

*Interprétation du second spectre solaire: la raie de Sr I
4607 Å observée au Pic-du-Midi et THEMIS*

Moncef Derouich

LERMA, Observatoire de Paris-Meudon, France

En collaboration avec:

Véronique Bommier (LERMA, Meudon),
Egidio Landi degl'Innocenti (Florence),
Jean-Marie Malherbe (LESIA, Meudon),
Guillaume Molodij (LESIA, Meudon),
Sylvie Sahal-Bréchet (LERMA, Meudon) ,
Paul Barklem (Uppsala, Suède)

- (1) Notions préliminaires
- (2) Formulation du problème de détermination des champs magnétique photosphériques par interprétation des mesures de polarisation linéaire en appliquant la méthode de l'effet Hanle
- (3) Théorie semi-classique pour calculer les taux de dépolarisation due aux collisions isotropes avec les atomes neutres d'hydrogène
- (4) Intepréétation de la polarisation linéaire de la raie de SrI 4607 Å observée au Pic-du-Midi et THEMIS



Notions Préliminaires

la diffusion d'un rayonnement anisotrope, par un système atomique, crée des cohérences entre les sous-niveaux Zeeman et un déséquilibre entre leurs populations \Rightarrow le rayonnement réémis par ce système atomique est polarisé linéairement

l'effet Hanle : un champ magnétique présent lors de la formation de ce rayonnement détruit partiellement les cohérences entre les sous-niveaux Zeeman de l'atome ce qui implique un changement des paramètres de polarisation

⇒ une diminution du taux de polarisation linéaire

⇒ une rotation de la direction de polarisation

généralement pour second spectre solaire il n'y a pas de rotation du plan de polarisation \Rightarrow le champ magnétique est turbulent

un champ magnétique turbulent est non détectable via les techniques basées sur l'effet Zeeman \Rightarrow l'application de la méthode de l'effet Hanle représente la seule possibilité actuelle pour mesurer l'intensité des champs faibles photosphériques dans les régions calmes du soleil

- sensibilité à l'effet Hanle :

$$10^7 B(\text{Gauss})g \sim \tau(s^{-1})$$

τ est *la durée de vie de l'alignement* : dépend essentiellement des collisions avec les atomes neutres d'hydrogène et des désexcitations spontanées

- pour les raies permises atomiques du second spectre solaire : $10^7 < \tau < 10^9 \Rightarrow$

$$1 < B(\text{Gauss}) < 100$$



Formulation du problème d'interprétation du second spectre solaire :

Formulation du problème :

- l'état du système atomique émetteur :

$$|\psi_{(A)}(t)\rangle = \sum_{nJM_J} a_{nJM_J}(t) |nJM_J\rangle$$

- L'état de l'atome émetteur (A) peut être aussi caractérisé par sa matrice densité $\rho^A(t)$ définie par :

$$\rho^A(t) = |\psi_{(A)}(t)\rangle \langle \psi_{(A)}(t)|$$

Formulation du problème :

- L'intérêt de la matrice densité est qu'elle permet une description de l'état d'un ensemble de N systèmes (dans notre cas un ensemble d'atomes émetteurs de lumière polarisée)
- on définit la matrice densité du système total comme étant la moyenne des matrices densités des systèmes individuels :

Formulation du problème :

- La base des opérateurs tensoriels irréductibles :

$${}^{nlJ,n'l'J'}T_q^k = \sum_{M_J, M'_J} (-1)^{J-M_J} \sqrt{2k+1}$$

$$\times \begin{pmatrix} J & k & J' \\ -M_J & q & M'_J \end{pmatrix} |nlJM_J\rangle \langle n'l'J'M'_J|$$

\Rightarrow

$${}^{nlJ,n'l'J'}\rho_q^k = \sum_{k,q} (-1)^{J-M_J} \sqrt{2k+1}$$

$$\times \begin{pmatrix} J & k & J' \\ -M_J & q & M'_J \end{pmatrix} {}^{nlJ,n'l'J'}\rho_{M_J, M'_J}$$

Formulation du problème :

$\Rightarrow \sqrt{2J + 1} \rho_{nlJ, nlJ}^0$: la *population* du niveau $|nlJ\rangle$

ρ_{nlJ}^1 : termes d'*orientation* associés à la polarisation circulaire du rayonnement.

ρ_{nlJ}^2 : termes d'*alignment* associés à la polarisation linéaire du rayonnement

Formulation du problème :

On considère l'équilibre statistique au sein des niveaux d'un système atomique :

$$\begin{aligned} \sum_i \left(\frac{d^{nlJ} \rho_q^k}{dt} \right)_i &= \left(\frac{d^{nlJ} \rho_q^k}{dt} \right)_{coll} \\ &+ \left(\frac{d^{nlJ} \rho_q^k}{dt} \right)_{rad} \\ &+ \left(\frac{d^{nlJ} \rho_q^k}{dt} \right)_{mag} \\ &= 0 \end{aligned}$$

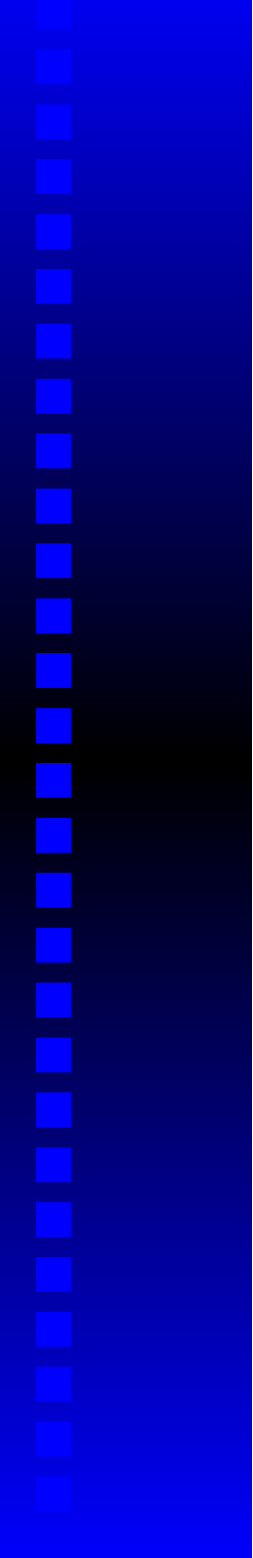
Formulation du problème :

la contribution des collisions avec les atomes neutres d'hydrogène dans l'équation de variation de la matrice densité :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d \rho_0^{nlJ,k}}{dt} \right)_{coll} &= -D^k(nlJ, T) \rho_0^{nlJ,k} \\ &+ \sum_{J' \neq J} D^k(nlJ' \rightarrow nlJ, T) \rho_0^{nlJ',k} \\ &- \rho_0^{nlJ,k} \sum_{J' \neq J} \zeta(nlJ \rightarrow nlJ', T) \end{aligned}$$

Formulation du problème :

- $D^0(nlJ, T) \equiv 0$: taux de destruction de la *population*
- $D^1(nlJ, T)$: taux de destruction de l'*orientation* (polarisation circulaire)
- $D^2(nlJ, T)$: taux de destruction de l'*alignement* (polarisation linéaire)

- 
- (1) comment calculer les taux de dépolarisation et de transfert de polarisation ?
 - (2) comment les calculer pour un grand nombre d'atomes avec un précision suffisante ?
 - (3) est ce que c'est possible de calculer des taux de dépolarisation pour des atomes/ions complexes ?

Théorie semi-classique qui permet de traiter rapidement la majorité des cas qu'on peut rencontrer et notamment le cas des atomes/ions *complexes*

Formulation du problème :

$$D^k(nlJ \rightarrow nlJ', T) = n_H \int_0^\infty v f(v, T) dv$$
$$\times \left(\pi b_0^2 + 2\pi \int_{b_0}^\infty \langle P^k(nlJ \rightarrow nlJ', b, v) \rangle_{av} b db \right)$$

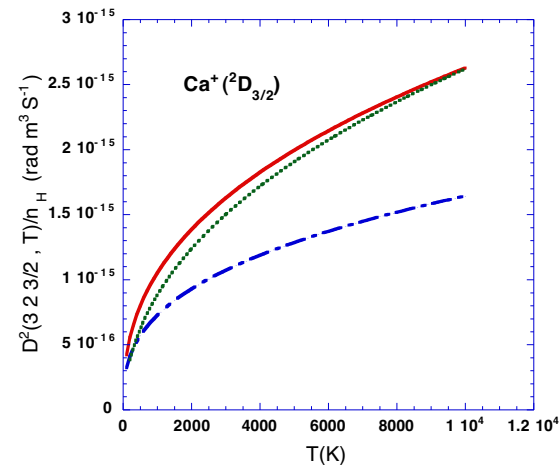
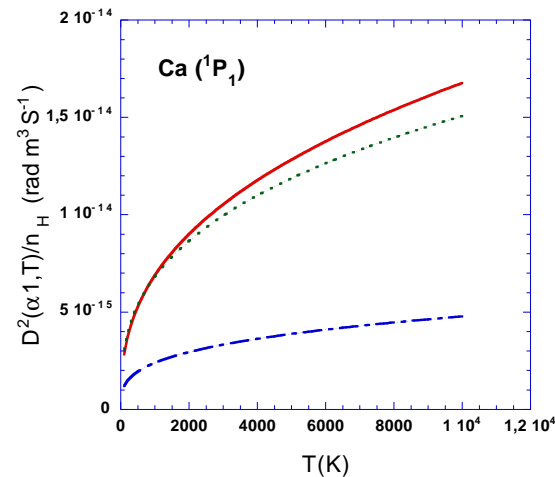
$\langle P^k(nlJ \rightarrow nlJ', b, v) \rangle_{av}$ est la probabilité de
depolarization ($J = J'$)/transfert de polarization
($J \neq J'$)

comparaison à des résultats de mécanique quantique
quand cela est possible :

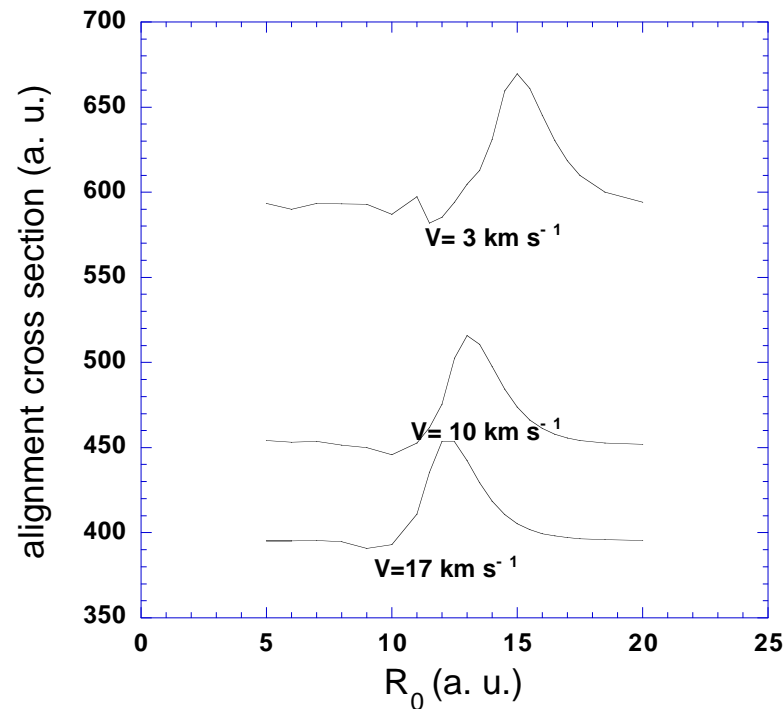
—■ : nos résultats

—■ : résultats de Kerkeni et al. (2003) (chimie quantique)

—■ : potentiel de Van der Waals



Nous avons perturbé localement le potentiel d'interaction pour étudier la sensibilité des sections efficaces de dépolarisation aux différentes régions du potentiel :



⇒ la région intermédiaire des distances interatomiques, bien décrite par notre approche, joue un rôle déterminant dans l'évaluation des taux de dépolarisation : ce résultat très important justifie le choix d'une approche semi-classique. La principale différence entre le potentiel perturbatif utilisé ici et les calculs *ab initio* de chimie quantique est dans la région de petits paramètres d'impact, ceci explique le bon accord entre nos taux de dépolarisation et ceux de chimie quantique

Nous notons qu'au contraire d'une méthode précise de chimie quantique, cette théorie semi-classique est facile à mettre en oeuvre et est applicable à tous les atomes/ions ce qui nous a permis de calculer pour la première fois des taux de dépolarisation des niveaux du Fe I et Ti I. Plus tard (dernier transparent) nous montrerons que la précision sur les taux de dépolarisation semi-classiques est largement suffisante pour les objectifs astrophysiques actuels

tendances générales,

$$D^1(n_1 = 1/2, T = 5000K) = 1.0045 \times 10^{-15} n_H \times n^{*2.979}$$

n^* est le nombre quantique effectif et n_H est la densité des atomes d'hydrogène en m^{-3}

perspectives prometteuses :

- quelques structures de polarisation dans le second spectre où la structure hyperfine peut jouer un rôle :
Li I 6707 Å, Ba II 4554 Å, Na I 5896 Å, le doublet
K I (7699 Å et 7665 Å)
- les atomes complexes : dans l'atlas d'Achim
Gandorfer on compte 38 % de raies de Fe I et 13 %
du Ti I

nous avons fixé à 10 % l'erreur sur les taux de dépolarisation calculés selon notre théorie semi-classique

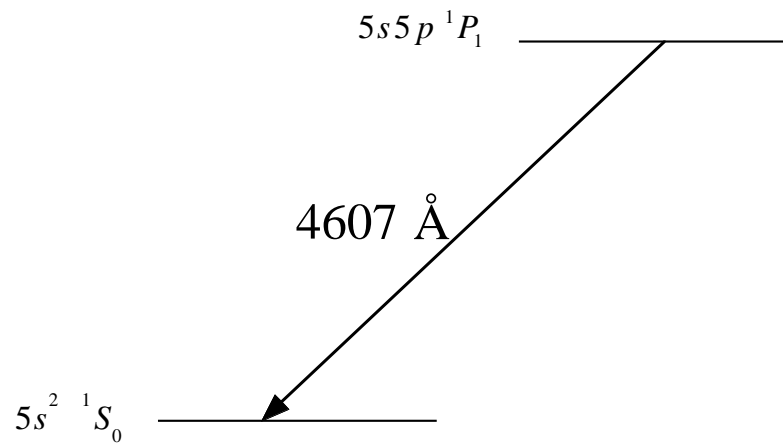
pour plus de détails :

- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., B. J. O'Mara, 2003, A&A, 404, 763
- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., 2003, A&A, 409, 369
- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., 2004, A&A, 414, 369
- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., 2004, A&A, 426, 707
- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., 2005, A&A, 434, 779
- Derouich M., Sahal-Bréchet S., Barklem P.S., 2005, A&A, sous presse

**mesure Hanle de l'intensité du
champ magnétique turbulent par
interprétation de la polarisation
linéaire de la raie Sr I 4607 Å**

Application :

- l'approximation d'un atome à deux niveaux est suffisante pour décrire le modèle atomique



Application :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \left(\begin{smallmatrix} 5 & 1 & 1 \\ & & \end{smallmatrix} \rho_q^k \right) = \\ \frac{B_{01}}{(D^k(5 \ 1 \ 1, T) + C_{10} + A_{10})} \frac{1}{\sqrt{3}} \mu^k (-1)^q w_{10}^{(k)} \bar{J}_{-q}^k(\nu_0) \left(\begin{smallmatrix} 5 & 0 & 0 \\ & & \end{smallmatrix} \rho_0^0 \right) \\ + \frac{C_{01}}{(D^k(5 \ 1 \ 1, T) + C_{10} + A_{10})} \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{smallmatrix} 5 & 0 & 0 \\ & & \end{smallmatrix} \rho_0^0 \right) \delta_{q,0} \delta_{k,0} \end{aligned}$$

$$\mu^k = \frac{1}{2k+1} \sum_{q'=-k}^k \frac{1}{(1+i\Gamma'q')}; \quad \Gamma' \propto B$$

en particulier, $\mu^0 = 1$ et $\mu^2 = \frac{1}{5} \left[1 + \frac{2}{1+(\Gamma')^2} + \frac{2}{1+4(\Gamma')^2} \right]$

Application :

9 profils de I/I_{cont} et Q/I mesurés avec THEMIS les 7, 8, et 9 Decembre 2002 par V. Bommier et G. Molodij (4 à 160 arcsec du limb $\Rightarrow \sim 300$ à ~ 200 km au-dessus de $\tau_{5000} = 1$)

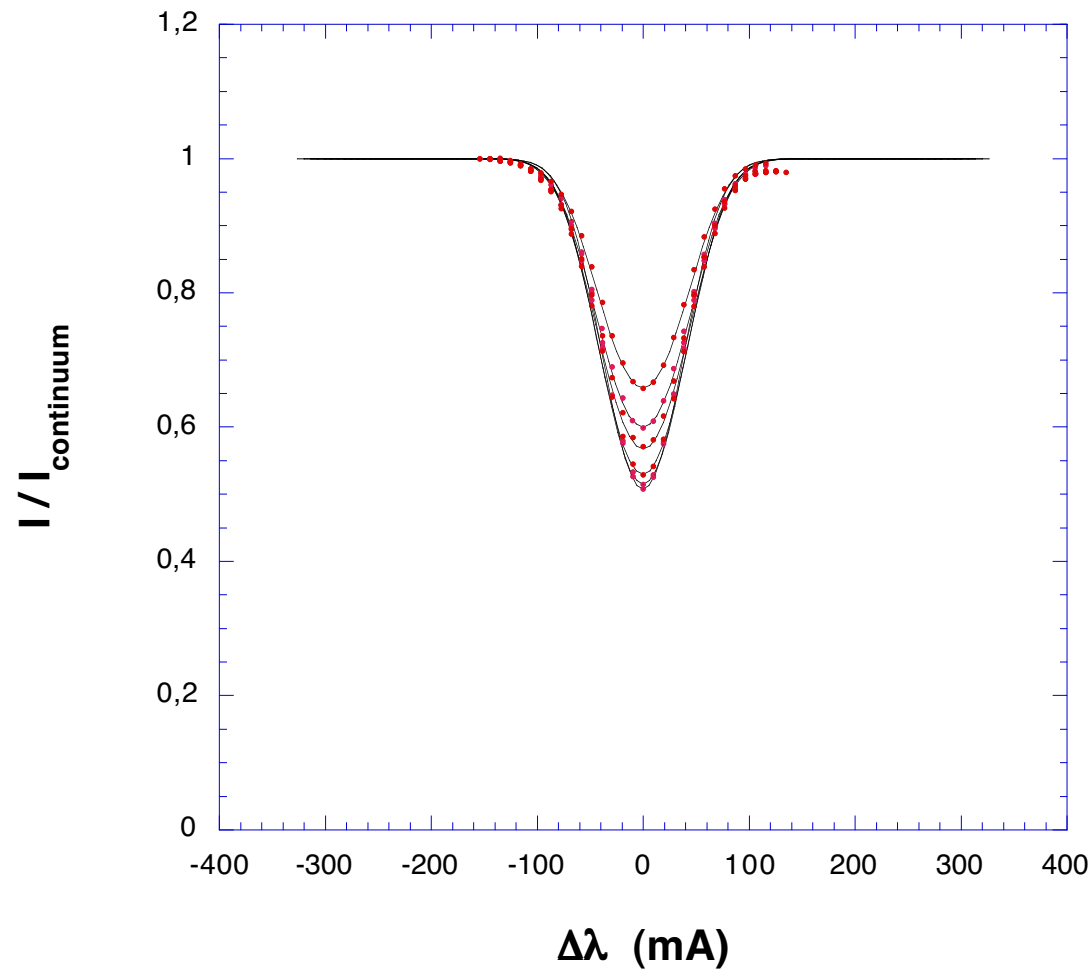
Strategie : puisque I/I_{cont} est pratiquement indépendante de B ($\mu^0 = 1$!) mais ce n'est pas le cas pour Q/I ($1/5 < \mu^2 < 1$) \Rightarrow premièrement : simulation de I/I_{cont} dans un modèle où $B = 0$

Application :

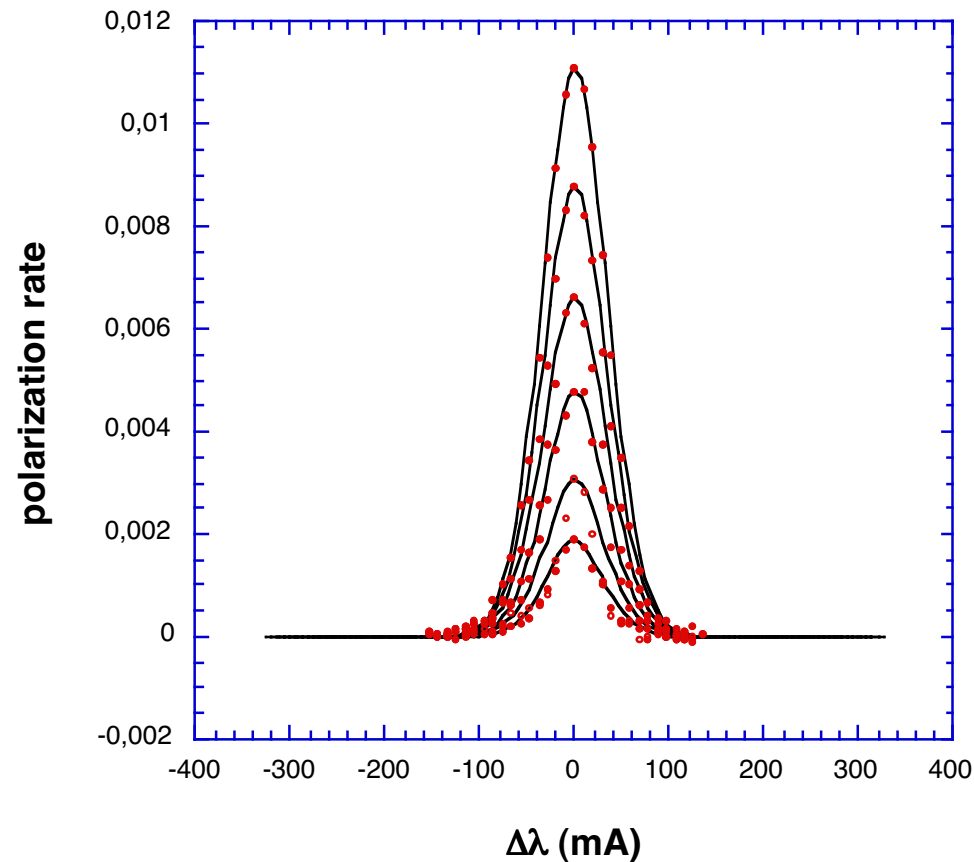
- Les vitesses microturbulente et macroturbulente doivent être introduites dans le modèle de formation de la raie polarisée pour prendre en compte les mouvements non-thermiques
- échelle de variation $<$ libre parcours moyen (l.p.m.) des photons : vitesse **micro**turbulente \Rightarrow élargissement du profil Doppler
- échelle de variation $>$ libre parcours moyen (l.p.m.) des photons : vitesse **macro**turbulente \Rightarrow convolution des profils théoriques par une gaussienne
- le meilleur ajustement fournit les valeurs des vitesses microturbulente et macroturbulente

Application :

\Rightarrow des vitesses moyennes $v_{\text{micro}} = 1.87 \text{ km s}^{-1}$,
 $v_{\text{macro}} = 1.78 \text{ km s}^{-1} \Rightarrow$

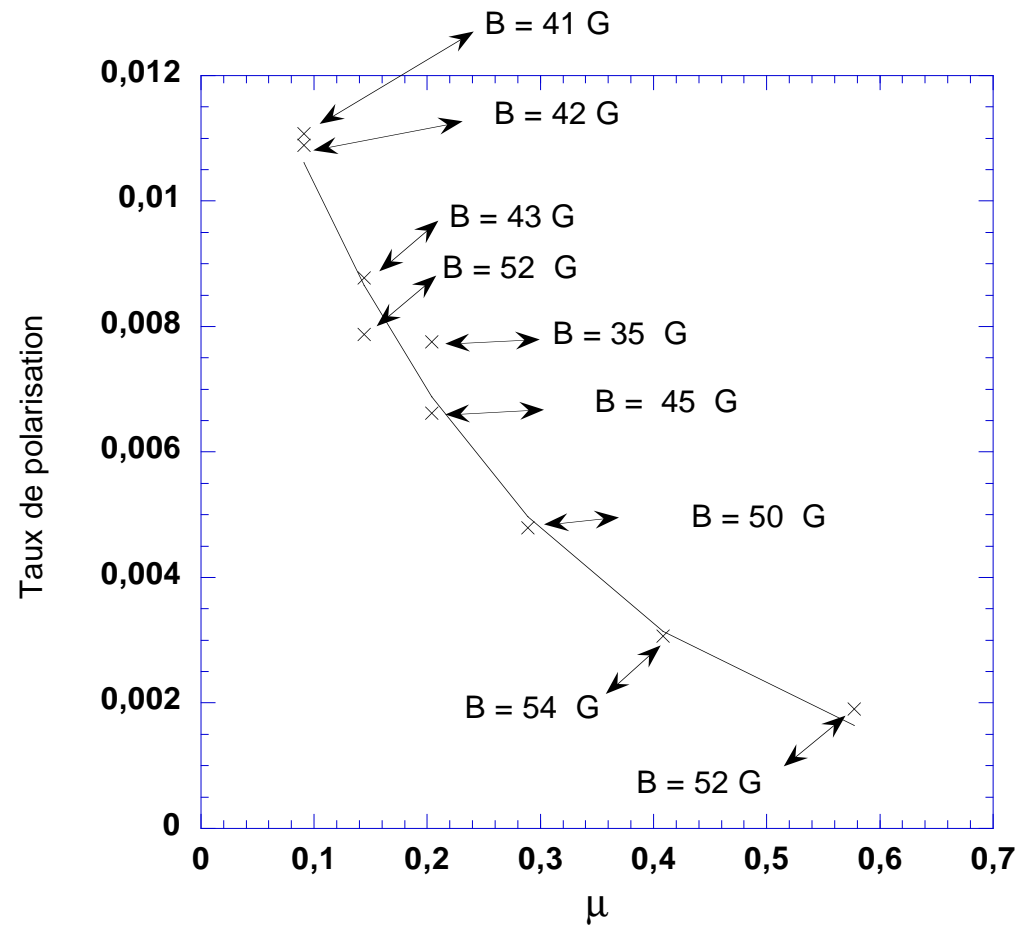


⇒ deuxièmement nous avons fait varier le champ magnétique introduit dans les EES de façon à converger vers la valeur de la polarisation observée au centre de la raie



Application :

⇒ une valeur moyenne de $B = 46$ Gauss



Application :

Observations du second spectre solaire de la raie Sr I 4607 Å avec résolution spatiale (Jean Marie Malherbe, 14 Mai 2004) au Pic-du-Midi : la fente a été positionnée perpendiculairement au limbe

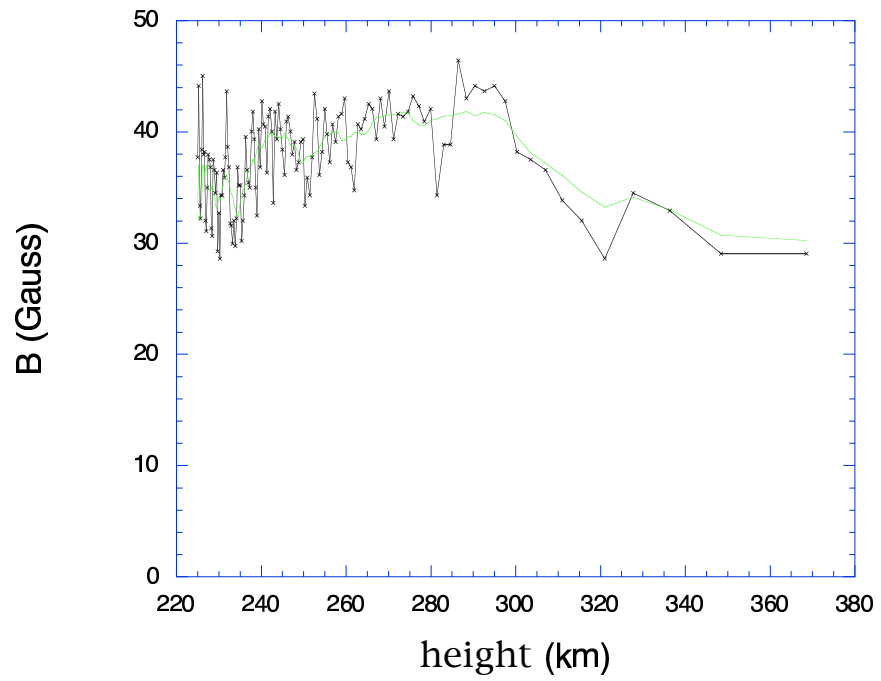
⇒ 132 distances par rapport au limbe allant de 225 à 368 km au dessus de $\tau_{5000} = 1$

⇒ la variation de la distance au limbe le long de la fente permettant un sondage en profondeur de l'atmosphère solaire

Application :

Nous avons construit une base de profils d'intensités théoriques dans laquelle nous cherchons le profil d'intensité théorique le plus proche du profil observé \Rightarrow $(v_{\text{micro}}, v_{\text{macro}})$ à chaque distance \Rightarrow on ajuste la polarisation au centre de la raie pour obtenir le champ magnétique B :

Application :

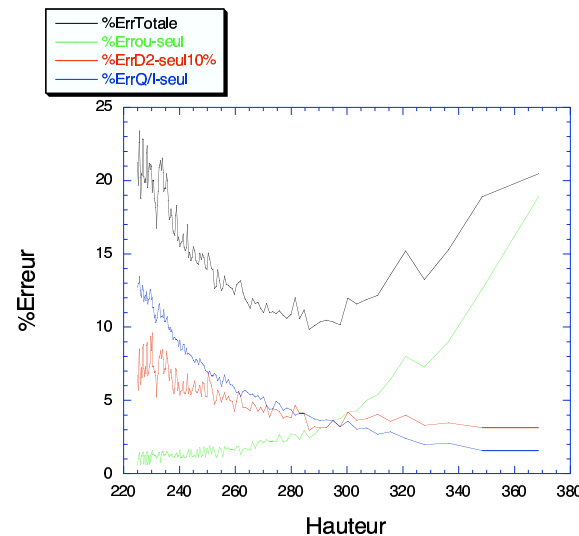


Application :

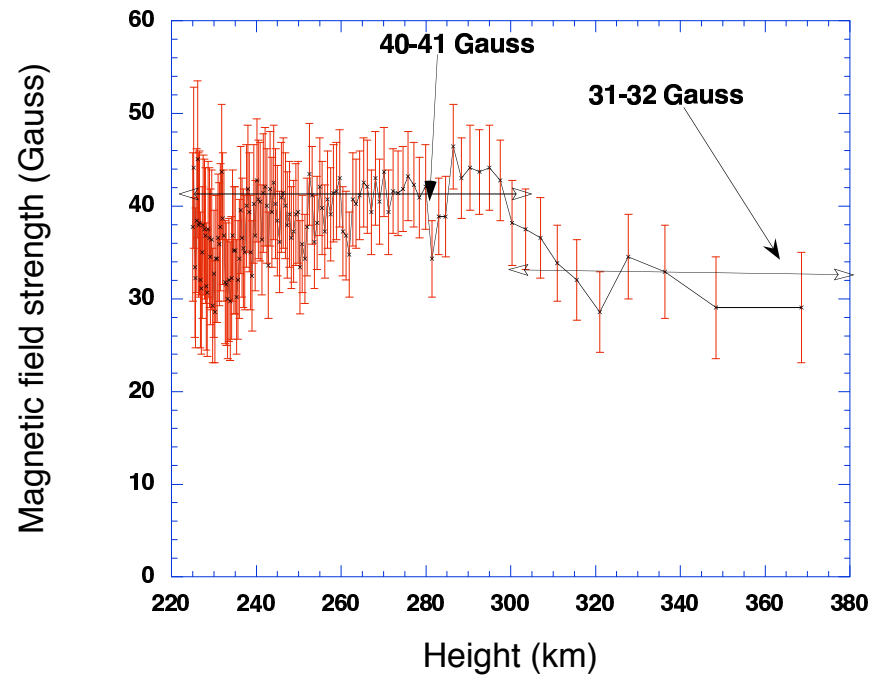
Est ce qu'il y a une variation de B en fonction de la hauteur de formation de la raie ?

Application :

Pour essayer de répondre à cette question, nous avons calculé les barres d'erreur : rouge) : la précision sur le calcul des taux de collisions dépolarisantes ; bleue) la précision polarimétrique ; vert) la précision sur la détermination de la distance au bord ; noir) barre d'erreur totale en fonction de la hauteur de formation de la raie



Application :



cette dernière figure montre que la variation du champ magnétique avec la hauteur de formation de la raie dans l'atmosphère (au dessus de $\tau_{5000} = 1$) serait une décroissance (deux droites de 40-41 Gauss et de 31-32 Gauss).

Nous notons enfin (voir l'avant dernière figure donnant les barres d'erreur) :

- (1) une erreur totale de $\sim 10\text{--}20\%$ sur les calculs des champs magnétiques en utilisant une méthode basée sur l'effet Hanle
- (2) l'erreur qui peut être introduite à cause de l'utilisation de nos taux de dépolarisation par collisions isotropes avec les atomes neutre d'hydrogène est comparable à l'erreur introduite par des observations à haute sensibilité polarimétrique de quelques $10^{-4}\text{--}10^{-5}$



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !