5}{3}} e^2 (4\pi n_e)^{\frac{1}{3}}}{3^{\frac{1}{3}} kT}$$



The $\frac{n_e^{1/3}}{T}$ ratio

Carga iônica média Z_i → Descida na fronteira entre regiões

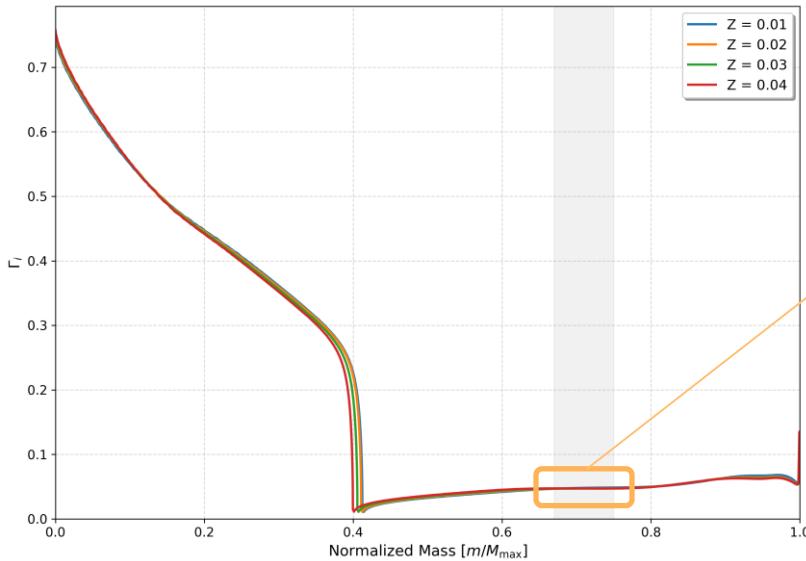
Mas ... \approx constante em cada região

- Densidade eletrônica n_e ↓
- Temperatura ↓

Γ_i ↑

T domina!

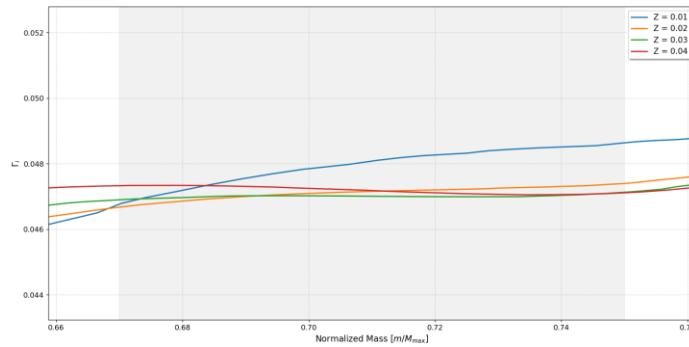
Efeito de mudanças na metalicidade em Γ_i



Parâmetro de acoplamento do plasma para 4 metalicidades

Metallicity	Age [Myr]	Total mass [M_\odot]	Core's Mass [M_\odot]
$Z = 0.01$	2399.14	1.383	0.480
$Z = 0.02$	2840.15	1.375	0.474
$Z = 0.03$	3022.06	1.376	0.468
$Z = 0.04$	3012.93	1.379	0.463

(Ampliação)



- Região interna do envelope convectivo ($\lesssim 0.7$)

$> Z$ equivale a $> \Gamma_i$
- Região externa do envelope convectivo ($\gtrsim 0.7$)

$< Z$ equivale a $> \Gamma_i$

Opacidade e correlação com Γ_i



► Objetivo: Procurar relação com outro parâmetro

A Opacidade relaciona-se com a “resistência” da matéria à passagem de radiação



Define qual o mecanismo de transporte de energia que é mais eficiente

Os fotões interagem com a matéria através de:

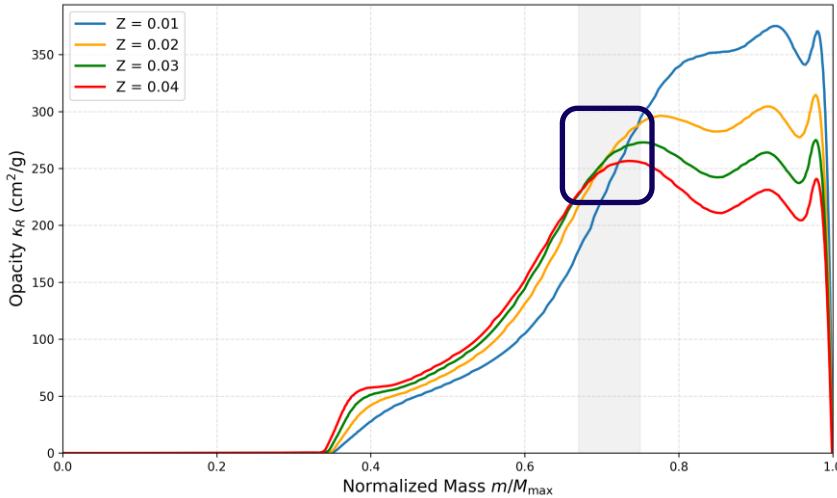
- Transições *Bound-Free*
- Transições *Bound-Bound*
- *Scattering*(...)

Varia com a frequência!

$$\frac{1}{\kappa_R} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{\kappa_{\nu}} \frac{\partial B_{\nu}}{\partial T} d\nu}{\int_0^{\infty} \frac{\partial B_{\nu}}{\partial T} d\nu}$$

Rosseland mean opacity

Opacidade e correlação com Γ_i



Perfil interno da opacidade média para 4 metalicidades

Metallicity	Age [Myr]	Total mass [M_\odot]	Core's Mass [M_\odot]
$Z = 0.01$	2399.14	1.383	0.480
$Z = 0.02$	2840.15	1.375	0.474
$Z = 0.03$	3022.06	1.376	0.468
$Z = 0.04$	3012.93	1.379	0.463

► Inversão da tendência na mesma região que o perfil de Γ_i !

Porquê?

Maior Metalicidade → Menor Temperatura
(Metal cooling)

- Região interna do envelope convectivo ($\lesssim 0.7$)

$T \approx 10^5 K$ → Ionização metálica

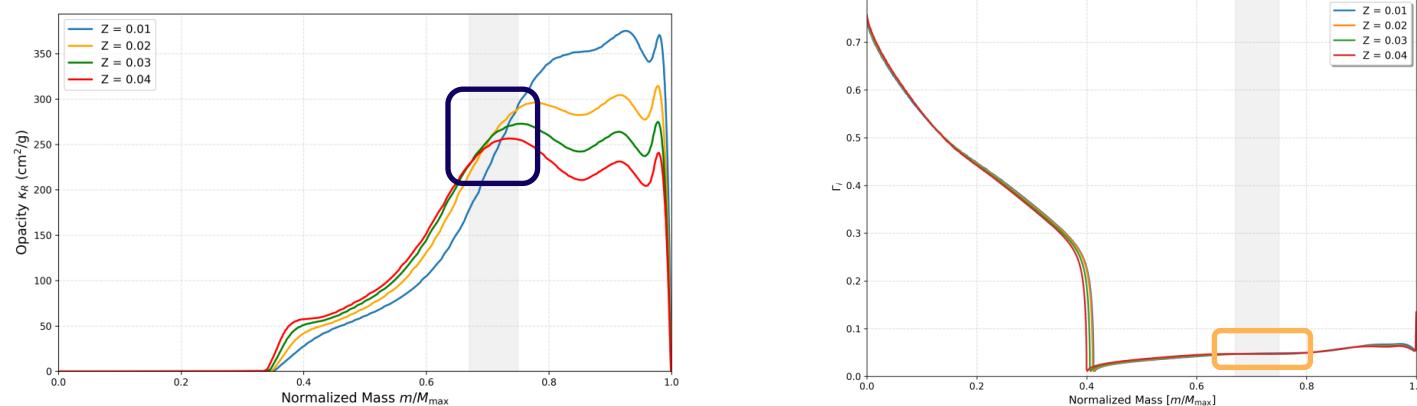
$$\kappa \simeq \kappa_0 \rho T^{-3.5}$$

- Região externa do envelope convectivo ($\gtrsim 0.7$)

$T \approx 10^4 K$ → Absorção por H^-

$$\kappa_{H^-} \sim \rho^{0.5} T^9$$

Opacidade e correlação com Γ_i



No envelope convectivo, podemos analisar o impacto relativo de mudanças na metalicidade no parâmetro de acoplamento do plasma através da opacidade média

Envelope Convectivo

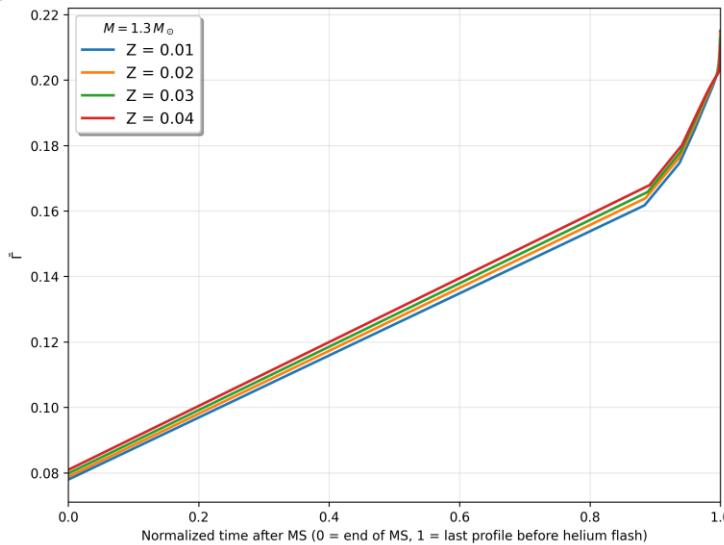
$$T \approx 10^5 K: \uparrow Z \quad \uparrow \kappa \quad \uparrow \Gamma_i$$

Região interna

$$T \approx 10^4 K: \downarrow Z \quad \uparrow \kappa \quad \uparrow \Gamma_i$$

Região externa

Dependência do parâmetro global do plasma estelar com a idade



Parâmetro global do plasma estelar em função da idade após MS

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{M} \int_0^M \Gamma_i dM(r)$$
$$\Gamma_i = \frac{(\overline{Z}_i)^{\frac{5}{3}} e^2 (4\pi n_e)^{\frac{1}{3}}}{3^{\frac{1}{3}} kT}$$

- Ordenamento de metalicidades

Maior metalicidade

Forças de Coulomb mais fortes

- Aumento linear gradual até $t \approx 0.9$

Devido a: Temperatura média

Densidade eletrónica média

- Aumenta \approx exponencialmente perto do *Helium Flash*

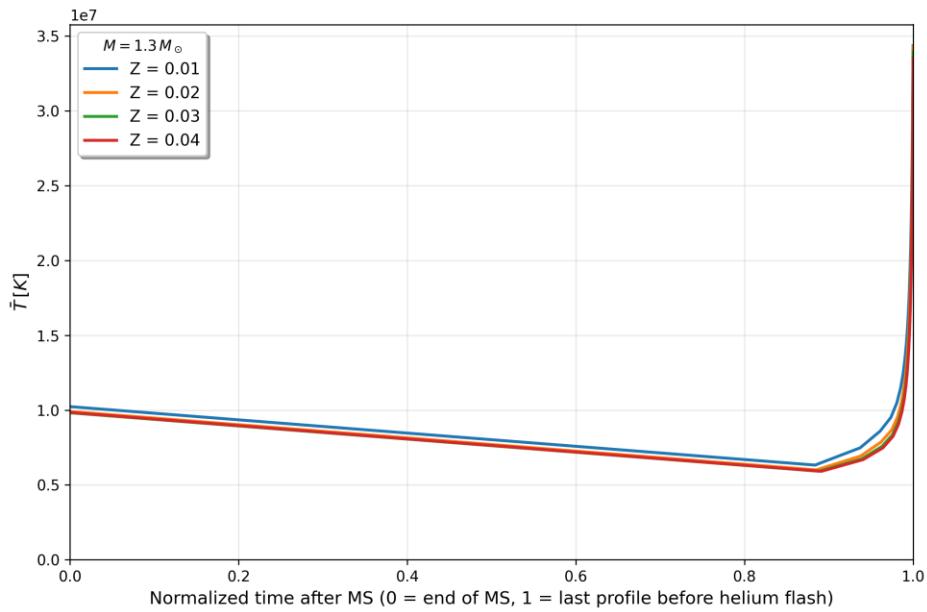
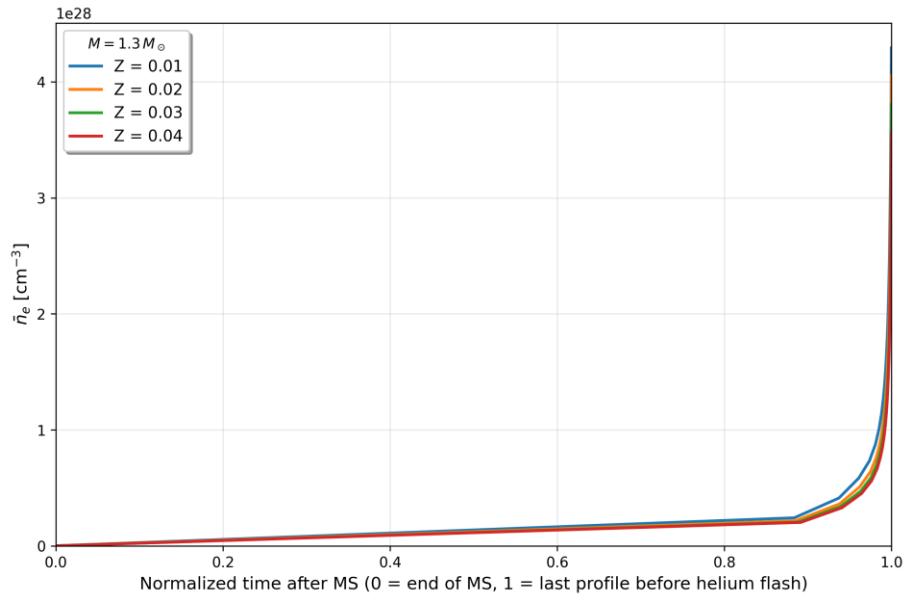
Densidade eletrónica aumenta exponencialmente (no núcleo)

Conclusão

- 12 modelos de gigantes vermelhas desenvolvidos no MESA
 - Analisando internamente o parâmetro de acoplamento do plasma, Γ_i , a temperatura é o fator dominante;
 - Variação de Γ_i com a metalicidade Z
 - O comportamento de Γ_i pode ser explicado pela dependência em temperatura dos mecanismos dominantes da opacidade. Podemos avaliar o impacto relativo de Z em Γ_i através da sua correlação com o perfil médio de opacidade de *Rosseland*;
 - Existe um ordenamento de metalicidades e aumento gradual do parâmetro global do plasma estelar ao longo do *Red-Giant Branch*.
- Massa: $1.1 ; 1.3 ; 1.5 M_{\odot}$
Metalicidade Z : $0.01 \rightarrow 0.04$
- Região interna do envelope convectivo: $> Z$ equivale a $> \Gamma_i$
Região externa do envelope convectivo: $< Z$ equivale a $> \Gamma_i$

Slides Extra

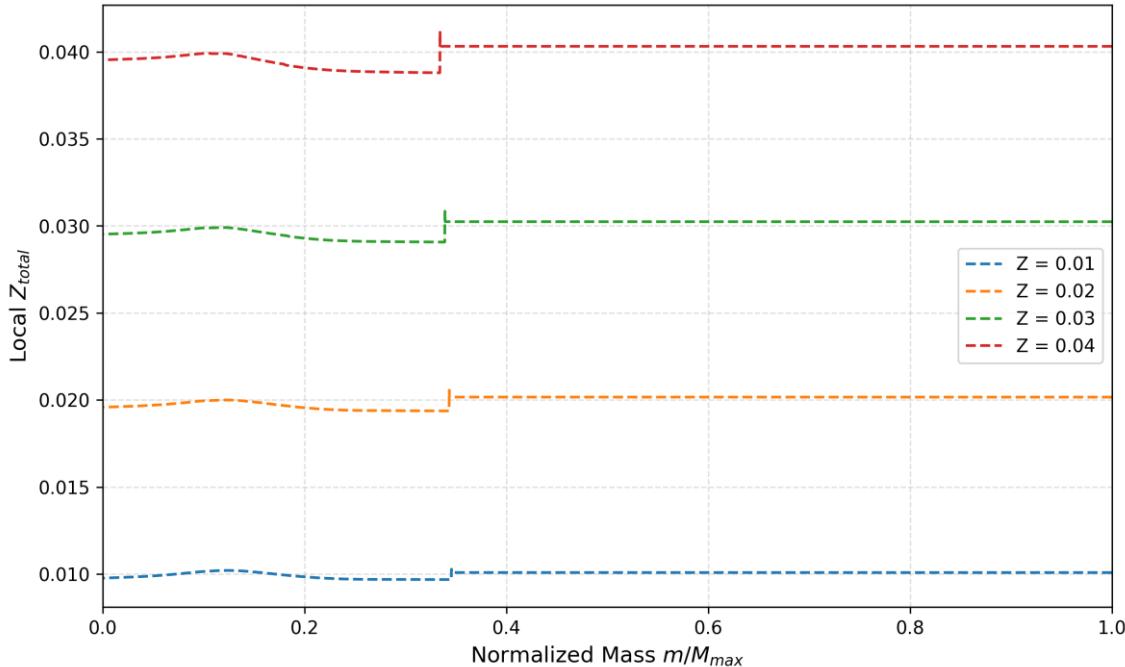
(Discussão)



$$\bar{n}_e = \frac{1}{M} \int_0^M n_e dM(r)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{M} \int_0^M T dM(r)$$

Densidade eletrónica média e temperatura média



Total de Z (localmente) para $1.5 M_\odot$