



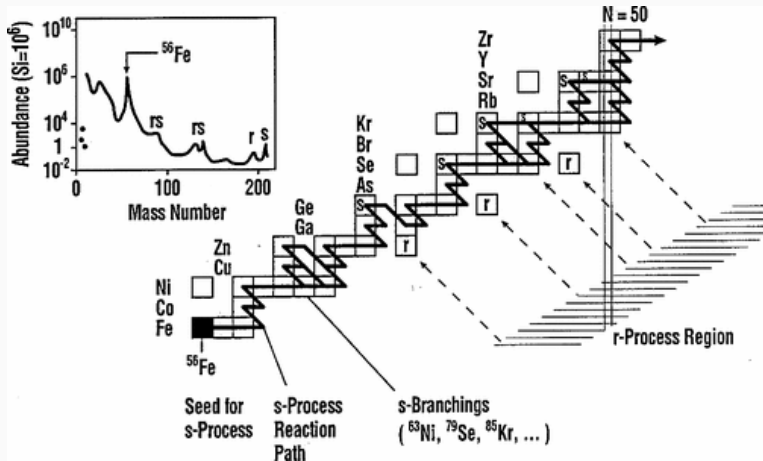
ÉTUDE DE SPECTRES INFRAROUGES DE GÉANTES ROUGES ÉVOLUÉES

Margaux Vandererven

Supervisé par Sophie Van Eck

Processus s

Käppeler et al. 2011.



+ de 50% éléments plus lourds que le fer

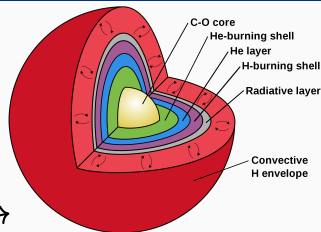
$$\tau_{\beta^-} < \tau_{n\text{-capture}}$$

Étoiles de type S & étoiles à baryum

T_{eff} étoiles S $\sim T_{\text{eff}}$ étoiles M

Bandes ZrO & enrichissement en éléments s

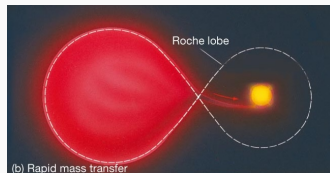
- de type S intrinsèques (T_c rich)
- de type S extrinsèques (T_c poor)



Structure interne d'une étoile AGB. (Persson 2014)

T_{eff} étoiles à baryum $\sim T_{\text{eff}}$ étoiles G-K

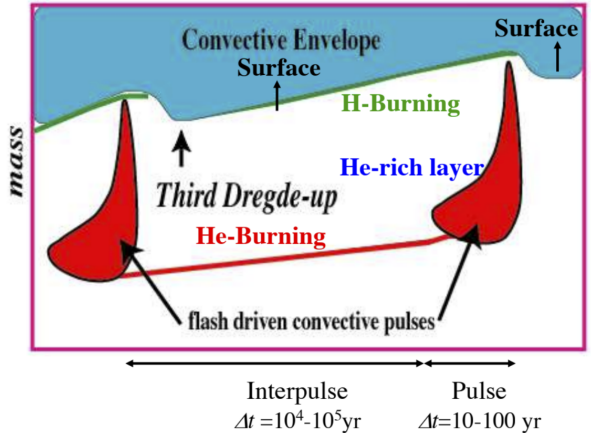
Enrichissement en éléments s



Transfert de masse. (Pearson Education 2014)

Mécanisme de production dans AGB

Instabilités
thermiques durant
combustion de la
couche He \rightarrow
réajustement,
engloutissement
enveloppe convective.



Source neutronique :



Intérêt du travail

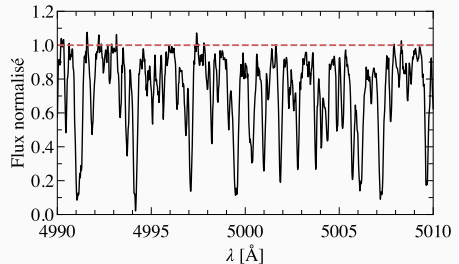
Beaucoup d'incertitude sur les processus de production des éléments, ainsi que sur leur détermination d'abondance (jusqu'à ± 0.3 dex dans le visible).

Infrarouge : continu plus atteint, moins de blend du aux raies moléculaires.

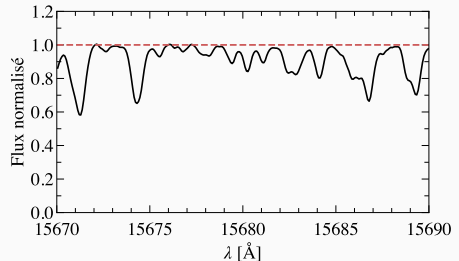
→

**Comparaison
visible/infrarouge des
paramètres stellaires et
abondances.**

Spectre visible BD-22°1742 (4000K)



Spectre IR BD-22°1742 (4000K)



Spectre infrarouge :

IGRINS (Immersion GRating INfrared Spectrometer)

Haute résolution : $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 45000$

- Bande H (1.45 - 1.80 μm)
- Bande K (2.05 - 2.50 μm)

Correction :

Réduction, correction tellurique, première normalisation par Chris Sneden.

Seconde normalisation sur pas 20 Å et correction redshift.

Série d'étoiles

Étoile	Type spectral	T_{eff} (K)	$\log g$ (cm s^{-2})	ξ_{micro} (km s^{-1})	[Fe/H] (dex)
HD 60197	K3.5III:Ba3.5	$3800 \pm 50^{(3)}$	$2.00 \pm 0.50^{(3)}$	$2.00^{(3)}$	$-0.60 \pm 0.20^{(3)}$
HD 63733	S3.5/3	$3700^{(1)}$	$1.00^{(1)}$	-	$-0.10 \pm 0.13^{(1)}$
CR Cir	S6,2	-	-	-	-
HD 123949	K1pBa	$4378 \pm 80^{(3)}$	$1.78 \pm 0.53^{(3)}$	$1.37^{(3)}$	$-0.31 \pm 0.13^{(3)}$
BD-22°1742	S3:*3	$4000^{(1)}$	$1.00^{(1)}$	-	$-0.30 \pm 0.09^{(1)}$
CD-29°5912	S4,4	$3600^{(4)}$	$1.00^{(4)}$	-	$-0.40 \pm 0.22^{(4)}$
BD-18°2608	S	$3500^{(2)}$	$1.00^{(2)}$	-	$-0.31 \pm 0.16^{(2)}$
HD 116869	G8III:Ba1	$4892 \pm 30^{(3)}$	$2.59 \pm 0.07^{(3)}$	$1.38 \pm 0.04^{(3)}$	$-0.44 \pm 0.09^{(3)}$
HD 120620	K0III (Ba ⁽³⁾)	$4831 \pm 13^{(3)}$	$3.03 \pm 0.30^{(3)}$	$1.11 \pm 0.05^{(3)}$	$-0.30 \pm 0.10^{(3)}$
HD 121447	K4III ⁽³⁾ (Ba ⁽³⁾)	$4000 \pm 50^{(3)}$	$1.00 \pm 0.50^{(3)}$	$2.00^{(3)}$	$-0.90 \pm 0.13^{(3)}$
HD 100503	G/KpBa	$4000 \pm 50^{(3)}$	$2.00 \pm 0.50^{(3)}$	$2.00^{(3)}$	$-0.72 \pm 0.13^{(3)}$
HD 119185	G8IIIpBa	-	-	-	-
HD 88562	K1III (Ba ⁽³⁾)	$4000 \pm 50^{(3)}$	$2.00 \pm 0.50^{(3)}$	$2.00^{(3)}$	$-0.53 \pm 0.12^{(3)}$
V812 Oph	S5+/2.5	$3500^{(2)}$	$1.00^{(2)}$	-	$-0.37 \pm 0.13^{(2)}$
19 Aql	F0III-IV	-	-	-	-
V915 Aql	S5+/2	$3400^{(1)}$	$0.00^{(1)}$	-	$-0.50 \pm 0.15^{(1)}$
HD 165774	S4,6	-	-	-	-

Références. ⁽¹⁾Shetye et al. 2018, ⁽²⁾Shetye et al. 2021, ⁽³⁾Karinkuzhi et al. 2018,
⁽⁴⁾Shetye et al. 2019

MARCS

- Model Atmospheres with a Radiative and Convective Scheme
- 1D à équilibre hydrostatique
- convection implémentée par théorie de longueur de mélange
- turbulences implémentées par paramètres simples (micro et macro-turbulence)

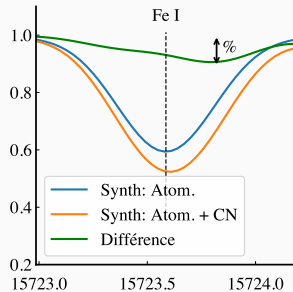
TurboSpectrum v20

- code qui résoud l'équation de transfert radiatif
- approximation ETL et non-ETL
- géométrie plan-parallèle ($\log g > 3.5$) et sphérique ($\log g < 3.5$)
- élargissement : profil de Voigt, effet Stark linéaire

→ Minimisation χ^2 entre spectres synthétiques et spectre observé

Contributions moléculaires

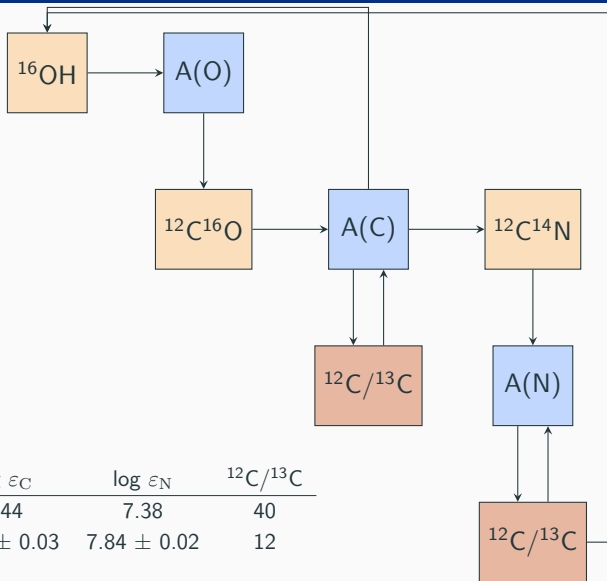
	Molécules	Bande H (%)	Bande K (%)
Cat. I (> 10%)	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	55.14	44.35
	$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$	32.00	14.51
	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	75.33	72.01
	HF	17.79	57.16
	$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	32.97	30.73
	$^{12}\text{C}^{13}\text{C}$	14.12	12.26
	^{12}CH	4.68	10.68
	^{16}OH	59.68	31.59
Cat. II (1-10%)	$^{13}\text{C}^{13}\text{C}$	7.84	3.51
	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}$	0.04	1.96
	^{56}FeH	3.12	0.08
	^{14}NH	1.57	1.23
	H_2O	1.75	6.80



Cat. III (< 1%) : ^{13}CH , ^{14}NH , ^{48}TiO , C_2H_2 , HCl , ^{20}CaH , ^{28}SiH , ^{28}SiO , VO , YO , ^{48}TiO , ^{24}MgH , AlH , ^{52}CrH , H^{12}CN , H^{13}CN , $^{90-94}\text{ZrO}$ et ^{96}ZrO

Abundances C, N, O

Itération sur les
abondances de C, N,
O jusqu'à
convergence.



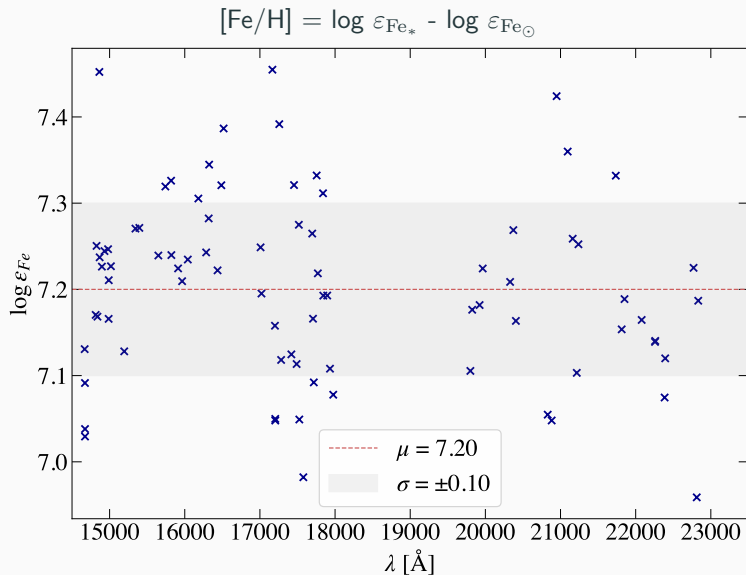
	$\log \varepsilon_{\text{O}}$	$\log \varepsilon_{\text{C}}$	$\log \varepsilon_{\text{N}}$	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
Initial	-	8.44	7.38	40
Final	8.31 ± 0.01	7.88 ± 0.03	7.84 ± 0.02	12

Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.3 ± 0.3	-	1.00	ailes raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	

Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.3 ± 0.3	-	1.00	ailes raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	



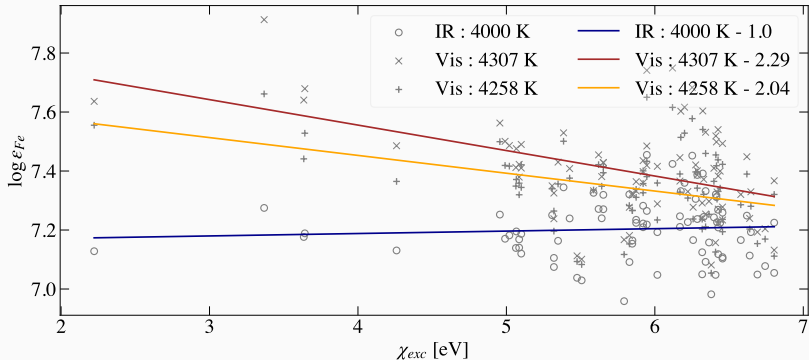
Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.3 ± 0.3	-	1.00	ailes raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	

Température effective

Respect de l'équation de Boltzmann \rightarrow abondance d'un élément ne varie pas en fonction du potentiel d'excitation

$$\frac{n_i}{N} = \frac{g_i}{U(T)} e^{-\chi_i/kT}$$



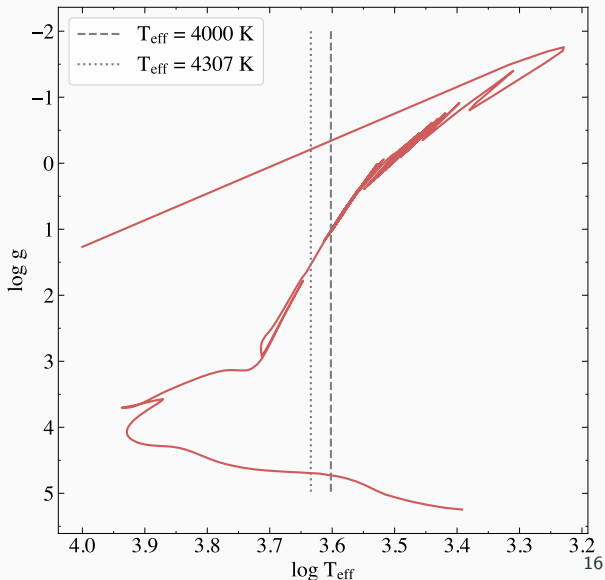
Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.3 ± 0.3	-	1.00	ailes raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	

Gravité de surface : isochrones

Isochrone basée sur
code PARSEC (code
d'évolution stellaire).

Amas d'étoiles de
même âge, supposé
ici à 1-10 Gyr.

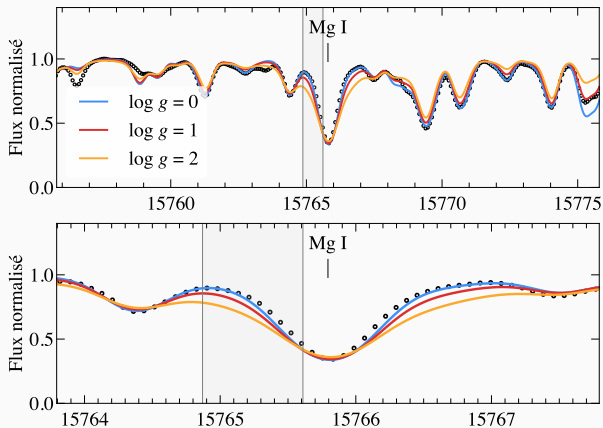


Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.3 ± 0.3	1.54	1.00	ailes de raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	

Gravité de surface : ailes de raies fortes

Minimisation χ^2 sur
ailes de raies fortes de
Mg I et Ca I.



Paramètres stellaires

Paramètre	Infrarouge	Visible	Littérature	Commentaires
[Fe/H] [dex]	-0.25 ± 0.10	-0.37	-0.30 ± 0.09	
T_{eff} [K]	4000 ± 125	4307	4000	
$\log g$ [dex]	to do	2.29	1.00	raies de Ti II
$\log g$ [dex]	1.04	1.54	1.00	isochrones
$\log g$ [dex]	to do	-	1.00	tracés évolutifs
$\log g$ [dex]	0.31	-	1.00	ailes raies fortes
ξ_{micro} [km/s]	to do	to do	-	

Gravité de surface

- Respect de l'équation de Saha
→ abondance identique pour l'élément neutre et ses différents états d'ionisation (raies de Ti II)
- Tracés évolutifs (estimer masse)

Microturbulence

- Paramètre *ad hoc*, permet de modéliser les effets de turbulence à des échelles plus petites que le libre parcours moyen des photons
- Abondance ne varie pas en fonction de la largeur équivalente réduite

Raies atomiques

	Élément	Nb. raies
Pic du fer	Sc I	115
	Ti I	63
	Ti II	7
	V I	76
	Cr I	20
	Mn I	55
	Fe I	81
	Co I	69
	Ni I	58
α	Mg I	12
	Si I	13
	Ca I	5

Raies atomiques suite

	Élément	Nb. raies
Z impaire	Na I	19
	Al I	7
	K I	5
s	Cu I	5
	Y I	17
	Zr I	2
	Ba I	2
	Ce II	9
	Ce III	2
	Nd II	7
	Yb II	2

- finir détermination paramètres stellaires
- comparaison avec abondances déterminées dans le visible à partir de spectre HERMES
- détermination d'abondances d'éléments lourds ETL et non-ETL
 - besoin de listes non-ETL
 - besoin d'interpoler modèles et coefficients d'écarts non-ETL
- comparaison profil d'abondances avec modèles de nucléosynthèse