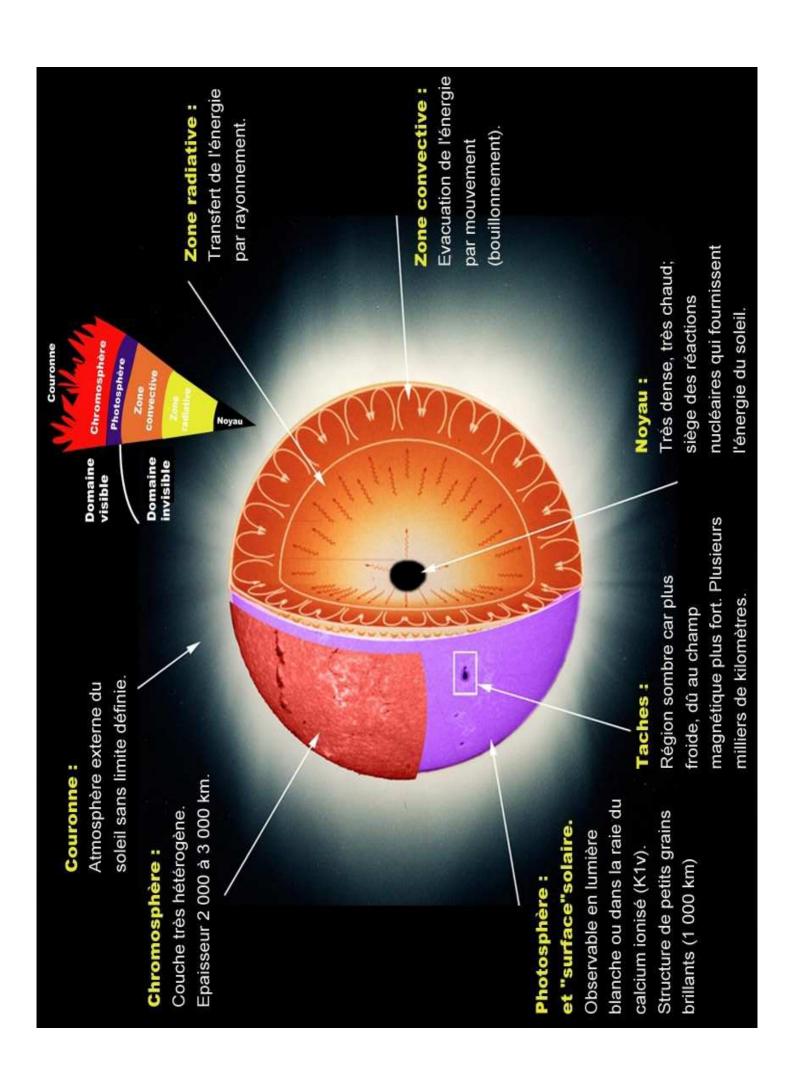


solaire...



...et stellaire

Présentation des principales caractéristiques du Soleil



Quelques constantes solaires

 $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg masse solaire}$

 $R_s = 696000$ km rayon solaire

g_s = 275 m/s² accélération de la pesanteur à la surface solaire

L = 3.86 10²⁶ W luminosité solaire (luminosité d'1 m² : 6.3 10⁷ W)

1 UA = 149600000 km distance moyenne Terre/Soleil

T_e = 5800 K température effective

Composition: H 92.1% et He 7.8%, autres éléments (O, C, N, Fe, Mg, Ca...) en trace (0.1%)

Rotation : 26 jours à l'équateur, 31 jours aux pôles, inclinaison de 6° sur l'écliptique

Photosphère solaire : 0 → 500 km d'altitude

Pression moyenne P = 10^3 Pa et variation de 0 à 500 km : $1.3 \cdot 10^4$ Pa $\rightarrow 10^2$ Pa

T moyenne = 5000 K et variation de 0 à 500 km : 6400 K \rightarrow 4170 K

Densité moyenne $N_H = 10^{22} \text{ m}^{-3}$ et variation de ρ de 0 à 500 km : 3 10^{-4} kg m⁻³ \rightarrow 3 10^{-6} kg m⁻³

Densité moyenne $N_e = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ et variation de 0 à 500 km : 5 $10^{19} \text{ m}^{-3} \rightarrow 10^{17} \text{ m}^{-3}$

Chromosphère solaire : 500 km → 2000 km d'altitude

Pression moyenne P = 1 Pa et variation de 500 à 2000 km : 10² Pa → 10⁻² Pa

T moyenne = 8000 K et variation de 500 à 2000 km : 4170 K → 10000 K

Densité moyenne N_H = 10^{19} m⁻³ et variation de ρ de 500 à 2000 km : $3 \cdot 10^{-6}$ kg m⁻³ $\rightarrow 1.8 \cdot 10^{-10}$ kg

m⁻³

Densité moyenne $N_e = 10^{17}$ m⁻³ et variation de 500 à 2000 km : 10^{17} m⁻³ \rightarrow 4 10^{16} m⁻³

Couronne solaire : 2000 km → milieu interplanétaire

Conductivité électrique $\sigma = 10^{-3} \text{ T}^{3/2} \text{ MKSA}$, T en Kelvins Conductivité thermique $k_{II} = 10^{-11} \text{ T}^{5/2} \text{ MKSA, T en Kelvins}$

- Basse couronne typique:

$$n_p = n_e = 5 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3} \text{ T} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$P = 2 \cdot 10^{-4} Pa$$

$$\rho = 10^{-12} \text{ kg m}^{-3}$$

- à 1 rayon solaire :

$$n_p = n_e = 10^{12} \text{ m}^{-3}$$
 T = 1.5 10⁶ K

$$P = 4 \cdot 10^{-7} Pa$$

$$\rho = 2 \cdot 10^{-15} \text{ kg m}^{-3}$$

- à 1 UA (orbite terrestre):

$$n_p = n_e = 10^7 \text{ m}^{-3}$$
 $T_p = 4 \cdot 10^4 \text{ K}$

$$T_e = 1.5 \ 10^5 \ K$$

$$\rho = 10^{-20} \text{ kg m}^{-3}$$

vitesse du vent solaire à la Terre: 400 km/s en moyenne

- milieu interplanétaire à grande distance: n_p = n_e = 10⁶ m⁻³

Quelques constantes universelles

C = 3 10⁸ m/s vitesse de la lumière dans le vide e = 1.6 10⁻¹⁹ C charge de l'électron

 $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg masse du proton}$

 $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg masse de l'électron}$

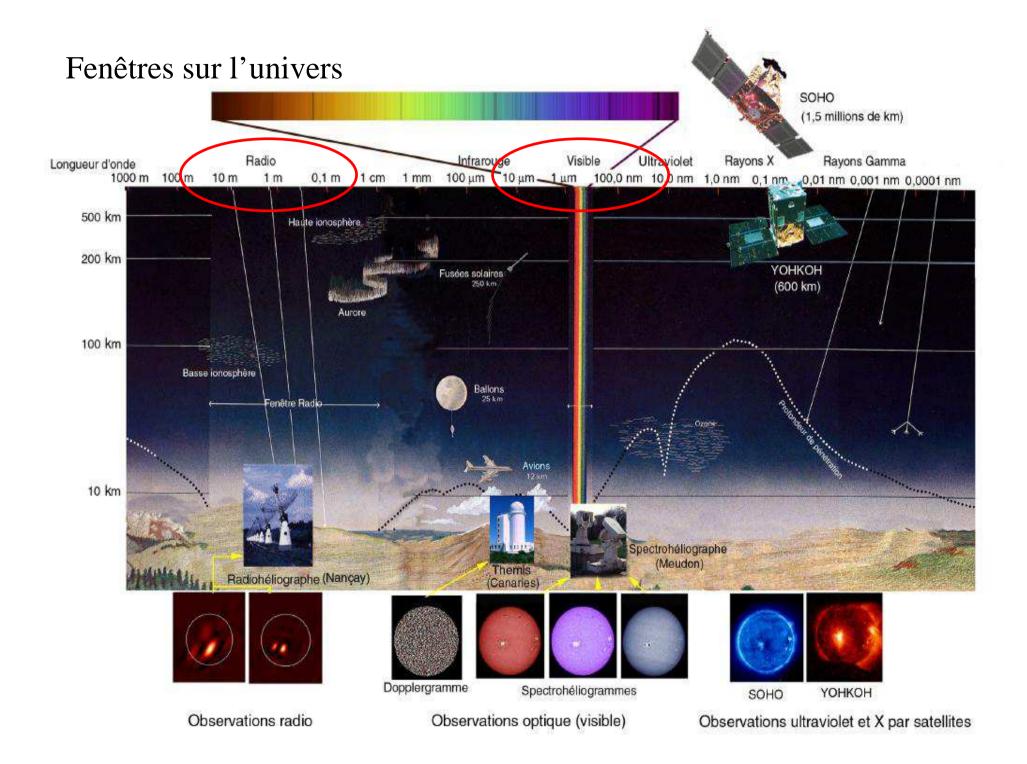
h = 6.62 10⁻³⁴ MKSA constante de Planck

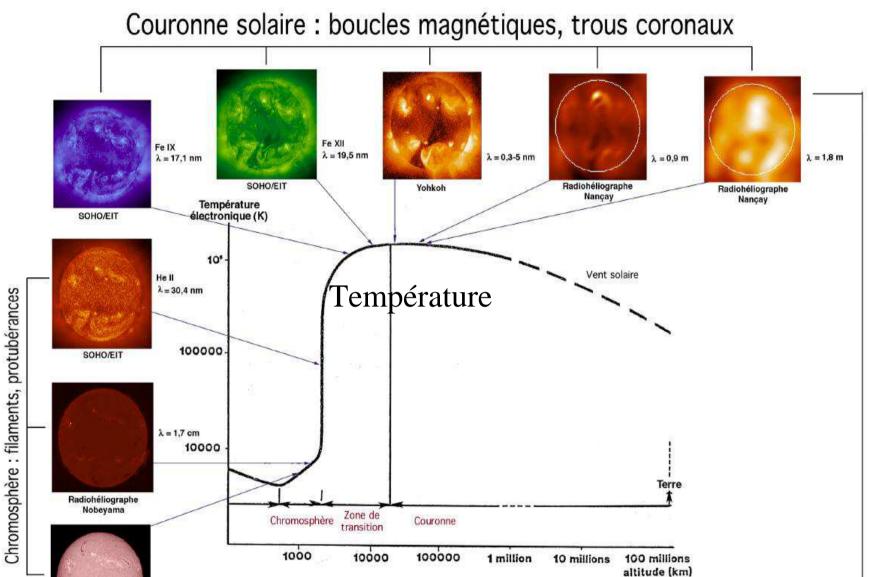
k = 1.38 10⁻²³ MKSA constante de Boltzmann

 μ_0 = 4 π 10⁻⁷ MKSA perméabilité magnétique du vide

G = 6.67 10⁻¹¹ MKSA constante gravitationnelle

 $1/(4 \pi \epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ MKSA}, \epsilon_0 \text{ permittivité du vide}$





Distance au soleil

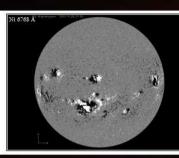
 $\lambda = 656,3 \text{ nm}$

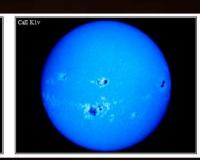
Spectroheliographe Meudon

Tous les domaines de longueurs d'onde : activité solaire, éruptions

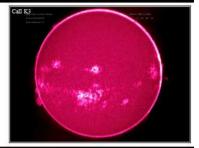
Vision du soleil le 28 Octobre 2003 dans toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique



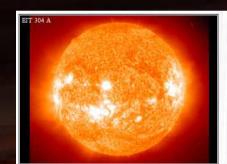


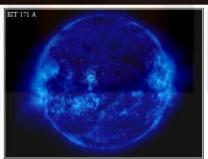


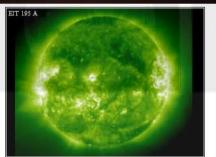


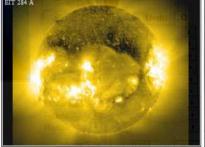


Domaine optique (raies + magnétogramme)





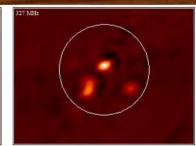




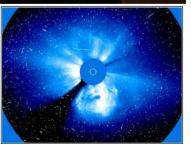
Domaine UV (raies, satellite SOHO-ESA/NASA)



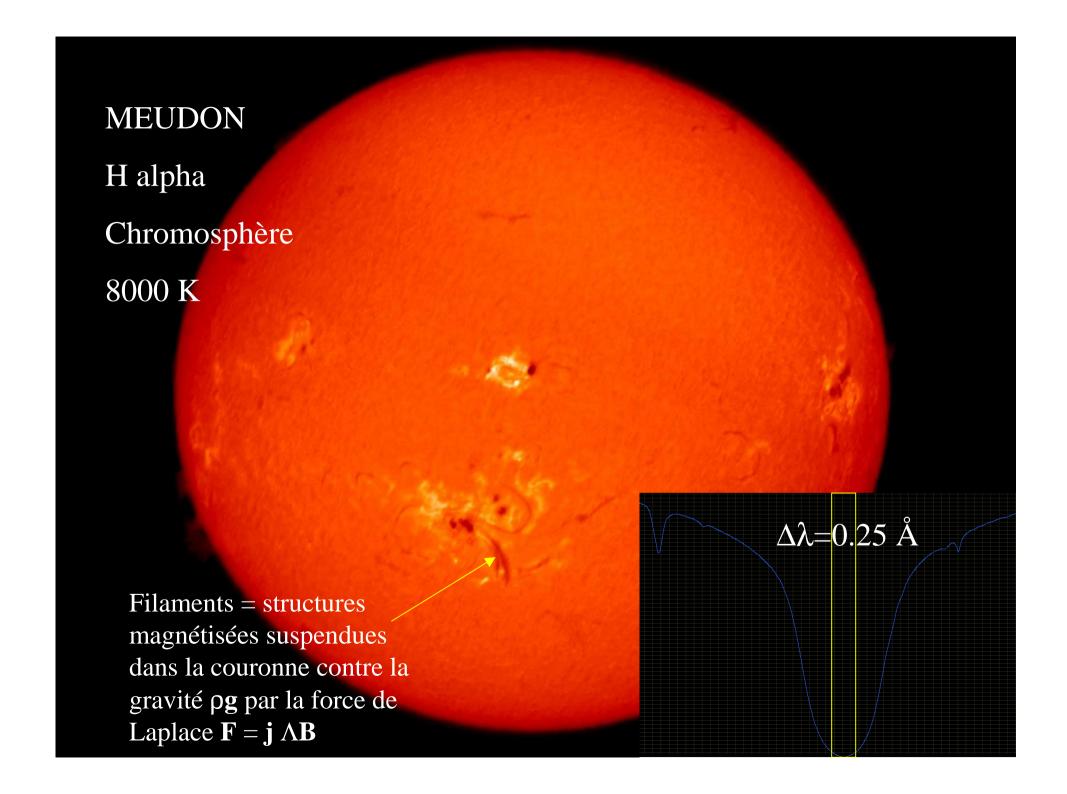


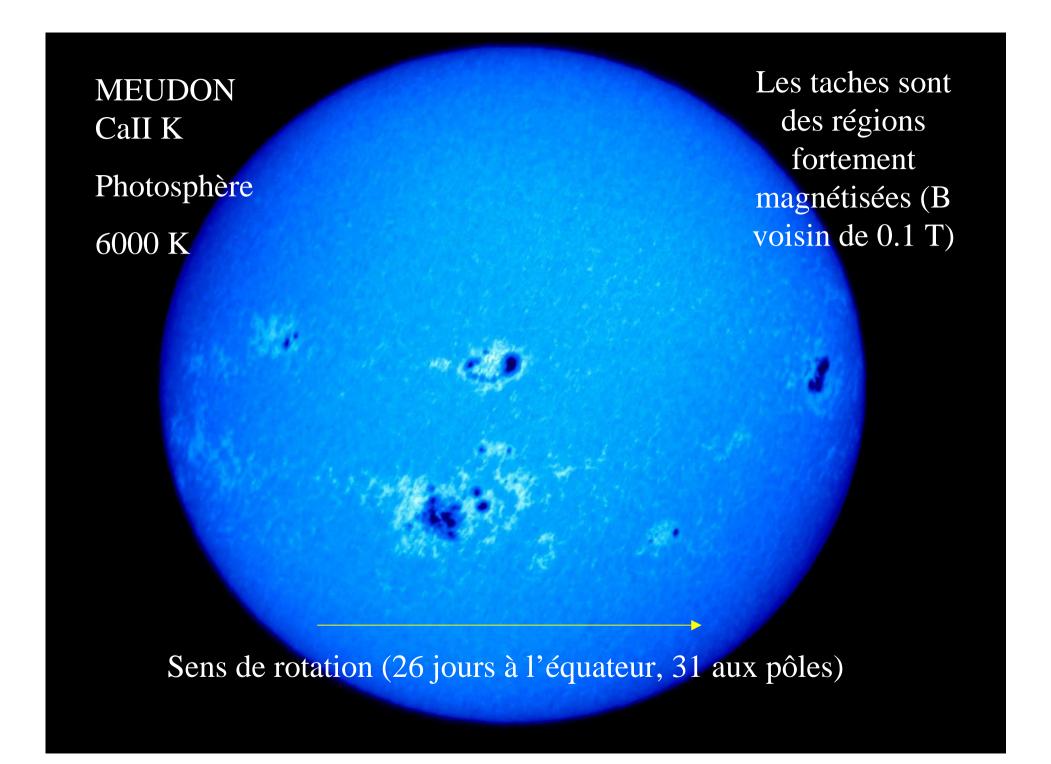




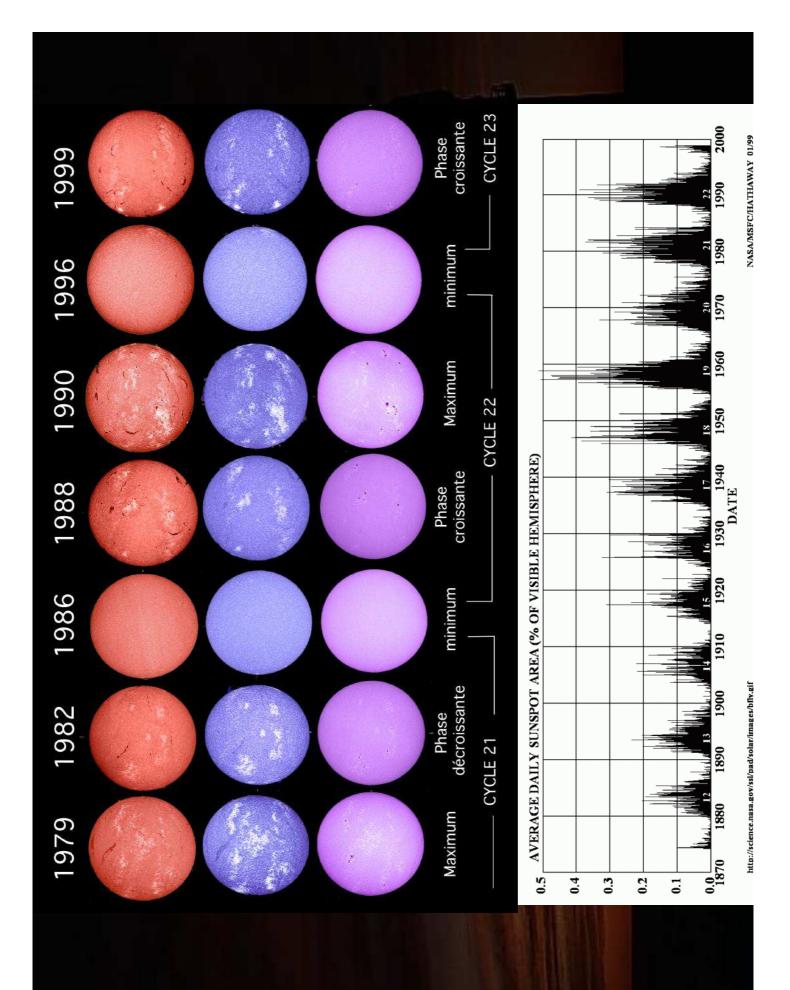


Domaine X, radio, et couronne en lumière blanche





Rotation: 2009 Lc:296.8 Observatoire de Paris-Meudon 03/Oct/28 08:50:59 P: 25,1 B0: 4.8 MEUDON Call **K**3 Protubérances et chromosphère $\Delta\lambda$ =0.15 Å K1v**K**3 Protubérances = filaments sur le disque



spectroscopie

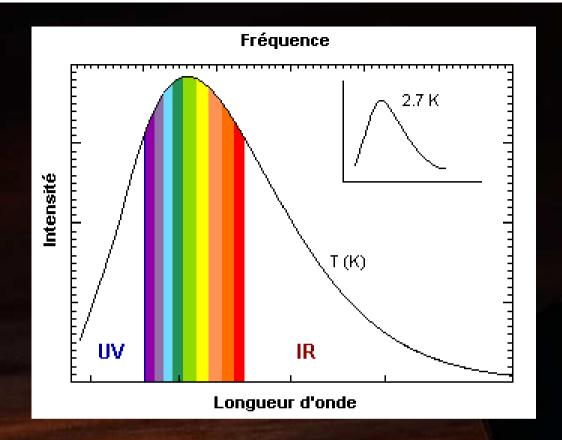
Corps noir

Spectres de raies d'absorption, d'émission, spectre continu

Largeur naturelle

Élargissement par agitation thermique

Profils Lorentzien, Gaussien



Rayonnement continu du corps noir: la Loi de PLANCK

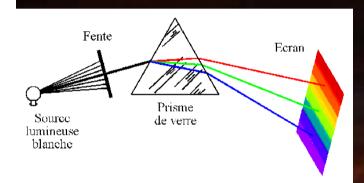
$$B(\lambda) = (2hC^2/\lambda^5) / \exp(hC/\lambda kT - 1)$$

Loi de Stefan Bolztmann

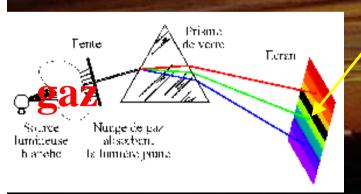
Flux lumineux par m² intégré sur toutes les longueurs d'onde

$$F = \sigma T^4 = L/4\pi R^2 \rightarrow T$$
 effective solaire = 5800 K

Principe de la Spectroscopie

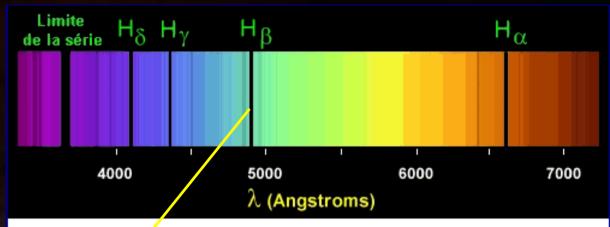


Spectre continu

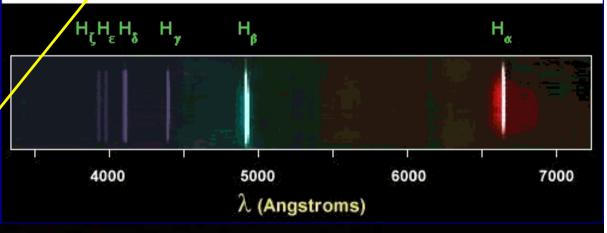


Spectre de raies

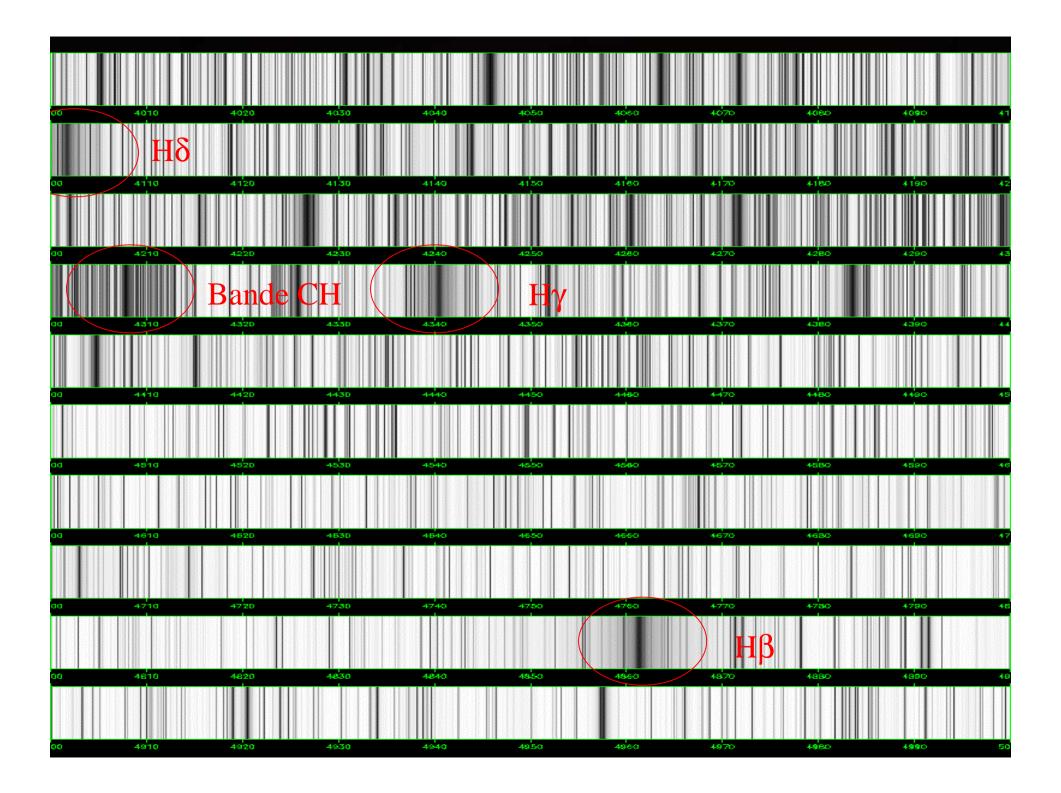
Spectre d'absorption

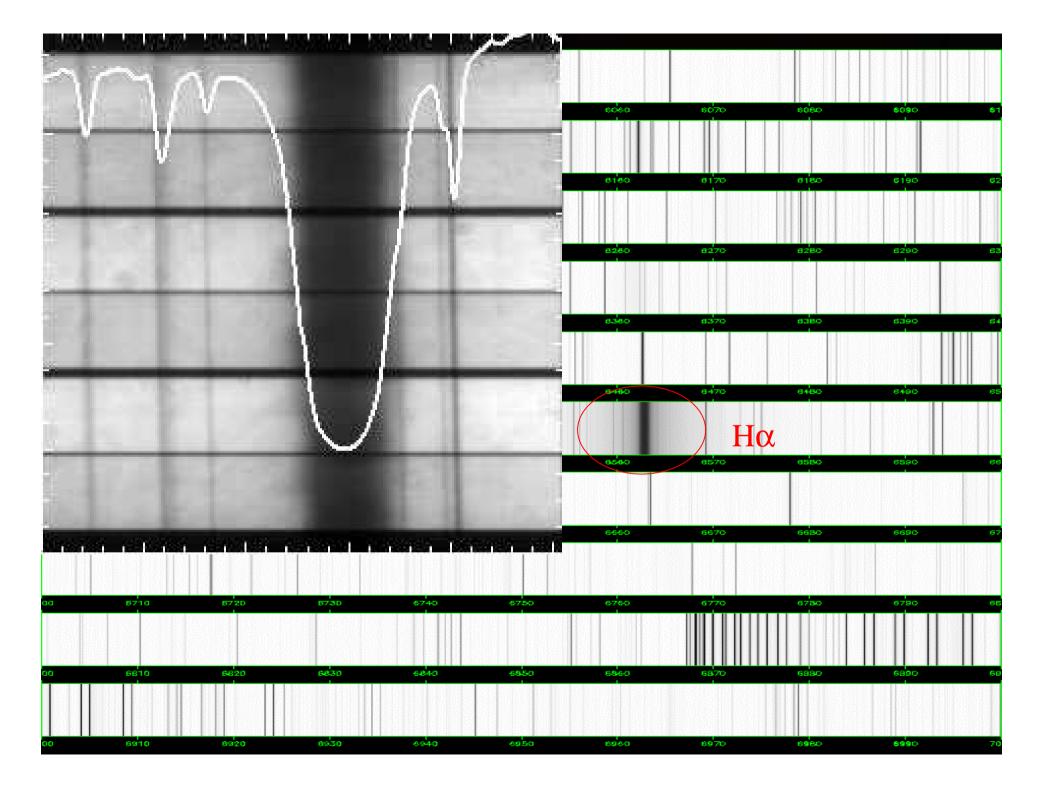


La série de Balmer des différents états d'excitation de l'atome d'hydrogène observés en absorption sur le continuum visible (ci-dessus) et en émission (ci-dessous). On reconnaît à droite la plus connue et la plus profonde ou la plus brillante de ces raies, celle de l'hydrogène alpha à 6562.81 Å. Document T.Lombry.



Spectre d'émission





Largeur naturelle de la raie (transition v_{nm} entre 2 niveaux m et n):

Le profil naturel est Lorentzien et étroit (<0.01 Å)

$$I(v) = (I/\pi) (\gamma/2\pi)/[(v-v_{nm})^2 + (\gamma/2\pi)^2]$$
 avec $\gamma = (\gamma_n + \gamma_m)/2$

 γ_n et γ_m sont les inverses des durées de vie des niveaux n et m (10-8 s). v est la fréquence.

Elargissement par agitation thermique

Les vitesses des atomes ont une distribution maxwellienne dont la vitesse la plus probable est $V_{th} = (2 \text{ k T/m})^{1/2}$

T température, m masse de l'atome, k cte de Boltzmann

Le profil est Gaussien et large (>0.1 Å, surtout si masse petite)

$$I(v) = (I/\sqrt{\pi}) (1/\Delta v_D) e^{-[(v-v_{nm})^2/\Delta v_D]^2}$$
 avec $\Delta v_D = v_{nm} (V_{th}/C)$

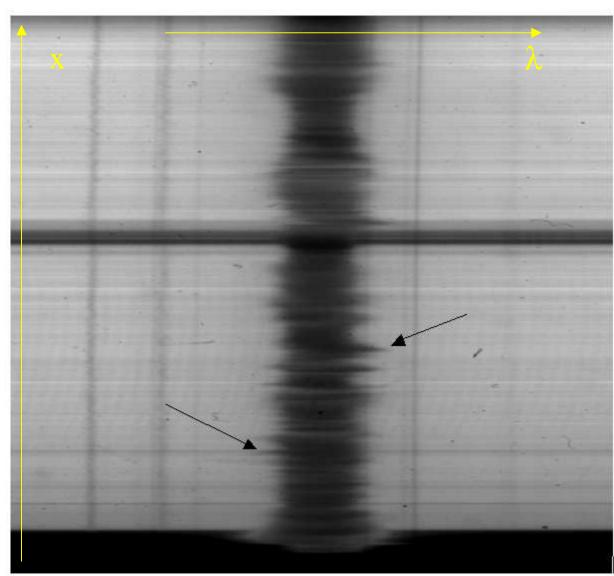
Raie larges si T grand (couronne), ou masse petite (hydrogène)

Diagnostics
spectroscopiques: effet
Doppler macroscopique

Mouvements d'approche, d'éloignement

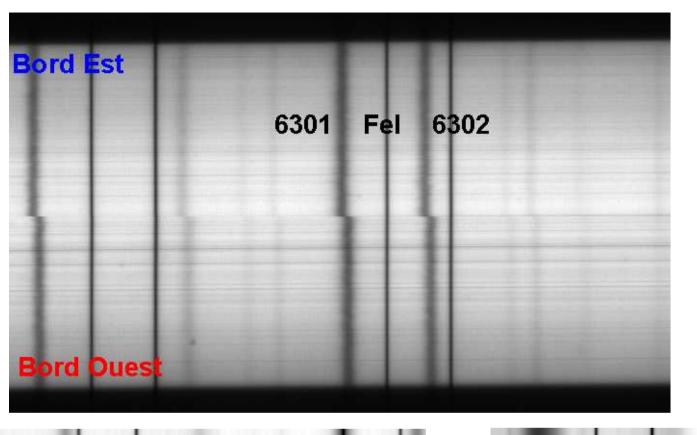
EFFET DOPPLER $V// = C \Delta \lambda/\lambda$

Direction sur le Soleil



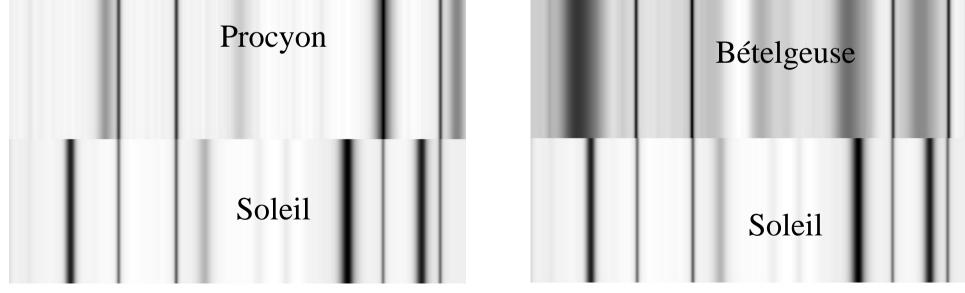
Bord solaire

Effet Doppler sur la raie Ha



Rotation solaire à 2 km/s

$$V/C = (\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_{raie}$$



Effet Doppler sur une tache, dit effet Evershed (mouvement radial de l'ombre vers la pénombre), SATELLITE SDO/NASA



Diagnostics spectroscopiques:

l'atome plongé dans un champ magnétique;

effet Zeeman en champ longitudinal

Effet Zeeman sur FeI 6173 dans une tache solaire

En règle générale, les composantes Zeeman ne sont pas séparées, mais comme elles sont polarisées différemment, l'analyse de leur polarisation permet de les séparer 2 composantes σ 3 composantes σ , π Champ longitudinal Champ quelconque

Transitions quantiques en présence de champ magnétique

Etat d'énergie d'un atome ^{2S+1} L _J
L moment cinétique orbital des électrons
S moment cinétique de spin des électrons
J moment cinétique TOTAL des électrons

Dégénérescence des niveaux: 2J+1 de même énergie

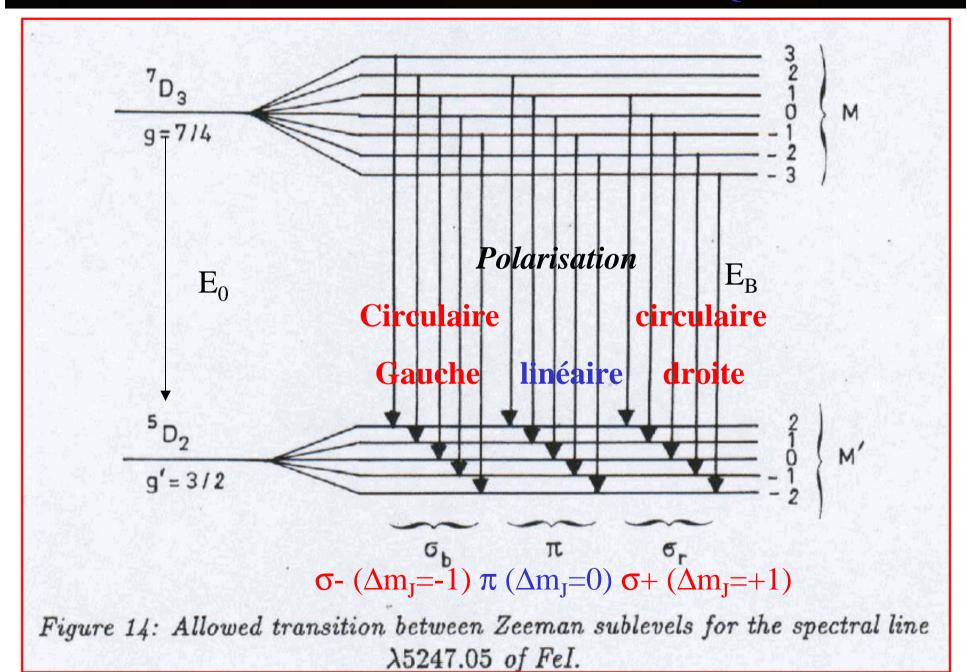
En présence de champ magnétique, levée de la dégénérescence

$$\Delta E = E_B - E_0 = \mu B (m_{J'} g_{J'} - m_{J} g_{J}) \text{ avec } \Delta m_{J} = 0, \pm 1$$

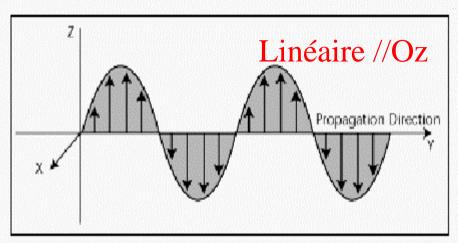
$$g_J \text{ facteur de Landé (fonction de L, S, J)}$$

μ Magnéton de Bohr ou moment magnétique de l'électron

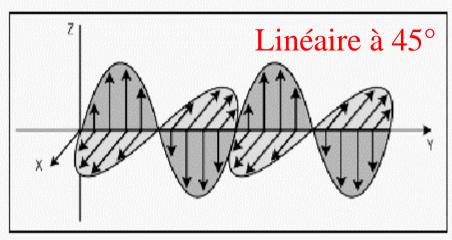
EFFET ZEEMAN EN CHAMP MAGNETIQUE



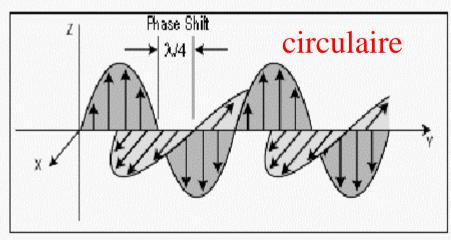
Onde E.M. polarisée



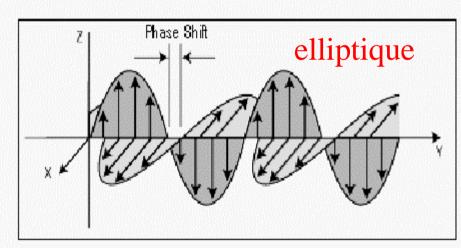
A. Linearly Polarized Light in the Vertical Direction



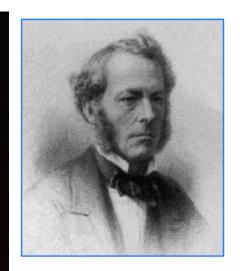
B. Linearly Polarized Light at 45 Degrees



C. Circularly Polarized Light



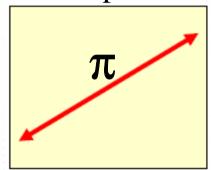
D. Elliptically Polarized Light



Paramètres de Stokes

Polarisation des composantes

$$\begin{cases} E_x = \xi_x \cos(\omega t - kz) \\ E_y = \xi_y \cos(\omega t - kz + \delta) \end{cases}$$



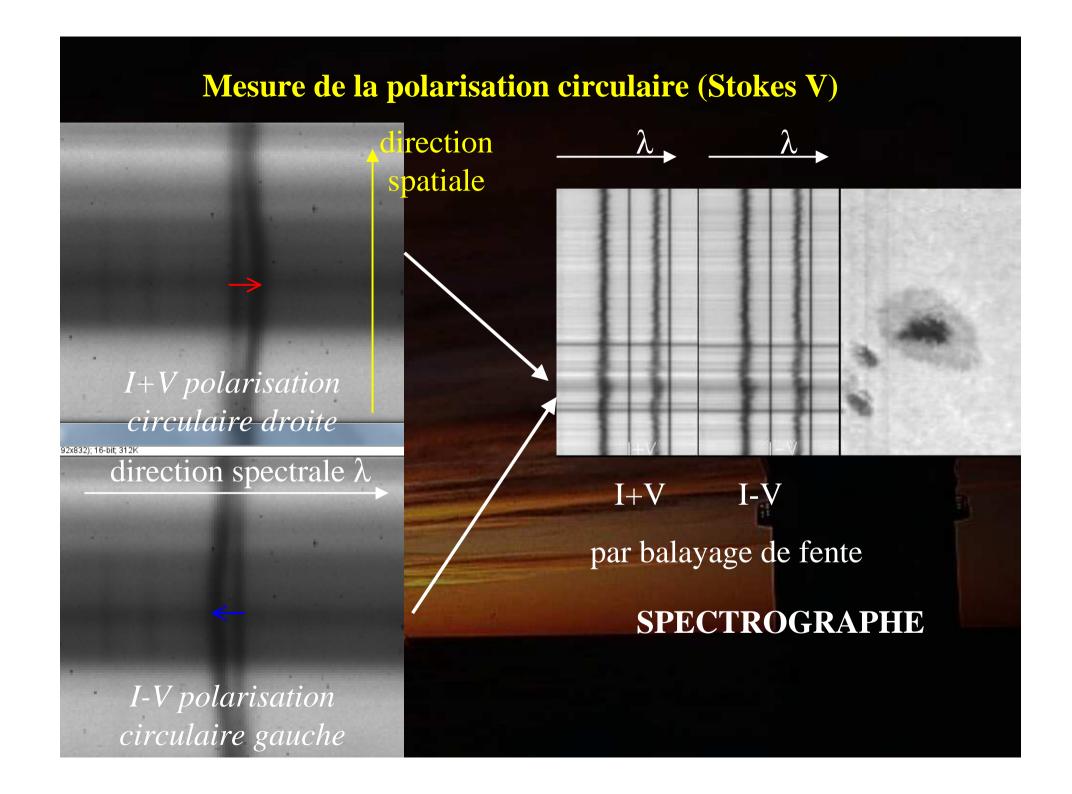
$$\delta = 0$$

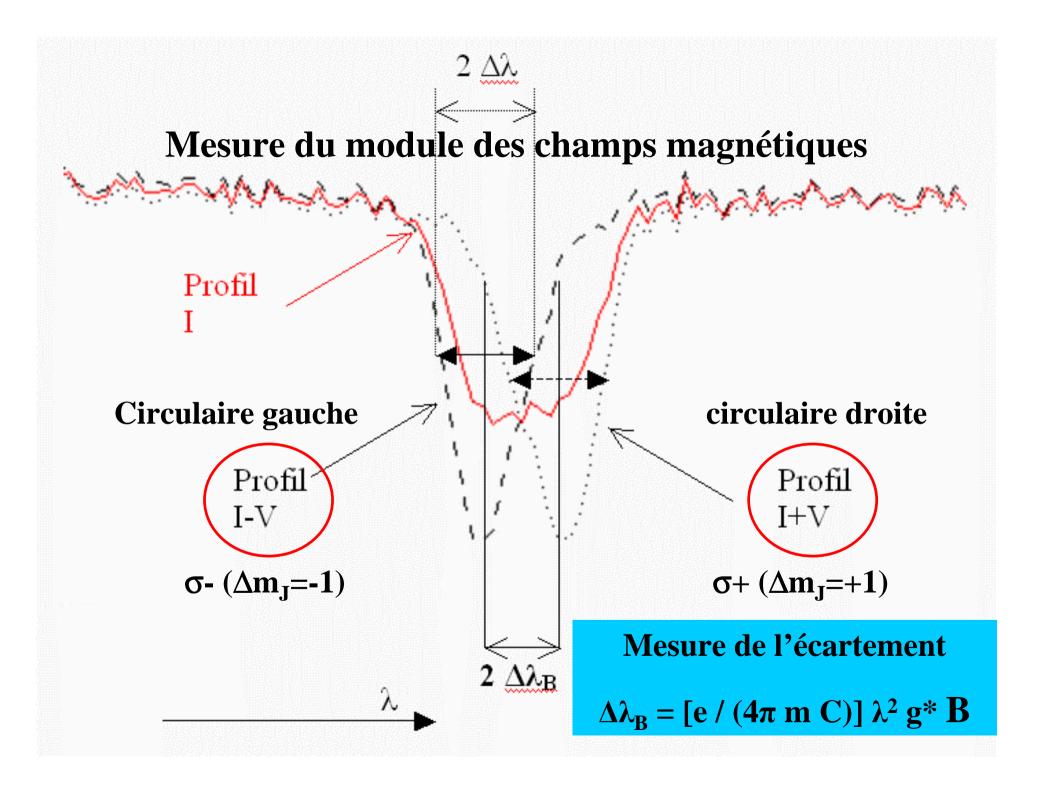
$$\sigma+$$
et $\sigma-$

$$\delta = \pm \pi/2$$

$$\xi_x = \xi_y$$

$$\begin{cases} I = \xi_x^2 + \xi_y^2 \\ Q = \xi_x^2 - \xi_y^2 \\ U = 2\xi_x \xi_y \cos \delta \\ V = 2\xi_x \xi_y \sin \delta \end{cases}$$

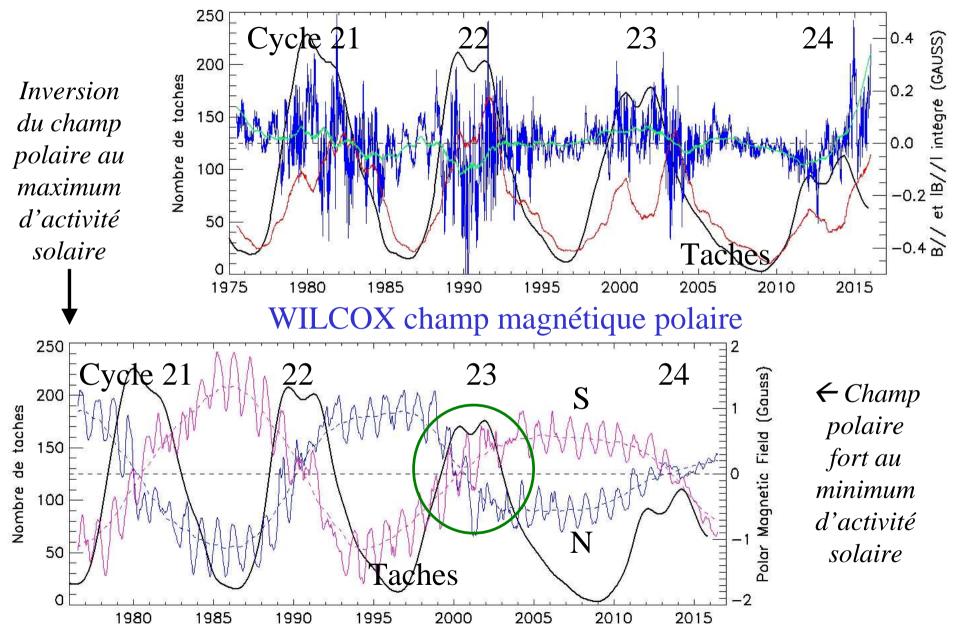


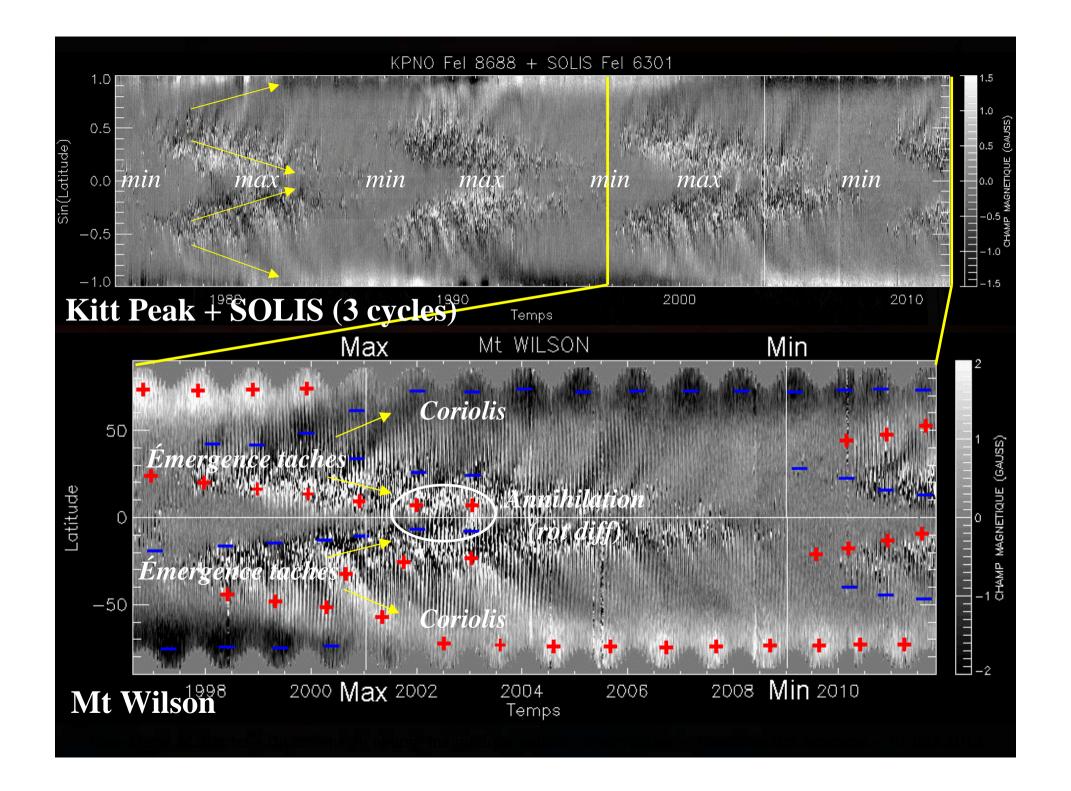


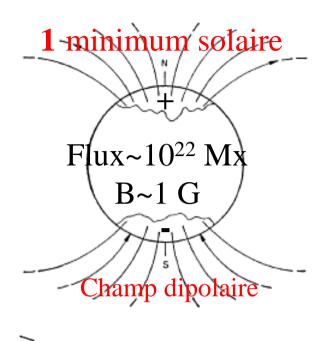
Effet Zeeman et applications:

manifestations des champs magnétiques solaires

WILCOX champ magnétique intégré (0 à 0.3 G)





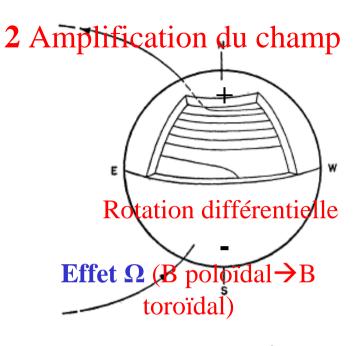


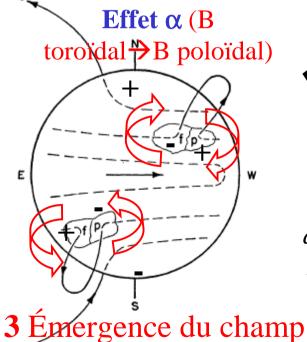
Modèle dynamo qualitatif de **Babcock Leighton**

Au maximum

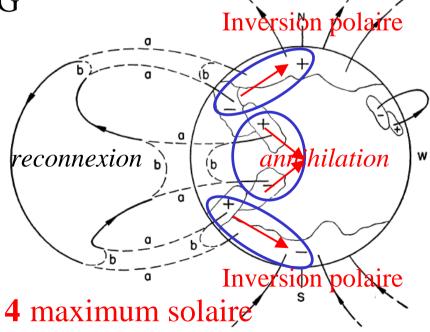
Flux~10²⁵ Mx B~1000 G

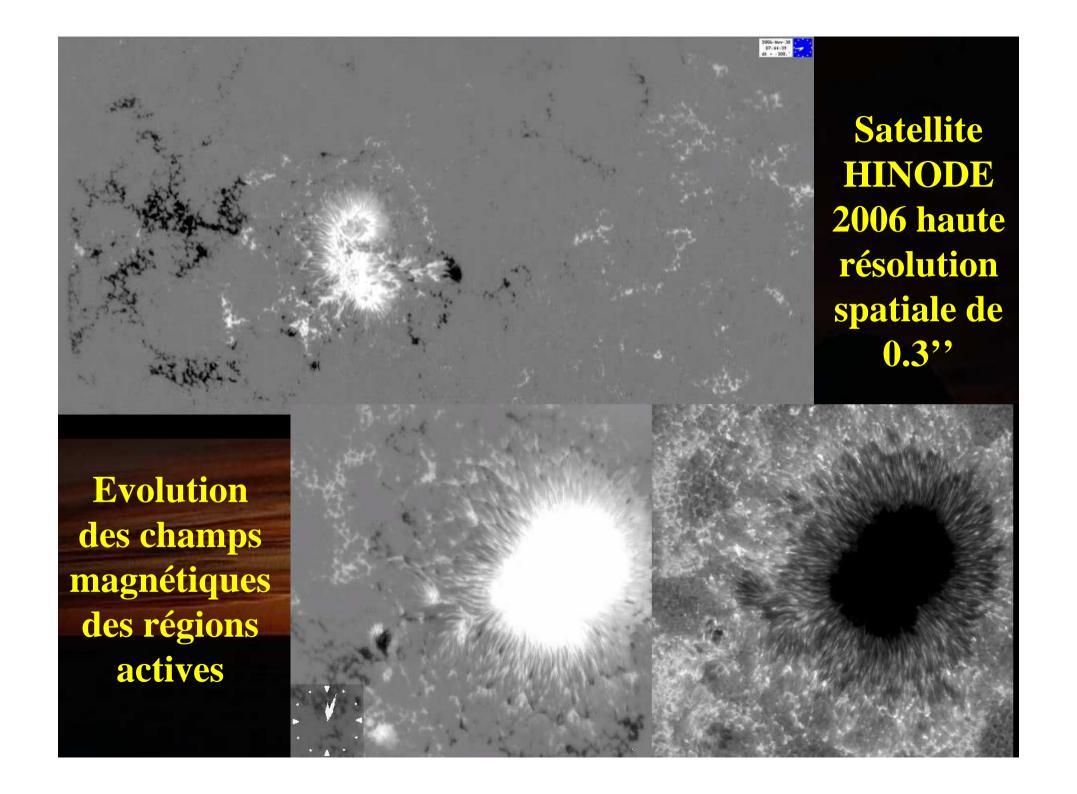
← Émergence des taches et mouvements anticycloniques (horaire au N, antihoraire au S) liés à la force de



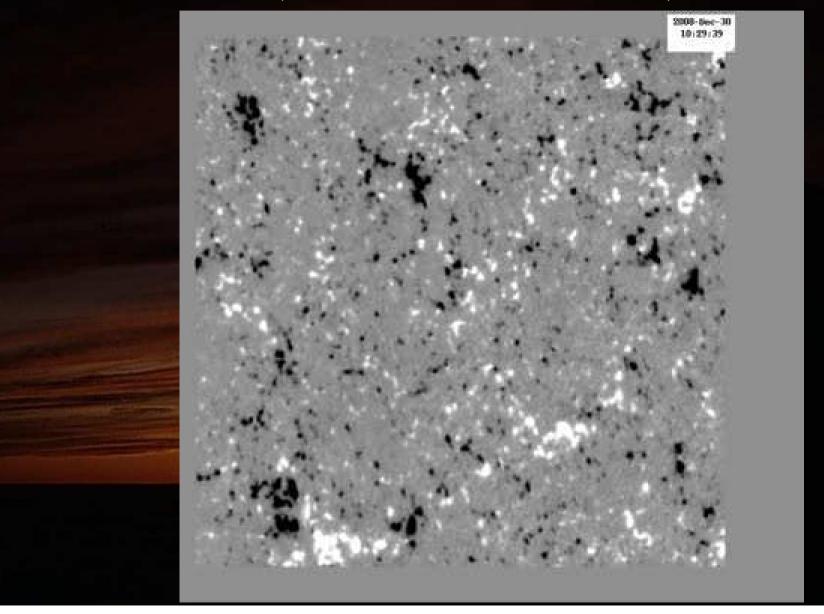


Coriolis



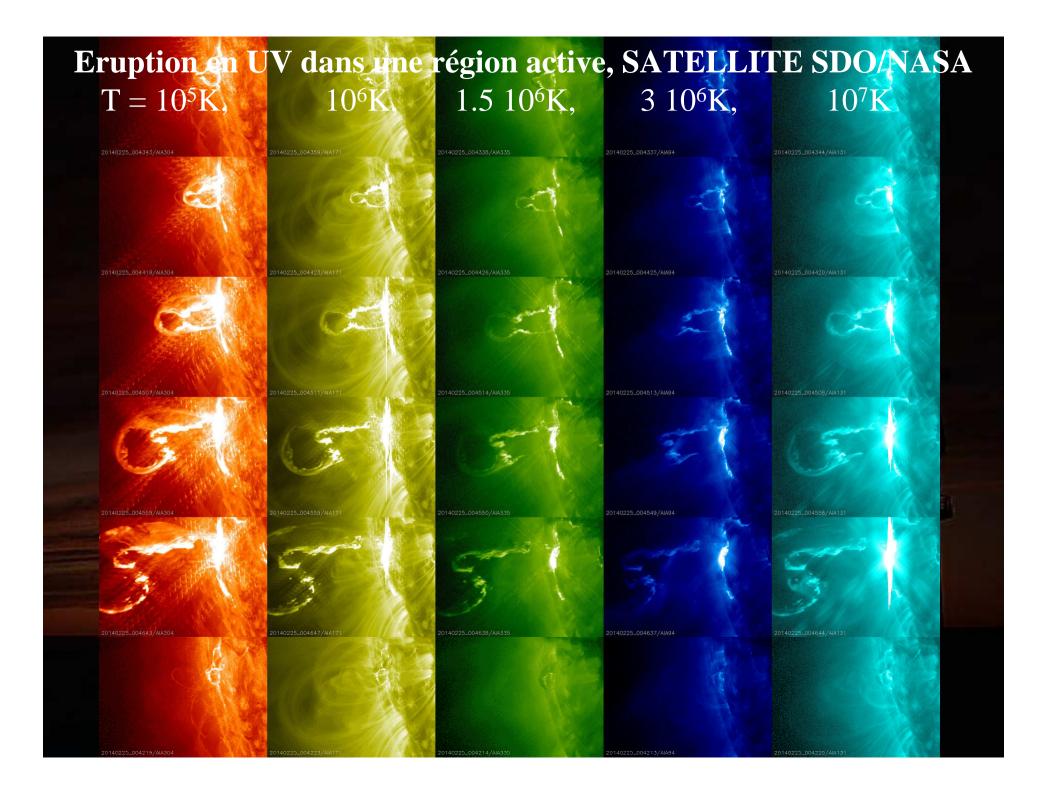


Satellite HINODE: champ magnétiques du soleil calme (tubes de flux concentrés)



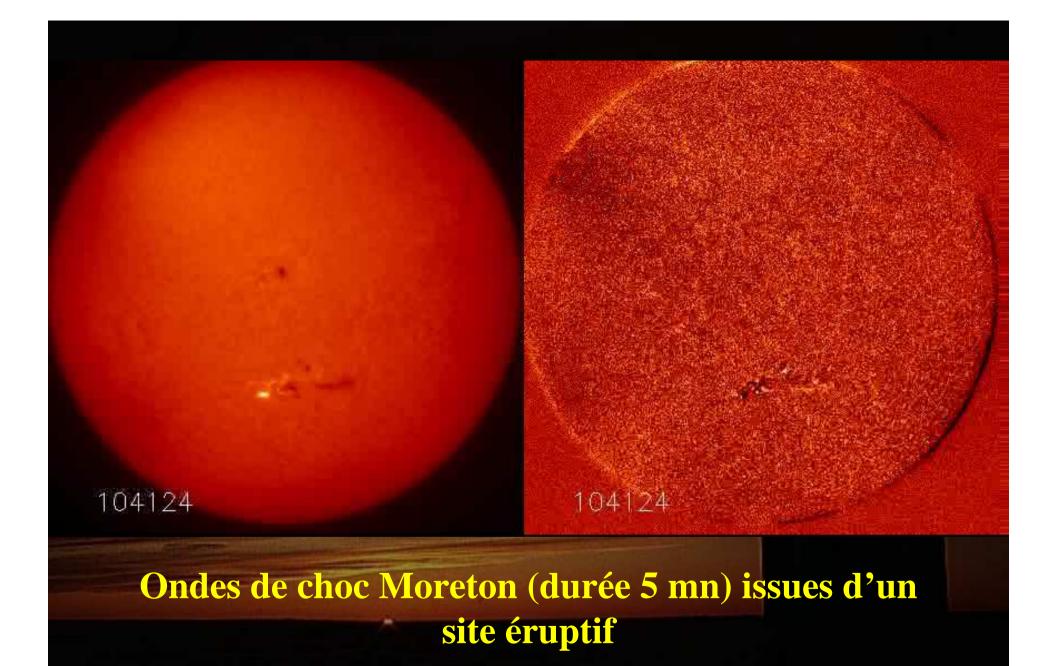
Applications:

l'activité solaire et les effets des champs magnétiques dans l'atmosphère solaire

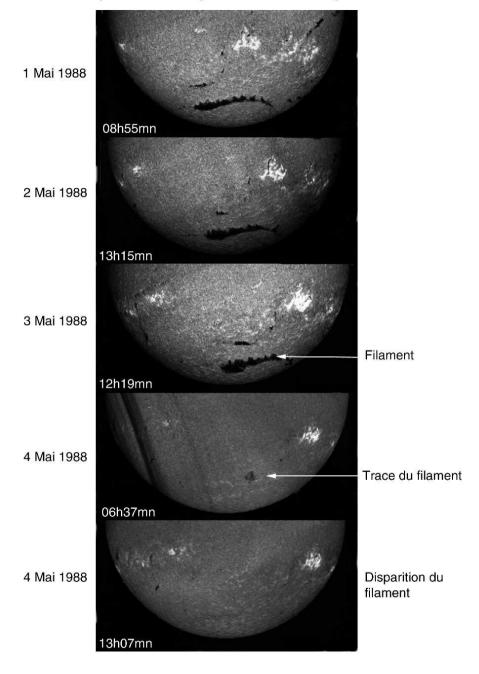


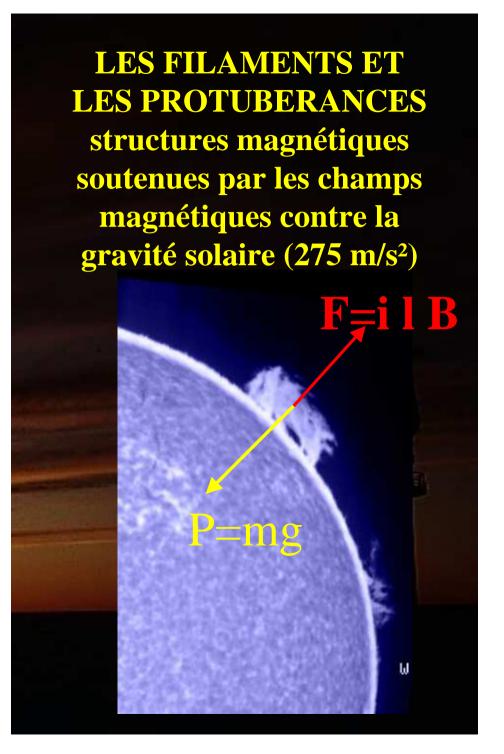
Eruption en UV dans une région active, SATELLITE SDO/NASA Continu à gauche, raie du fer à T = 10⁶K à droite, impacts sur la surface

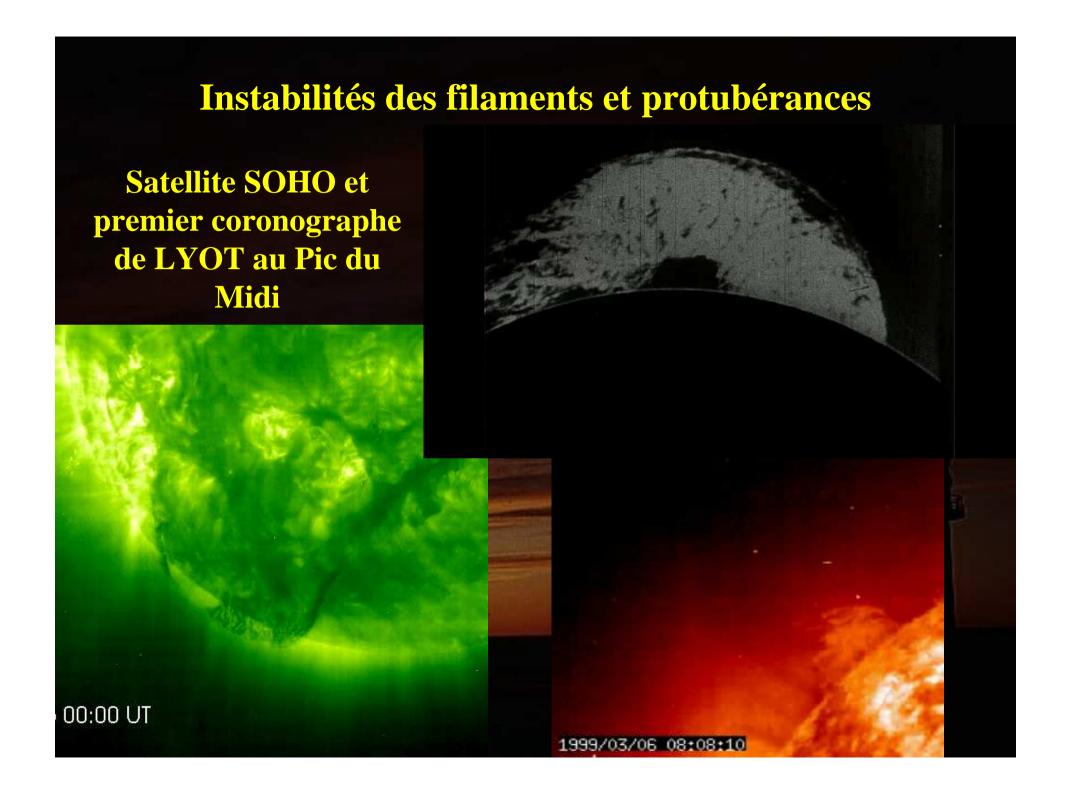




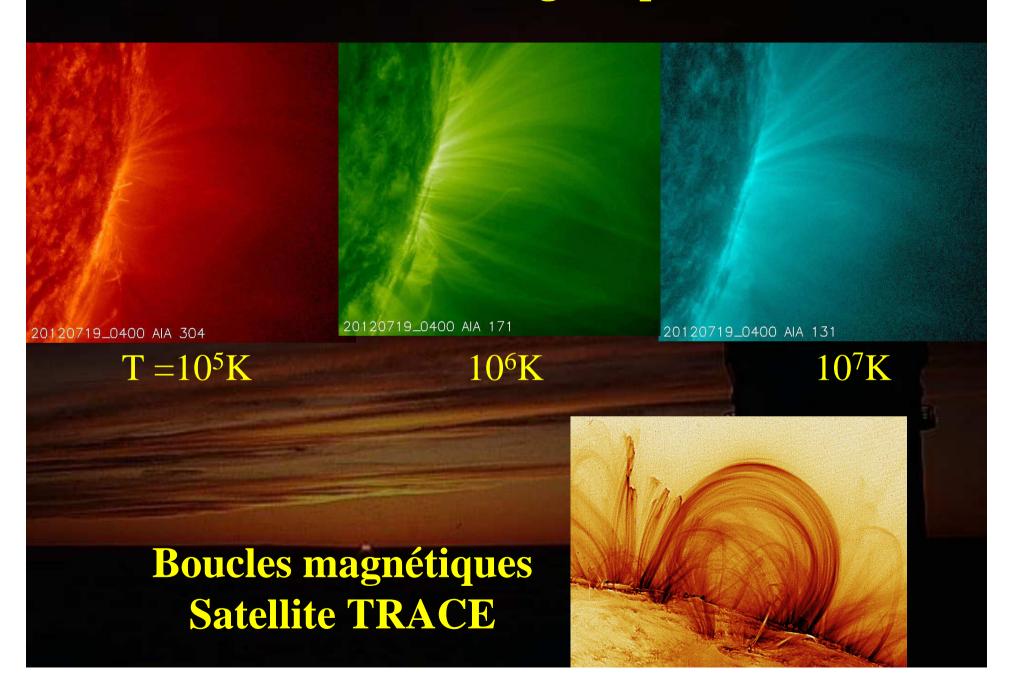
Disparition brusque d'un filament quiescent







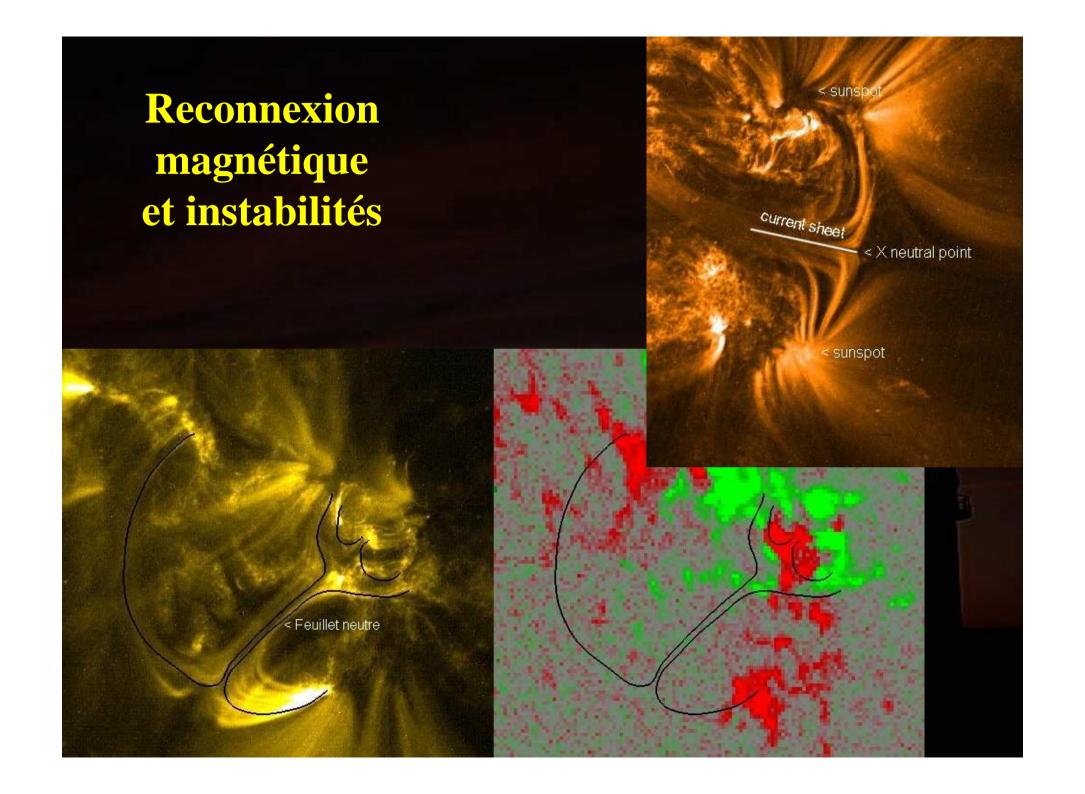
Instabilités des boucles magnétiques satellite SDO



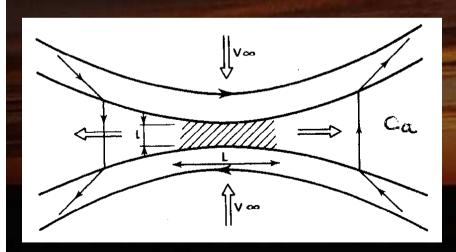
Instabilités magnétiques à grande échelle

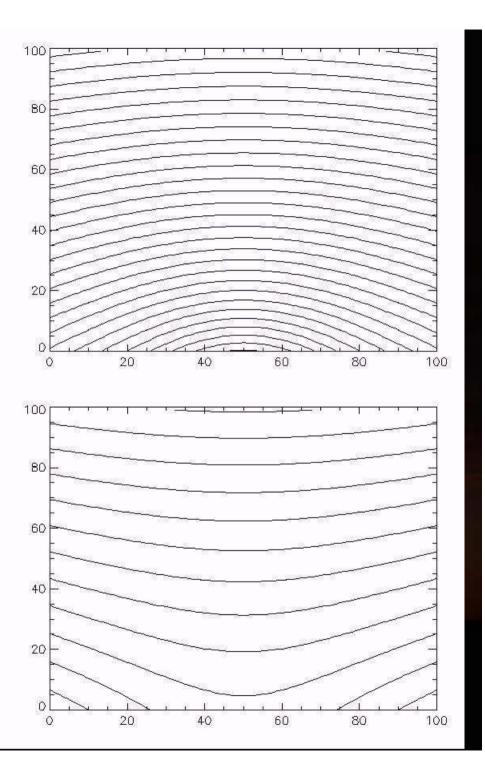


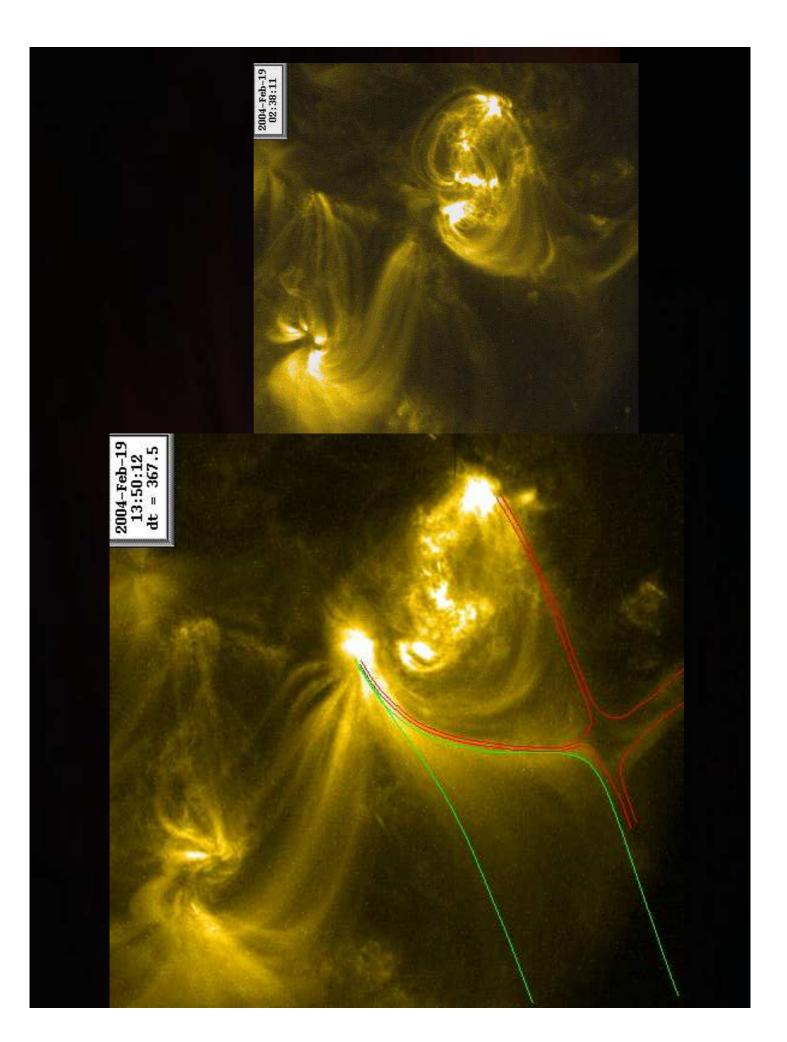
Ejections de masse coronale et relations Soleil Terre



Emergence d'un courant électrique et reconnexion du champ associé avec un champ horizontal pré-existant orienté droite ou gauche









Effet Zeeman Doppler

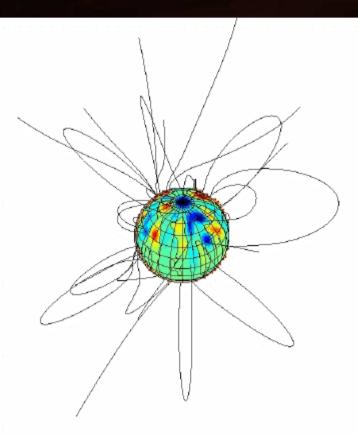
Mesure des champs magnétiques stellaires

Référence: site Web de

Pascal PETIT, IRAP Toulouse,

http://www.ast.obs-mip.fr/article639.html

Effet Zeeman Doppler et Magnétisme stellaire





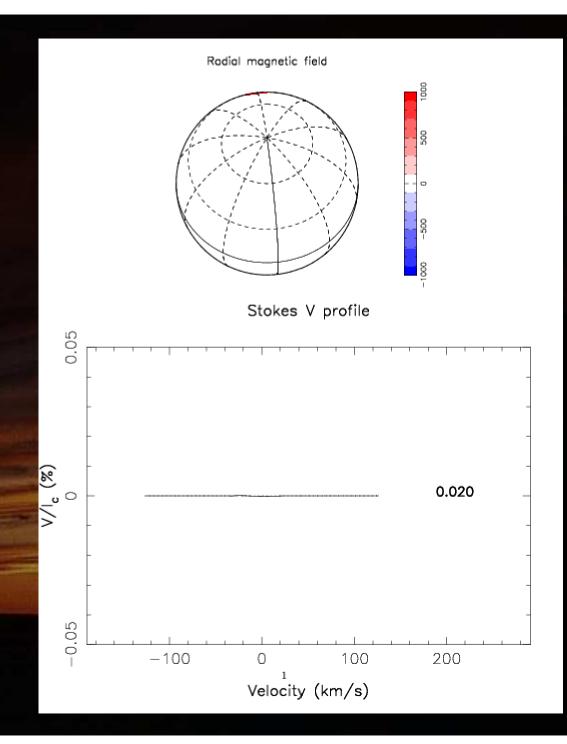
Les étoiles en rotation sont observées comme des objets ponctuels

Spectre 400-800 nm dans 2 états de polarisation circulaire gauche et droite, intégré sur le disque stellaire (I+V, I-V) Profil de raie dans deux etats de polarisation (differences amplifiees artificiellement 5 fois) isee Intensite norma 0.952 profils I+V et I-V Écartement $\Delta \lambda_{\rm B} \rightarrow {\rm B}//$ 0.90-150-100-50100 vitesse radiale (km/s)

Tache de faible latitude (30°)

Champ magnétique radial

Reconstruction
par imagerie
Zeeman
Doppler
au cours de
la rotation

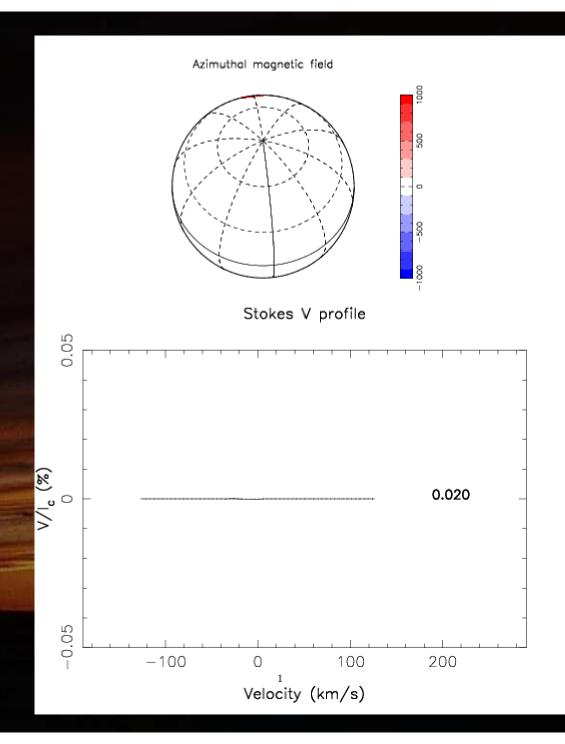


K E

Tache de faible latitude (30°)

Champ magnétique azimuthal

Reconstruction
par imagerie
Zeeman
Doppler
au cours de
la rotation



K E

