







Transfert de rayonnement hors ETL pour l'étude des photosphères et des chromosphères stellaires Applications aux atomes de magnésium, calcium et fer dans les étoiles tardives

Thibault Merle

UNS - OCA - CNRS - Laboratoire Lagrange

21 mars 2012







Plan

- Contexte astrophysique
- Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- 🗿 Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- **1** Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

Introduction - Contexte astrophysique



Populations stellaires

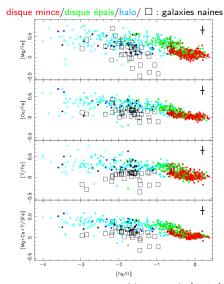
- Pop. I : étoiles jeunes et riches en métaux (disque)
- Pop. II : étoiles vieilles et pauvres en métaux (halo)
- Pop. III : étoiles sans métaux (hypothétiques)

Introduction - Contexte astrophysique

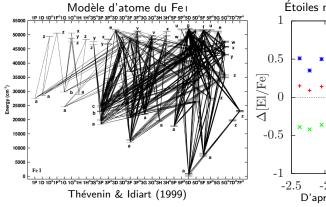


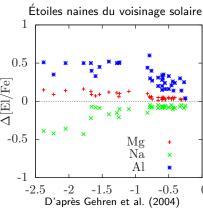
Populations stellaires

- Pop. I : étoiles jeunes et riches en métaux (disque)
- Pop. II : étoiles vieilles et pauvres en métaux (halo)
- Pop. III : étoiles sans métaux (hypothétiques)



Introduction - Contexte astrophysique





- Impact des effets hors ETL sur la détermination des abondances individuelles des étoiles de différentes populations stellaires
- Éléments considérés : magnésium et calcium
 - ▶ Bons traceurs de l'évolution chimique des galaxies
 - Éléments de références alternatifs au fer

Introduction - La mission spatiale Gaia



La mission Gaia de l'ESA (Perryman et al. 2001)

- Objectifs :
 - Astrométrie et photométrie de $\sim 10^9$ objets ($V \le 20$)
 - ightharpoonup Vitesses radiales et spectroscopie de $\sim 2 \times 10^8$ objets

Performances et comparaisons avec Hipparcos

- ullet Nombre d'objets : 10^9 (Hipparcos $\sim 10^5$)
- Magnitude limite : V = 20 (Hipparcos V = 12)
- Précision sur les parallaxes : 25 μ as jusqu'à V=15 (Hipparcos 1 mas)

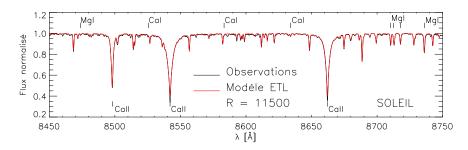
Avantages principaux pour la physique stellaire par rapport à Hipparcos

- Astrométrie → distance d'objets plus lointains
- \bullet Photomètre BP/RP + Spectromètre RVS \to contraintes sur les paramètres stellaires fondamentaux

Introduction - La mission spatiale Gaia

Le RVS (Radial Velocity Spectrometer) Katz et al. 2004

- Caractéristiques du spectrographe :
 - Spectrographe à intégrale de champ
 - ▶ Domaine spectral [8470 8740] Å \rightarrow le triplet du Ca II (CaT) + Fe, Mg, Si
 - Pouvoir de résolution R = 11500 ($V \lesssim 10$) et R = 6500 ($10 \lesssim V \lesssim 17$)
- Précision :
 - ▶ 1 km s⁻¹ pour les vitesses radiales des étoiles F, G et K (avec $V \lesssim 13$)
 - ightharpoonup 200 K, 0.4 dex, 0.15 dex pour les paramètres atmosphériques ($T_{\rm eff}$, log g, [Fe/H])
 - ▶ activités chromosphériques, vitesses de rotation, extinction interstellaire...



Introduction – Formation des raies spectrales

Équation du transfert radiatif

$$\mu rac{\mathrm{d} I_
u}{\mathrm{d} au_
u} = I_
u(au_
u, \mu) - S_
u(au_
u)$$

Solution formelle

• Intensité du champ de rayonnement :

$$I_{\nu}(0,\mu) = \int_0^{\infty} \mathbf{S}_{\nu}(\tau_{\nu}) e^{-\tau_{\nu}/\mu} d\tau_{\nu}/\mu$$

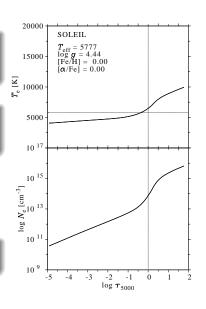
Fonction source : $S_{\nu}(\tau_{\nu}) = \frac{j_{\nu}}{\alpha_{\nu}}$

Profondeur optique radiale : $d\tau_{\nu} = -\alpha_{\nu} dz$

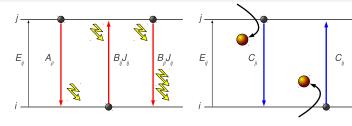
Projection sur la ligne de visée : $\mu = \cos \theta$

Modèle d'atmosphère

Modèle 1D ETL MARCS (Gustafsson et al. 2008)



Introduction - Hypothèse de l'ETL



Transitions radiatives

Transitions collisionnelles

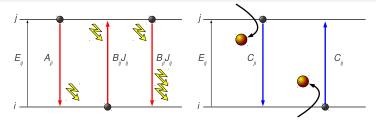
Matière à l'ETL

- ullet Fonction de distribution des vitesses o distribution de Maxwell
- Équilibre d'excitation → distribution de Boltzmann
- Équilibre d'ionisation → distribution de Saha

Rayonnement à l'ETL

- Fonction source de raie = fonction de Planck : $S_{\nu} = B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$
- Opacité de la raie : $\alpha_{\nu} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi e^2}{m_e c} n_i^* f_{ij} \phi(\nu \nu_0)$

Introduction - Hypothèse de l'ETL



Transitions radiatives

Transitions collisionnelles

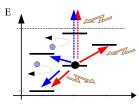
Matière à l'ETL

- ullet Fonction de distribution des vitesses o distribution de Maxwell
- Équilibre d'excitation → distribution de Boltzmann
- Équilibre d'ionisation → distribution de Saha

Rayonnement à l'ETL

- Fonction source de raie = fonction de Planck : $S_{\nu} = B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$
- Opacité de la raie : $\alpha_{\nu} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi e^2}{m_e c} n_i^* f_{ij} \phi(\nu \nu_0)$

Introduction – Approche hors ETL



Équilibre statistique

$$\frac{\mathrm{d}n_i}{\mathrm{d}t} = \sum_{i\neq j}^N n_j P_{ji} - n_i \sum_{i\neq j}^N P_{ij} = 0$$

Probabilités de transition : $P_{ij} = R_{ij}(J_{\nu_0}) + C_{ij}(T)$

Transitions radiatives : $R_{ij} = A_{ij} + B_{ij}J_{\nu_0}$

Transitions collisionnelles : $C_{ij} = n_{col} \int_{v_0}^{+\infty} \sigma_{ij}(v) v f(v) dv$

Interaction radiative Interaction collisionnelle

Fonction source de raie

•
$$S_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{b_i}{b_i} e^{h\nu/kT} - 1}$$

• Coefficient d'écart (à l'ETL) : $b_i = n_i/n_i^*$ (n_i et n_i^* : populations hors ETL et ETL)

Opacité de la raie

$$\alpha_{\nu} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{0}} \frac{\pi e^{2}}{m_{e}c} \frac{\mathbf{b}_{i} n_{i}^{*} f_{ij}}{\phi(\nu - \nu_{0})}$$

Introduction - Les effets hors ETL

Sur l'équilibre d'excitation (transitions liées-liées [b-b])

- Effet de diffusion résonante
 - Pour les raies de résonance : $S_{\nu} = \epsilon_{\nu} B_{\nu} + (1 \epsilon_{\nu}) J_{\nu}$
 - La raie devient plus forte hors ETL si $J_{\nu} < B_{\nu}$
 - ► Exemples : les raies de résonance du Kı et du Naı D (Bruls, Rutten & Schukina 1992)
- Effet de pompage de photons
 - $I_{\nu} > B_{\nu}$
 - La raie devient plus faible hors ETL

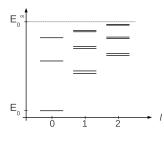
Sur l'équilibre d'ionisation (transitions liées-libres [b-f])

- Effet de sur-ionisation (dans l'UV)
 - $I_{\nu} > B_{\nu}$
 - ► Le taux de photo-ionisation peut excéder celui à l'ETL → baisse de l'opacité de la raie
 - Exemples : espèces minoritaires comme le Mg I, le Ca I et le Fe I dans les étoiles F, G, K (Zhao et al. 1998, Mashonkina et al. 2007, Thévenin & Idiart 1999)
- Effet de sur-recombinaison + processus de suction de photons (dans l'IR)
 - $ightharpoonup J_{\nu} < B_{\nu}$
 - $lackbox{ Niveaux élevés peuplés par collisions} + grands <math>\log gf
 ightarrow {
 m siphonne}$ le niveau d'ionisation supérieur
 - Exemple : raies en émission du Mg $\scriptstyle 1$ à 12 μ m dans le Soleil (Carlsson et al. 1992)

Plan

- Contexte astrophysique
- Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- 6 Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

Construction de modèles d'atomes - Niveaux d'énergie



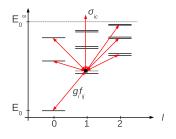
Caractérisation des niveaux d'énergie

- Configuration électronique n et l
- Terme spectroscopique ²⁵⁺¹L
- Poids statistique g
- Énergie référencée à l'état fondamental

Données atomiques

- États simplement et doublement excités
- Bases de données en ligne
 - ► Experimentale : Atomic Spectral Database de NIST (Ralchenko et al. 2010)
 - ► Théorique : TOPBASE (Seaton et al. 1995)
- Théorie de la polarisation pour des états à hauts n et l (par exemple Chang and Noyes 1983)
- Structure fine prise en compte quand disponible

Construction de modèles d'atomes - Transitions radiatives



Caractérisation des transitions radiatives

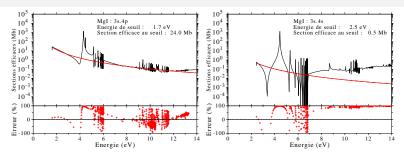
- suivent les règles de sélection en couplage spin-orbite (LS)
- ullet liées-liées : forces d'oscillateur $f_{ij} \propto A_{ji}/E_{ij}^2$
- liées-libres : sections efficaces de photo-ionisation $\sigma_{ic}(E_{\rm rad})$

Données atomiques

- transitions radiatives liées-liées :
 - Compilation VALD (Piskunov et al. 1995)
 - Kurucz & Bell (1995)
 - ► Atomic Spectra Database de NIST (Ralchenko et al. 2010)
- transitions radiatives liées-libres :
 - ► TOPBASE (Seaton et al. 1995)
 - ▶ formule de Kramers : $\sigma_{ic}(E_{\rm rad}) \propto \frac{n}{Z_{\rm eff}^2} g_{\rm bf}(n_{\rm eff}, n, l) E_{\rm rad}^{-3}$

avec facteur de Gaunt de Karzas & Latter (1961)

Construction de modèles d'atomes - Transitions radiatives

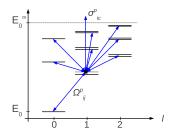


Données atomiques

- transitions radiatives liées-liées :
 - ► Compilation VALD (Piskunov et al. 1995)
 - Kurucz & Bell (1995)
 - ► Atomic Spectra Database de NIST (Ralchenko et al. 2010)
- transitions radiatives liées-libres :
 - ► TOPBASE (Seaton et al. 1995)
 - ▶ formule de Kramers : $\sigma_{ic}(E_{\rm rad}^{'}) \propto \frac{n}{Z_{\rm eff}^2} g_{\rm bf}(n_{\rm eff},n,l) E_{\rm rad}^{-3}$

avec facteur de Gaunt de Karzas & Latter (1961)

Construction de modèles d'atomes - Transitions collisionnelles



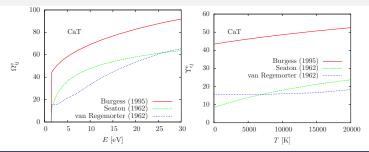
Caractérisation des transitions collisionnelles

- Dépendance à la nature des collisionneurs
- liées-liées : force de collision $\Omega^p_{ij}(E_{col})$
- liées-libres : sections efficaces de collisions $\sigma^p_{ic}(E_{col})$

Données atomiques pour collisions électroniques ($p \equiv e$)

- quelques calculs quantiques dans la littérature spécialisée (Burgess et al. 1995)
- ullet formule semi-classique de Seaton (1962a,b) où $\Omega_{ij}^{\,\mathrm{e}} \propto g_i f_{ij}$
- formule semi-empirique de van Regemorter (1962)

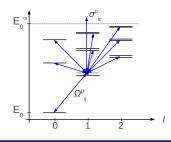
Construction de modèles d'atomes - Transitions collisionnelles



Données atomiques pour collisions électroniques ($p \equiv e$)

- quelques calculs quantiques dans la littérature spécialisée (Burgess et al. 1995)
- ullet formule semi-classique de Seaton (1962a,b) où $\Omega_{ij}^{\,\mathrm{e}} \propto g_i f_{ij}$
- formule semi-empirique de van Regemorter (1962)

Construction de modèles d'atomes - Transitions collisionnelles



Caractérisation des transitions collisionnelles

- Dépendance à la nature des collisionneurs
- ullet liées-liées : force de collision $\Omega^p_{ij}(E_{ ext{col}})$
- liées-libres : sections efficaces de collisions $\sigma^p_{ic}(E_{col})$

Données atomiques pour collisions électroniques ($p \equiv e$)

- quelques calculs quantiques dans la littérature spécialisée (Burgess et al. 1995)
- ullet formule semi-classique de Seaton (1962a,b) où $\Omega_{ij}^{
 m e} \propto g_i f_{ij}$
- formule semi-empirique de van Regemorter (1962)

Données atomiques pour collisions avec hydrogène $(p \equiv H)$

- source principale des incertitudes du transfert radiatif hors ETL
- ullet formule classique de Drawin (1969) où $\Omega^{
 m H}_{ij} \propto m_A/m_{
 m H} \ f_{ij} +$ facteur d'ajustement S_H
- collisions Mg-H (Barklem et al., arXiv, 2012) en cours d'implémentation (collaboration avec Feautrier, Guitou [Paris-Meudon] et Barklem [Uppsala])

Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

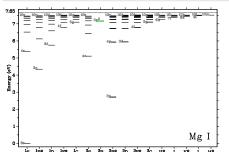
- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

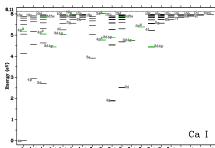
Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mgı et Caı

- Mg \mid (Z = 12, [Ne]3s²), Ca \mid (Z=20, [Ar]4s²) \rightarrow alcalino-terreux
- ullet Atomes à "deux électrons" ightarrow 2 systèmes de multiplicité



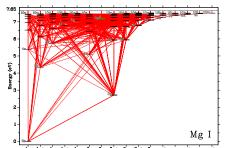


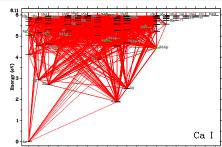
Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mgı et Caı

- Mg \colon (Z = 12, [Ne]3s²), Ca \colon (Z=20, [Ar]4s²) \to alcalino-terreux
- \bullet Atomes à "deux électrons" \to 2 systèmes de multiplicité



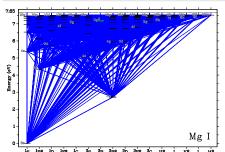


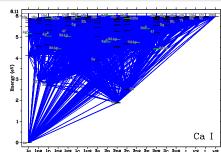
Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mgı et Caı

- Mg \colon (Z = 12, [Ne]3s²), Ca \colon (Z=20, [Ar]4s²) \to alcalino-terreux
- ullet Atomes à "deux électrons" ightarrow 2 systèmes de multiplicité



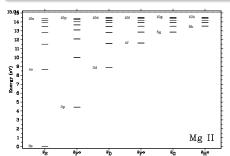


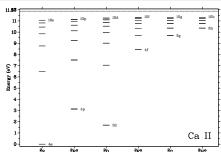
Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mg II et Ca II

- Mg II (Z=12, [Ne]3s), Ca II (Z=20, [Ar]4s) \rightarrow ions alcalins
- ullet Atomes à "un électron" o 1 système de multiplicité



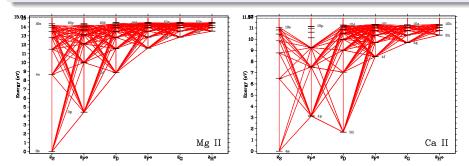


Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mg II et Ca II

- Mg II (Z=12, [Ne]3s), Ca II (Z=20, [Ar]4s) ightarrow ions alcalins
- ullet Atomes à "un électron" o 1 système de multiplicité

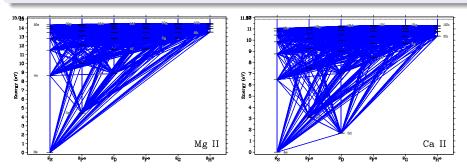


Le code FORMATO (fortran90 modulaire)

- Un degré d'ionisation à la fois en couplage spin-orbite (LS)
- Grand nombre de critères (sur les niveaux, les transitions radiatives et collisionnelles)
- Modularité pour le traitement des collisions

Modèles d'atomes du Mg II et Ca II

- Mg II (Z = 12, [Ne]3s), Ca II (Z = 20, [Ar]4s) \rightarrow ions alcalins
- ullet Atomes à "un électron" ightarrow 1 système de multiplicité

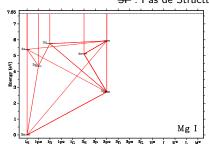


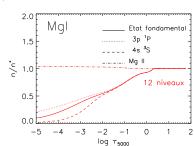
| Auteur | Élt | Niveaux | Tra radiatives | ansitions collisionnelles | Applications |
|--------------------------|---------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| Przybilla et al. (2001) | Mg I Mg II | 88 SF 33 SF | ? | ? | étoiles A |
| Sundqvist et al. (2008) | Mgı | 90 SF | > 315 | ~ 1000 | géantes K |
| Merle et al. (2011) | Mgı | 150 SF | 1102 | 11026 | géantes G,K,M |
| Idiart & Thévenin (2000) | Сат | 84 SF | 483 | 483 | naines |
| Mashonkina et al. (2007) | Caı | 63 SF | 421 | ? | Soleil, |
| | Сап | 37 SF | 213 | ? | naines F, G |
| Merle et al. (2011) | Ca I Ca II | 152 SF 74 SF | 2120 422 | 11628 2775 | géantes G,K,M |

SF: Pas de Structure Fine; SF: Structure Fine

| Auteur | Élt | Niveaux | Transitions | | Applications |
|--------------------------|-------|------------------|-------------|-----------------|--------------|
| | | | radiatives | collisionnelles | |
| Przybilla et al. (2001) | Mgı | 88 SF | ? | ? | étoiles A |
| | MgII | 33 SF | ? | ? | |
| Sundqvist et al. (2008) | Mgı | 90 SF | > 315 | ~ 1000 | géantes K |
| Merle et al. (2011) | Mgı | 150 SF | 1102 | 11026 | géantes |
| | | | | | G,K,M |
| Idiart & Thévenin (2000) | Сат | 84 SF | 483 | 483 | naines |
| Mashonkina et al. (2007) | Caı | 63 SF | 421 | ? | Soleil, |
| | Ca II | 37 SF | 213 | ? | naines F, G |
| Merle et al. (2011) | Caı | 152 SF | 2120 | 11628 | géantes |
| | Са п | 74 SF | 422 | 2775 | G,K,M |

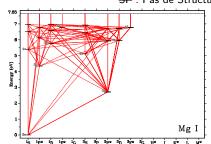
SF: Pas de Structure Fine; SF: Structure Fine

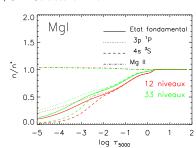




| Auteur | Élt | Niveaux | Tradiatives | ansitions collisionnelles | Applications |
|--------------------------|---------------|--------------------------------------|-------------|------------------------------|------------------|
| Przybilla et al. (2001) | Mg I Mg II | 88 SF 33 SF | ? | ? ? | étoiles A |
| Sundqvist et al. (2008) | Mgı | 90 SF | > 315 | ~ 1000 | géantes K |
| Merle et al. (2011) | Mgı | 150 SF | 1102 | 11026 | géantes G,K,M |
| Idiart & Thévenin (2000) | Сат | 84 SF | 483 | 483 | naines |
| Mashonkina et al. (2007) | Caı | 63 SF | 421 | ? | Soleil, |
| | Ca II | 37 SF | 213 | ? | naines F, G |
| Merle et al. (2011) | Ca I Ca II | 152 SF 74 SF | 2120 422 | 11628 2775 | géantes G,K,M |

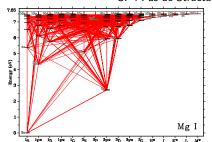
SF: Pas de Structure Fine; SF: Structure Fine

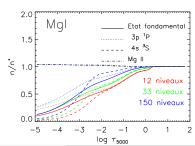




| Auteur | Élt | Niveaux | Transitions | | Applications |
|--------------------------|-------|------------------|-------------|-----------------|--------------|
| | | | radiatives | collisionnelles | |
| Przybilla et al. (2001) | Mgı | 88 SF | ? | ? | étoiles A |
| , , | MgII | 33 SF | ? | ? | |
| Sundqvist et al. (2008) | Mgı | 90 SF | > 315 | ~ 1000 | géantes K |
| Merle et al. (2011) | Mgı | 150 SF | 1102 | 11026 | géantes |
| | | | | | G,K,M |
| Idiart & Thévenin (2000) | Сат | 84 SF | 483 | 483 | naines |
| Mashonkina et al. (2007) | Caı | 63 SF | 421 | ? | Soleil, |
| | Ca II | 37 SF | 213 | ? | naines F, G |
| Merle et al. (2011) | Caı | 152 SF | 2120 | 11628 | géantes |
| | Са п | 74 SF | 422 | 2775 | G,K,M |

SF: Pas de Structure Fine; SF: Structure Fine





Plan

- Contexte astrophysique
- 2 Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- 1 Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Test des modèles d'atomes

Code de transfert radiatif hors ETL MULTI2.2 (Carlsson 1986)

- Hypothèses : 1D, indépendant du temps, plan-parallèle
- Résolution auto-cohérente des équations de transfert et de l'équilibre statistique
- Schéma numérique itératif de Newton-Raphson
- Modifications apportées :
 - prise en compte des collisions élastiques avec l'hydrogène par les calculs quantiques de Anstee & O'Mara (1995) Barklem & O'mara (1997) et Barklem et al. (1998)
 - modification de la routine des collisions inélastiques avec les électrons et l'hydrogène neutre

Entrées

- modèle d'atmosphère
- composition chimique
- modèle d'atome

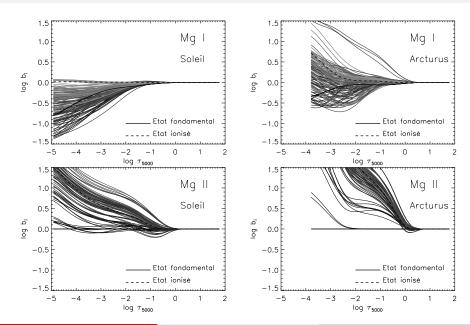
Sorties ETL et hors ETL

- coefficients d'écart à l'ETL $b_i = n_i/n_i^*$
- ullet rapports de largeurs équivalentes W/W^{st}
- flux, fonctions de contribution, etc.

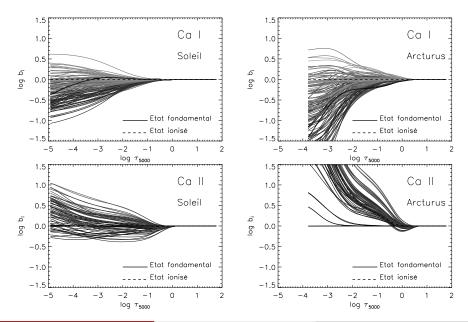
Modèles d'atmosphères MARCS (Gustafsson et al. 2008)

- ullet Le Soleil : $T_{
 m eff}=5777$ K, $\log g=4.44$, ${
 m [Fe/H]}=0.0$, $\xi=1$ km s $^{-1}$, plan-parallèle
- Arcturus : $T_{\rm eff} = 4300 \text{ K}$, $\log g = 1.50$, $[{\rm Fe/H}] = -0.5$, $\xi = 2 \text{ km s}^{-1}$, sphérique

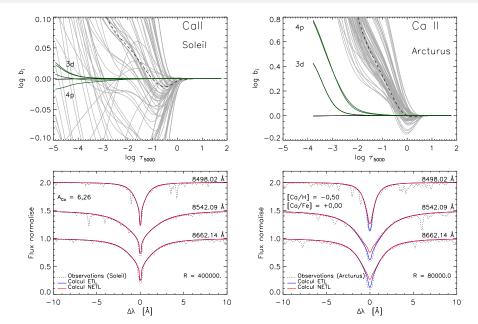
Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Équilibre d'excitation



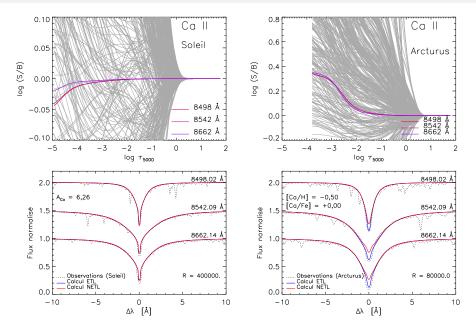
Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Équilibre d'excitation



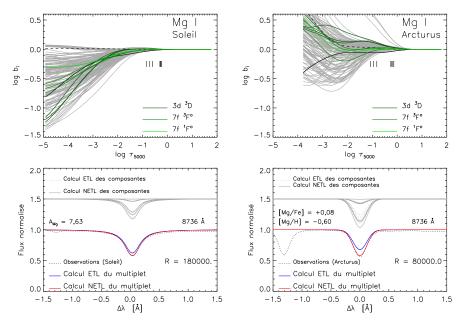
Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Formation du CaT



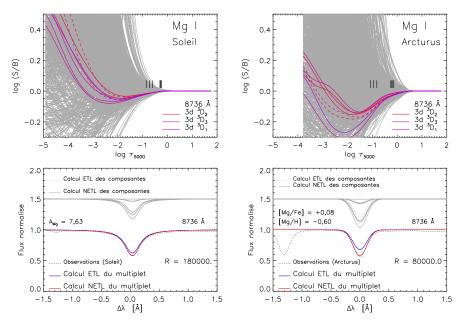
Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Formation du CaT



Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Formation du Mg | 8736 Å



Effets hors ETL sur le Soleil et Arcturus - Formation du Mg | 8736 Å



Plan

- Contexte astrophysique
- Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- 6 Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

Une grille de corrections hors ETL pour des géantes et super-géantes

Publication

Merle, Thévenin, Pichon & Bigot 2011, MNRAS, 418, 863-887

La grille de géantes et de super-géantes

- 453 modèles d'atmosphères MARCS (Gustafsson et al. 2008)
- avec composition solaire standard (Grevesse, Asplund & Sauval 2007)
- 1 M_☉ en sphérique
- vitesse de microturbulence constante $\xi = 2 \text{ km s}^{-1}$
- Paramètres atmosphériques :
 - ► 3500 < T_{eff} < 5500
 - ▶ $0.5 \le \log g \le 2.0$
 - ► $-4.0 \le [Fe/H] \le +0.5$ et $0.0 \le [\alpha/Fe] \le +0.4$

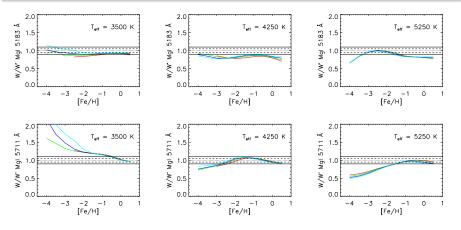
Corrections hors ETL W/W^*

- Pour 20 raies du Mg₁, 18 raies du Ca₁ et 9 raies du Ca₁₁
- Sur les largeurs équivalentes en fonction des paramètres atmosphériques
- Ajustements polynômiaux pour les corrections W/W^* des raies Gaia

Une grille de corrections hors ETL - Sensibilité aux paramètres

Exemples pour le Mgı

- Le triplet b du Mg (5167, 5172, 5183) Å
- La raie à **5711** Å du Mg I (3p ¹P° 5s ¹S)

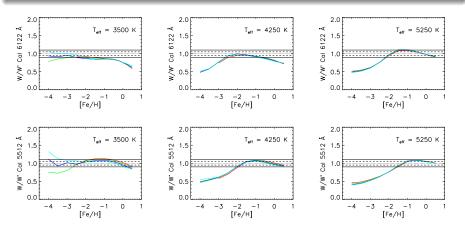


 $\log g = 0.5$, $\log g = 1.0$, $\log g = 1.5$ et $\log g = 2.0$

Une grille de corrections hors ETL - Sensibilité aux paramètres

Exemples pour le Cai

- Le triplet subordonné rouge du Cai (6102, 6122, 6162) Å
- La raie à **5512** Å du Ca (4p ¹P° 4p² ¹S)

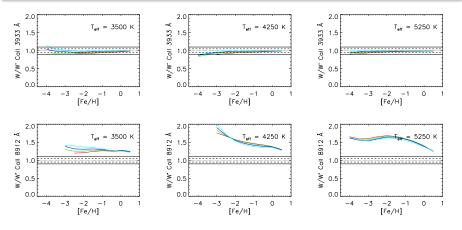


 $\log g = 0.5$, $\log g = 1.0$, $\log g = 1.5$ et $\log g = 2.0$

Une grille de corrections hors ETL - Sensibilité aux paramètres

Exemples pour le Ca II

- Les raies de résonances H & K du Ca II (3933 et 3968) Å
- La raie à **8912** Å du Ca II (4d ²D 4f ¹F°)

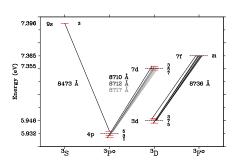


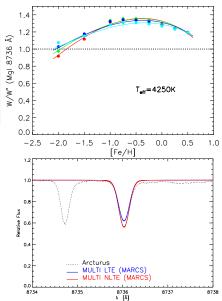
 $\log g = 0.5$, $\log g = 1.0$, $\log g = 1.5$ et $\log g = 2.0$

Une grille de corrections hors ETL - Raies Gaia : Mg I

Effets hors ETL sur la raie à 8736 Å

- Modèle Mg i spécial Gaia
- Exemple sur la géante Arcturus ($T_{\rm eff}=4300~{\rm K}, \log g=1.5, {\rm [Fe/H]}=-0.5)$
 - ▶ [Mg/H] = -0.2 à l'ETL
 - Mg/H = -0.5 hors ETL
 - $\Delta [\mathrm{Mg/H}] = -0.3 \ \mathrm{dex}$



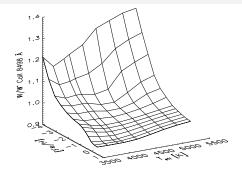


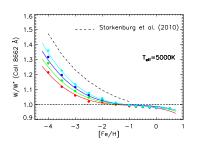
Une grille de corrections hors ETL - Raies Gaia : CaT

Effets NETL sur le CaT

- La composante à 8498 Å est la plus sensible
- Comportement similaire pour les autres composantes du triplet
- Effets plus importants pour les modèles chauds et pauvres en métaux

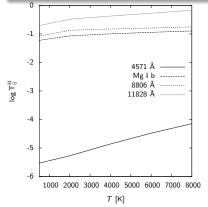
- Comparaison avec Starkenburg et al. (2010): ajustement indépendant de log g
- Avec modèle d'atome du Ca I/II de Mashonkina et al. (2007)



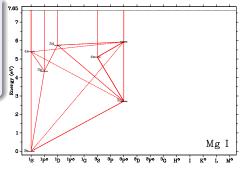


Travail en cours - Collisions inélastiques avec l'hydrogène neutre

- $ullet < \sigma_{ij}^{
 m H} v >$ de Barklem et al. 2012 ightarrow force de collisions effectives $\Upsilon_{ij}^{
 m H}$
- FORMATO \rightarrow modèle de Mg I à 12 niveaux avec ces collisions
- Tests sur le Soleil, Arcturus, HD122563 et HD84937



Merle et al. (en préparation)



HD122563 (4600/1.60/ - 2.60/ + 0.40)

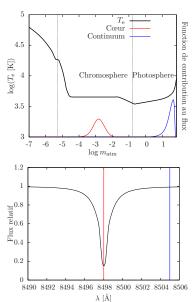
| | | Drawin (1962) | Barklem | et al. (2012) |
|-------|-------|---------------|---------|---------------|
| | Hcoll | Hcoll | Hcoll | Hcoll b-b |
| λ [Å] | W/W* | W/W* | W/W* | W/W* |
| 2852 | 0.49 | 0.55 | 0.74 | 0.63 |
| 4571 | 0.59 | 0.59 | 0.78 | 0.65 |
| 5167 | 0.91 | 0.87 | 1.01 | 0.94 |
| 5172 | 0.85 | 0.88 | 0.99 | 0.90 |
| 5183 | 0.82 | 0.79 | 0.98 | 0.88 |
| 8806 | 1.29 | 1.14 | 1.21 | 1.11 |
| 11828 | 1.41 | 1.17 | 1.17 | 1.07 |

Plan

- Contexte astrophysique
- 2 Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- **1** Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

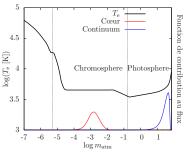
Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K

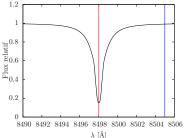
Exemple pour une géante rouge



Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K

Exemple pour une géante rouge





L'interféromètre CHARA ten Brummelaar (2005)

- 6 télescopes d' 1 m sur une base en "Y"
- Longueurs de base jusqu'à 330 m
- Résolution angulaire max de 0.3 mas

Recombinateur de faisceaux VEGA Mourard et al. (2009)

- domaine visible [4500 8500]Å
- 2 détecteurs de photons (rouge et bleu)
- haute résolution spectrale (30000)

Sélection des cibles

- géantes K
- cibles brillantes : $m_V < 4$
- visibilités dans le continu > 30 %

Observations interférométriques dans le continu de 7 géantes K

| HD | Nom | Туре | p [mas] | m_K | V - R | $T_{\rm eff}[K]$ | log g | [Fe/H] | $A_{\rm v}$ |
|--------|--------------------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|--------|-------------|
| 4128 | β Cet | K0III | 33.86 ± 0.16 | -0.20 | 0.72 | 4750 ± 100 | 2.45 | 0.13 | 0 |
| 6805 | η Cet | K1III | 26.32 ± 0.14 | 0.86 | 0.83 | 4425 ± 100 | 2.05 | 0.04 | 0 |
| 98430 | $\dot{\delta}$ Crt | K0III | 17.56 ± 0.19 | 0.95 | 0.83 | 4500 ± 120 | 2.59 | -0.48 | 0.01 |
| 127665 | ρ Boo | K3III | 20.37 ± 0.18 | 0.59 | 0.92 | 4260 ± 120 | 2.22 | -0.17 | 0 |
| 161096 | β Oph | K2III | 39.85 ± 0.17 | 0.27 | 0.82 | 4475 ± 100 | 1.70 | 0.00 | 0.05 |
| 169414 | 109 Her | K2III | 27.42 ± 0.40 | 1.09 | 0.85 | 4450 ± 120 | 2.67 | -0.16 | 0.04 |
| 216228 | ι Cep | K0III | 28.29 ± 0.10 | 1.11 | 0.83 | 4770 ± 120 | 2.97 | -0.12 | 0 |

parallaxes Hipparcos (van Leeuwen 2007), paramètres atmosphériques de Luck & Challener (1995) and McWilliam (1990)

Observations interférométriques dans le continu de 7 géantes K

Publication

Berio, Merle et al. 2011, A&A, 535, 59-69

| HD | Nom | Туре | p [mas] | m_K | V - R | $T_{\rm eff}[K]$ | log g | [Fe/H] | $A_{ m v}$ |
|--------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|--------|------------|
| 4128 | β Cet | K0III | 33.86 ± 0.16 | -0.20 | 0.72 | 4750 ± 100 | 2.45 | 0.13 | 0 |
| 6805 | η Cet | K1III | 26.32 ± 0.14 | 0.86 | 0.83 | 4425 ± 100 | 2.05 | 0.04 | 0 |
| 98430 | δ Crt | K0III | 17.56 ± 0.19 | 0.95 | 0.83 | 4500 ± 120 | 2.59 | -0.48 | 0.01 |
| 127665 | ρ Boo | K3III | 20.37 ± 0.18 | 0.59 | 0.92 | 4260 ± 120 | 2.22 | -0.17 | 0 |
| 161096 | β Oph | K2III | 39.85 ± 0.17 | 0.27 | 0.82 | 4475 ± 100 | 1.70 | 0.00 | 0.05 |
| 169414 | 109 Her | K2III | 27.42 ± 0.40 | 1.09 | 0.85 | 4450 ± 120 | 2.67 | -0.16 | 0.04 |
| 216228 | ι Cep | K0III | 28.29 ± 0.10 | 1.11 | 0.83 | 4770 ± 120 | 2.97 | -0.12 | 0 |

parallaxes Hipparcos (van Leeuwen 2007), paramètres atmosphériques de Luck & Challener (1995) and McWilliam (1990)

- Observations interférométriques dans le continu à 6200 et 7900 Å
- Diamètres angulaires assombris en utilisant les lois de Claret et al. (1995) and Diaz-Cordoves et al. (1995)
- Flux bolométriques m_K (2MASS), BC_K de Houdashelt et al. (2000) et A_V de Chen et al. (1998)

| HD | Nom | θ_{LD} [mas] | $f_{\mathrm{bol}}^{\dagger}$ | T _{eff} [K] | L/L _⊙ | R/R _⊙ | M/M _☉ |
|--------|--------------|---------------------|------------------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 4128 | β Cet | 5.288 ± 0.075 | 5.10 | 4838 ± 70 | 139.1 ± 7.0 | 16.78 ± 0.25 | 3.0 - 3.5 |
| 6805 | η Cet | 3.698 ± 0.160 | 1.64 | 4356 ± 55 | 74.0 ± 3.7 | 15.10 ± 0.10 | 1.0 - 1.4 |
| 98430 | δ Crt | 3.667 ± 0.022 | 1.66 | 4408 ± 57 | 171.4 ± 9.0 | 22.44 ± 0.28 | 1.0 - 1.4 |
| 127665 | ρ Boo | 4.090 ± 0.031 | 1.76 | 4298 ± 56 | 131.9 ± 6.8 | 21.57 ± 0.25 | 1.0 - 1.4 |
| 161096 | β Oph | 4.606 ± 0.045 | 3.04 | 4621 ± 62 | 63.4 ± 3.2 | 12.42 ± 0.13 | 1.4 - 1.8 |
| 169414 | 109 Her | 3.223 ± 0.034 | 1.17 | 4334 ± 59 | 50.7 ± 2.7 | 12.63 ± 0.22 | 0.8 - 1.0 |
| 216228 | ι Cep | 2.646 ± 0.048 | 1.28 | 4831 ± 74 | 49.6 ± 2.5 | 10.05 ± 0.18 | 1.8 - 2.2 |

 $^{^{\}dagger} imes 10^{-6}$ [erg rd 2 s $^{-1}$ cm $^{-2}$]

Observations interférométriques dans le continu de 7 géantes K

Publication

Berio, Merle et al. 2011, A&A, 535, 59-69

| HD | Nom | Туре | p [mas] | m_K | V - R | $T_{\rm eff}[K]$ | log g | [Fe/H] | $A_{\rm v}$ |
|--------|--------------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|--------|-------------|
| 4128 | β Cet | K0III | 33.86 ± 0.16 | -0.20 | 0.72 | 4750 ± 100 | 2.45 | 0.13 | 0 |
| 6805 | η Cet | K1III | 26.32 ± 0.14 | 0.86 | 0.83 | 4425 ± 100 | 2.05 | 0.04 | 0 |
| 98430 | δ Crt | K0III | 17.56 ± 0.19 | 0.95 | 0.83 | 4500 ± 120 | 2.59 | -0.48 | 0.01 |
| 127665 | ρ Boo | K3III | 20.37 ± 0.18 | 0.59 | 0.92 | 4260 ± 120 | 2.22 | -0.17 | 0 |
| 161096 | β Oph | K2III | 39.85 ± 0.17 | 0.27 | 0.82 | 4475 ± 100 | 1.70 | 0.00 | 0.05 |
| 169414 | 109 Her | K2III | 27.42 ± 0.40 | 1.09 | 0.85 | 4450 ± 120 | 2.67 | -0.16 | 0.04 |
| 216228 | ι Cep | K0III | 28.29 ± 0.10 | 1.11 | 0.83 | 4770 ± 120 | 2.97 | -0.12 | 0 |

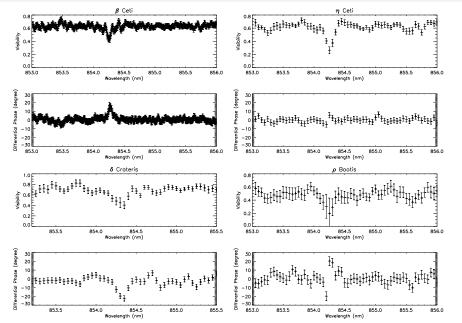
parallaxes Hipparcos (van Leeuwen 2007), paramètres atmosphériques de Luck & Challener (1995) and McWilliam (1990)

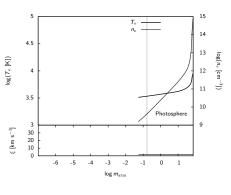
- Observations interférométriques dans le continu à 6200 et 7900 Å
- Diamètres angulaires assombris en utilisant les lois de Claret et al. (1995) and Diaz-Cordoves et al. (1995)
- Flux bolométriques m_K (2MASS), BC_K de Houdashelt et al. (2000) et A_V de Chen et al. (1998)

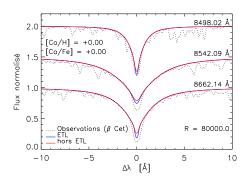
| HD | Nom | θ_{LD} [mas] | $f_{ m bol}^{\dagger}$ | T _{eff} [K] | L/L _⊙ | R/R _⊙ | M/M _☉ |
|--------|--------------|---------------------|------------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| 4128 | β Cet | 5.288 ± 0.075 | 5.10 | 4838 ± 70 | 139.1 ± 7.0 | 16.78 ± 0.25 | 3.0 - 3.5 |
| 6805 | η Cet | 3.698 ± 0.160 | 1.64 | 4356 ± 55 | 74.0 ± 3.7 | 15.10 ± 0.10 | 1.0 - 1.4 |
| 98430 | δ Crt | 3.667 ± 0.022 | 1.66 | 4408 ± 57 | 171.4 ± 9.0 | 22.44 ± 0.28 | 1.0 - 1.4 |
| 127665 | ρ Boo | 4.090 ± 0.031 | 1.76 | 4298 ± 56 | 131.9 ± 6.8 | 21.57 ± 0.25 | 1.0 - 1.4 |
| 161096 | β Oph | 4.606 ± 0.045 | 3.04 | 4621 ± 62 | 63.4 ± 3.2 | 12.42 ± 0.13 | 1.4 - 1.8 |
| 169414 | 109 Her | 3.223 ± 0.034 | 1.17 | 4334 ± 59 | 50.7 ± 2.7 | 12.63 ± 0.22 | 0.8 - 1.0 |
| 216228 | ι Cep | 2.646 ± 0.048 | 1.28 | 4831 ± 74 | 49.6 ± 2.5 | 10.05 ± 0.18 | 1.8 - 2.2 |

 $^{^{\}dagger} imes 10^{-6}$ [erg rd 2 s $^{-1}$ cm $^{-2}$]

Observations interférométriques dans les raies du CaT de 4 géantes

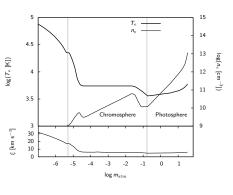


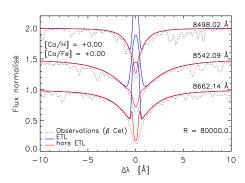




Modèles d'atmosphères de β Cet (Observations de NARVAL/TBL)

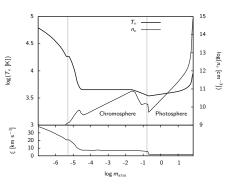
• Modèle MARCS ($T_{\rm eff}=4830~{\rm K,\ log}\,g=2.45,\ {\rm [Fe/H]}=0$) photosphère seule

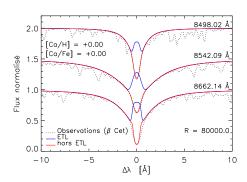




Modèles d'atmosphères de β Cet (Observations de NARVAL/TBL)

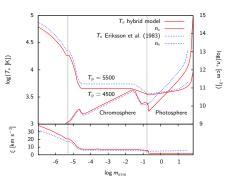
ullet Eriksson et al. (1983) ($T_{
m eff}=4900$ K, $\log g=2.90$, ${
m [Fe/H]}=0$) avec chromosphère

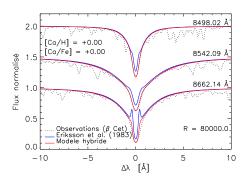




Modèles d'atmosphères de β Cet (Observations de NARVAL/TBL)

• Modèle hybride : photosphère MARCS + chromosphère ajustée de Eriksson et al.





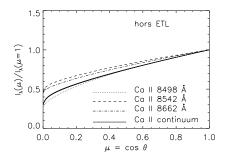
Modèles d'atmosphères de β Cet (Observations de NARVAL/TBL)

- Modèle Marcs ($T_{\rm eff}=4830$ K, $\log g=2.45$, ${\rm [Fe/H]}=0$) photosphère seule
- ullet Eriksson et al. (1983) ($T_{
 m eff}=4900$ K, $\log g=2.90$, ${
 m [Fe/H]}=0$) avec chromosphère
- Modèle hybride : photosphère MARCS + chromosphère ajustée de Eriksson et al.

Les lois d'assombrissement centre-bord hors ETL

Modèle NETL de β Cet

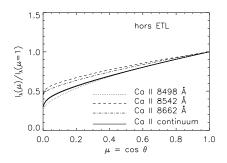
- Modèle d'atmosphère hybride : photosphère MARCS + chromosphère d'Eriksson et al. (1983) ajusté
- Modèle d'atome du Ca II de Merle et al. (2011)
- Code de transfert radiatif hors ETL MULTI (modifié pour considérer plus de directions pour l'assombrissement centre-bord)

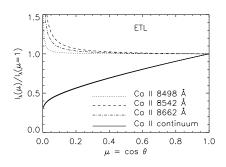


Les lois d'assombrissement centre-bord hors ETL

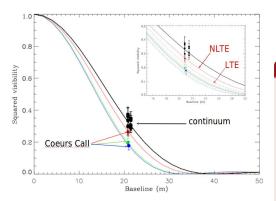
Modèle NETL de β Cet

- Modèle d'atmosphère hybride : photosphère MARCS + chromosphère d'Eriksson et al. (1983) ajusté
- Modèle d'atome du Ca II de Merle et al. (2011)
- Code de transfert radiatif hors ETL MULTI (modifié pour considérer plus de directions pour l'assombrissement centre-bord)





Extension chromosphérique de β Cet



| λ [Å] | $	heta_{LD}$ [mas] | | $R_{C}\left[R_{\star}\right]$ | |
|---------------|--------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | ETL | hors ETL | ETL | hors ETL |
| Cont | 5.15 | 5.15 | 1 | 1 |
| 8498 | 5.80 | 6.10 | 1.13 | 1.18 |
| 8542 | 6.35 | 6.62 | 1.23 | 1.29 |
| 8662 | 6.55 | 6.85 | 1.27 | 1.33 |

Comparaison des résultats

Bon accord avec:

- Modèles de chauffage par dissipation d'ondes acoustiques (Cuntz 1990a, b) qui prédisent des extensions de $\sim 10-20~\%$ du rayon stellaire
- Modèles de chauffage par dissipation d'ondes MHD (Suzuki 2007) qui expliquent l'évolution de la structure chromosphérique de telles étoiles

Plan

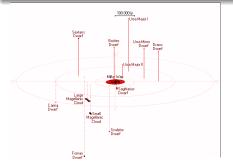
- Contexte astrophysique
- Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- **1** Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

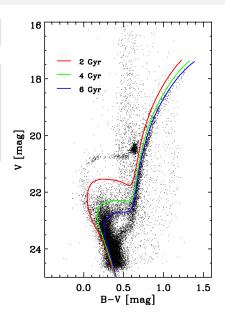
Publication

Fabrizio, Merle et al. 2012, PASP, soumis

La galaxie dSph Carina

- ullet Étoiles brillantes o géantes rouges
- \bullet Branche des géantes peu étalée \to couvre différentes populations stellaires
- \bullet Si atmosphères non polluées \to composition chimique initiale du milieu





Observations (ESO Science Archive)

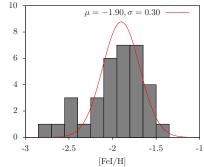
- UVES et FLAMES/GIRAFFE-UVES
- [4780 6825] Å, $R \sim 38000$, $S/B \sim 30$

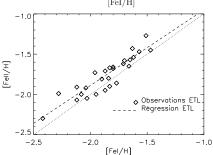
Analyse ETL avec MOOG (Sneden 1973)

- 44 géantes rouges analysées
- Distribution de métallicité [Fe/H] = -1.80, $\sigma = 0.29$
- ullet différence Fe $_{
 m I}$ Fe $_{
 m II}$: $\sim 0.1~{
 m dex}$

2 interprétations

- corrections sur la gravité de surface \sim 0.2 dex (Shetrone et al. 2003)
- corrections hors ETL
 - ▶ modèle du Fe ı/ıı (Collet et al. 2005)
 - ightharpoonup différence Fe I Fe II : \sim 0.1 dex





Observations (ESO Science Archive)

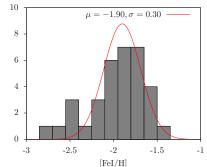
- UVES et FLAMES/GIRAFFE-UVES
- [4780 6825] Å, $R \sim 38000$, $S/B \sim 30$

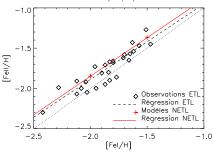
Analyse ETL avec MOOG (Sneden 1973)

- 44 géantes rouges analysées
- Distribution de métallicité [Fe/H] = -1.80, $\sigma = 0.29$
- différence Fe $_{\rm I}$ Fe $_{\rm II}$: $\sim 0.1~{\rm dex}$

2 interprétations

- corrections sur la gravité de surface \sim 0.2 dex (Shetrone et al. 2003)
- corrections hors ETL
 - ▶ modèle du Fe I/II (Collet et al. 2005)
 - ightharpoonup différence Fe I Fe II : \sim 0.1 dex





Observations (ESO Science Archive)

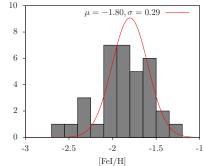
- UVES et FLAMES/GIRAFFE-UVES
- [4780 6825] Å, $R \sim 38000$, $S/B \sim 30$

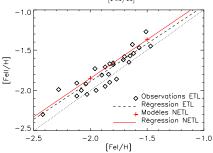
Analyse ETL avec MOOG (Sneden 1973)

- 44 géantes rouges analysées
- Distribution de métallicité [Fe/H] = -1.80, $\sigma = 0.29$
- différence Fe $_{\rm I}$ Fe $_{\rm II}$: \sim 0.1 dex

2 interprétations

- corrections sur la gravité de surface \sim 0.2 dex (Shetrone et al. 2003)
- corrections hors ETL
 - ▶ modèle du Fe I/II (Collet et al. 2005)
 - ightharpoonup différence Fe I Fe II : \sim 0.1 dex





Plan

- Contexte astrophysique
- Construction de modèles d'atomes pour le magnésium et le calcium
- Transfert hors ETL sur deux étoiles de références : le Soleil et Arcturus
- Grille de corrections hors ETL dans les photosphères de géantes et supergéantes
- 5 Transfert hors ETL dans les chromosphères de géantes K
- 6 Effets hors ETL sur le fer dans la galaxie naine Carina
- Conclusions et perspectives
- Compléments

Conclusions

- Développement du code FORMATO → construction des modèles d'atomes les plus récents et les plus réalistes de Mg I, Mg II, Mg I/II, Ca I, Ca II et Ca I/II avec structure fine
- Grille de corrections hors ETL calculée pour 47 raies du Mg1, Ca1 et Ca11 dans des géantes et super-géantes → corrections hors ETL à appliquer sur les largeurs équivalentes mesurées (Merle et al. 2011, MNRAS, 418, 863-887)
 - ► 30 à 40 % sur W/W*
 - ▶ Δ [ÉI/H] ~ 0.3 dex
- Lois d'assombrissement centre-bord hors ETL → extension chromosphérique de 15 à 30 % du rayon stellaire de β Cet (Berio, Merle et al. 2011, A&A, 535, 59–69)
 - ► $\Delta R_{\rm C}/R_{\rm C}^* \sim 5$ %
- Analyse ETL de la métallicité de la galaxie dSph Carina → distribution de métallicité de Carina : [Fe/H] = -1.80, $\sigma \sim 0.3$ et effets hors ETL sur l'équilibre d'ionisation Fe I - Fe II (Fabrizio, Merle et al. 2012, PASP)
 - ► $log(g/g^*) \sim 0.2$
 - ▶ [Fe I/H] [Fe II/H] $\sim -0.1 \text{ dex}$

Perspectives

- Inclusion des collisions inélastiques du Mg | avec H | (collaboration avec P. Barklem, N. Feautrier et al.)
- Production de corrections hors ETL pour d'autres éléments légers (B, Al, Na, Ti, etc. grâce à FORMATO) avec **F. Thévenin**
- **Q** Applications des corrections hors ETL des éléments α sur les géantes rouges de la galaxie dSph Carina (collaboration avec G. Bono, M. Fabrizio et al.)
- Étude de la variabilité de la chromosphère de β Cet (collaboration avec P. Berio, D. Mourard et al.)
- Analyse d'abondances ETL et hors ETL en transfert radiatif 3D (collaboration avec L. Bigot, F. Thévenin, K. Lind et al.)
- Analyse d'abondances ETL des actinides instables dans des étoiles Ap et étude des effets hors ETL pour les éléments s (Sr, Ba, Pb) (post-doc à l'ULB en collaboration avec S. van Eck, A. Jorissen et al.)



Merci de votre attention!

Introduction - Contexte astrophysique

De nos aînés...

« N'eut-il pas été étonnant de la trouver en équilibre thermodynamique, cette région de l'étoile qui reçoit de l'énergie des couches profondes, la rayonne en la modifiant vers l'extérieur, cette partie de l'étoile opaque à certains rayonnements, transparente à d'autres, d'où l'on reçoit des photons venus de régions beaucoup plus chaudes, d'où d'autres photons s'échappent vers des régions beaucoup plus froides? »

J.C. Pecker, chaire d'astrophysique théorique, Collège de France, leçon inaugurale, 1964

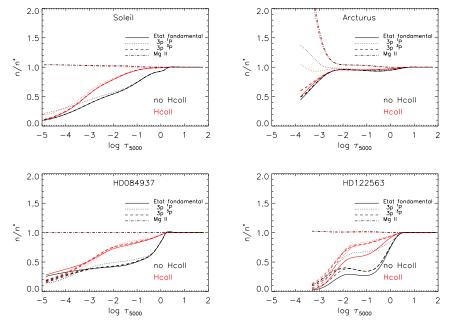
... à nos contemporains

"In LTE the strength of a line can be straightforwardly predicted from a few properties of the line and the species once the model atmosphere and the continuous opacity are known.

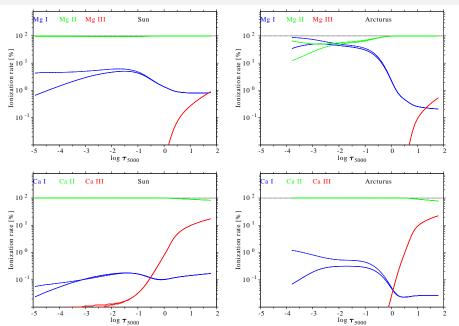
In non-LTE, in principle everything depends on everything else, everywhere else. As a result, knowledge of a great deal of additionnal input data for radiative and collisional processes is required."

M. Asplund, 2005, ARAA, 43, 481

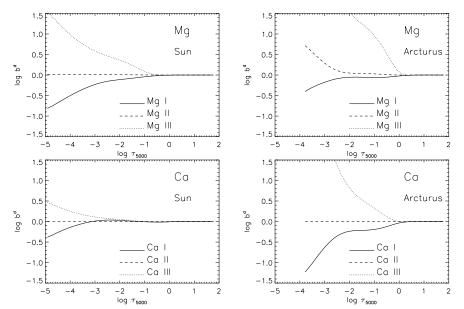
Travail en cours - Inclusions des collisions avec l'hydrogène neutre



NLTE effects on the Sun and Arcturus - Ionization rates



Effets NETL sur le Soleil et Arcturus - Équilibre d'ionisation



Une grille de corrections hors ETL – Largeurs équivalentes et abondances

Théorie de la courbe de croissance

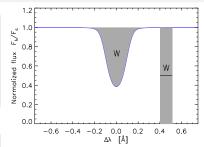
- ullet Largeur équivalente : $W=\int_{\mathsf{raie}}rac{F_c-F_\lambda}{F_c}\,\mathrm{d}\lambda$
- Relation entre W et $A_{\rm El} = \log \frac{n_{\rm El}}{n_{\rm H}} + 12$
 - $\log(W/\lambda) \propto A_{\mathsf{El}}$
 - $\log(W/\lambda) \sim \text{cst}$
 - $\log(W/\lambda) \propto 0.5 A_{\rm El}$

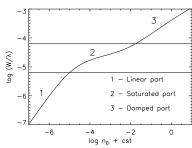
Le rapport W/W^*

- W: NLTE equivalent width; W*: LTE equivalent width
- $W/W^* = (n_{\rm EI}/n_{\rm EI}^*)^{-\beta}$

Correction d'abondances NETL Δ [Fe/H]

- Raies faibles : $\Delta[EI/H] = -\log(W/W^*)$
- Raies fortes : $\Delta[EI/H] = -2\log(W/W^*)$





Une grille de corrections hors ETL – Sensibilité aux paramètres

NLTE corrections for equivalent widths of Mg1, Ca1 and Ca11 lines

- 453 models atmospheres for giant and super-giant stars
- for 20 lines of Mg1, 18 lines of Ca1 and 9 lines of Ca11
- ullet W/W^* ratio to apply on observed equivalent width before LTE abondance analysis

NLTE effects with atmospheric parameters

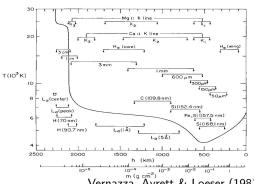
- Similar behaviour for lines rising from the same levels
- Only few lines sensitive to the gravity surface
- Stronger NLTE effect for the most metal-poor models

Estimated NLTE abundance corrections $\Delta[EI/H]$

- Based on the LTE curve of growth theory : $\Delta[\mathsf{EI}/\mathsf{H}] = -\beta \log(W/W^*)$
- Example : $W/W^* = 2$
 - Weak lines $\beta = 1 \rightarrow \Delta [EI/H] \sim -0.3$
 - ▶ Strong lines $\beta = 2 \rightarrow \Delta [EI/H] \sim -0.6$
 - ▶ Saturated lines $1 < \beta < +\infty \rightarrow \Delta[EI/H]$ cannot be estimated

Chromosphère solaire



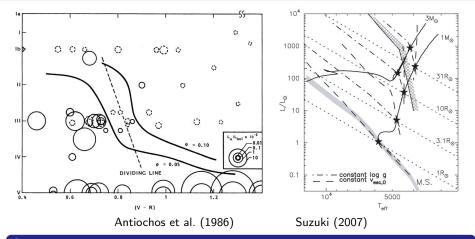


Vernazza, Ävrett & Loeser (1981)

Caractéristiques

- découverte par J. Lockyer en 1868
- ullet 2000 km \sim 0.3 % R_{\odot}
- mécanismes de chauffage non-thermiques
- formation du cœur de certaines raies fortes

Chromosphères stellaires : la division de Linsky-Haisch



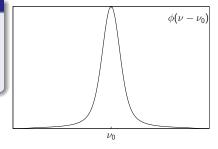
Étoiles coronales et non-coronales : une séparation?

- Étoiles coronales : $V R \lesssim 0.8$ (émission X) \rightarrow chromosphères fines
- ullet Étoiles non-coronales : $V-R\gtrsim 0.8$ (pas d'émission X) o chromosphères étendues
- Étoiles hybrides : $V R \gtrsim 0.8$ avec émission X **ou** $V R \lesssim 0.8$ sans émission X

Le profil d'absorption

Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- ullet un cœur Doppler $\Delta
 u_{
 m D} = \sqrt{rac{2kT/m_{
 m El}}{c}} + \xi^2 \
 u_0$
- des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{\rm rad} + \gamma_{\rm col}$



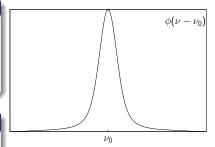
Le profil d'absorption

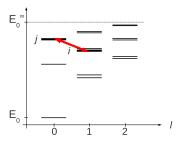
Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- ullet un cœur Doppler $\Delta
 u_{
 m D} = \sqrt{rac{2kT/m_{
 m El}}{c}} + \xi^2 \
 u_0$
- ullet des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{
 m rad} + \gamma_{
 m col}$

Élargissement radiatif $\gamma_{ m rad}$

- ullet Formule d'Unsöld (1955) $\gamma_{
 m rad} \propto
 u_0^2$
- $\bullet \ \gamma_{\mathrm{rad}}^{ij} \propto \left(\sum_{k < i} A_{ik} + \sum_{k < j} A_{jk} \right)$





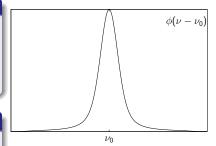
Le profil d'absorption

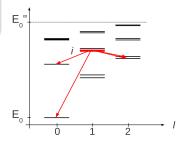
Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- ullet un cœur Doppler $\Delta
 u_{
 m D} = \sqrt{rac{2kT/m_{
 m El}}{c}} + \xi^2 \
 u_0$
- ullet des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{
 m rad} + \gamma_{
 m col}$

Élargissement radiatif $\gamma_{\rm rad}$

- ullet Formule d'Unsöld (1955) $\gamma_{
 m rad} \propto
 u_0^2$
- $\gamma_{\mathrm{rad}}^{ij} \propto \left(\sum_{k < i} A_{ik} + \sum_{k < j} A_{jk} \right)$





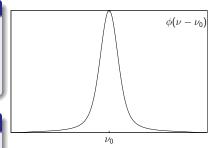
Le profil d'absorption

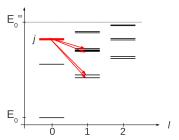
Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- ullet un cœur Doppler $\Delta
 u_{
 m D} = \sqrt{rac{2kT/m_{
 m El}}{c}} + \xi^2 \
 u_0$
- ullet des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{
 m rad} + \gamma_{
 m col}$

Élargissement radiatif $\gamma_{\rm rad}$

- ullet Formule d'Unsöld (1955) $\gamma_{
 m rad} \propto
 u_0^2$
- $\gamma_{\mathrm{rad}}^{ij} \propto \left(\sum_{k < i} A_{ik} + \sum_{k < j} A_{jk}\right)$





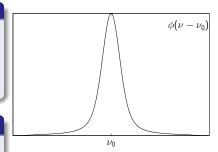
Le profil d'absorption

Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- ullet un cœur Doppler $\Delta
 u_{
 m D} = \sqrt{rac{2kT/m_{
 m El}}{c}} + \xi^2 \
 u_0$
- ullet des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{
 m rad} + \gamma_{
 m col}$

Élargissement radiatif γ_{rad}

- ullet Formule d'Unsöld (1955) $\gamma_{
 m rad} \propto
 u_0^2$
- $\gamma_{\mathrm{rad}}^{ij} \propto \left(\sum_{k < i} A_{ik} + \sum_{k < j} A_{jk} \right)$



| | Unsöld | VALD | calculé |
|-----------|--------|------|---------|
| | | | |
| Mg ı 4571 | 8.02 | 2.34 | 2.34 |
| Mg ı 5167 | 7.92 | 7.99 | 7.98 |
| Mg 5172 | 7.92 | 7.99 | 7.98 |
| Mg 5183 | 7.92 | 7.99 | 7.98 |
| Mg i 8736 | 7.46 | | 8.21 |
| Mg 8806 | 7.46 | 8.69 | 8.72 |

 $\log \gamma_{\rm rad}$

 λ [Å]

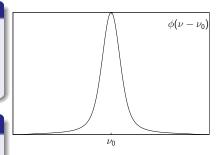
Le profil d'absorption

Une raie à ν_0 est caractérisé par un profil de Voigt $\phi(\nu-\nu_0)$ avec :

- un cœur Doppler $\Delta \nu_{\rm D} = \sqrt{\frac{2kT/m_{\rm El}}{\xi} + \xi^2} \ \nu_0$
- des ailes de Lorentz $\gamma = \gamma_{\rm rad} + \gamma_{\rm col}$

Elargissement radiatif $\gamma_{\rm rad}$

- Formule d'Unsöld (1955) $\gamma_{\rm rad} \propto \nu_0^2$
- $\bullet \ \gamma_{\mathrm{rad}}^{ij} \propto \left(\sum_{k < i} A_{ik} + \sum_{k < i} A_{jk} \right)$



| λ [Å] | | F_H | |
|---------------|------|-------|-----------------|
| | emp. | ABO | $Autre^\dagger$ |
| Mg 4571 | ~ 2 | 1.34 | |

 ~ 2

Élargissement collisionnel $\gamma_{\rm col}$

- $\gamma_{\rm col} \simeq \gamma_{\rm e} + \gamma_{\rm H} \simeq \gamma_{\rm H}$ in cool stars
- Approximation de Van der Waals $\gamma_{\rm col} \propto n_{\rm H} T^{3/10}$ mais $1.5 \leq F_H \leq 5$
- ABO : Anstee, Barklem & O'Mara (1998) $\gamma_{\rm col} = f(n_H, T, n'_{\rm eff}, l_i, n'_{\rm eff}, l_i)$

Ca ∈ 6122 ~ 2 Ca : 6162 ~ 2 Ca II H & K ∼ 2 CaT

Ca | 6102 ~ 2

Mgıb

2.55 2.44 1.42

[†]Cayrel et al. (1996)

 ~ 2 2.16

2.37

2.55

2.55

2.92

2.22