

# Activité magnétique des jumeaux solaires : peut-on la filmer ?

Pascal Petit, Observatoire Midi-Pyrénées

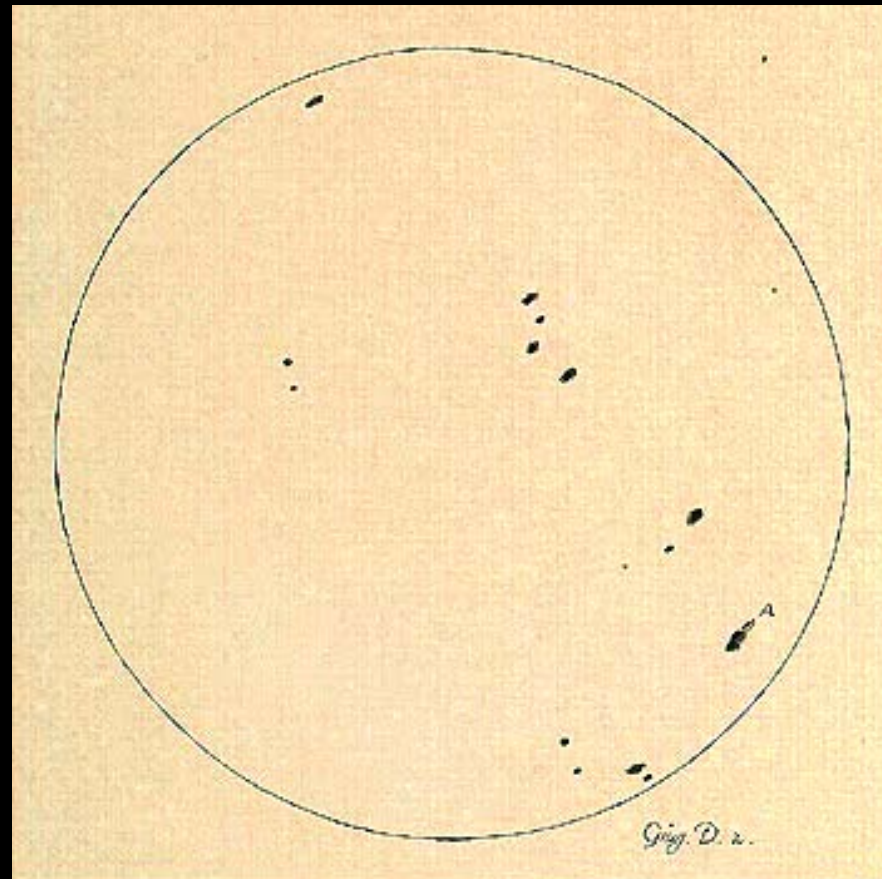
M. Aurière, J. Dias dos Nascimento, B. Dintrans, R. Farès, T. Gastine,  
J. Lanoux, F. Lignièrès, A. Morgenthaler, J. Melendez, J. Morin, F. Paletou,  
J. Ramirez Velez, S. Saar, S.K. Solanki, S. Théado

# Taches solaires

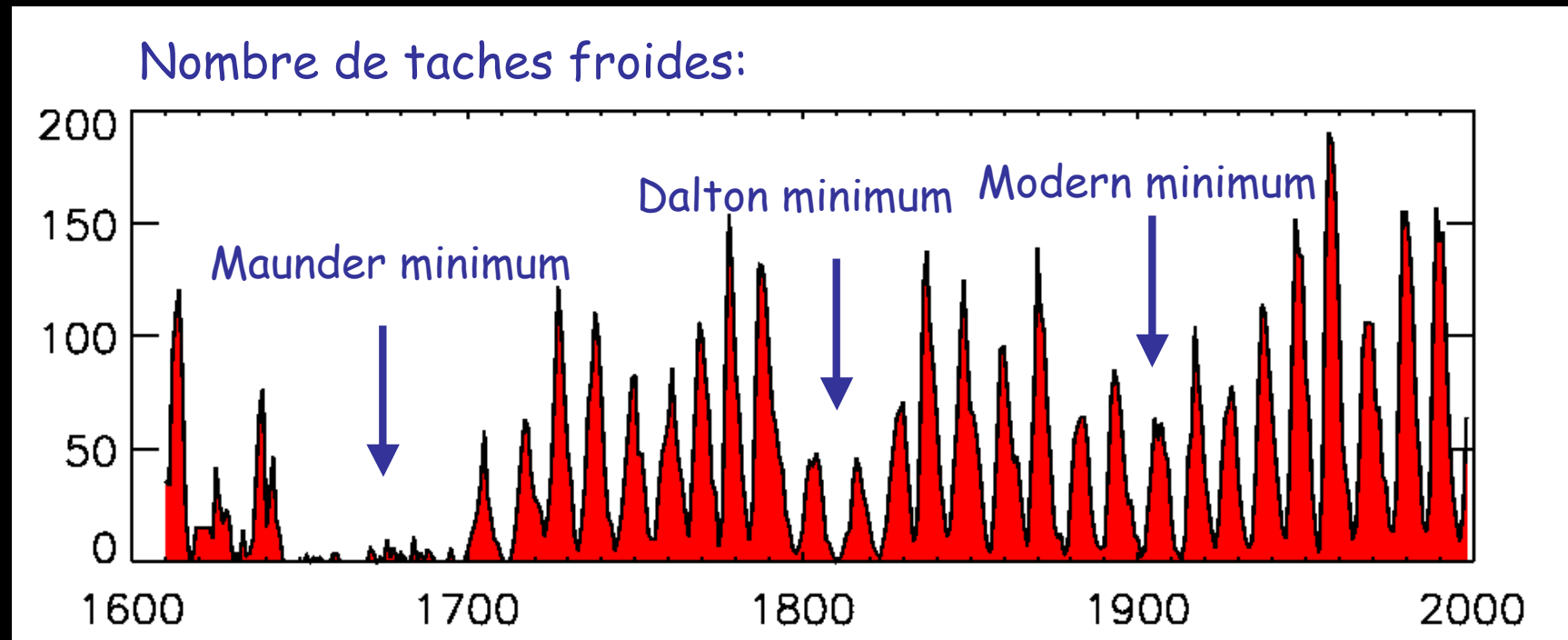
Découvertes par Galilée (1610)

Rotation différentielle  
(Scheiner 1630)

Cyclicité  
(Schwabe 1843)



# Fluctuations à long terme De l'activité solaire



© National Geophysical Data Center

Cycle de 11 ans  
+  
Cycle de Gleissberg (80-90 ans)

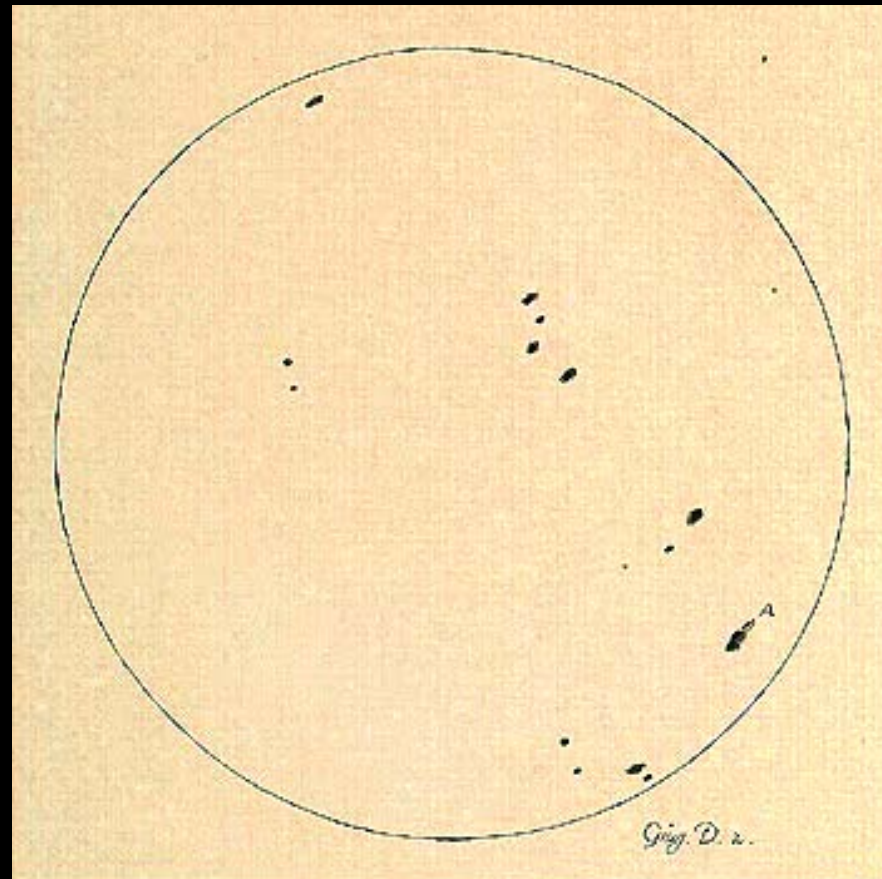
# Taches solaires

Découvertes par Galilée (1610)

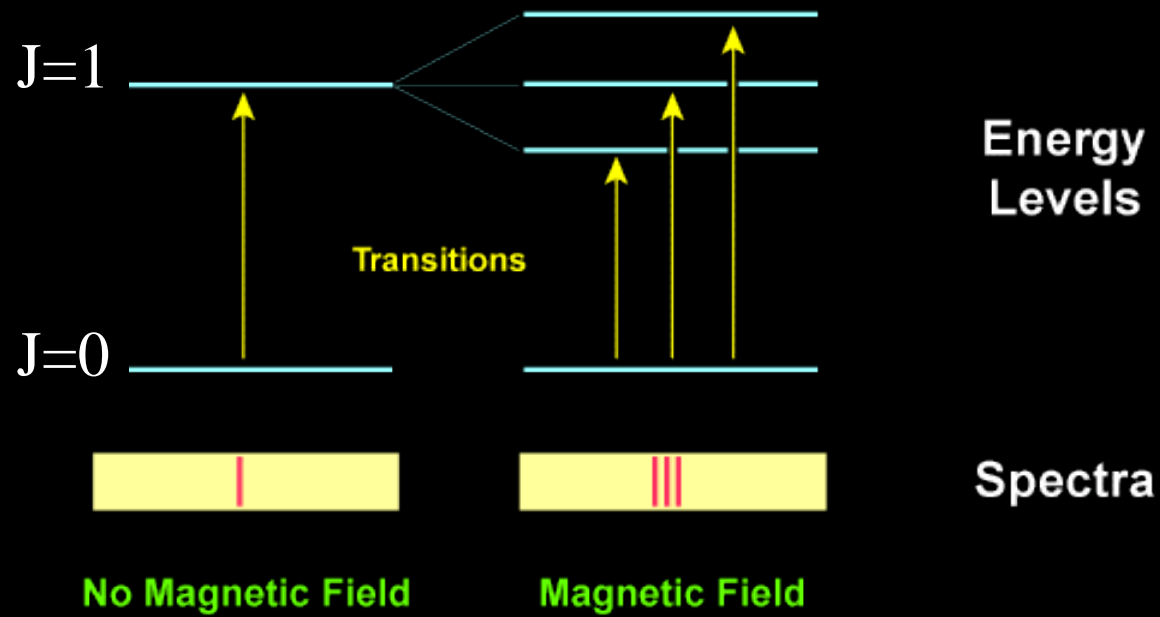
Rotation différentielle  
(Scheiner 1630)

Cyclicité  
(Schwabe 1843)

Magnétisme  
(Hale 1908)

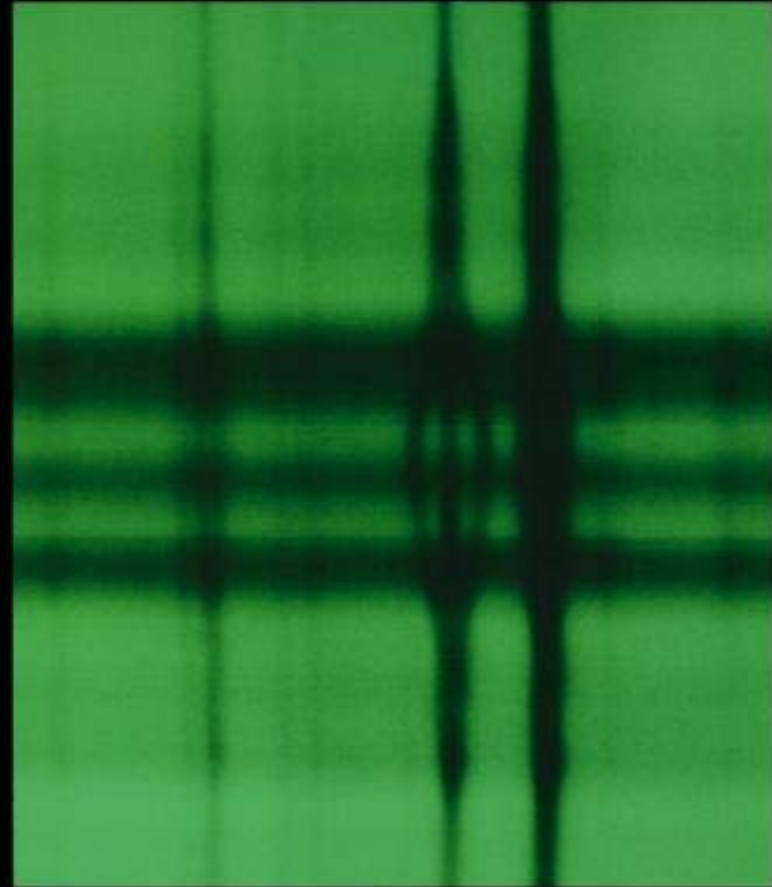
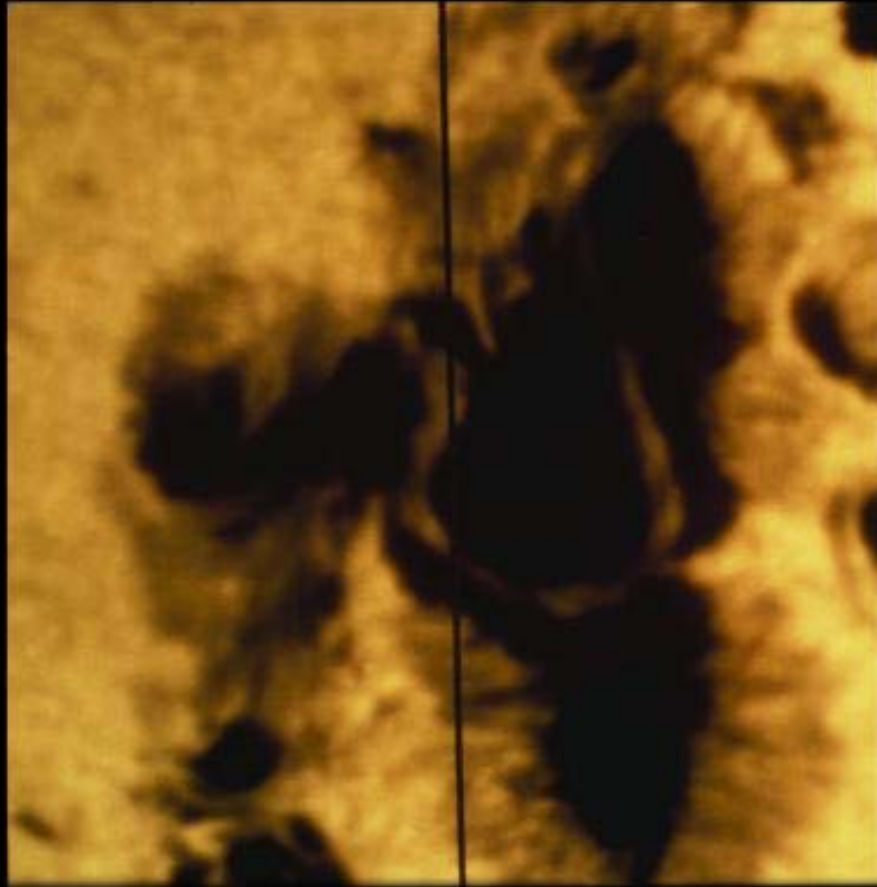


# Mesure des champs magnétiques: Effet Zeeman

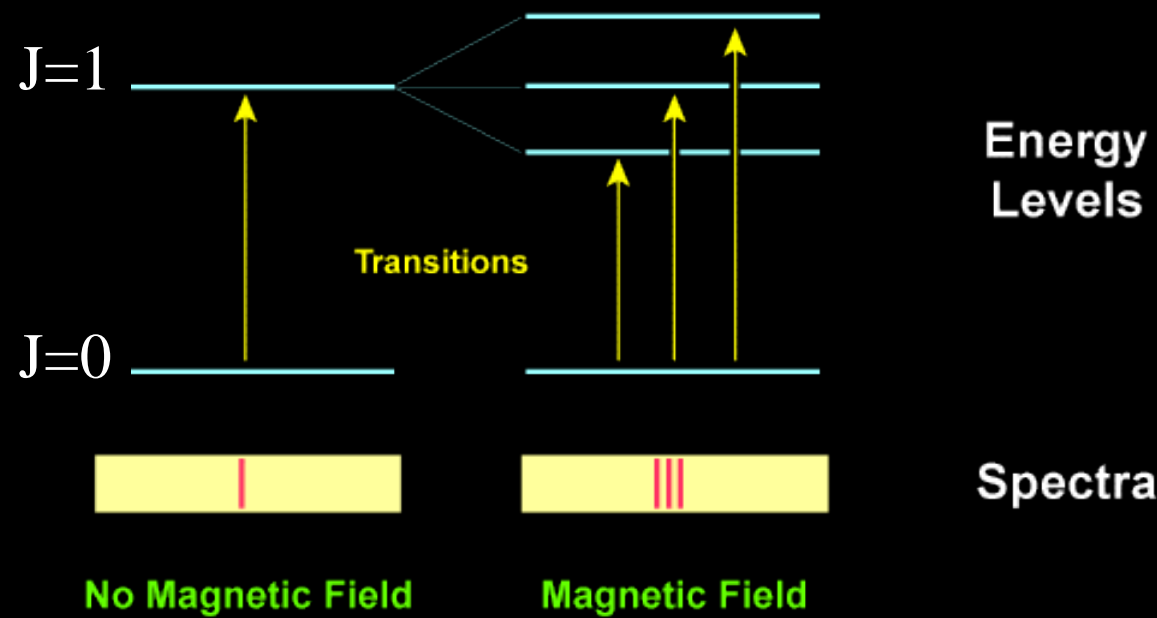


(Zeeman 1896)

## Effet Zeeman dans une tache solaire



# Mesure des champs magnétiques: Effet Zeeman



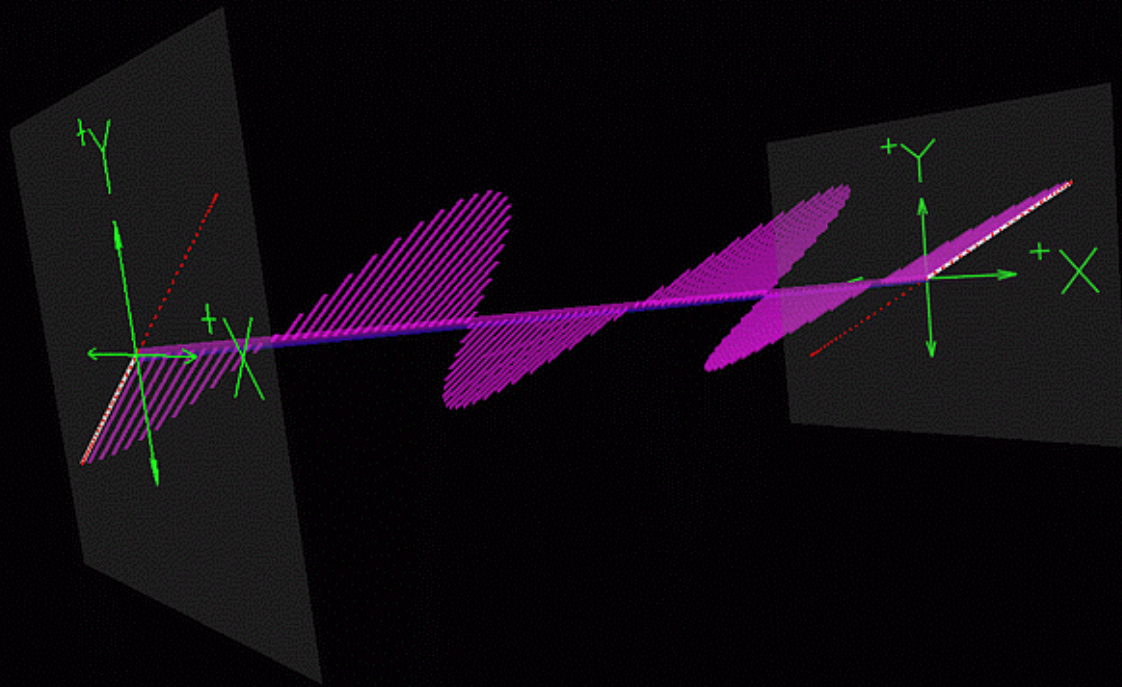
(Zeeman 1896)

Sous-transitions polarisées



# Polarisation de la lumière

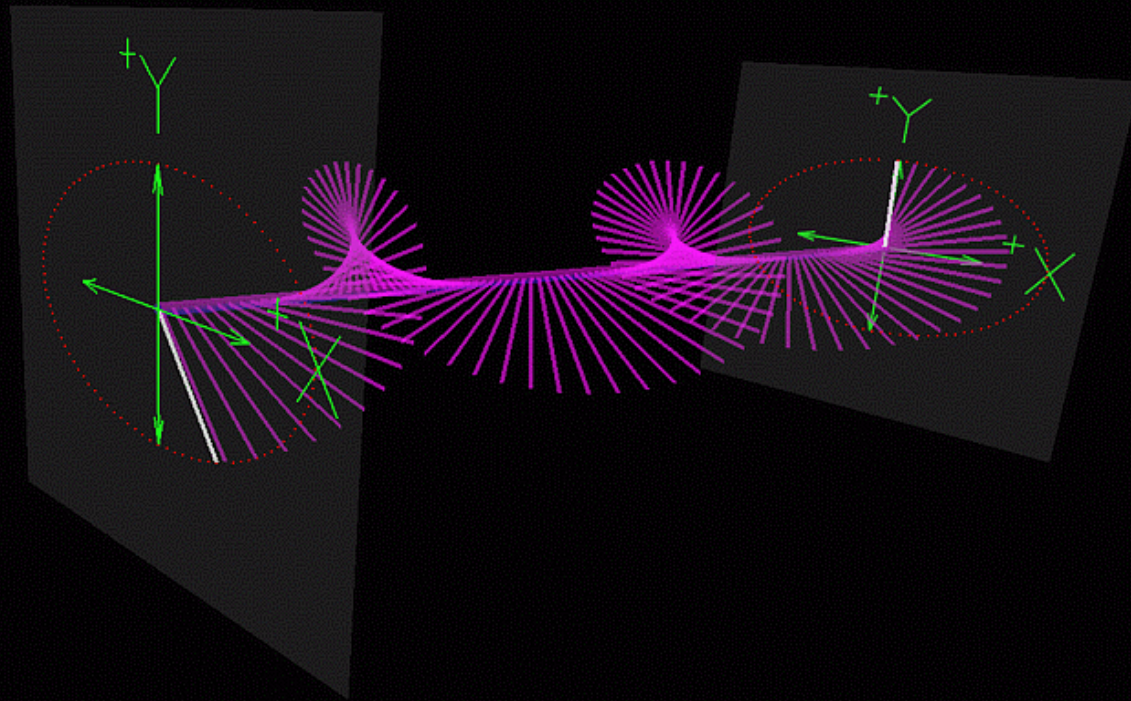
Lumière polarisée linéairement:



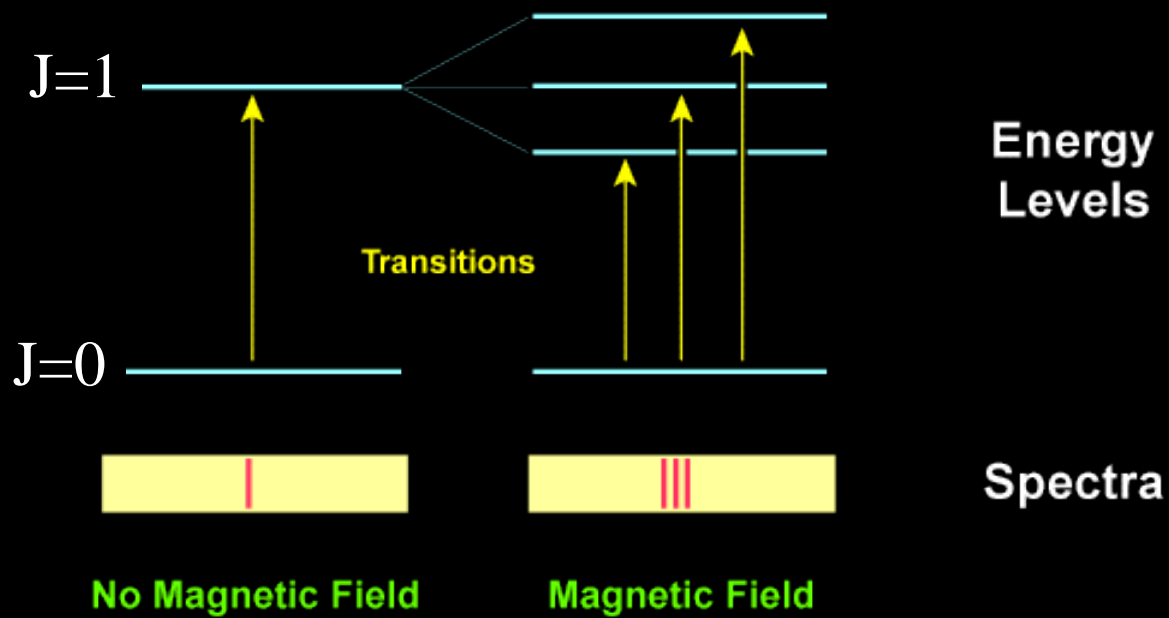


# Polarisation de la lumière

Lumière polarisée circulairement:



# Effet Zeeman



Polarisation dépendante de l'orientation du champ

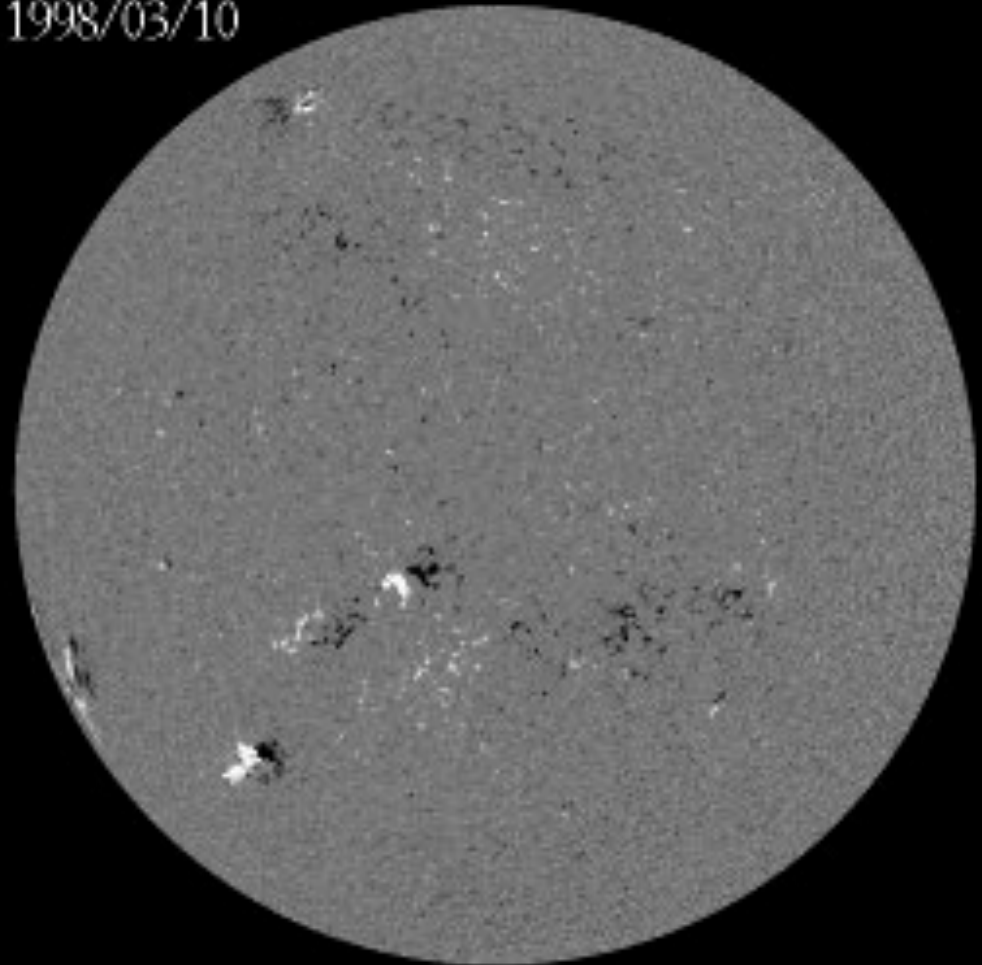
## Distribution des régions actives

1998/03/10

**Domaine en latitude**  
Des régions actives:  $\pm 40^\circ$

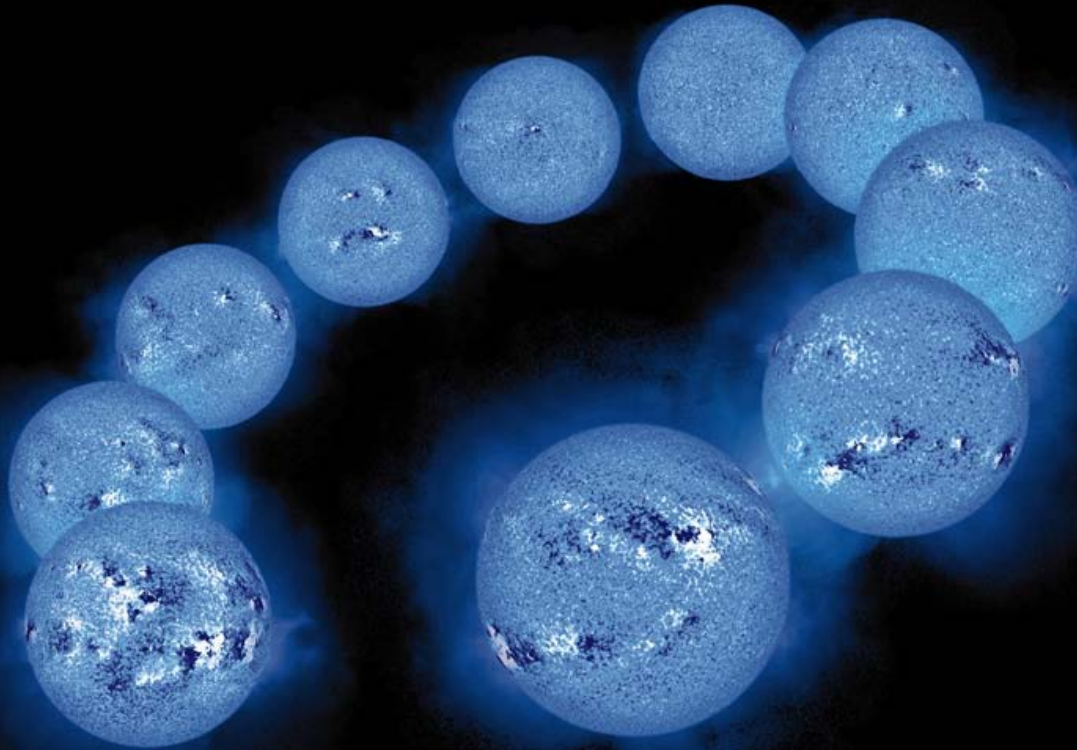
**Loi de Hale-Nicholson:**

- polarité opposée entre tache de tête / de queue
- Opposition de polarité entre les hémisphères N/S



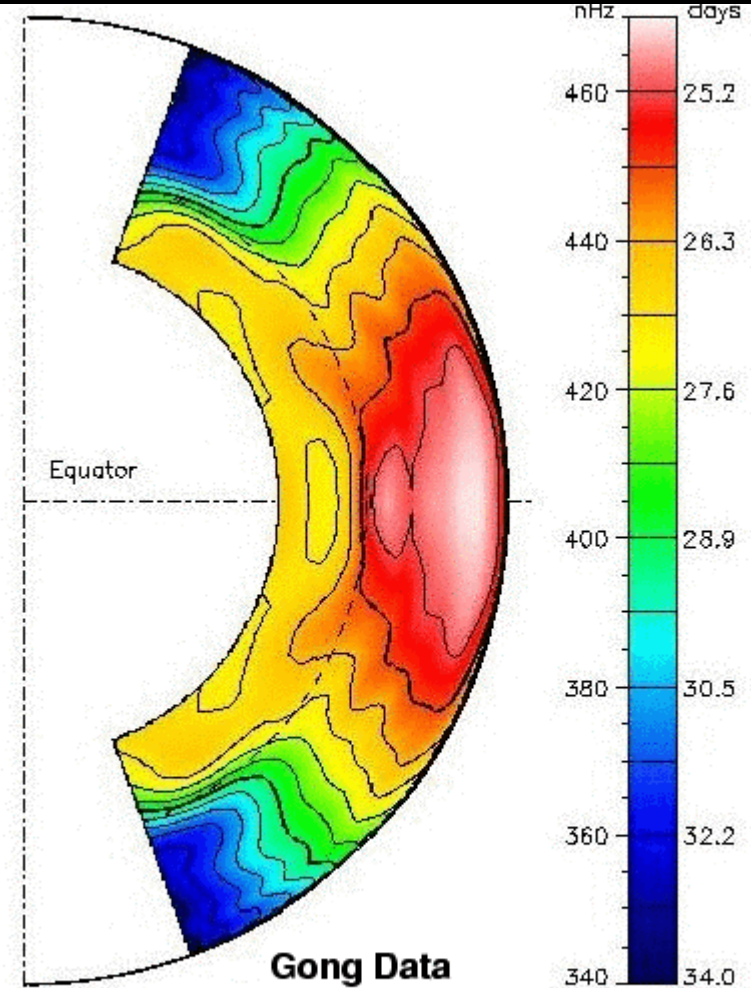
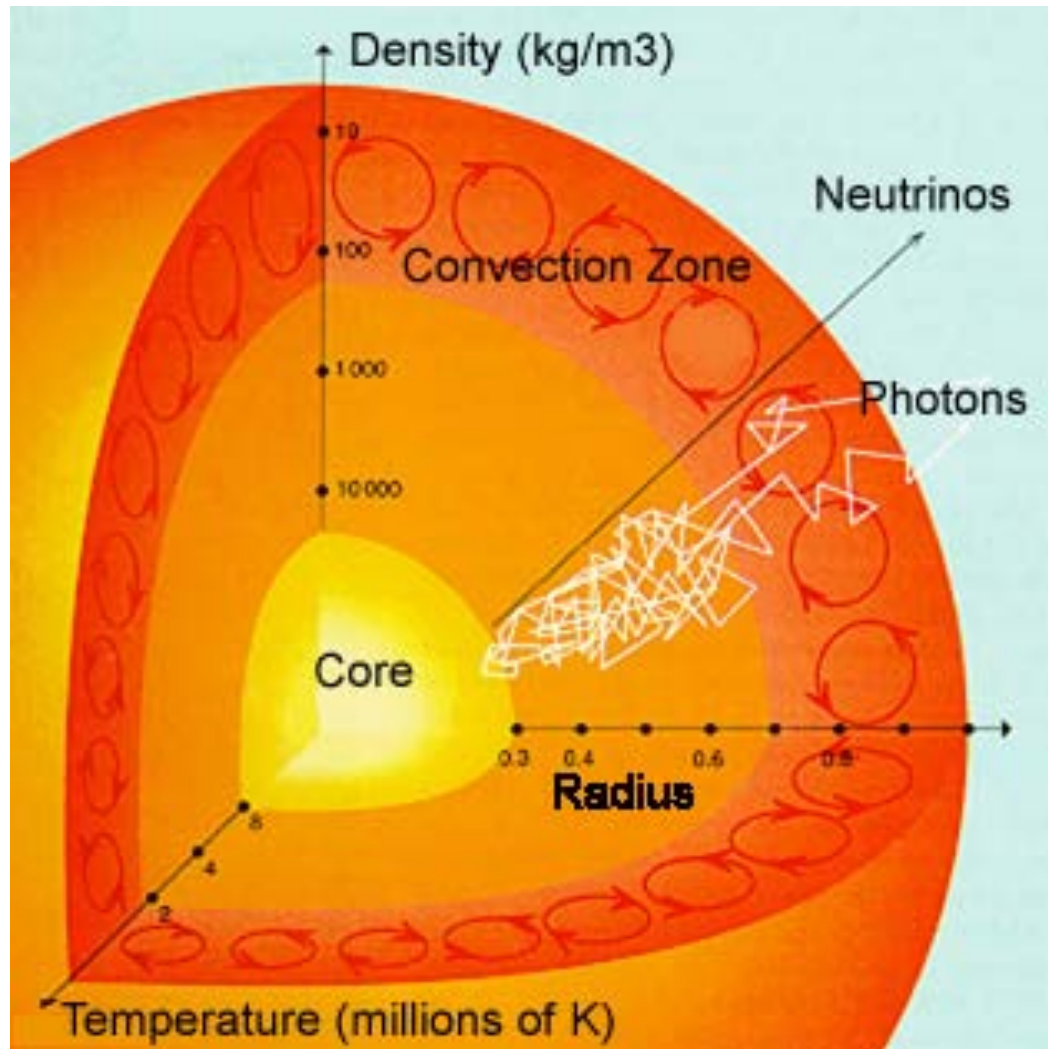
## Cycle magnétique solaire

Variations au cours  
du cycle:  
Facteur 2 en UV  
Jusqu'à 100 en X



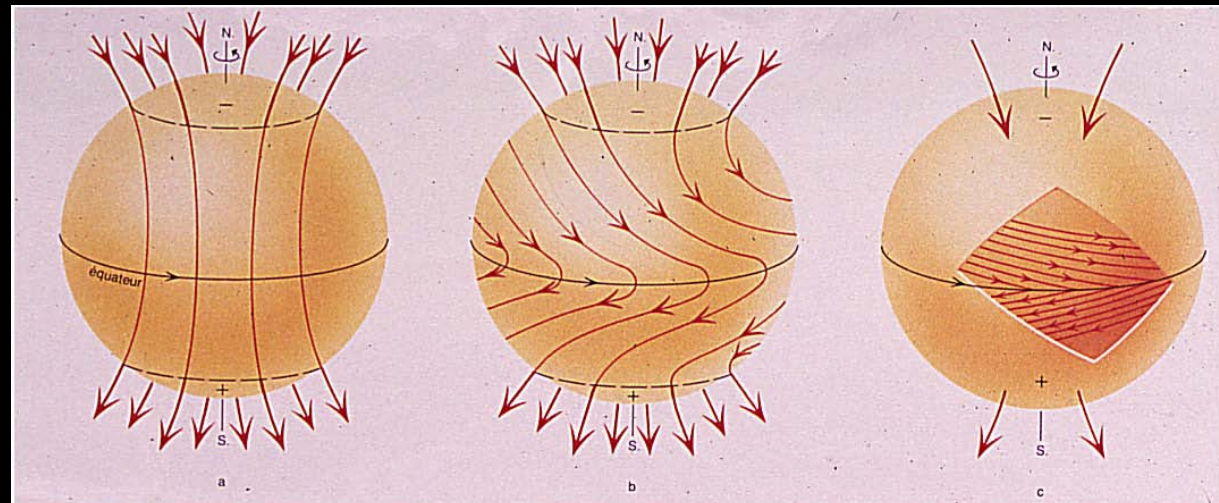


# La dynamo solaire

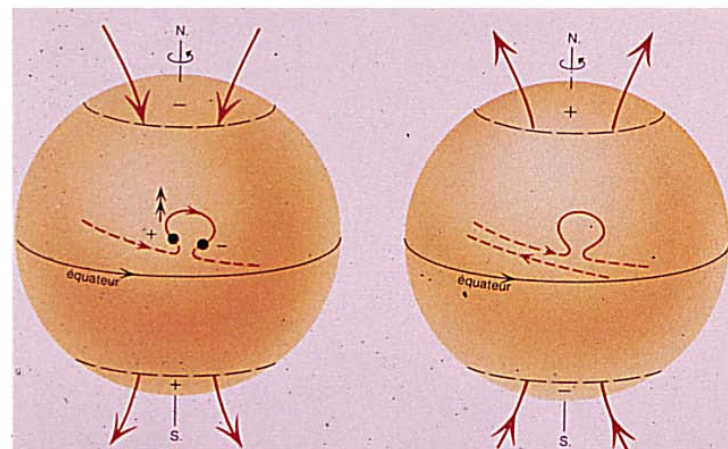


# Dynamo $\alpha - \Omega$

Transformation du champ  
Source par la  
Rotation différentielle



Régénération du  
Champ initial

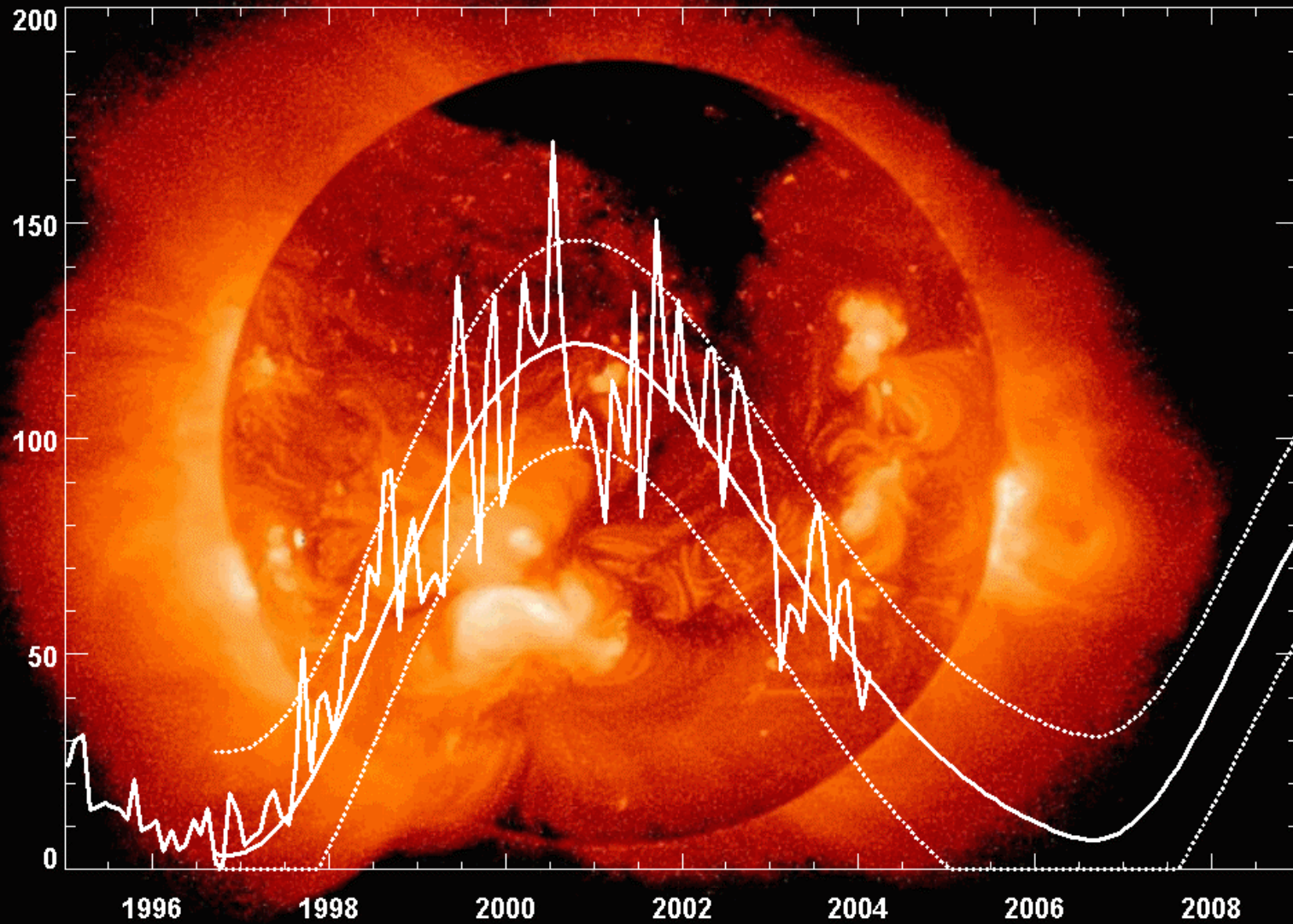


(Parker 1955, 1993)



# Des questions ouvertes

Cycle 23 Sunspot Number Prediction (March 2004)

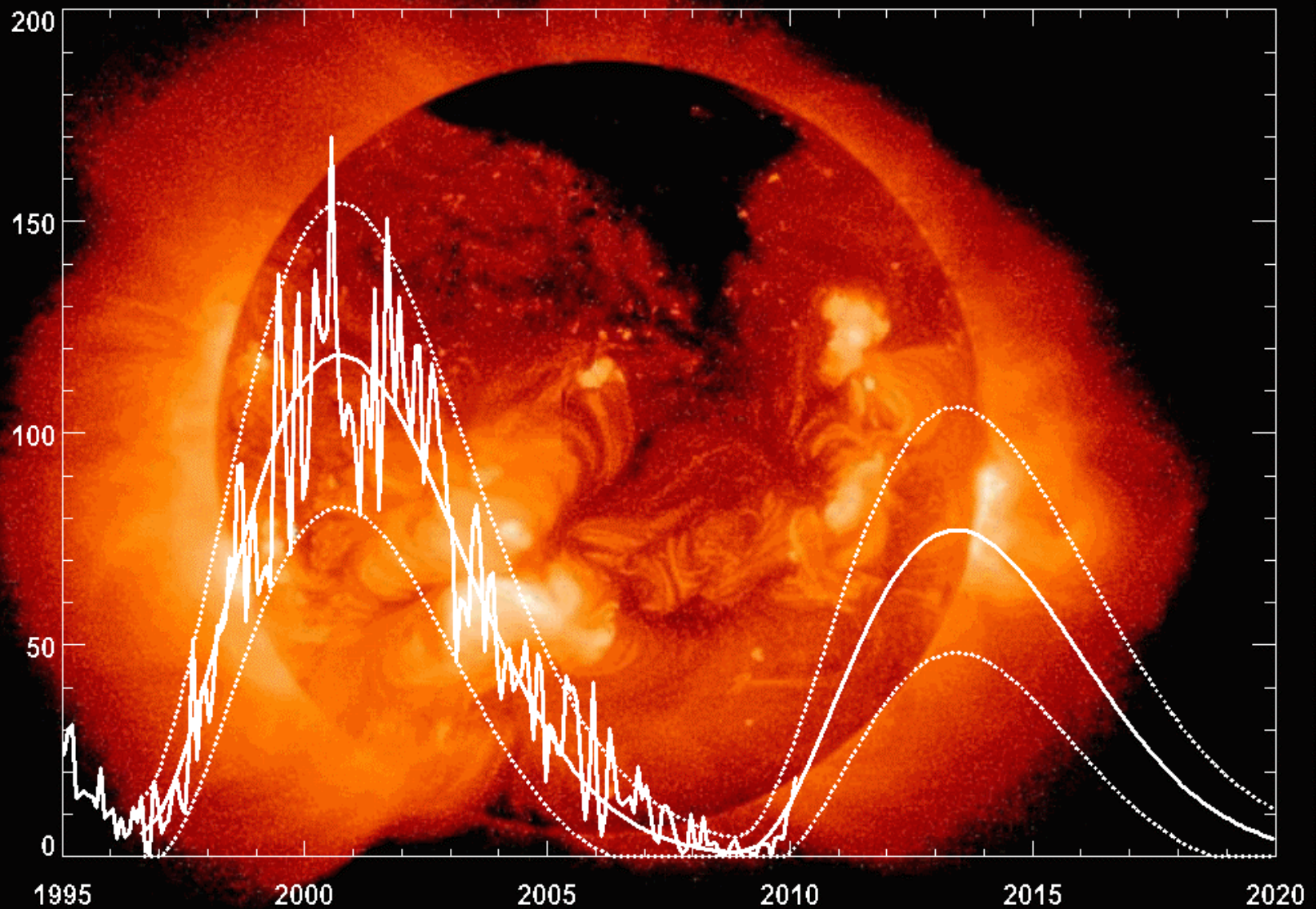


NASA/NSSTC/Hathaway

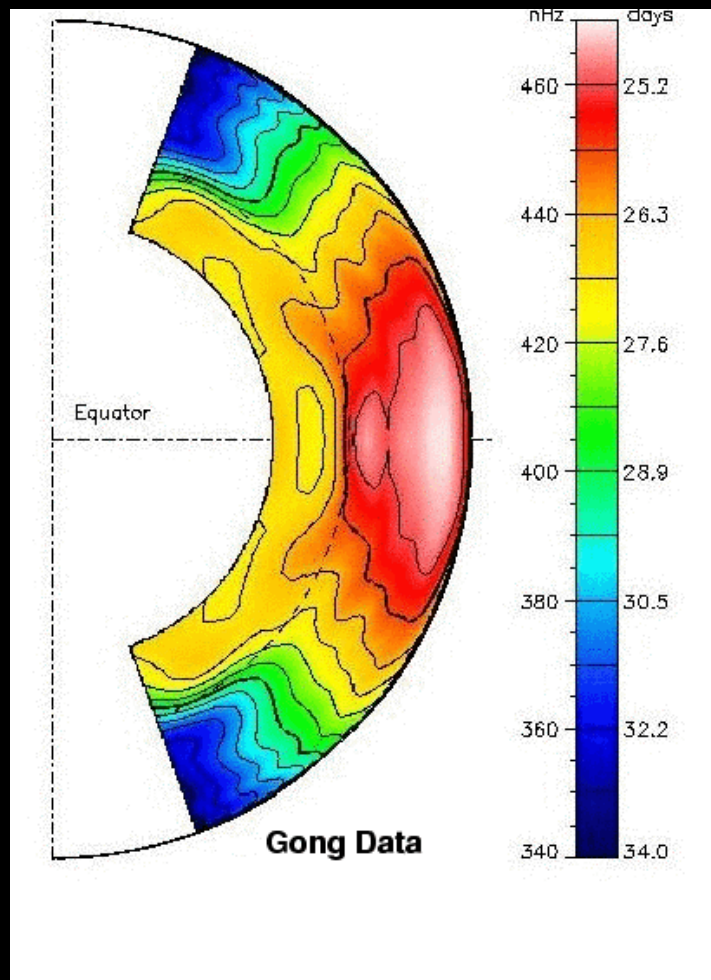


# Des questions ouvertes

Cycle 24 Sunspot Number Prediction (March 2010)



# Dynamos solaires et stellaires



- Création d'un champ toroidal à  $g^{\text{de}}$  échelle :  
**rotation différentielle** (Parker 1955)
  - tachocline seule ?
  - zone convective ?
- Régénération du champ poloidal :
  - convection cyclonique ? (Parker 1955)
  - résidus de régions actives
  - + circ. méridienne ? (Dikpati et al. 2004)
- Influence de la **rotation/masse** sur la géométrie/cyclicité?

# Le Soleil vu comme une étoile

Effet Zeeman  
En lumière **polarisée** **circulairement**

Etoile en rotation lente  
non résolue

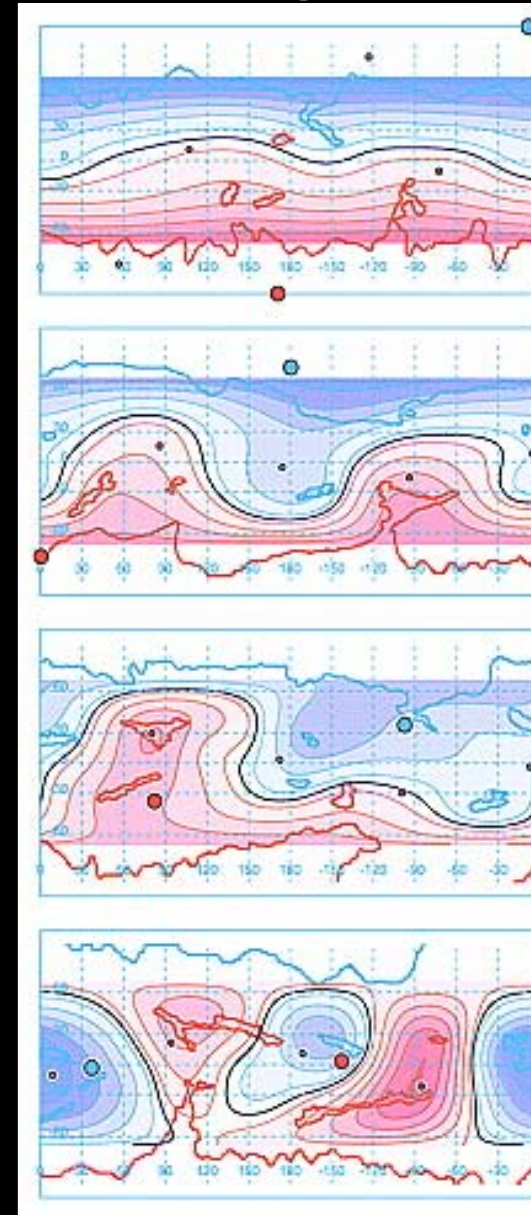


Annulation mutuelle des signatures  
de régions actives individuelles



Contribution dominante du champ  
à grande échelle

Champ mag solaire  
à g<sup>de</sup> échelle



Sanderson et al. (2003)

## Activité magnétique des jumeaux solaires

18 Scorpii :  
excellent jumeau solaire

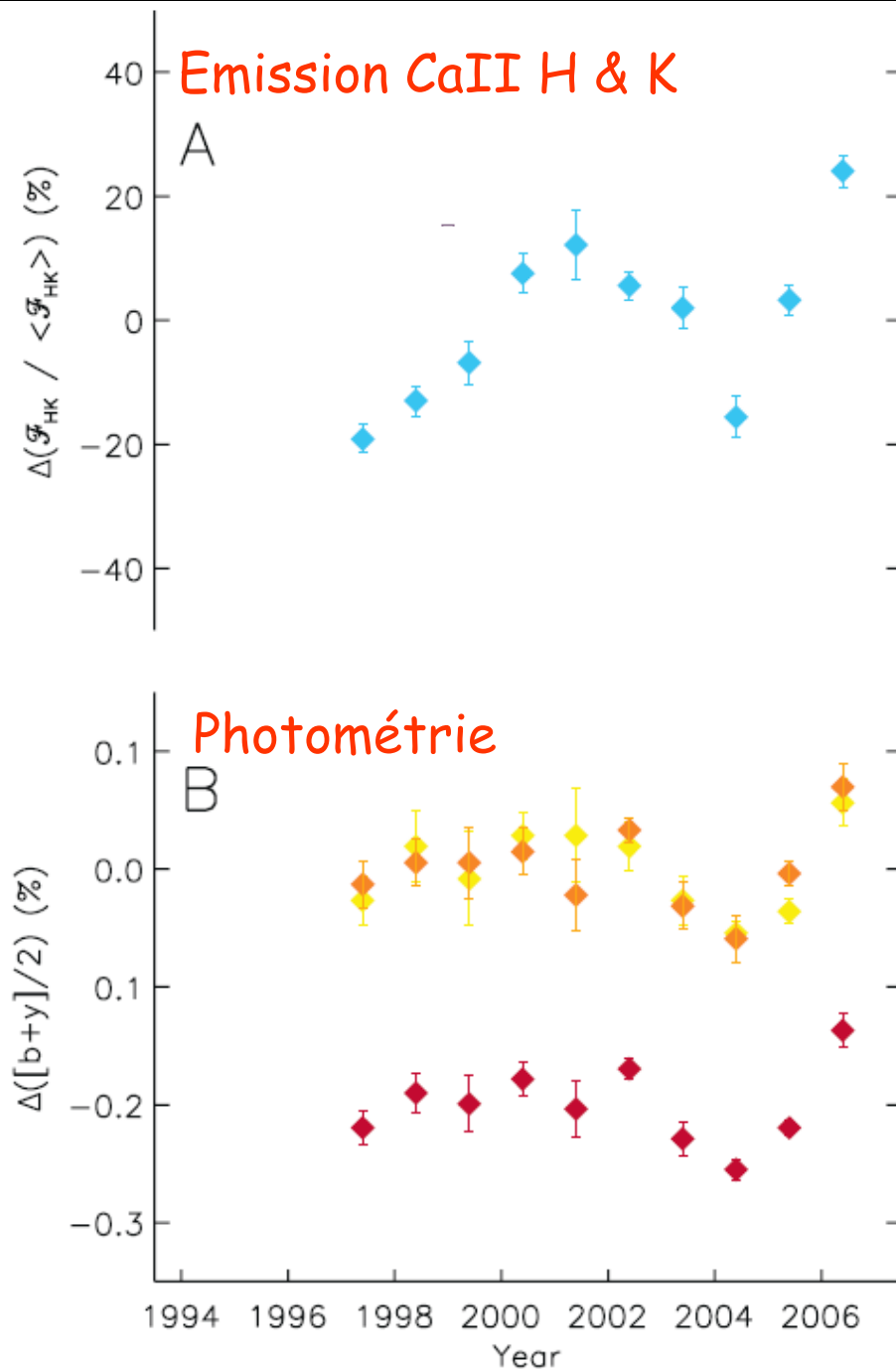
$$T_{\text{eff}} = 5791 \pm 50 \text{ K}$$

$$[M/H] = 0.03 \pm 0.03$$

$$\log(g) = 4.41 \pm 0.06$$

$$P_{\text{rot}} \sim 23 \text{ jours}$$

$$\text{Cycle} \sim 7 \text{ ans}$$



Hall et al. (2007)



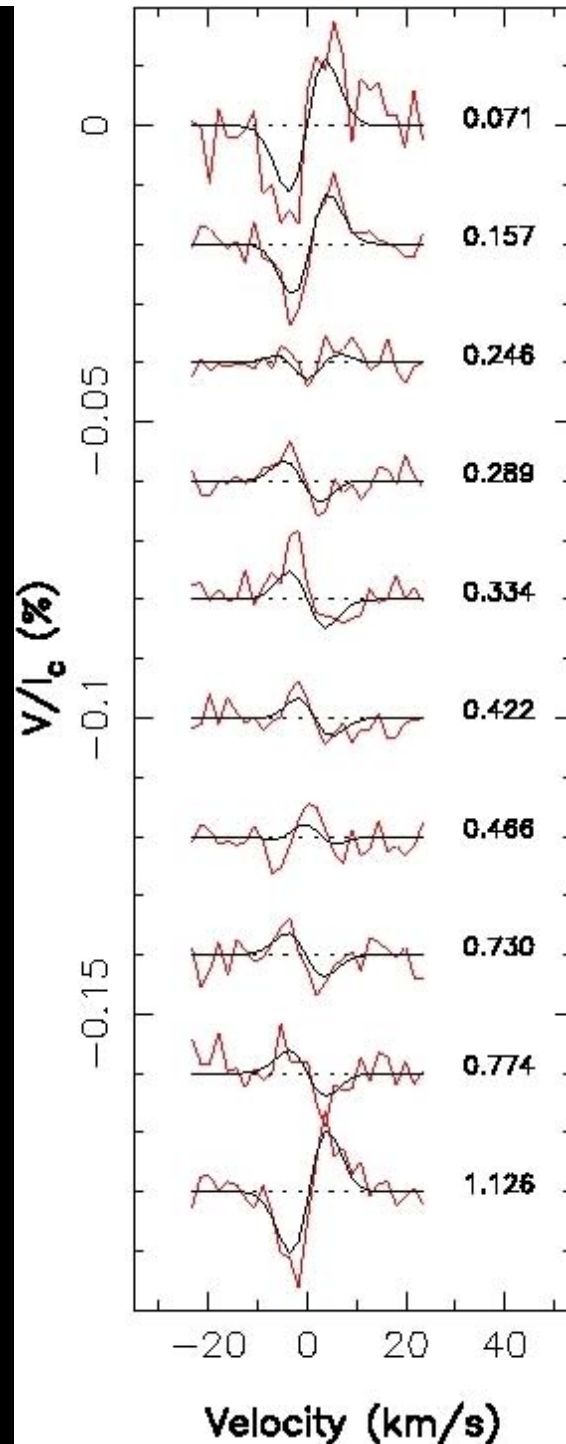


CFHT, Hawaii

TBL, Pic du Midi



# Géométrie magnétique des jumeaux solaires



18 Sco

Observations NARVAL, été 2007  
(proches du max d'activité)

Détection de signatures Zeeman  
modulées par la rotation

(Petit et al. 2008)

# Imagerie indirecte des surfaces stellaires

Pas de résolution spatiale directe sur les étoiles



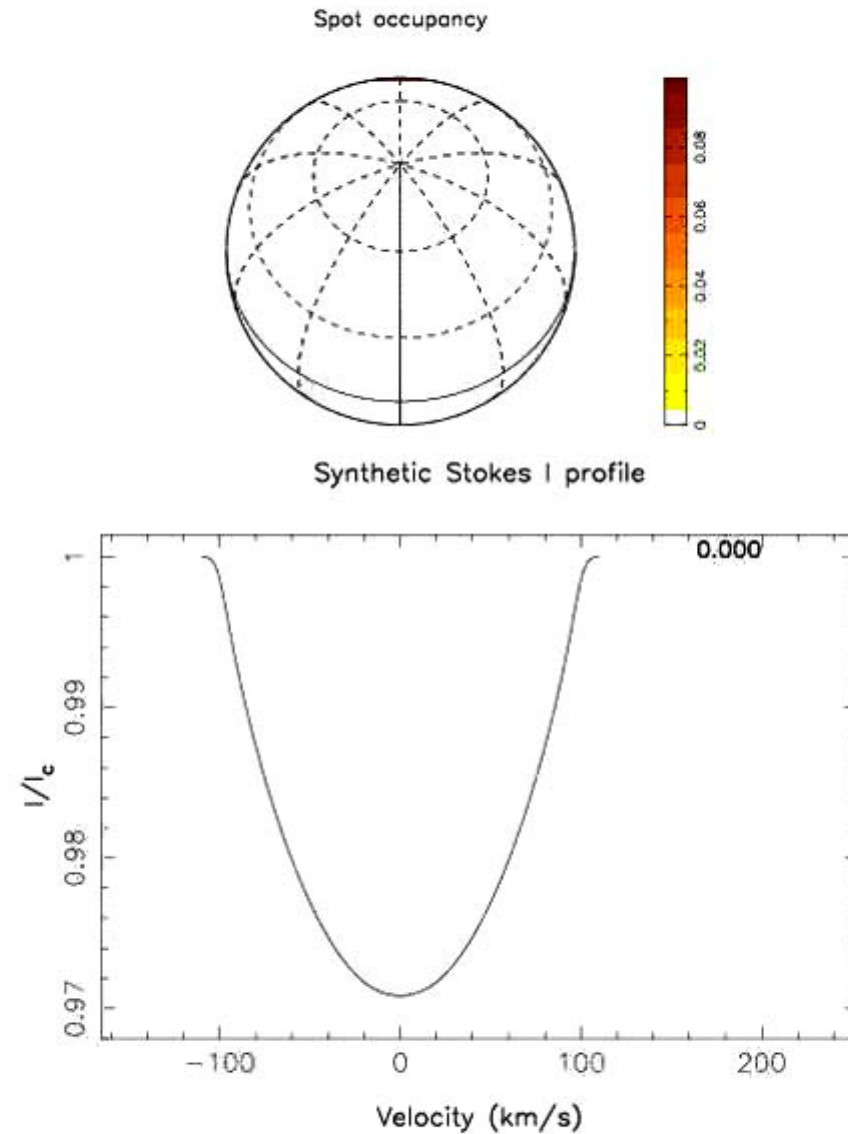
Techniques d'imagerie tomographique,  
inspirées de l'imagerie médicale



# Imagerie indirecte Des taches froides: Imagerie Doppler

Signature spectrale  
Des taches stellaires

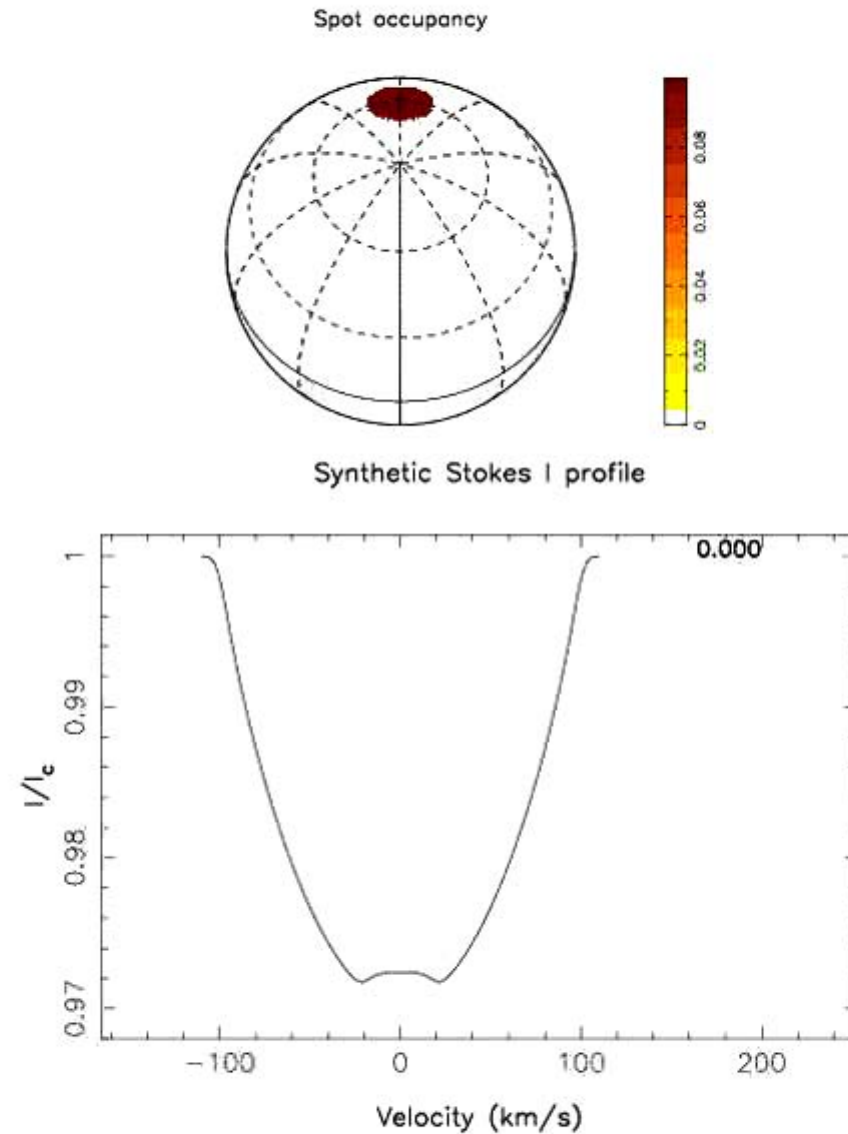
1. Tache à basse latitude



# Imagerie indirecte Des taches froides: Imagerie Doppler

Signature spectrale  
Des taches stellaires

1. Tache à haute latitude

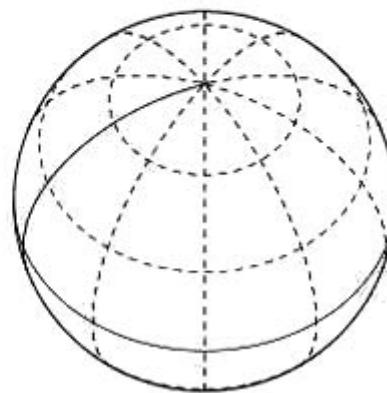


Série temporelle  
De spectres

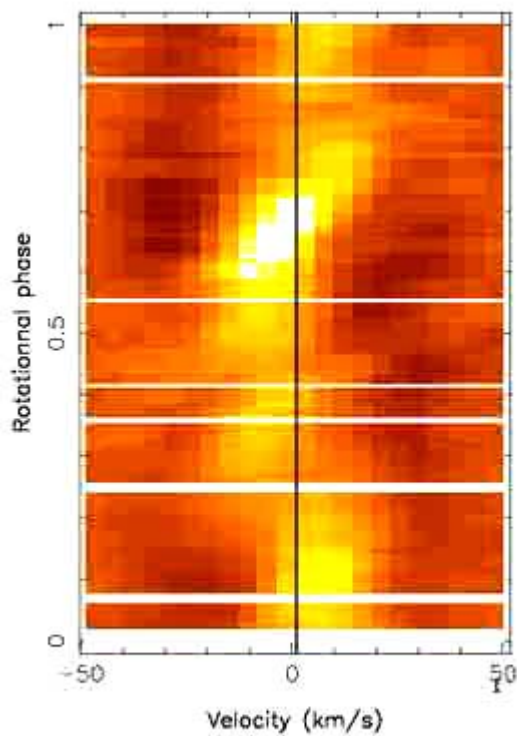


Carte reconstruite

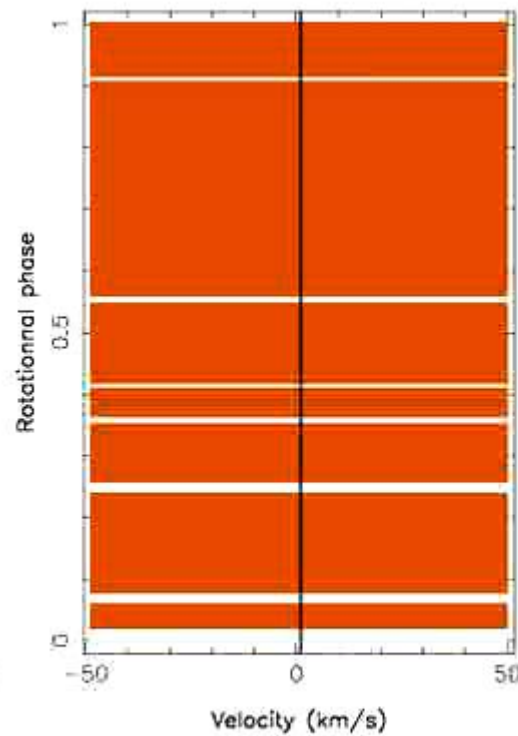
Spot occupancy



HR 1099, Stokes I profiles



Reconstructed Spectra

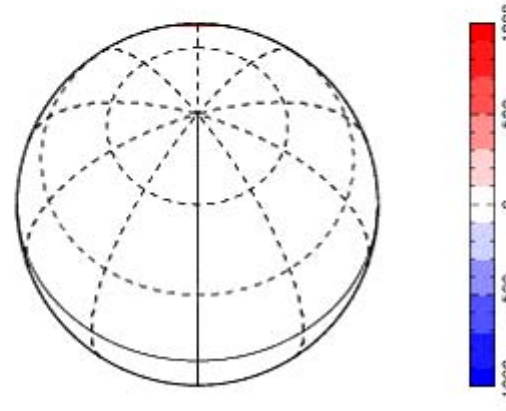


# Imagerie Zeeman-Doppler

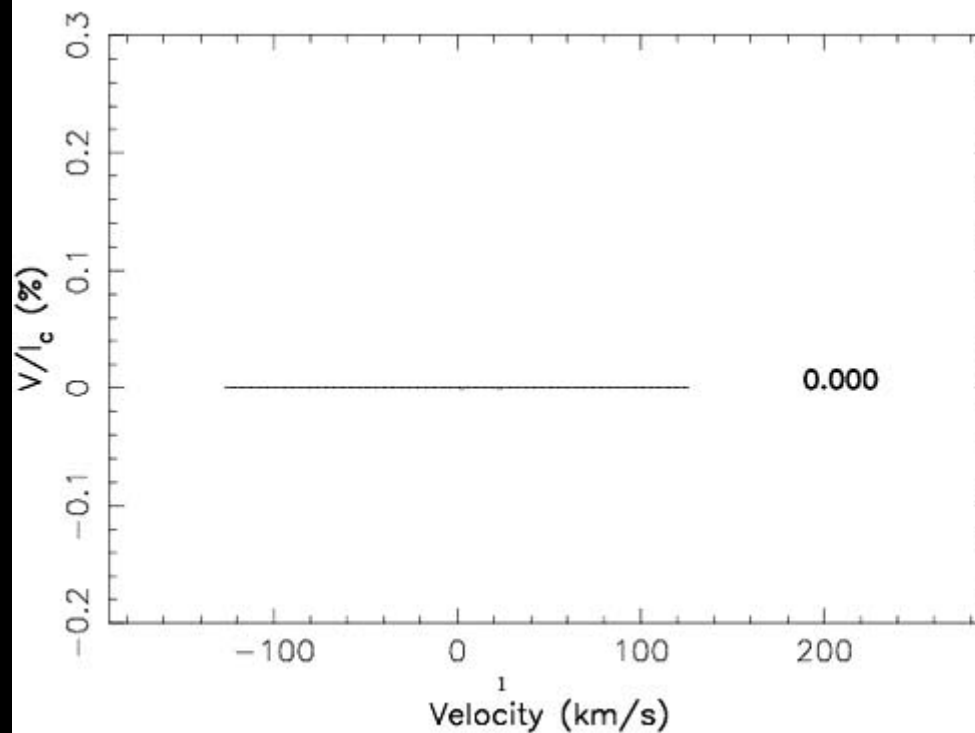
## Magnétogrammes stellaires

1. longitude des  
régions magnétiques

Radial magnetic field



Stokes V profile

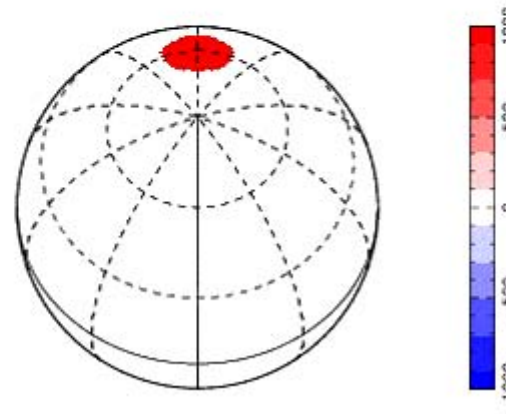


# Imagerie Zeeman-Doppler

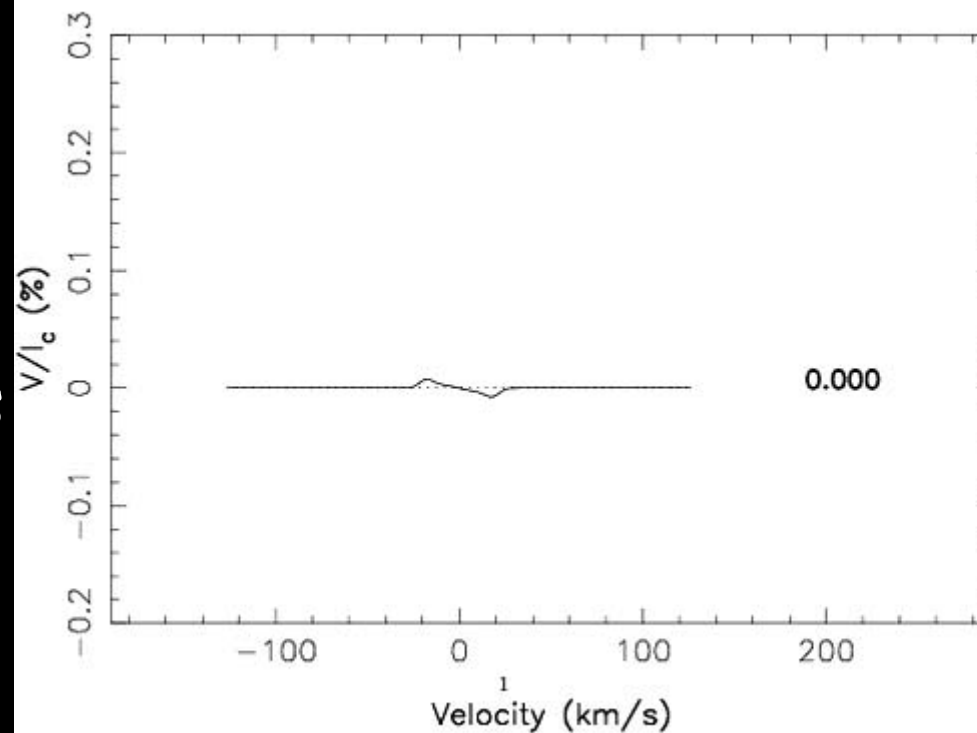
## Magnétogrammes stellaires

1. latitude des  
régions magnétiques

Radial magnetic field



Stokes V profile

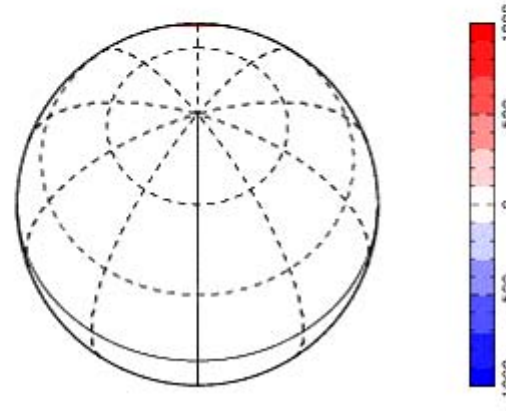


# Imagerie Zeeman-Doppler

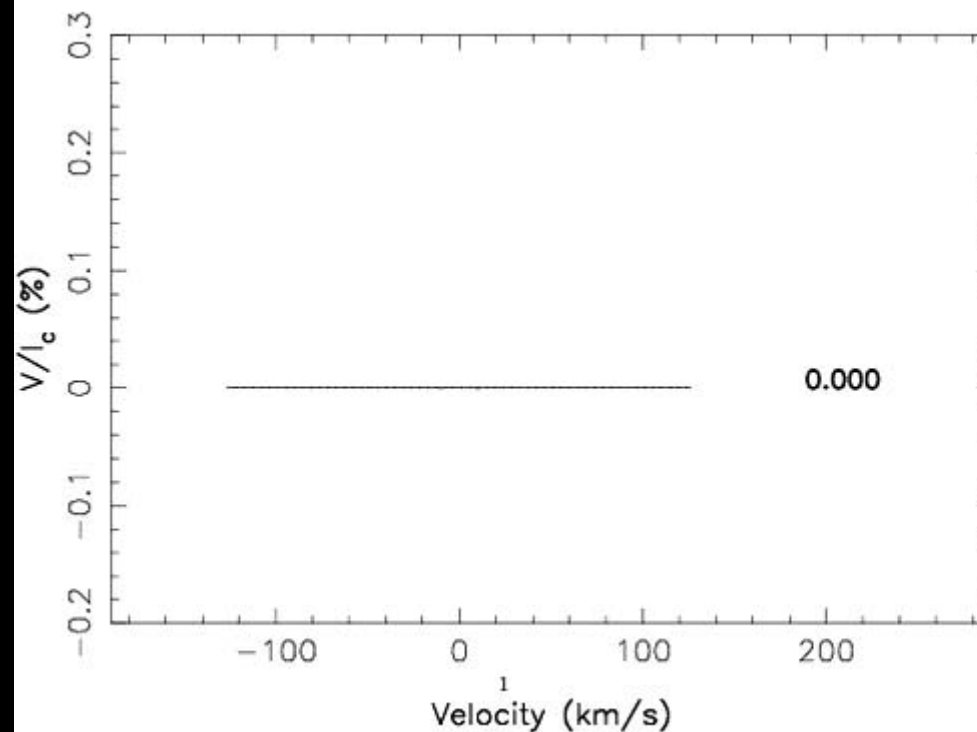
## Magnétogrammes stellaires

1. orientation des  
lignes de champ

Azimuthal magnetic field



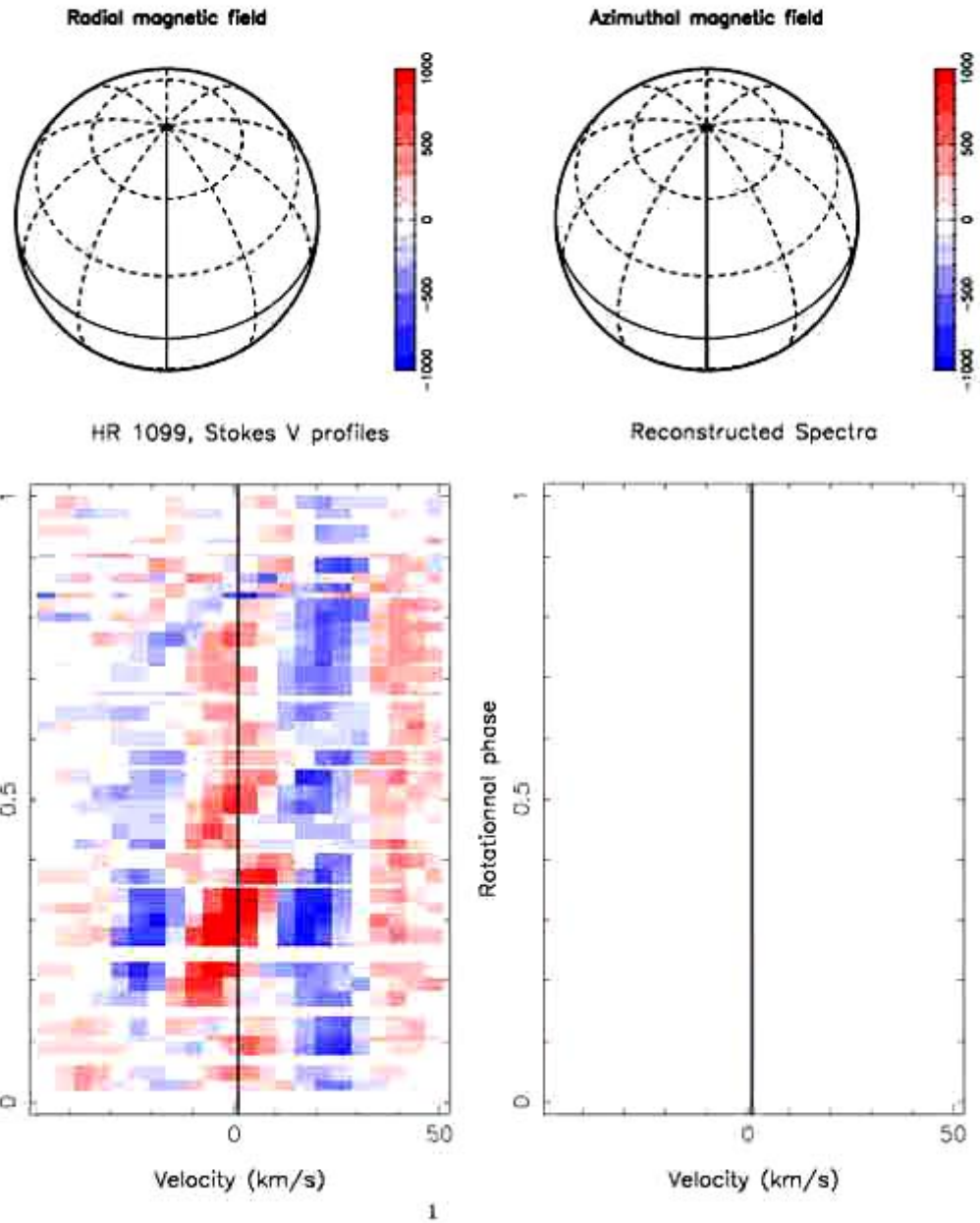
Stokes V profile



Série temporelle  
De spectres polarisés



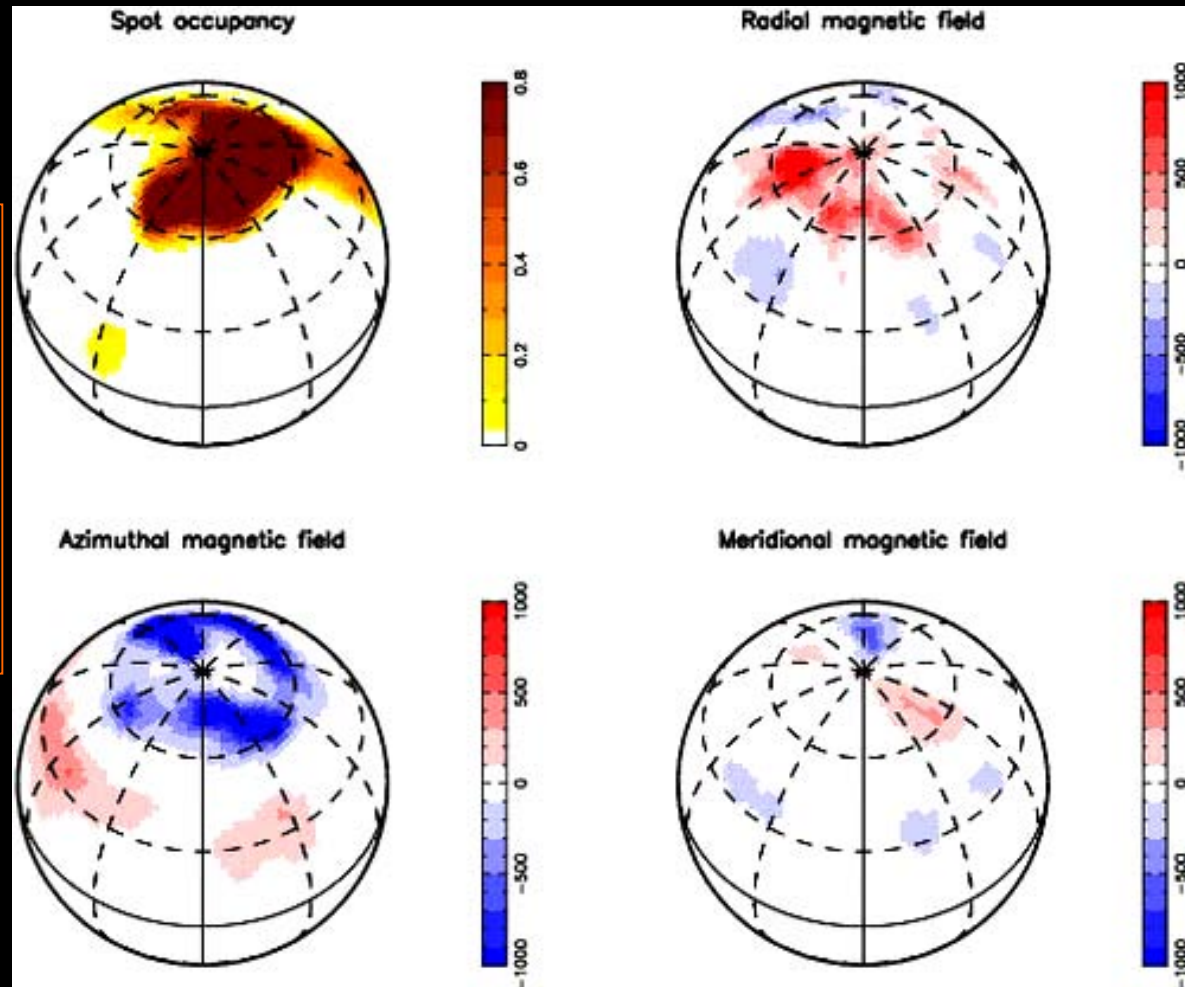
Carte reconstruite





# Magnétogrammes stellaires

HR 1099  
Binaire serrée  
Sous-géante K1 (+ G5 sec.)  
 $P_{\text{rot}} = 2.83$  days  
 $M \sim 1.0 M_{\text{sun}}$   
 $R \sim 3.7 R_{\text{sun}}$   
 $T \sim 4700$  K



(Petit et al. 2004)

# Géométrie magnétique des jumeaux solaires

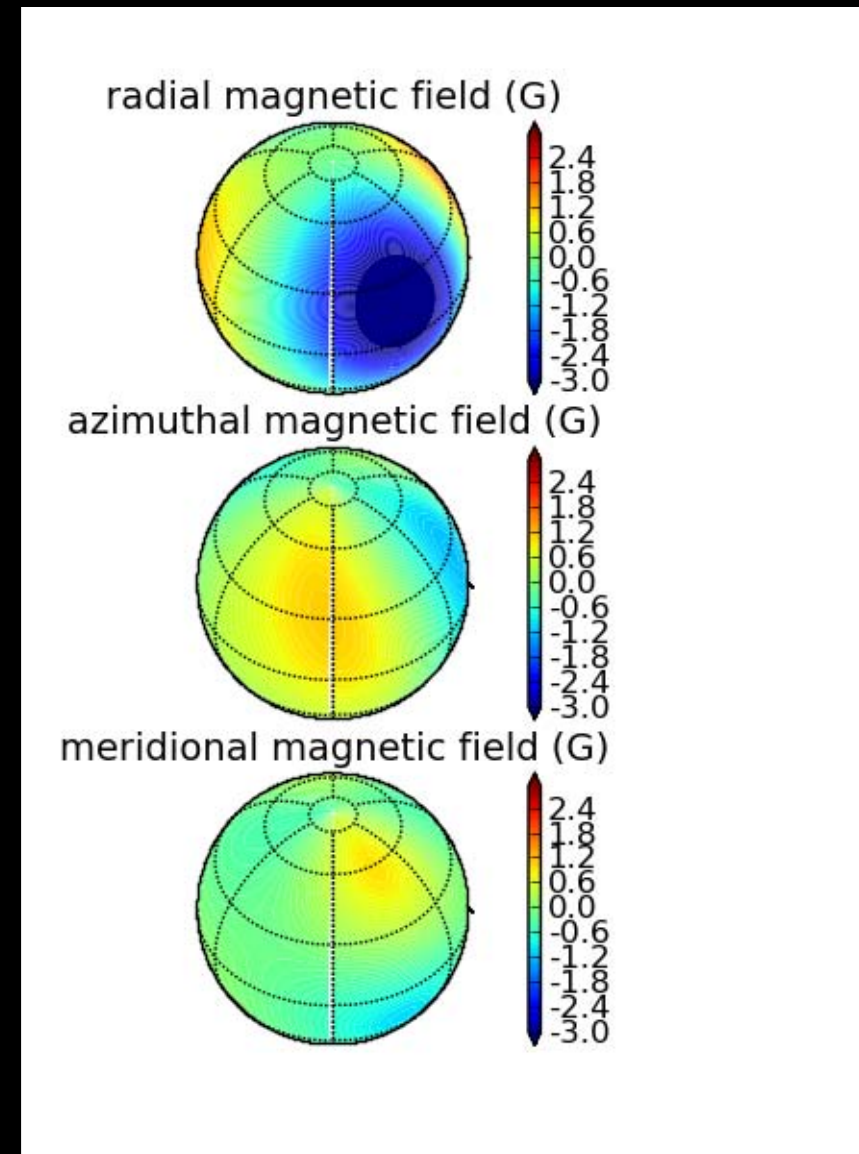
Reconstruction de la géométrie  
magnétique  
(imagerie Zeeman-Doppler)

**Champ moyen :**  $3.6 \pm 1 \text{ G}$

**Répartition de  $B^2$  :**

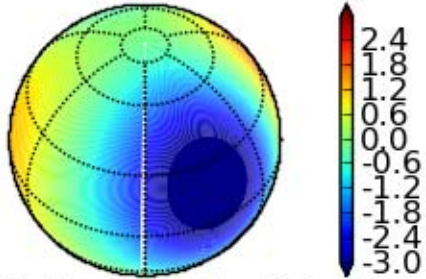
- 34% dipole
- 56% quadrupole
- 10% octopole

Géométrie réminiscente  
du maximum solaire

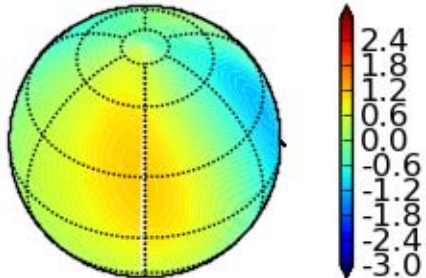


# Effet de la rotation

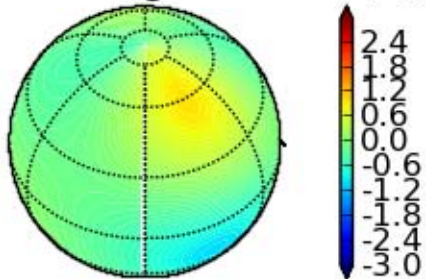
radial magnetic field (G)



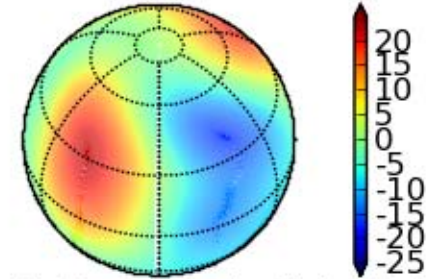
azimuthal magnetic field (G)



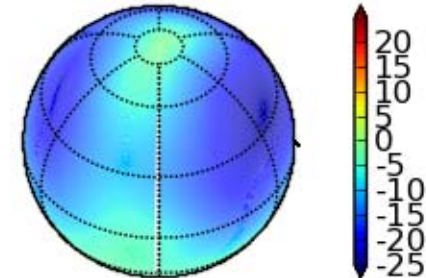
meridional magnetic field (G)



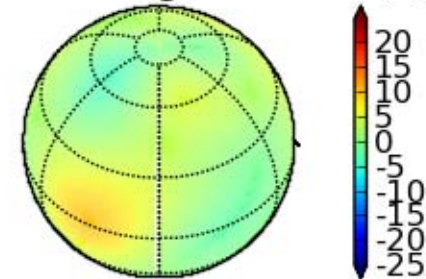
radial magnetic field (G)



azimuthal magnetic field (G)



meridional magnetic field (G)

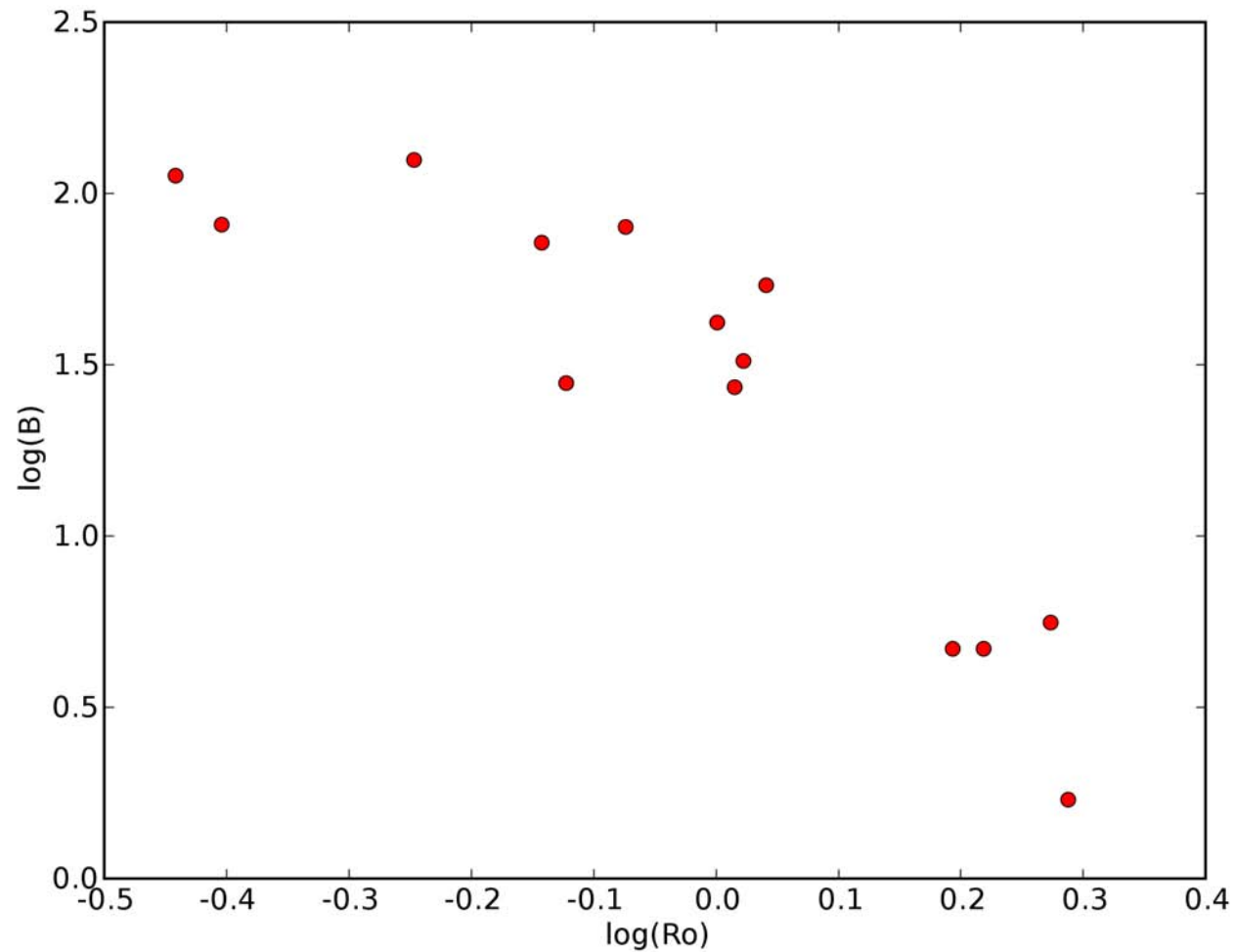


18 Sco, Prot = 23.5 jours

HD 190771, Prot = 8.8 jours

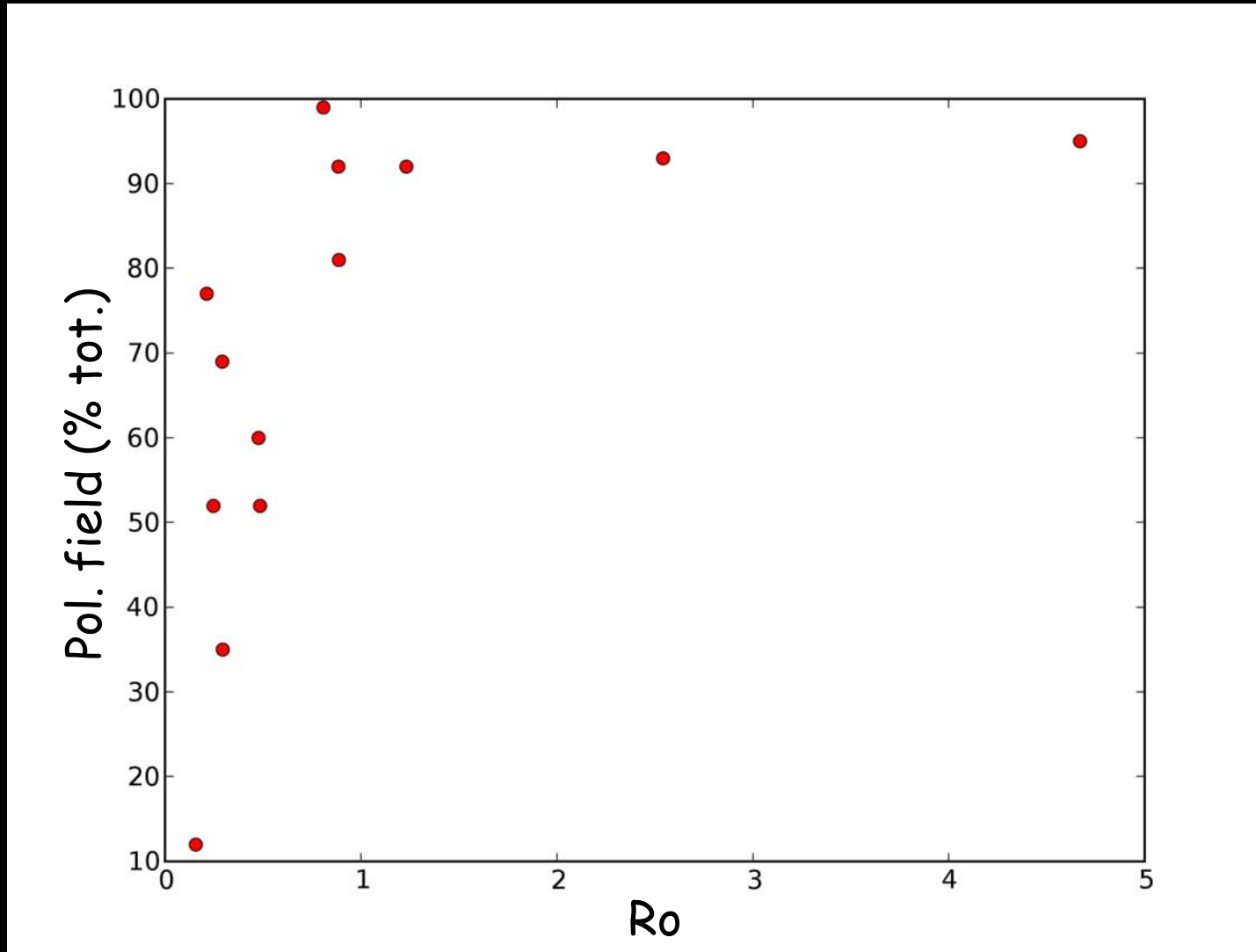
# Exploration du plan masse-rotation

Nombre de Rossby :  $Ro = P_{\text{rot}} / \tau_{\text{conv}}$



# Exploration du plan masse-rotation

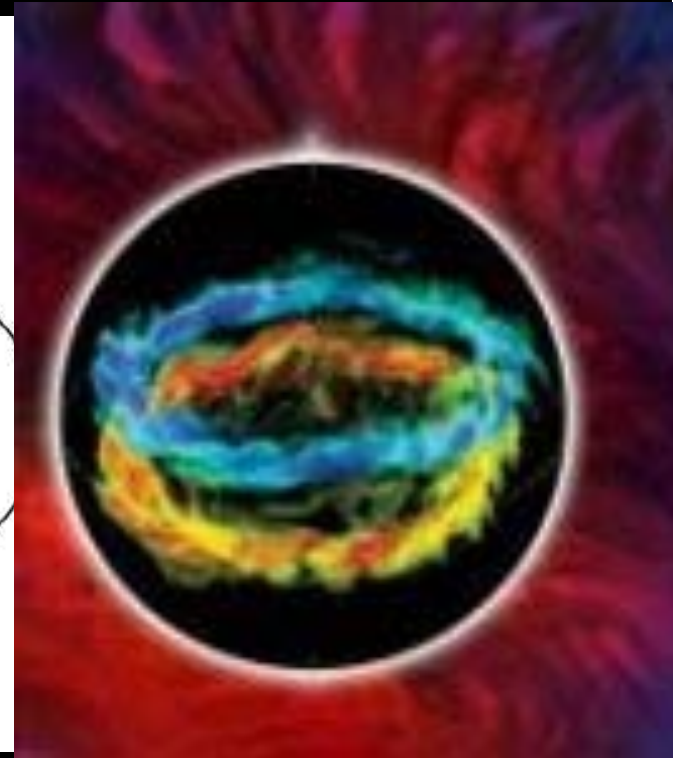
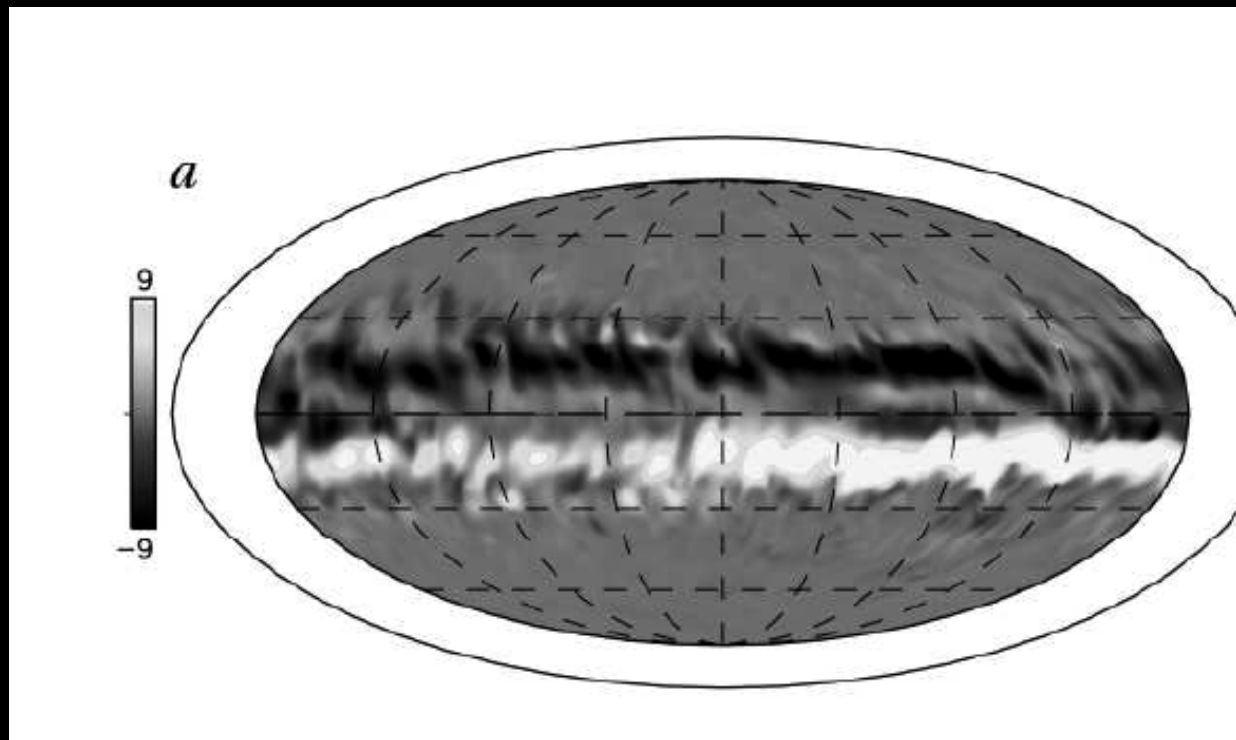
Nombre de Rossby :  $Ro = P_{rot} / \tau_{conv}$





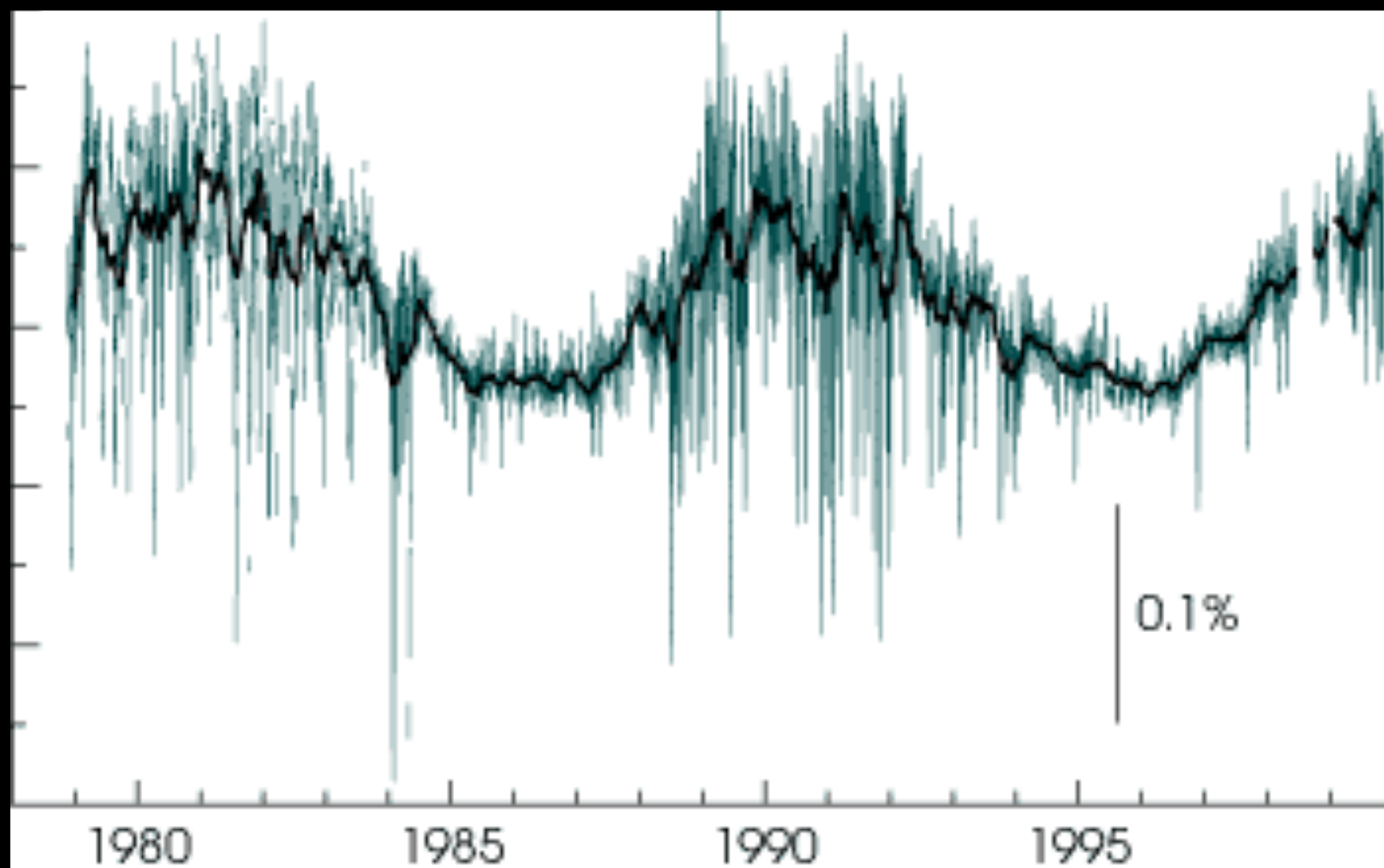
# Simulations numériques de dynamos

Champ toroidal à  $g^{\text{de}}$  échelle dans la ZC pour  $\Omega = 3\Omega_{\text{sun}}$

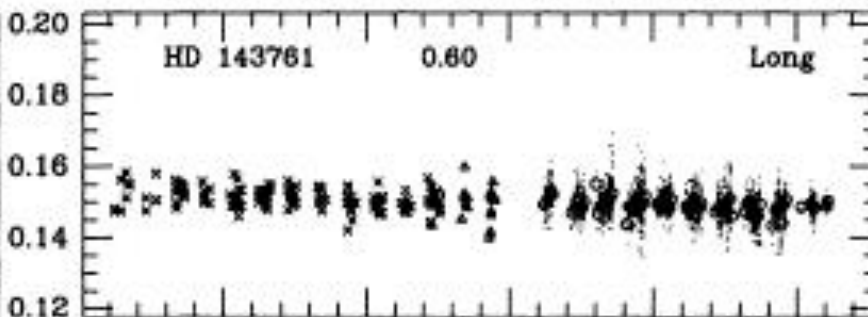
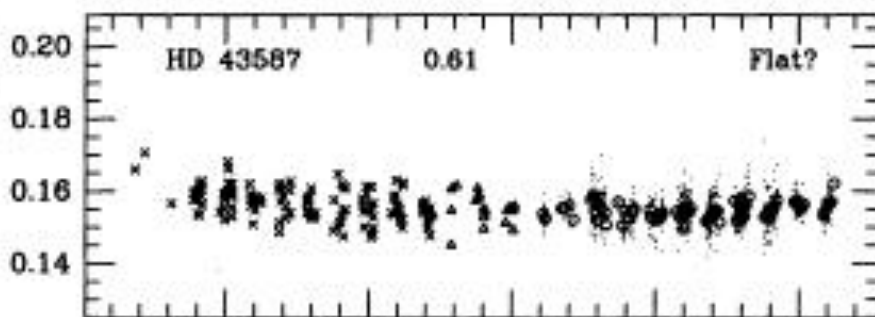
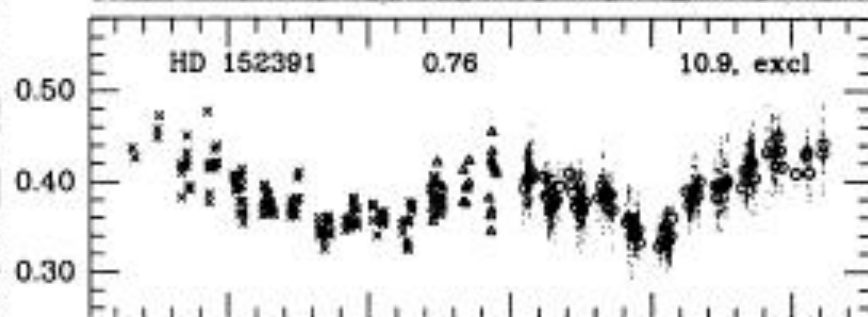
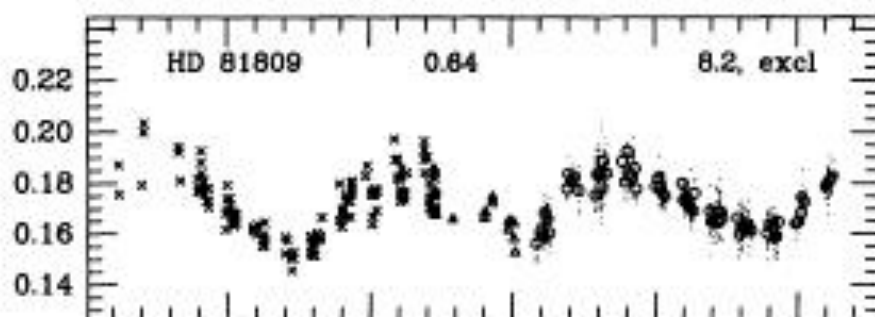
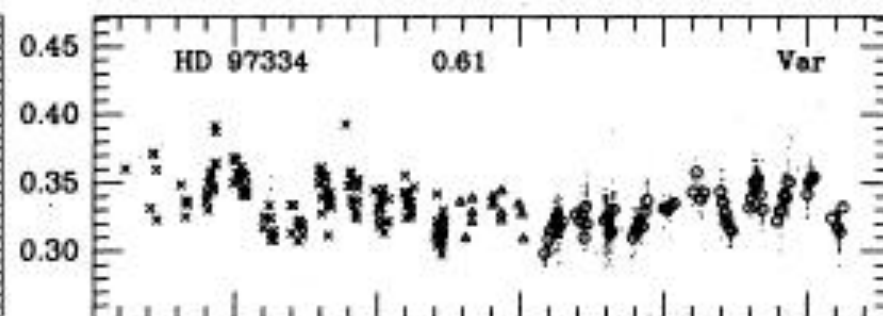
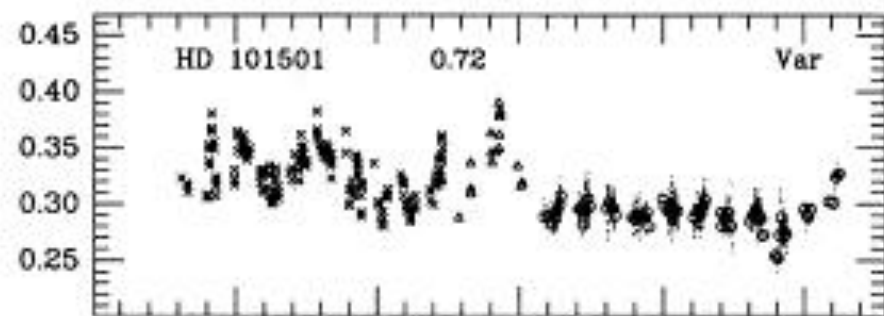


Brown et al. 2007

# Cycles magnétiques stellaires



S, relative Ca II H + K flux

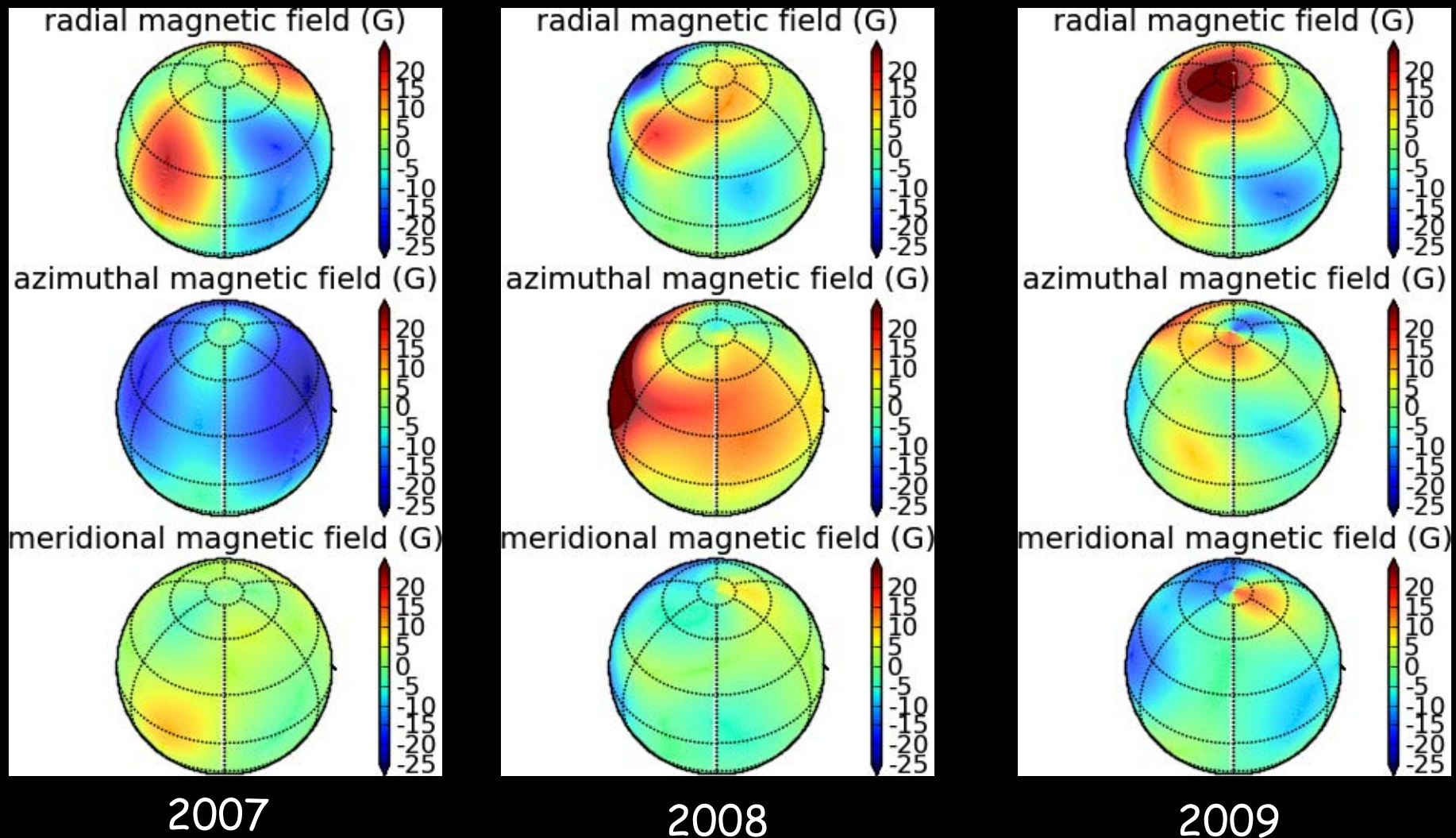


Year

Year

# Cycles magnétiques stellaires

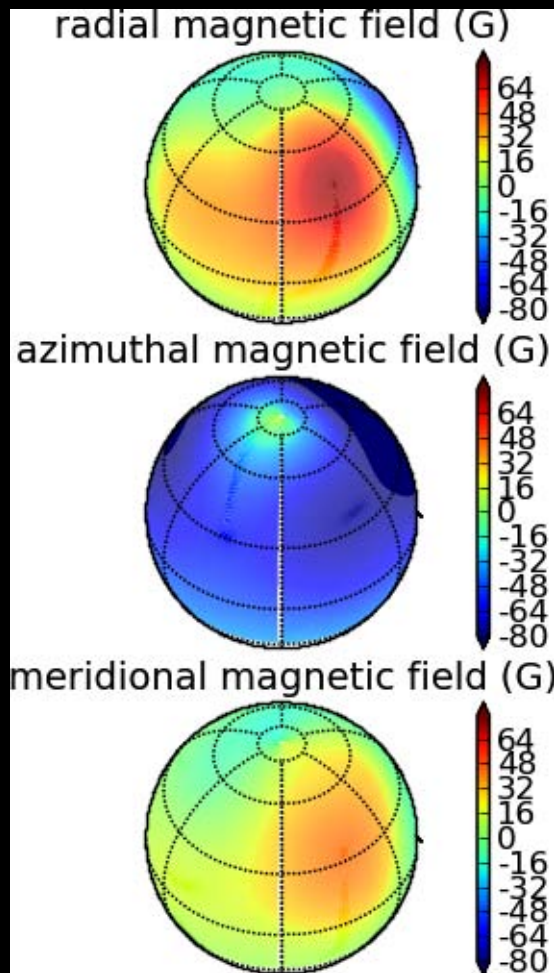
HD 190771 (Prot = 8.8 j) : renversement de polarité du champ



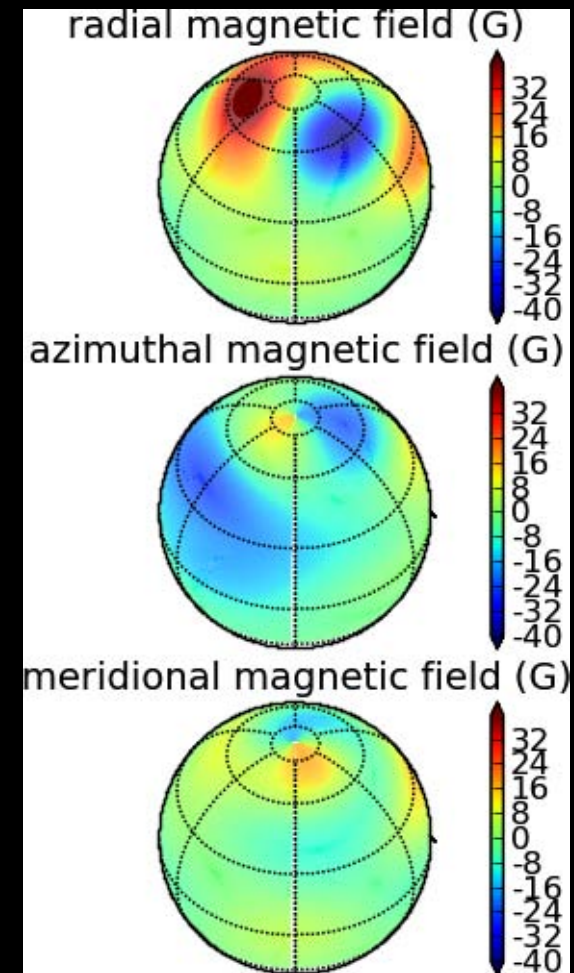


# Cycles magnétiques stellaires

$\xi$  Boo A (Prot = 6.4 j,  $T_{\text{eff}} = 5500$  K) : baisse de l'activité magnétique



2007



2010

## Perspectives

- Suivi à long terme de l'échantillon  
Existence et nature des **cycles magnétiques** ?
- Proche IR (**SPIROU@CFHT**): meilleure sensibilité Zeeman  
accès aux étoiles très froides
- Simulations numériques de dynamo : code PENCIL