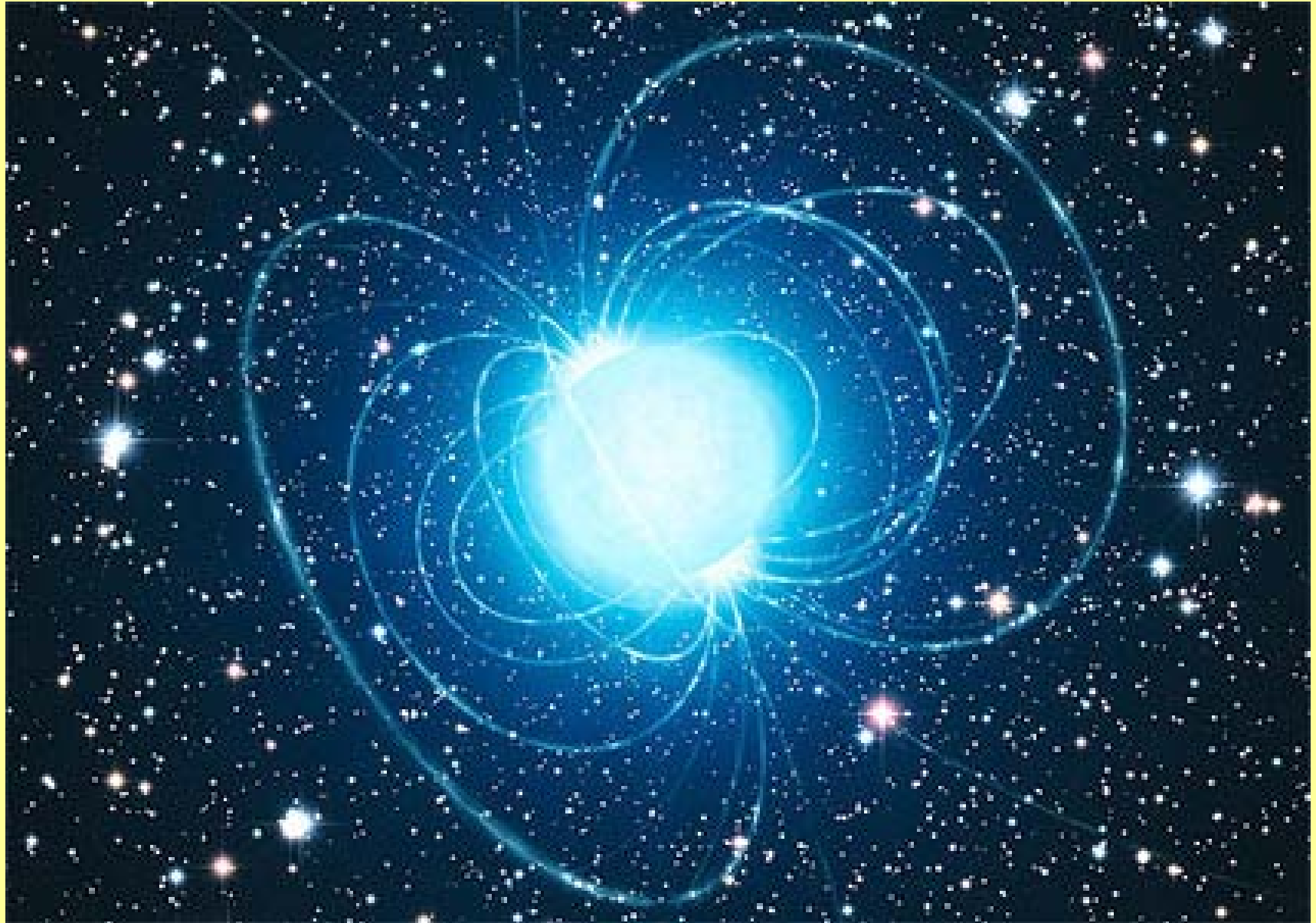


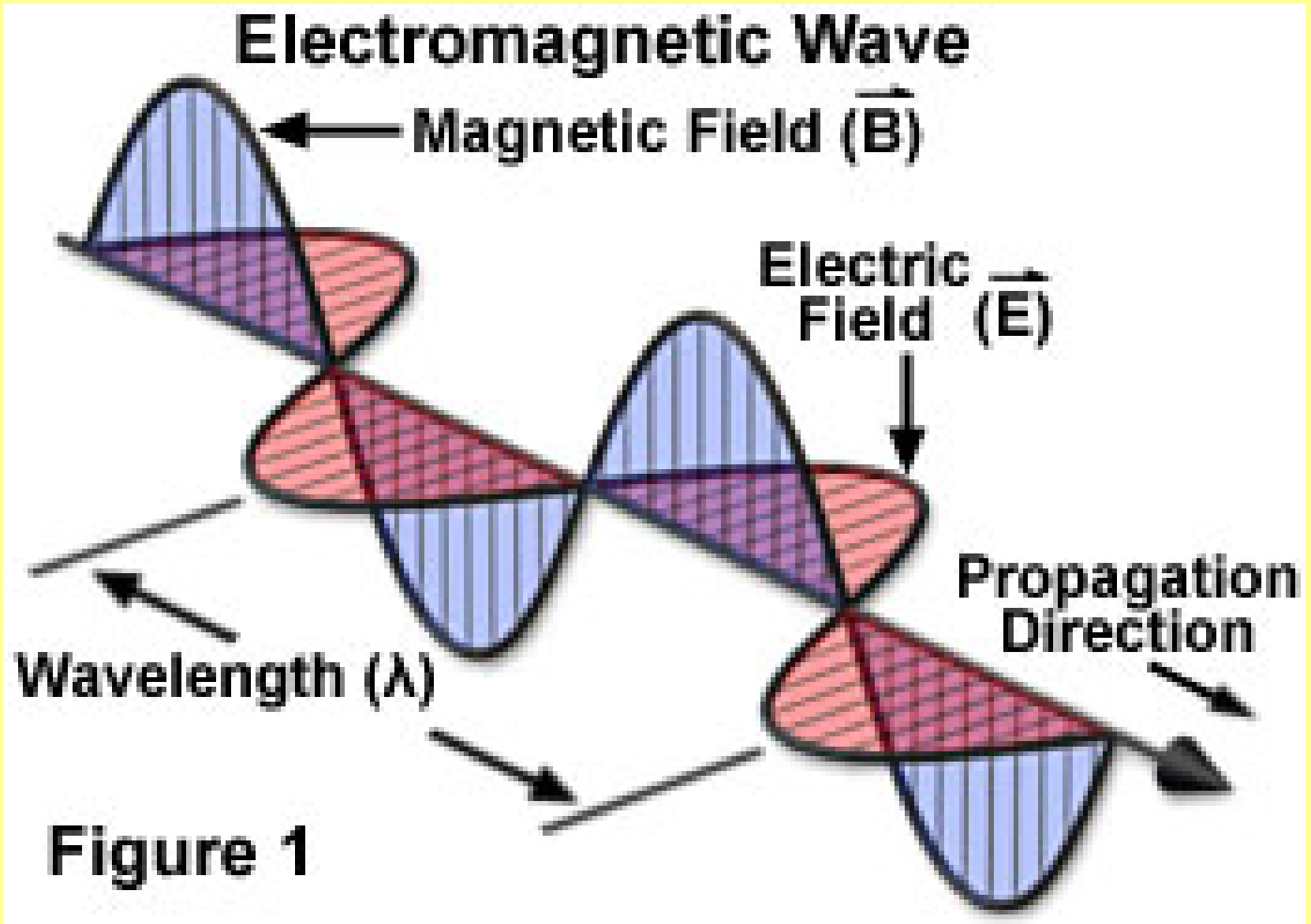
# Introduction à la spectropolarimétrie



# Plan

- La polarisation de la lumière
- Origine de la polarisation
- Mesure de cette polarisation
- Exemple : le spectropolarimètre Narval
- La méthode LSD
- Application à l'étoile Bételgeuse

Propagation =



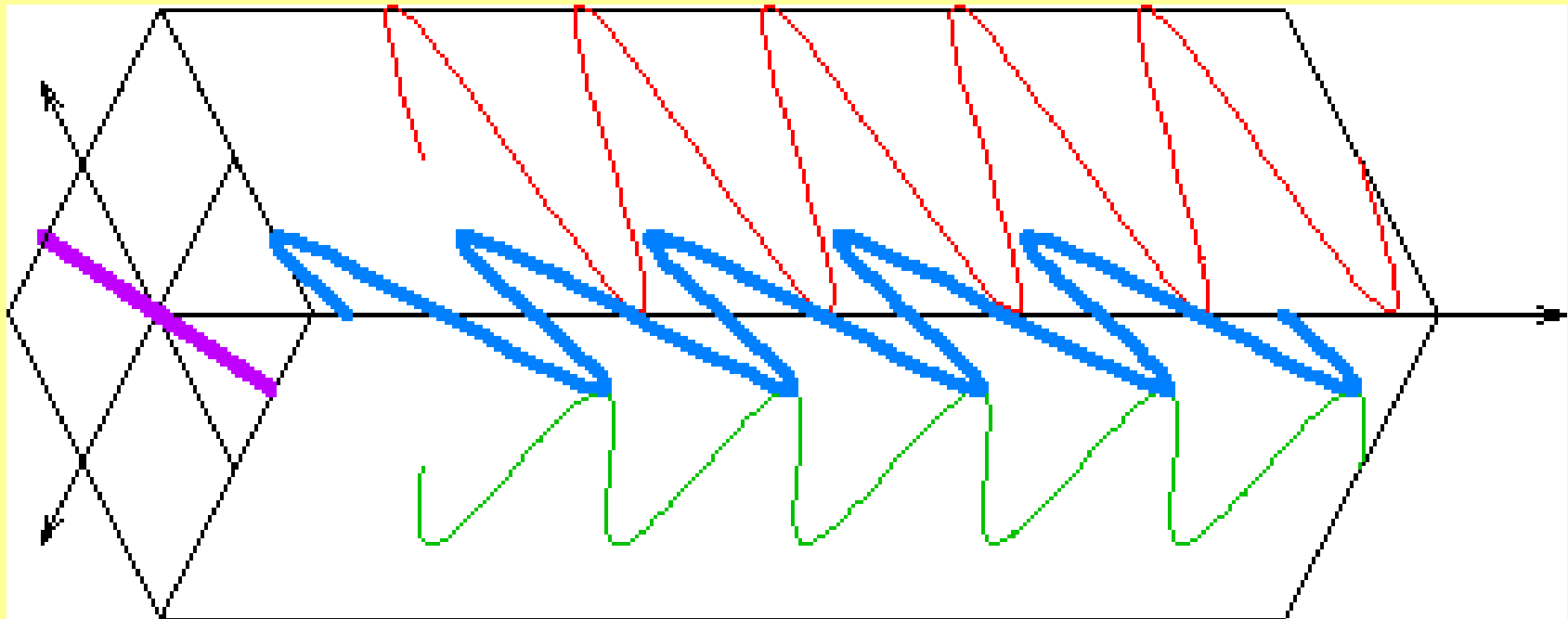
# Polarisation

- Donnée par l'orientation du vecteur  $\hat{n}$ , qui définit l'orientation du plan de polarisation
- Si l'onde se propage suivant z,  $\hat{n}$  n'a des composantes que sur x et y :
- Où :
  - $\omega$  est la fréquence angulaire de l'onde
  - $\phi$  est le déphasage temporel entre les 2 composantes

# États de polarisation

- Si  $\vec{E}$  alors oscille suivant une droite dans le plan de polarisation

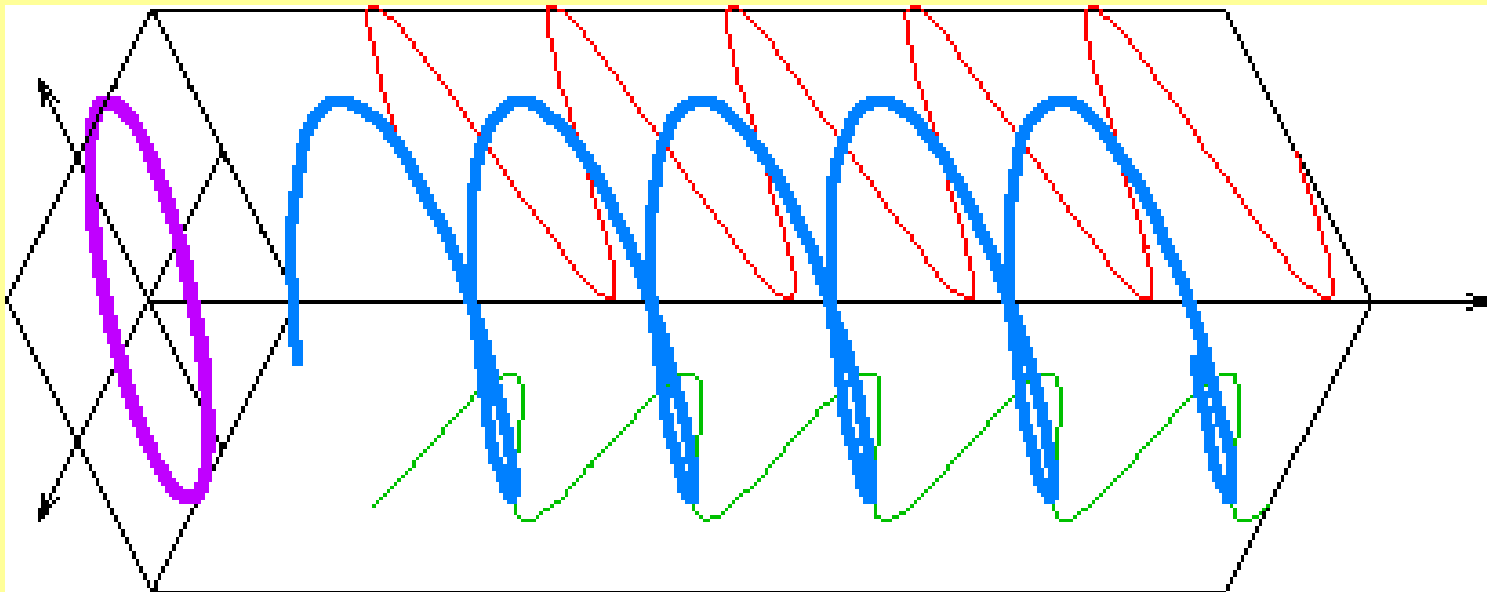
polarisation linéaire



# États de polarisation

- Si tourne dans le sens des aiguilles d'une montre  
**polarisation droite**
- Si tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre  
montre

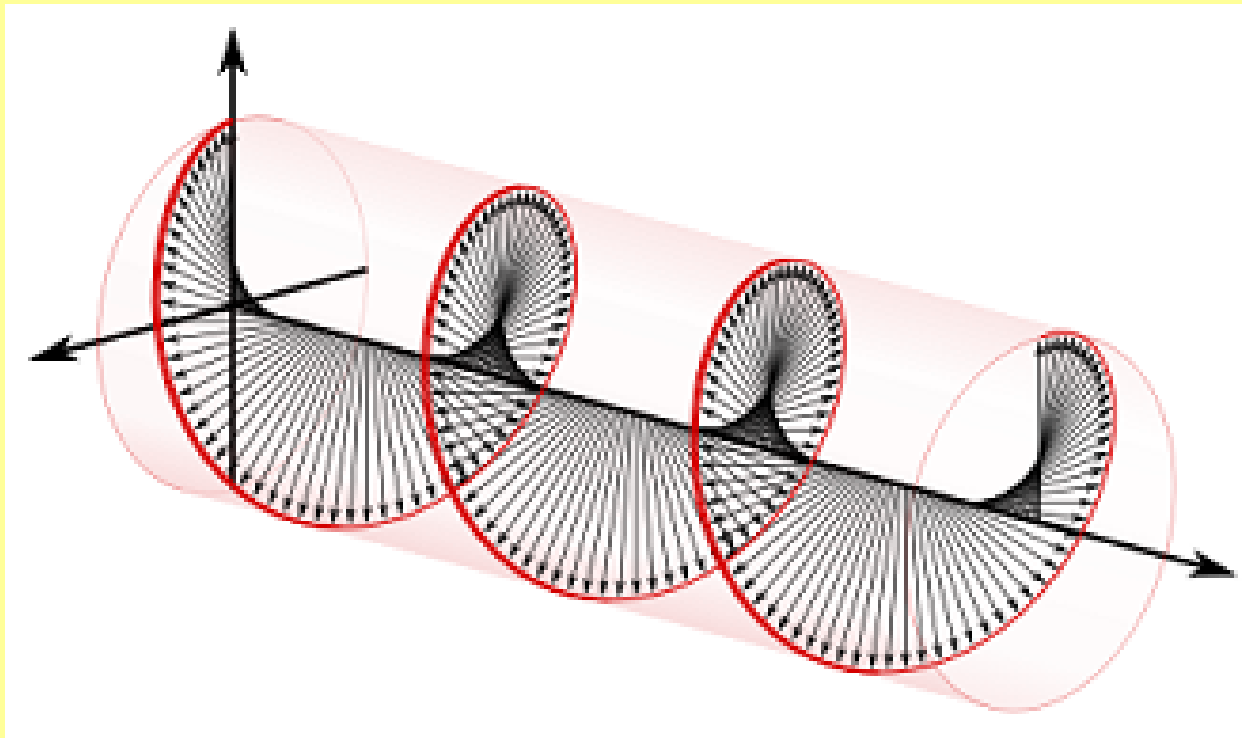
**polarisation gauche**



# États de polarisation

- Si les amplitudes sont égales
- Si le déphasage est

polarisation circulaire (droite ou gauche)



# Détecter la polarisation

- Les détecteurs ne sont sensibles qu'à l'énergie transportée par  $E$ , non à  $E$  directement
- Cette énergie peut se mettre sous la forme :
- On définit le tenseur de polarisation, ou encore la matrice de cohérence, par :
- Seuls les éléments diagonaux sont réels, donc mesurables





# Les paramètres de Stokes

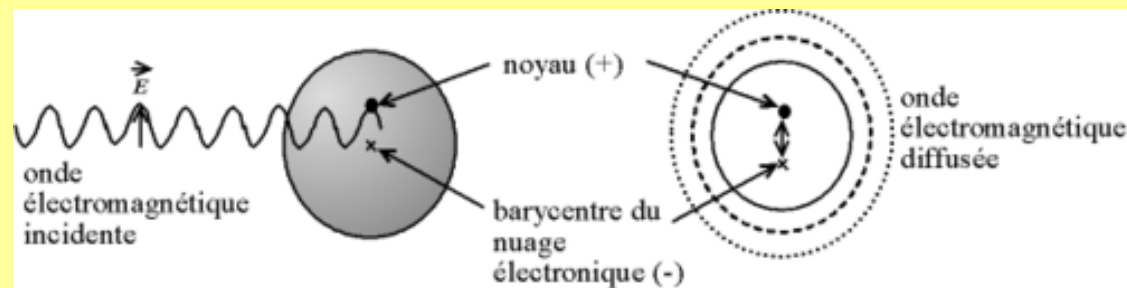
- représente l'intensité totale mesurée
- représente l'intensité de la polarisation circulaire (qui peut être droite ou gauche suivant son signe)
- représente l'intensité de la polarisation linéaire
  
- On définit le taux de polarisation par :
  
- avec :

# Origines de la polarisation

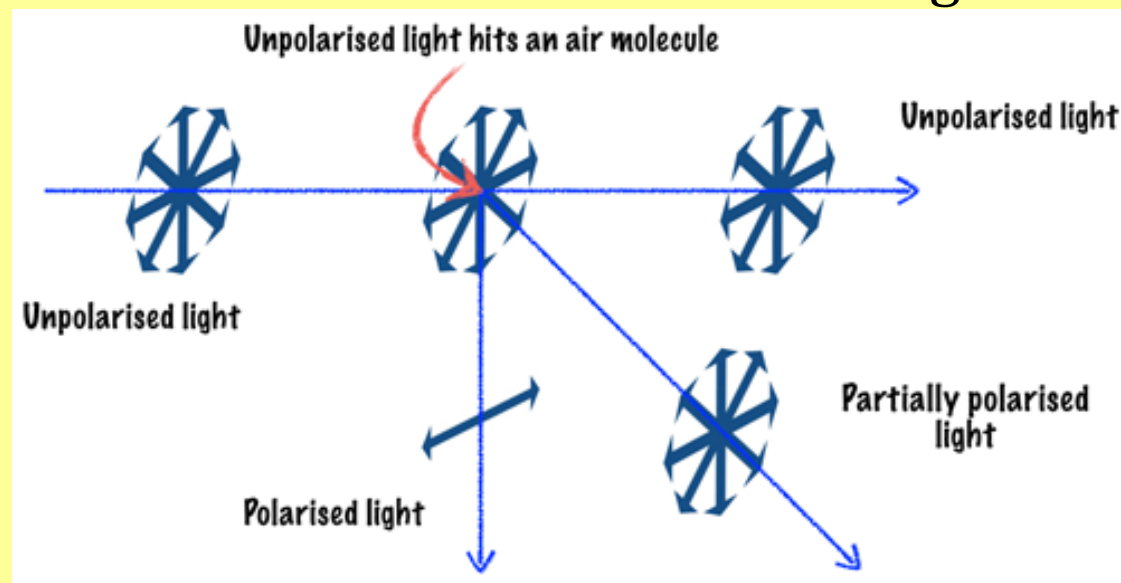
- D'un point de vue des causes physiques (on ne parle pas ici des dispositifs expérimentaux), il y a 2 grandes origines à la polarisation de la lumière :
  - La polarisation par diffusion sur des dipôles oscillants (électrons, atomes, molécules...) : par exemple, les protubérances solaires, ou encore des milieux circumstellaires.
  - La polarisation par action d'un champ magnétique sur les transitions électroniques : par exemple le magnétisme stellaire

# Polarisation par diffusion

- Oscillation d'un dipole sous l'action du champ électromagnétique du rayonnement :



- Une onde est réémise dans la direction orthogonale à l'onde incidente

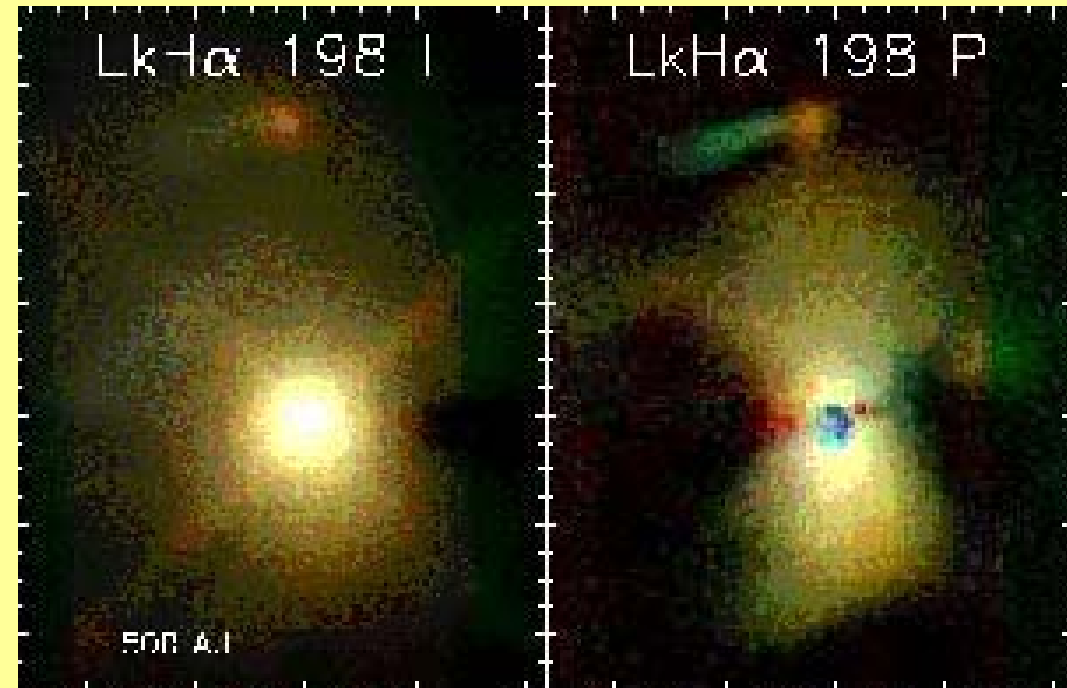


# Polarisation par diffusion

- Conséquences :
  - L'onde est totalement polarisée linéairement perpendiculairement (angle  $\theta$ ) au plan de diffusion
  - De manière générale, le taux de polarisation (linéaire!) s'écrit :
- 
- Ce phénomène de polarisation est aussi appelé polarisation par réflexion et permet l'étude des constituants et surfaces des planètes via la polarisation de la lumière réfléchie du Soleil

# Applications astrophysique

- Cas courants : taches (ou anisotropies quelconques), disques et enveloppes circumstellaires
- Géométrie et composition des éléments polarisants



# Effet Zeeman

- Découvert en
- Dédoublément des raies : apparition de nouveaux niveaux d'énergie
- Existence de transitions permises ou interdites
- Polarisation de ces nouvelles transition
- Ne peut s'interpréter qu'à travers la Mécanique Quantique

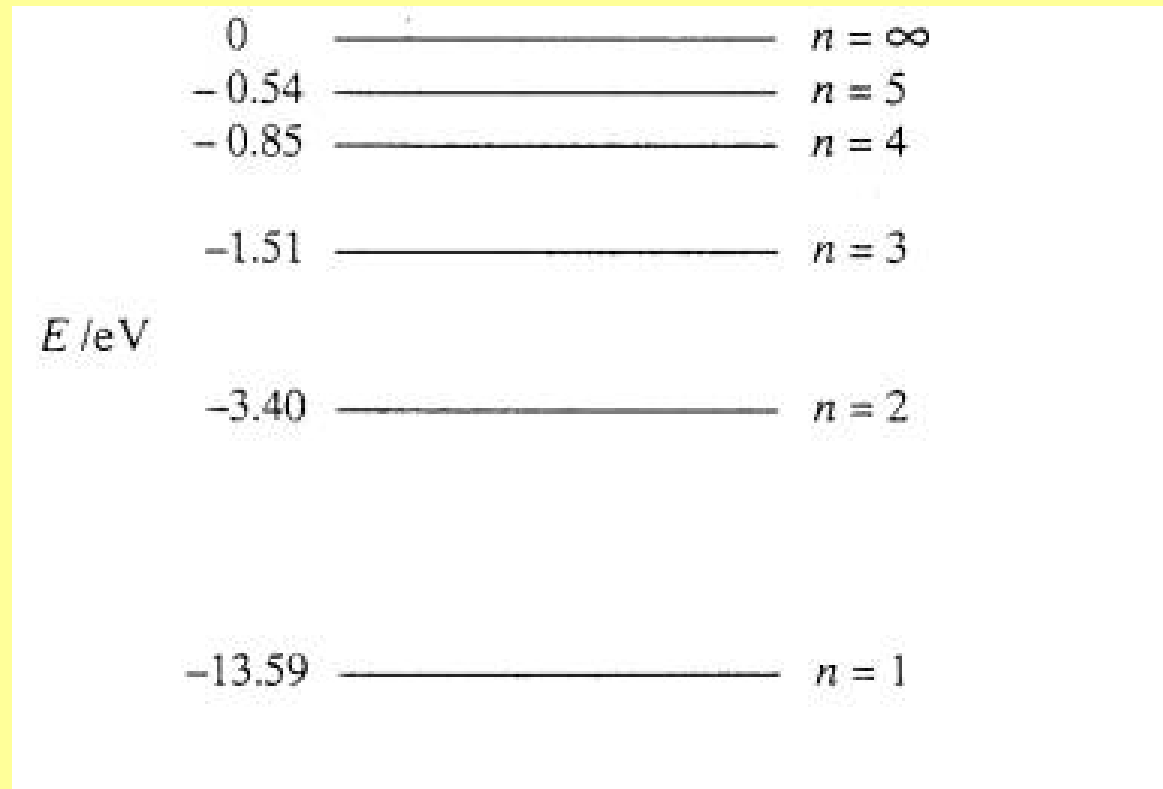
# Effet Zeeman

- Le premier niveau en mécanique quantique concerne la quantification de l'énergie totale d'un électron :
- où  $E_{kin}$  représente l'énergie cinétique de l'électron, et  $E_{pot}$  représente l'énergie potentielle électrostatique du noyau auquel est soumis l'électron
- La quantification intervient via la conservation du moment cinétique :
- où  $n$  est un entier naturel non nul qui correspond au nombre quantique principal déterminant le niveau d'énergie



# Effet Zeeman

- Exemple de niveaux d'énergie déterminés par :



# Effet Zeeman

- En réalité, d'autres phénomènes physiques sont à prendre en compte, conduisant à l'existence d'autres nombres quantiques :
  - Le moment cinétique orbital de l'électron « autour » du noyau :
  - Le moment cinétique de spin de l'électron, quantité propre à la Physique Quantique :
- Ces 3 nombres définissent l'*état* dans lequel se trouve un électron de l'atome

# Effet Zeeman

- Les 2 moments cinétiques ainsi définis ne sont pas indépendants car les électrons interagissent entre eux et avec le moment angulaire du noyau :

c'est l'interaction spin-orbite :

qui représente le moment angulaire total

- Par similitude avec  $\mathbf{L}$  et  $\mathbf{S}$  on associe à  $\mathbf{J}$  2 nombres quantiques :

# Effet Zeeman

- Les niveaux d'énergie sont alors uniquement repérés par les valeurs  $m_l$
- La valeur de  $l$  ne joue aucun rôle : on dit que l'état d'énergie est  $(2l+1)$  fois dégénéré
- Les transitions entre les valeurs  $m_l$  représentent la structure fine du spectre :

# Effet Zeeman

- En présence d'un champ magnétique  $B$ , le calcul de l'énergie fait intervenir un terme supplémentaire, de la forme :
- où
- $\mu_B$  représente le magnéton de Bohr
- Si ce terme est important par rapport à l'état initial, il faut traiter le problème dans sa globalité, le résultat donne l'effet Paschen-Back, utilisé pour les champs forts
- Si ce terme reste petit, on peut (relativement) facilement traité le problème par perturbation : c'est l'**effet Zeeman**

# Effet Zeeman

- Le champ magnétique a pour effet de lever la dégénérescence des niveaux  $E_{n,l}$ , qui vont se retrouver séparés d'une quantité :
$$\Delta E = \mu_B B g_l m_l$$
- où  $g_l$  est appelé facteur de Landé
- Ce facteur dépend des caractéristiques quantiques du niveau
- Pour une transition, il faut calculer  $\Delta E$  qui combine les nombres quantiques des 2 niveaux considérés.

# Effet Zeeman

- Lors d'une transition entre 2 niveaux  $l$  et  $l'$ , il y a émission ou absorption de photon qui a lui-même un moment angulaire
  - En physique, le moment angulaire est une quantité qui se conserve
  - Par conséquent, certaines transitions sont interdites, et on ne peut avoir que des transitions permises par les règles de sélection :
- 
- La transition  $l = 0 \rightarrow l' = 0$  étant interdite

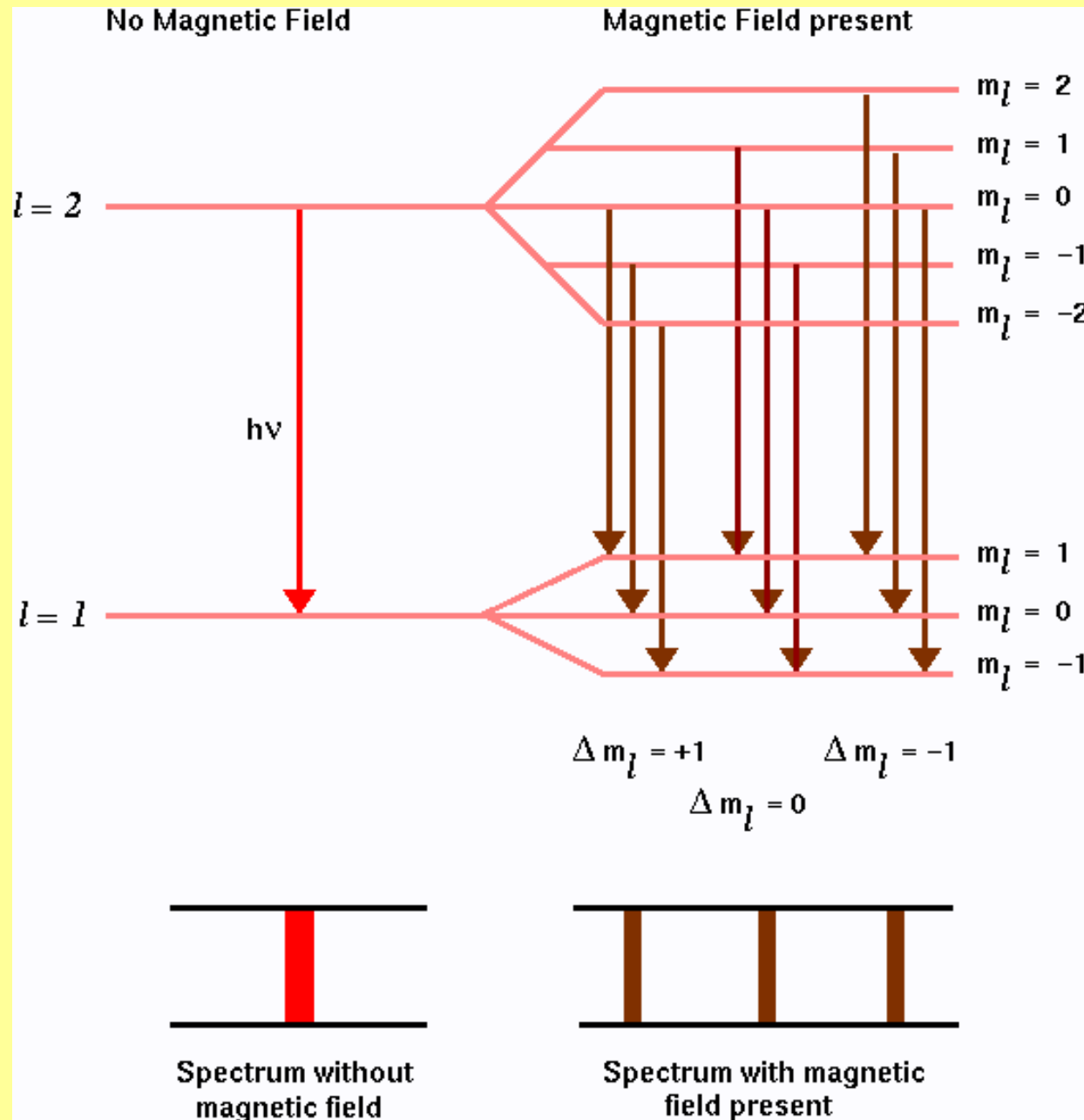
# Effet Zeeman

- Les règles de sélection imposent en outre :
- et renvoient directement à l'hélicité du photon :
  - $\Delta m = 0$  : composante  $\sigma$  : polarisation linéaire
  - $\Delta m = \pm 1$  : composante  $\pi$  : polarisation circulaire

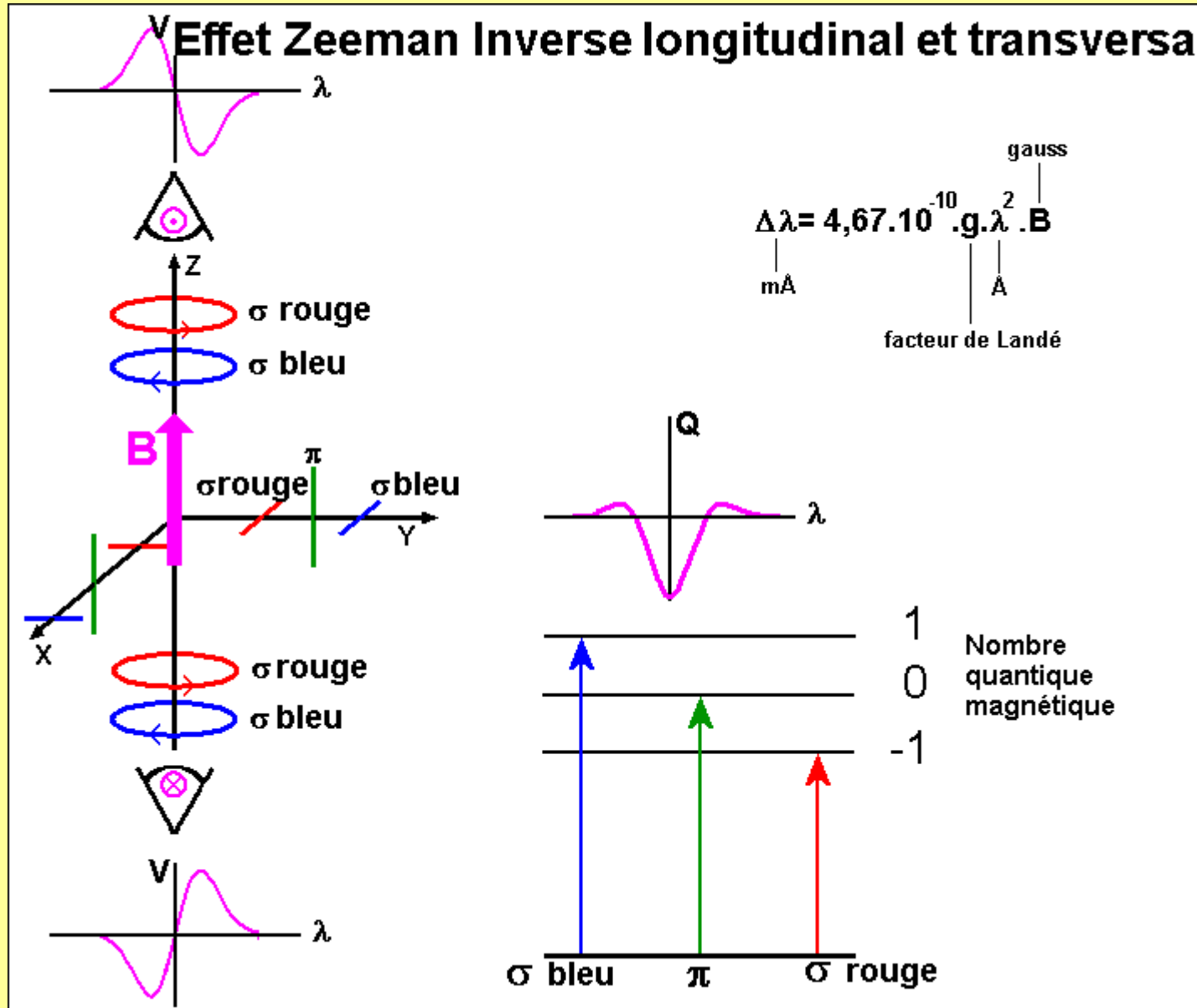
Ces règles permettent de passer d'une composante (sans champ) à 3 composantes (avec champ): c'est l'effet Zeeman normal



# Schéma des transitions Zeeman



# Effet Zeeman et polarisation



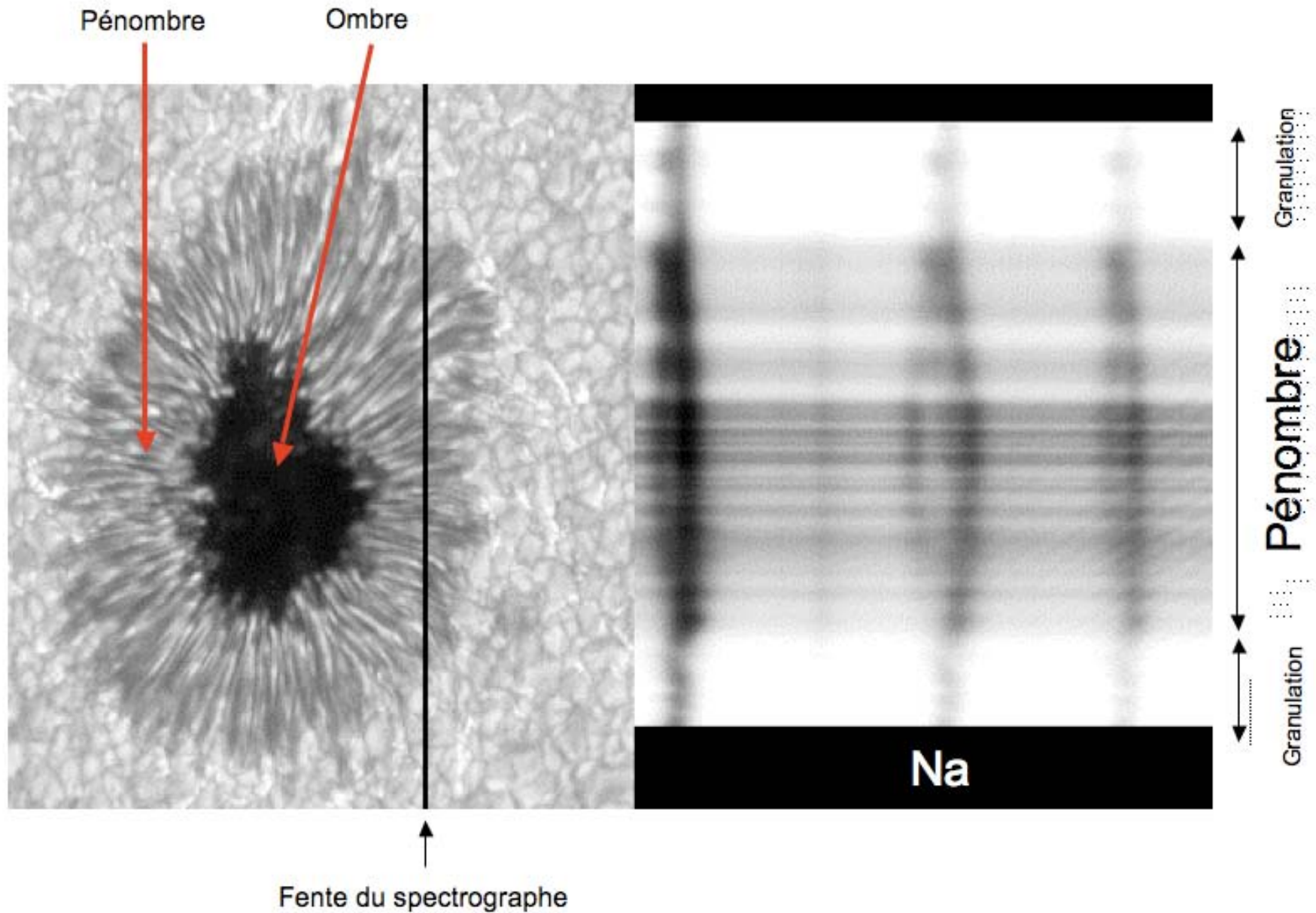
# Décalage Zeeman

- En unités usuelles (B en Gauss), la séparation est de l'ordre de:  
 $\Delta \lambda \approx 4.67 \times 10^{-5} B \lambda^2$
- où  $B$  est la composante sur la ligne de visée de  $B$
- Pour  $B = 10^4$  Gauss :  
 $\Delta \lambda \approx 4.67 \times 10^{-1} \lambda^2$
- Il faut un pouvoir de résolution :

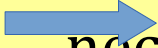
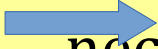


- Impossible à mesurer en Physique Stellaire !!

# Composantes Zeeman



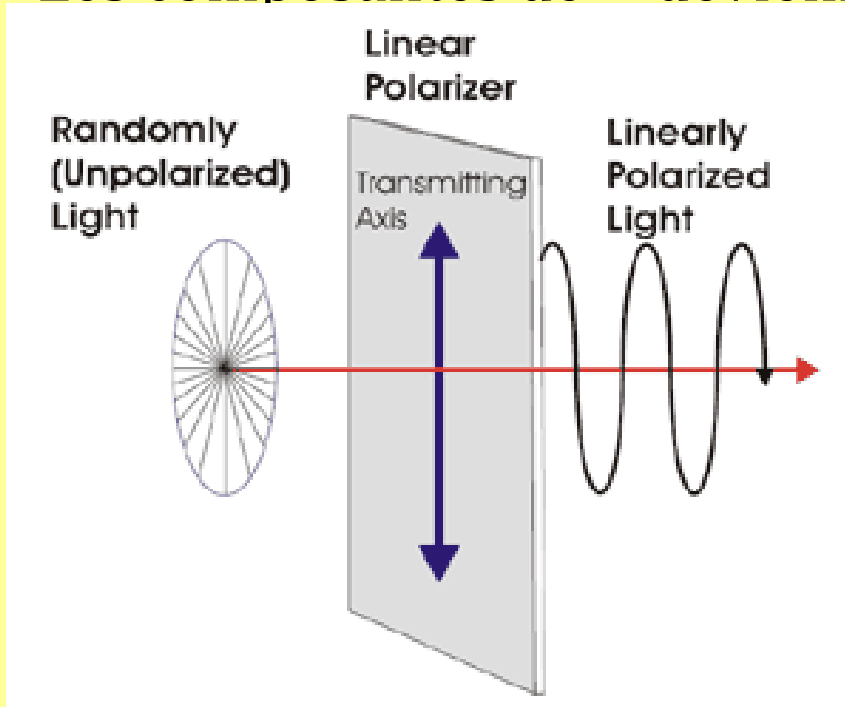
# Physique stellaire

- Trop peu de photons pour les disperser...
- On ne peut voir qu'une composante (légèrement élargie)
- La seule indication concerne la polarisation des photons par les transitions (dans les raies donc) :
-  nécessité d'un spectrographe
- Il faut ``trier'' les photons suivant leur état de polarisation
-  nécessité d'un polarimètre

## **Spectropolarimétrie**

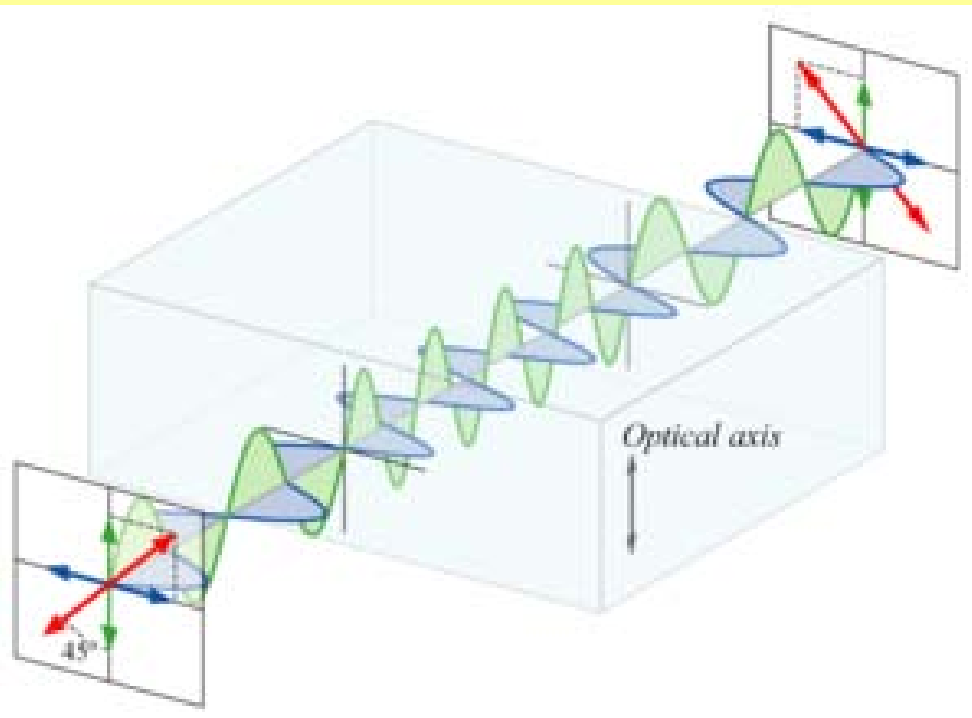
# Polariseur

- Possède un axe optique suivant une direction :
  - laisse passer 100 % des photons suivant cette direction
  - absorbe 100 % des photons suivant
- À la sortie, le rayonnement est polarisé linéairement suivant
- Les composantes de  $E$  deviennent :



# Retardateur

- Possède un axe lent et rapide qui permet d'introduire un retard de phase entre 2 composantes orthogonales de
- Ce dispositif est encore appelé lame à retard
- Les composantes de deviennent :



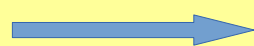
# Polarimétrie

- Si on a la composition d'un polariseur d'un retardateur, les composantes de  $\vec{E}$  s'écrivent :
- et l'énergie transportée par l'onde peut s'écrire :
- dont le développement s'écrit :



# Polarimétrie

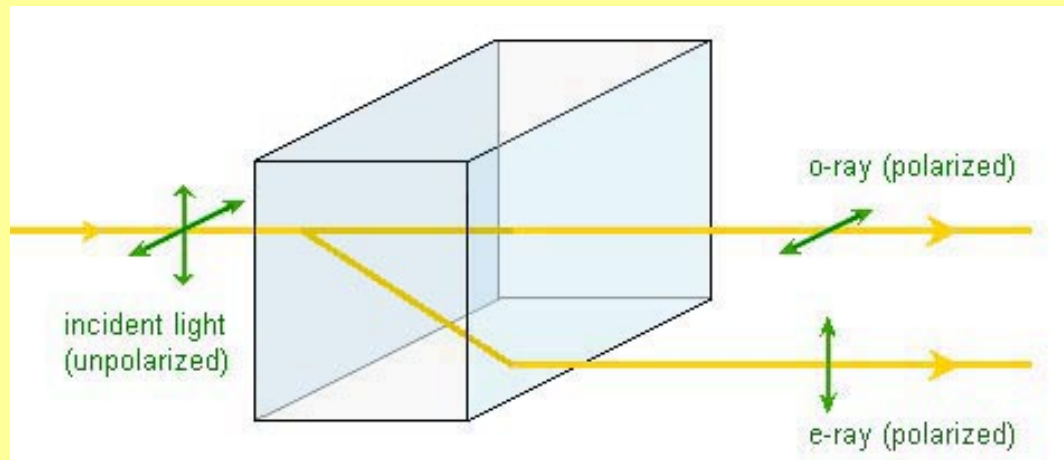
- Avec des valeurs judicieuses de  $\alpha$  et  $\beta$ , on peut accéder aux mesures des paramètres de Stokes :
- ainsi, 2 mesures avec 1 seule rotation de  $\alpha$  permet de remonter à un paramètre de Stokes
- Pour des raisons de cohérence (instrumentale, météo, stellaire), il est préférable de réaliser les 2 mesures simultanées :



Séparateur de faisceaux orthogonaux

# Biréfringence

- 2 axes avec 2 vitesses différentes des photons



- Solution utilisée par Espadons/Narval : prisme de Wollaston

# Matrices de transfert

- Un détecteur ne peut mesurer que des photons, polarisés ou non
- Il faut que le polarimètre ``récupère" les photons dont on souhaite la polarisation
- Cette polarisation étant dans les raies, il est souhaitable d'avoir, en plus de Q/U/V, le signal I
- Espadons/Narval utilisent des composants optiques ``jouant" sur les composantes Stokes de la polarisation à travers des matrices de transfert
- Afin de minimiser les effets instrumentaux, 4 sous-poses interviennent par différentes positions des composantes et de leurs matrices de transfert





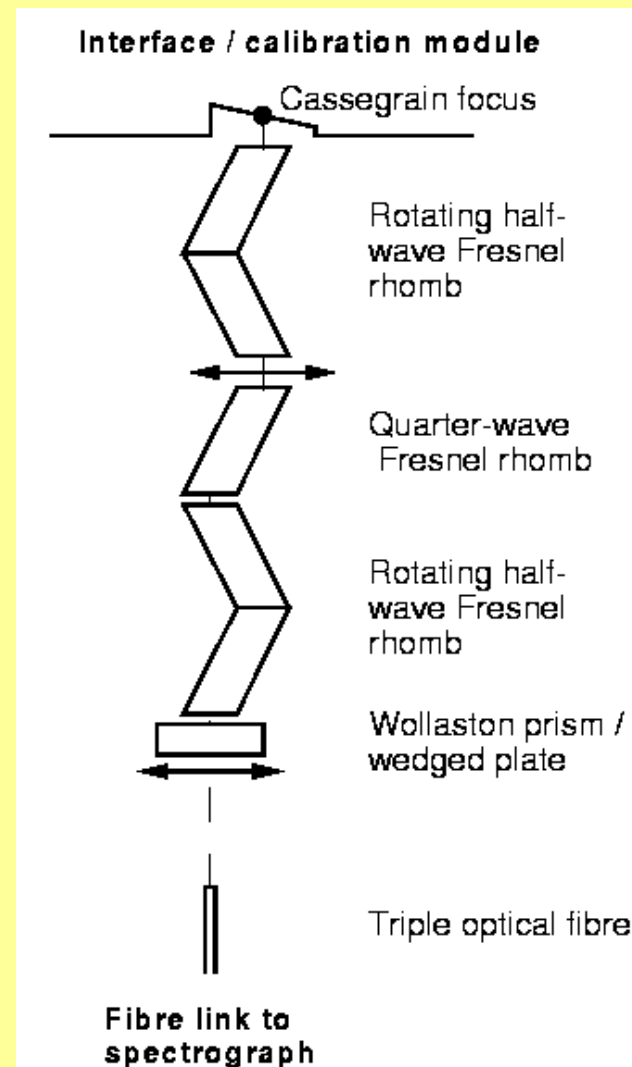


# Lame 1/2 onde

- Une lame demie onde permet de changer le signe de la polarisation circulaire
- La matrice de transfert s'écrit :
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Pour  $\vec{S}_i$ , le vecteur de Stokes devient :

# Polarimètre de Espadons/Narval

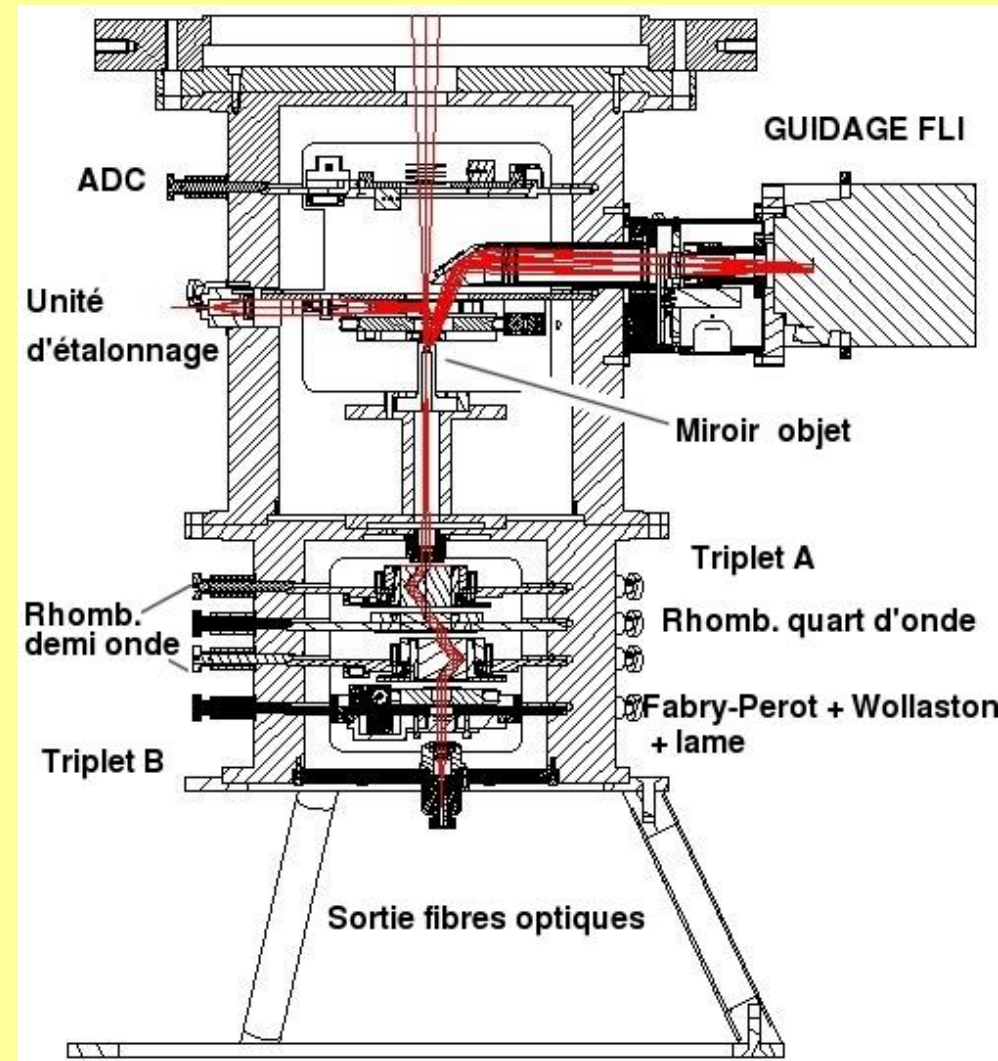
- 2 lames  $\frac{1}{2}$  ondes rotatives entourant une lame  $\frac{1}{4}$  d'onde fixe, avant l'entrée d'un Wollaston :





# Polarimètre de Espadons/Narval

- Les différentes rotations des lames  $\frac{1}{2}$  ondes permettent de récupérer les photons d'une certaine polarisation
- La lame  $\frac{1}{4}$  d'onde sert "juste" à transformer le linéaire en circulaire : elle est fixe
- Ce montage permet aussi d'invertir les 2 voies à l'entrée du Wollaston, afin de balayer les 2 chemins optiques



# Application : mesure de $V$

- La composition des différentes matrices de transfert :
- avec leurs angles propres, permet de dresser le tableau suivant :

- où  $e_1$  et  $e_2$  sont les 2 composantes orthogonales à la sortie du Wollaston



# Estimation du bruit instrumental

- On peut aussi combiner les poses de façon à *annuler* le signal de polarisation
- Pour cela, on cherche une (ou plusieurs) combinaisons donnant
- ce qui définit, en théorie :
- 2 signaux théoriquement nuls,  $\sigma_{\text{L1}}$  et  $\sigma_{\text{L2}}$ , sont ainsi calculés par Libre-Esprit
- S'ils sont non nuls, cela dénote un problème instrumental, ou liée aux conditions d'observations (météo, variabilité, ...)

# Expression de $V(\lambda)$

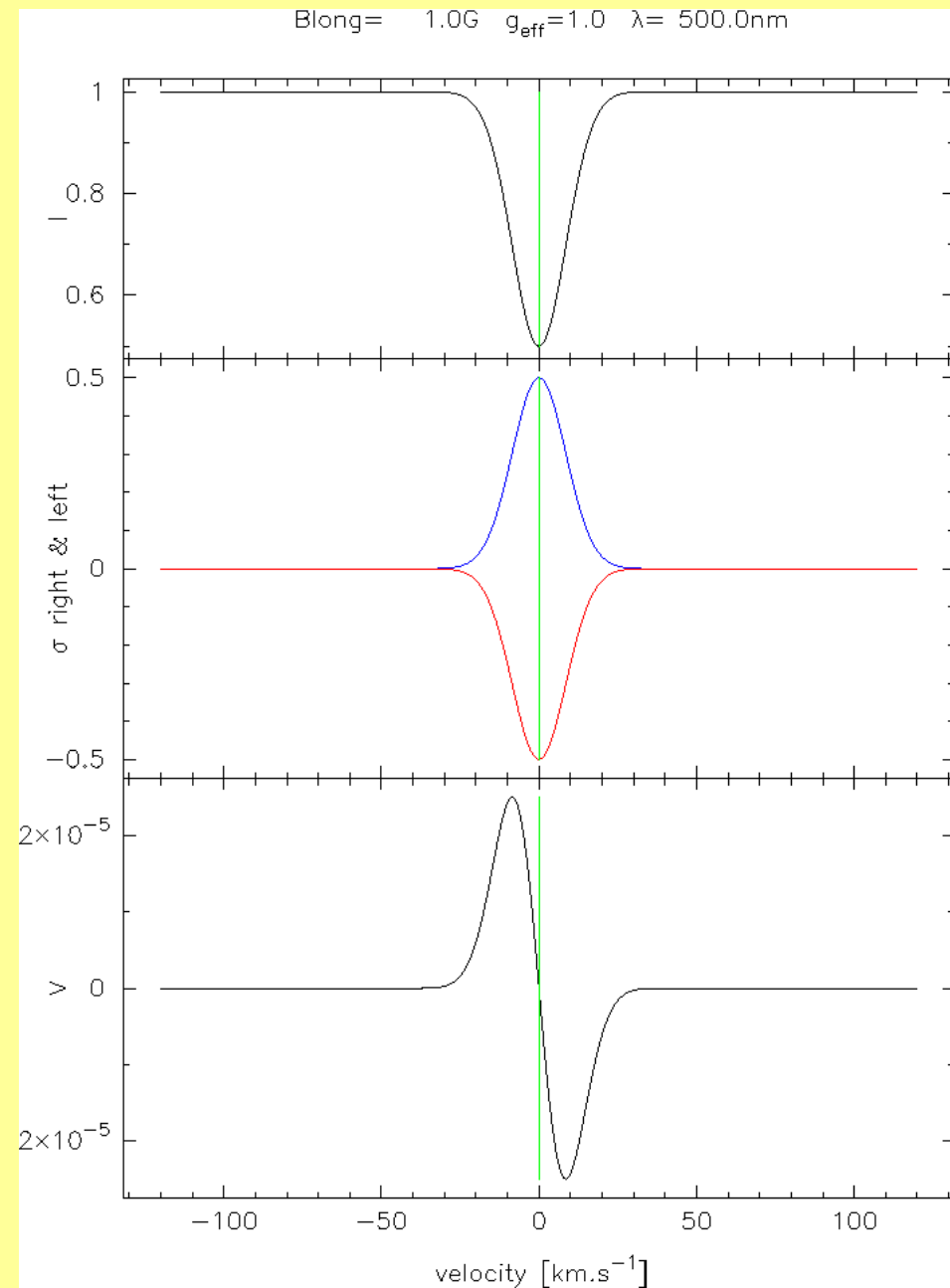
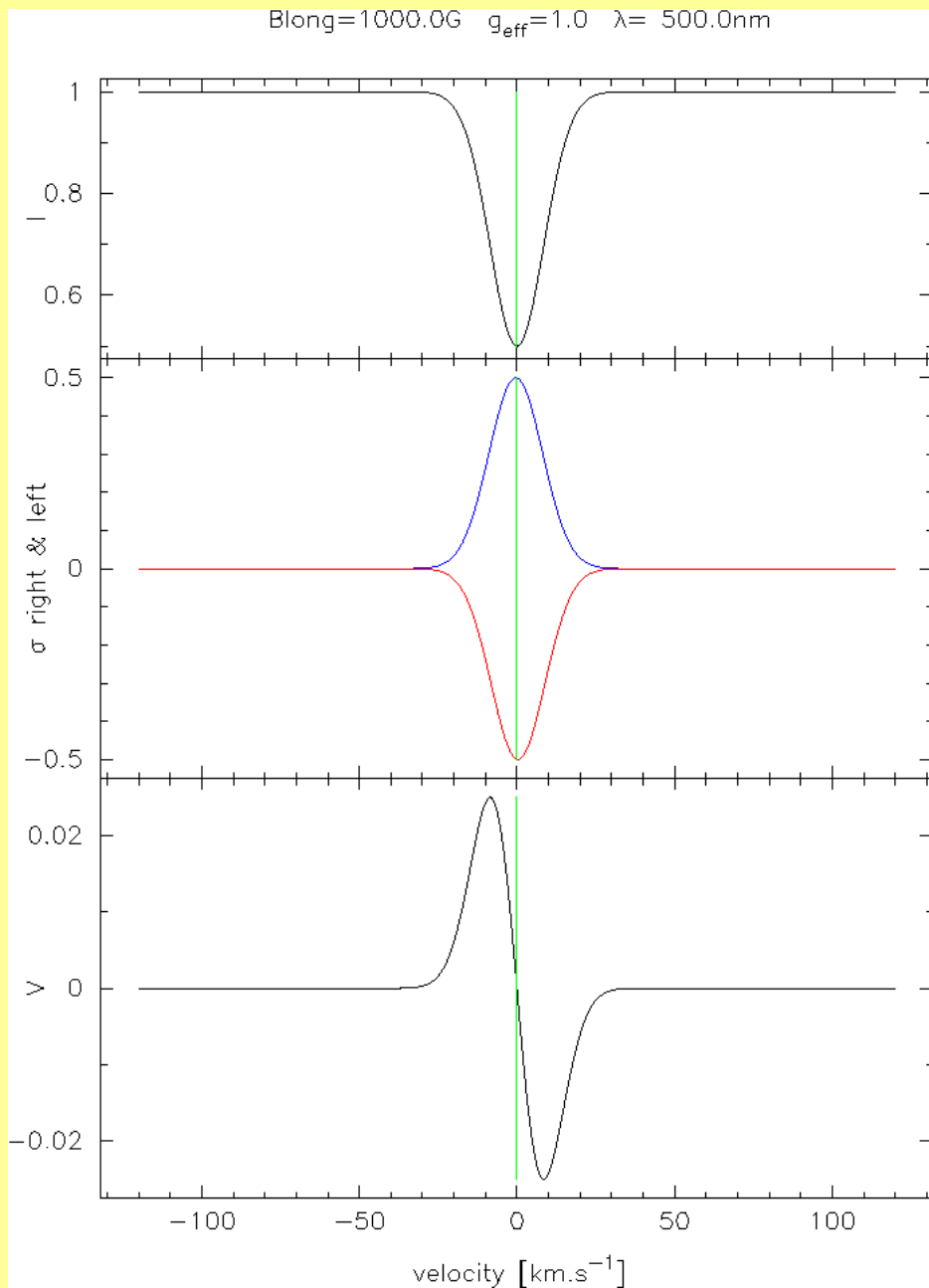
- En champ faible  $B$  et après un peu de transfert de rayonnement, on arrive à :
  
- Où :

  - $g$  est le facteur de Landé effectif
  - $\lambda$  est la longueur d'onde de la transition
  - $\cos^2 \theta$  est la composante sur la ligne de visée de

# Expression de $V(v)$

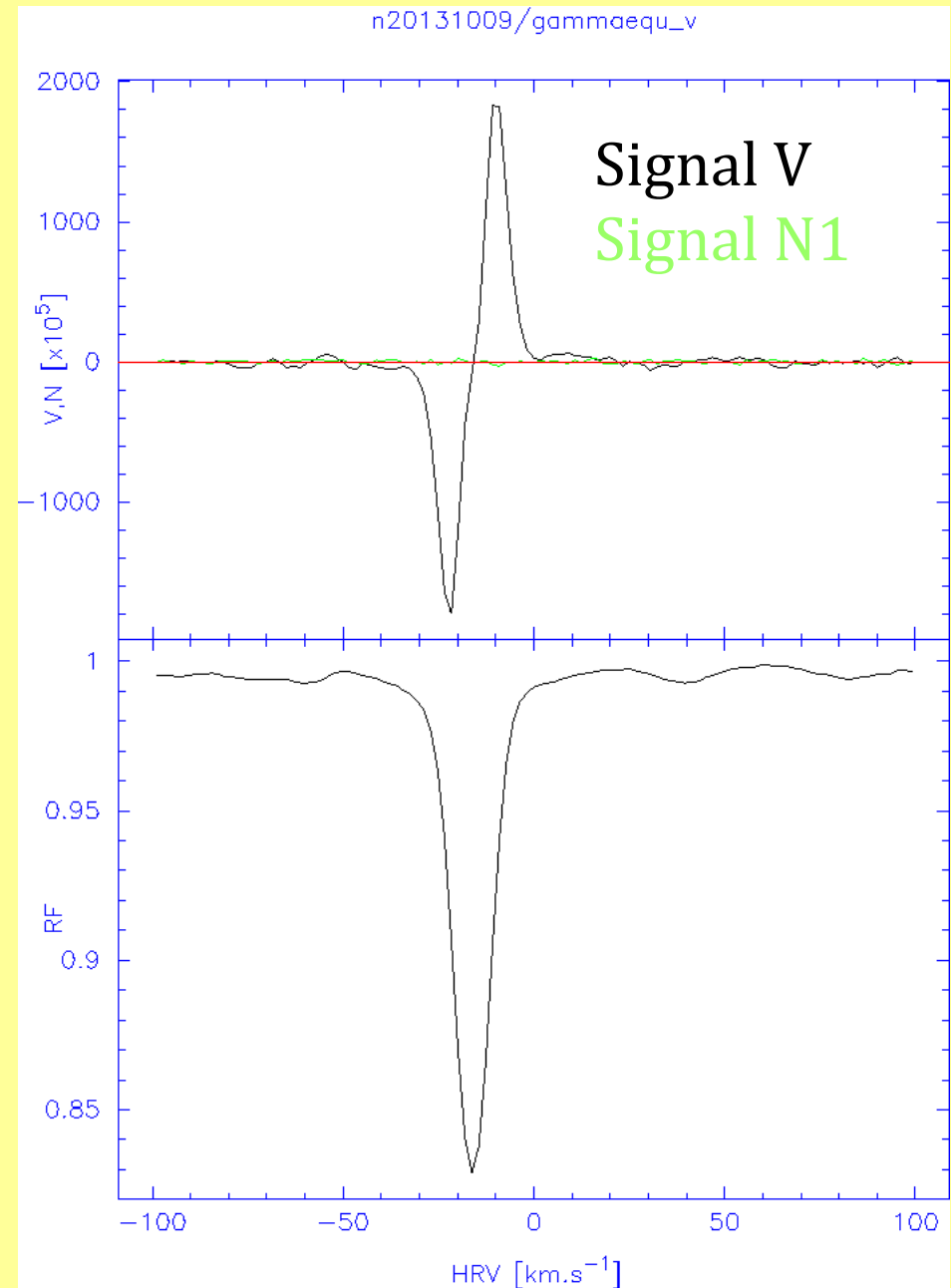
- Détecter un signal sur une raie requiert  $S/N \sim 1000$
- Difficile à obtenir pour les objets faibles ( $mV > 1$ )
- mesure du signal sur un maximum de raies  $N$  simultanément
- le signal est augmenté d'un facteur
- On utilise un processus de corrélation des raies spectrales par comparaison avec un spectre synthétique (masque)
- nombreuses hypothèses (réponse de chaque raie identique...)
- Le calcul se fait en projetant chaque raie sur une grille de vitesse par effet Doppler

# Allure de $V(v)$



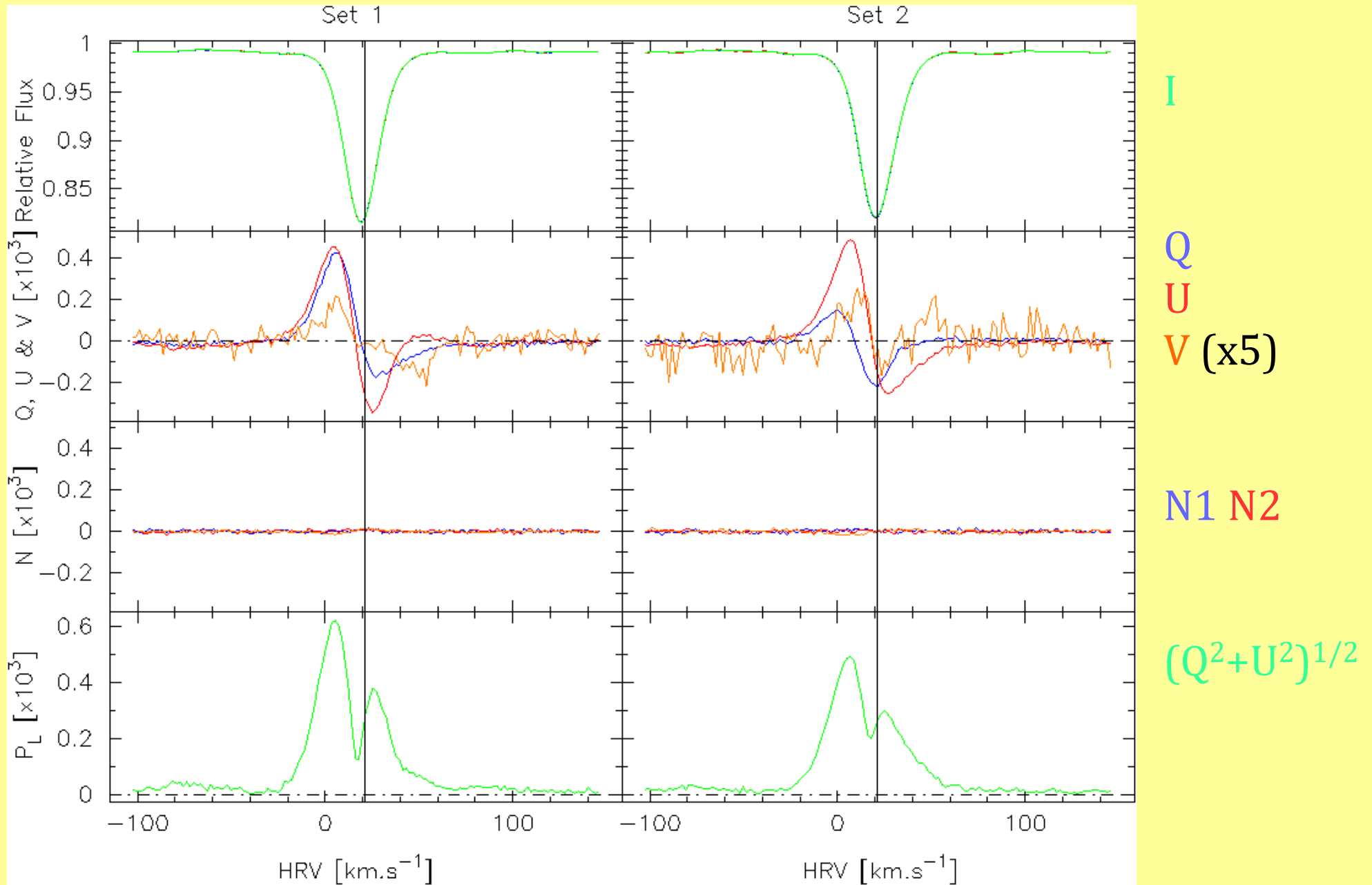
# $V(v)$ ``classique''

- Étoile  $\gamma$  Equ (A9V)
- $B \sim 1\text{kG}$
- Masque :  $\sim 3400$  raies

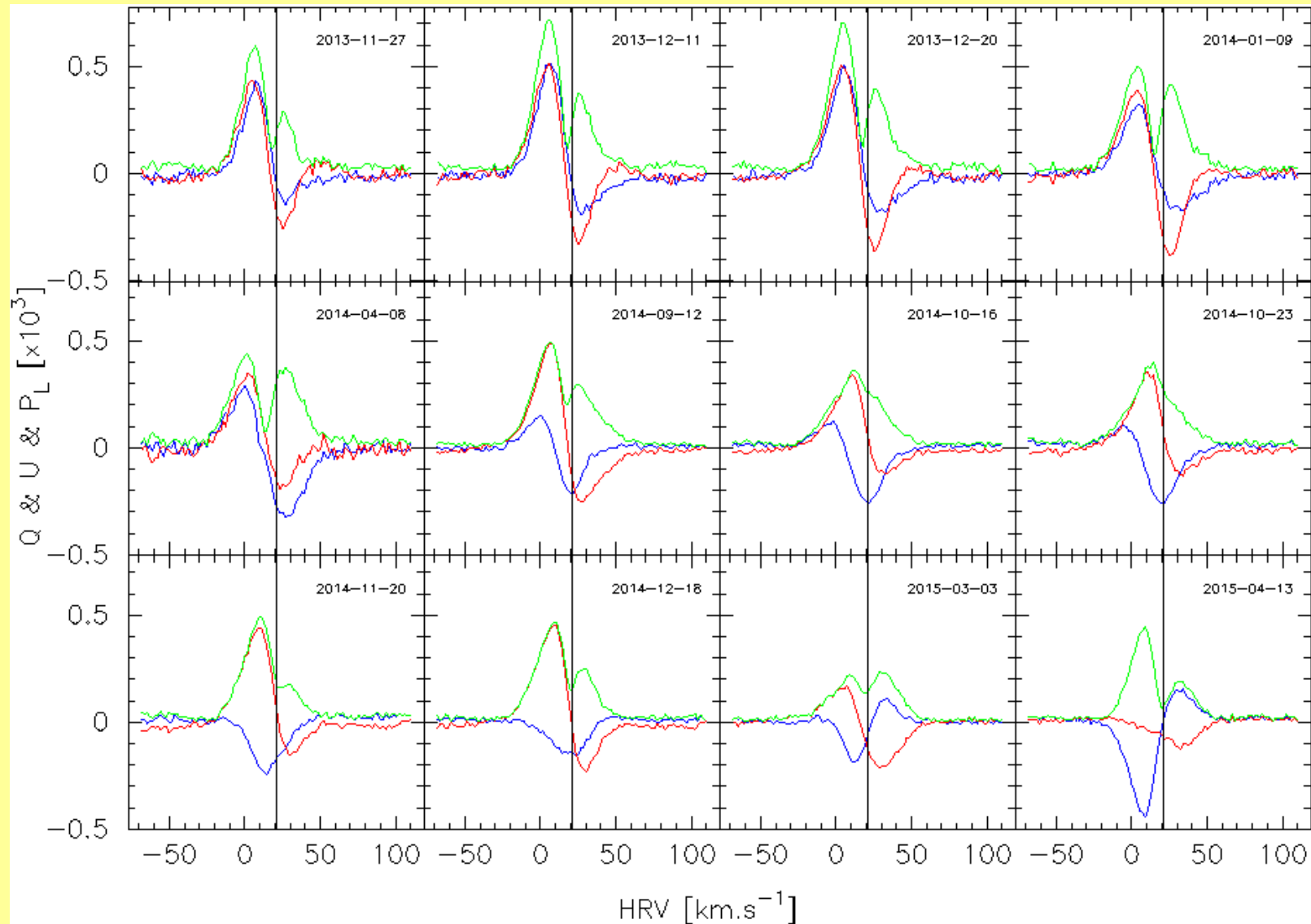




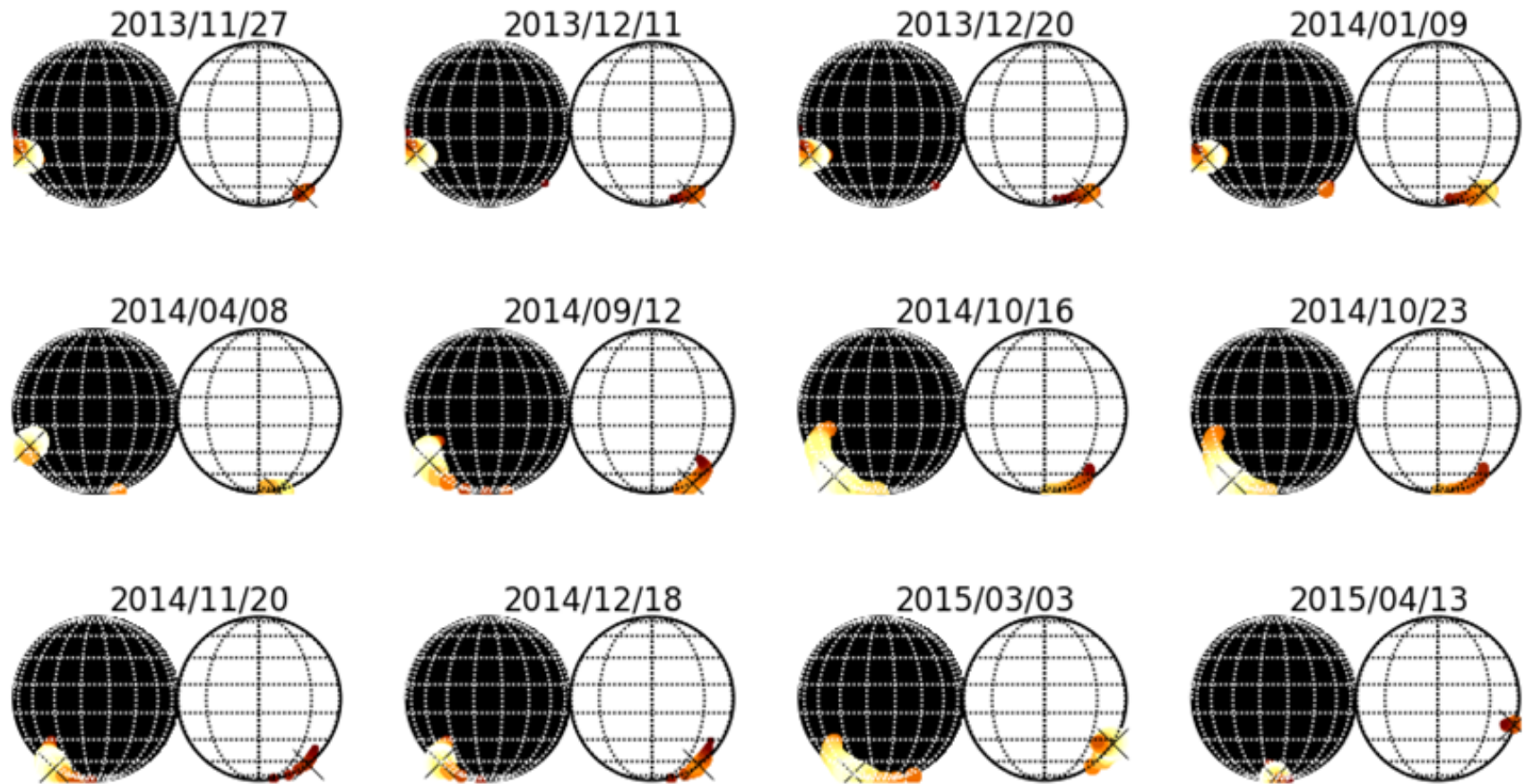
# Bételgeuse : Q, U, V



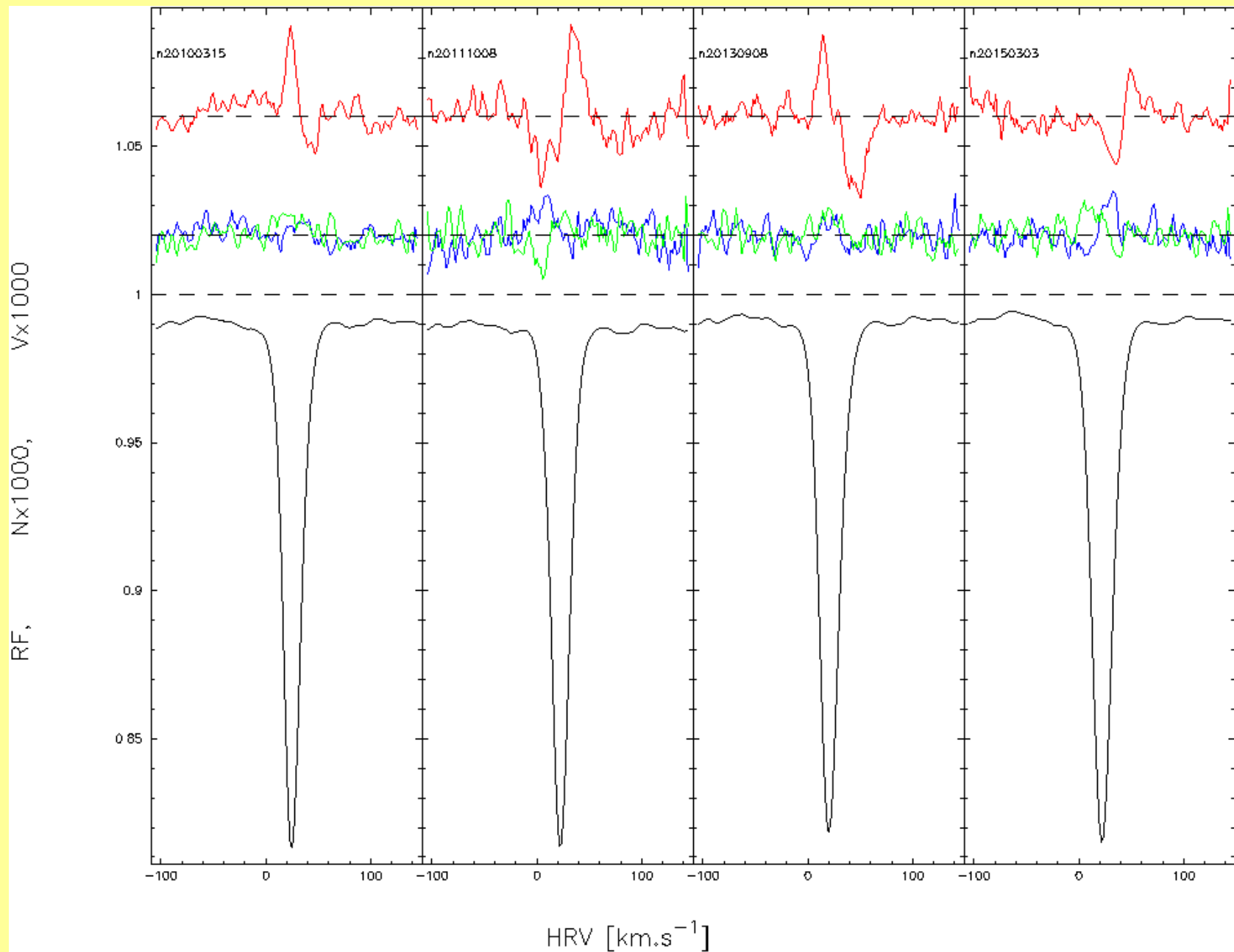
# Exemple de reconstruction de surface



# Exemple de reconstruction de surface

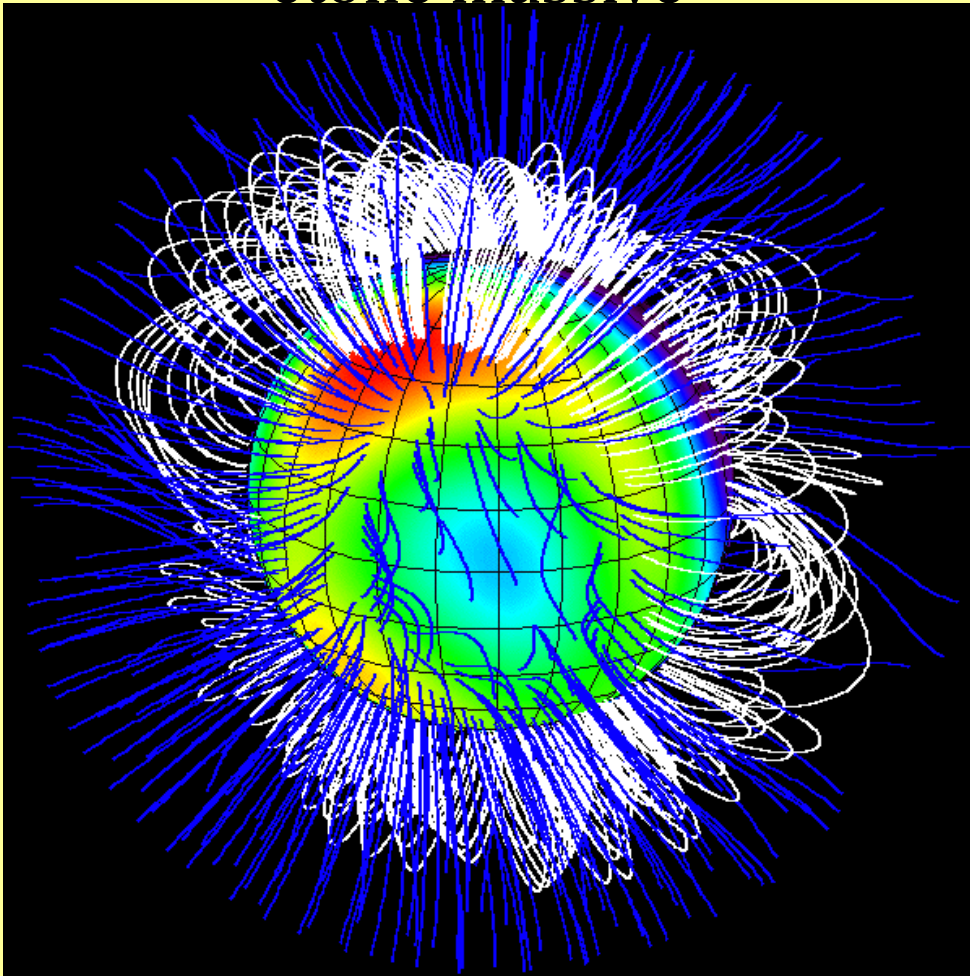


# Exemple de changement de polarité



# Beaucoup de surprises...

étoile massive



étoile de faible masse

