Diagnostics spectroscopiques, dynamique et magnétisme

solaire...





Présentation des principales caractéristiques du Soleil



 $M_{s} = 2 \ 10^{30}$ kg masse solaire $R_{s} = 696000$ km rayon solaire $g_{s} = 275 \text{ m/s}^{2}$ accélération de la pesanteur à la surface solaire L = 3.86 10^{26} W luminosité solaire (luminosité d'1 m² : 6.3 10^{7} 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 : $0 \rightarrow 500$ km d'altitude

Pression moyenne P = 10³ Pa et variation de 0 à 500 km : 1.3 10⁴ Pa \rightarrow 10² Pa T moyenne = 5000 K et variation de 0 à 500 km : 6400 K \rightarrow 4170 K Densité moyenne N_H = 10²² 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 = 10¹⁹ m⁻³ et variation de 0 à 500 km : 5 10¹⁹ m⁻³ \rightarrow 10¹⁷ m⁻³

Chromosphère solaire : 500 km \rightarrow 2000 km d'altitude

Pression moyenne P = 1 Pa et variation de 500 à 2000 km : 10^2 Pa $\rightarrow 10^{-2}$ Pa T moyenne = 8000 K et variation de 500 à 2000 km : 4170 K $\rightarrow 10000$ 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 $\rightarrow 4 \cdot 10^{16}$ m⁻³

Couronne solaire : 2000 km → milieu interplanétaire

Conductivité électrique σ = 10⁻³ T^{3/2} MKSA, T en Kelvins Conductivité thermique $k_{\prime\prime} = 10^{-11} T^{5/2}$ MKSA, T en Kelvins

- Basse couronne typique: $n_{p} = n_{e} = 5 \ 10^{14} \ m^{-3} \ T = 1.5 \ 10^{6} \ K$ P = 2 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 $P = 4 \ 10^{-7} Pa$

- à 1 UA (orbite terrestre): $n_{p} = n_{e} = 10^{7} \text{ m}^{-3}$ $T_{p} = 4 \ 10^{4} \text{ K}$ T_e = 1.5 10⁵ K vitesse du vent solaire à la Terre: 400 km/s en moyenne

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

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

- milieu interplanétaire à grande distance: $n_p = n_e = 10^6 \text{ m}^{-3}$

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 $m_e = 9.1 \ 10^{-31} \text{ kg masse de l'électron}$ $h = 6.62 \ 10^{-34} MKSA$ constante de Planck k = 1.38 10⁻²³ MKSA constante de Boltzmann $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ MKSA perméabilité magnétique du vide G = 6.67 10⁻¹¹ MKSA constante gravitationnelle $1/(4 \pi \epsilon_0) = 9 \ 10^9 \text{ MKSA}, \epsilon_0 \text{ permittivité du vide}$

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





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

MEUDON H alpha Chromosphère 8000 K

> Filaments = structures magnétisées suspendues dans la couronne contre la gravité ρg par la force de Laplace $\mathbf{F} = \mathbf{j} \Lambda \mathbf{B}$



MEUDON CaII K Photosphère 6000 K Les taches sont des régions fortement magnétisées (B voisin de 0.1 T)

Sens de rotation (26 jours à l'équateur, 31 aux pôles)

Observatoire de Paris-Meudon

03/Oct/28 08:50:59

MEUDON Call K3

Protubérances

et chromosphère

Rotation: 2009 Lc:296.8

Δλ=0.15 Å

K3

K1v

P: 25.1 BO: 4.8

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







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 $V_{th} = (2 \text{ k T} / \text{m})^{1/2}$

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

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

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

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

Champ <u>longitudinal</u>



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 facteur de Landé (fonction de L, S, J)

µ Magnéton de Bohr ou moment magnétique de l'électron

EFFET ZEEMAN EN CHAMP MAGNETIQUE







Mesure de la polarisation circulaire (Stokes V)



I-V polarisation circulaire gauche





I+V I-V par balayage de fente

SPECTROGRAPHE



Effet Zeeman et applications:

manifestations des champs magnétiques solaires

WILCOX champ magnétique intégré (0 à 0.3 G)







2 Amplification du champ

qualitatif de

Au maximum

Flux~ 10^{25} Mx

B~1000 G

taches et

Coriolis

Modèle dynamo **Babcock Leighton** Rotation différentielle **Effet** Ω (**B** poloidal \rightarrow B toroïdal) Inversion polaire nk-hilation reconnexion b w (b Inversion polaire 4 maximum solaire

Satellite HINODE 2006 haute résolution spatiale de 0.3''

2006-Nev-30 07:44:39 dt = -300,

Evolution des champs magnétiques des régions actives

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 $T = 10^{6}$ K à droite, impacts sur la surface







LES FILAMENTS ET LES PROTUBERANCES structures magnétiques soutenues par les champs magnétiques contre la gravité solaire (275 m/s²)

B

ω

P-mg

Disparition brusque d'un filament quiescent

Instabilités des filaments et protubérances

Satellite SOHO et premier coronographe de LYOT au Pic du Midi



1999/03/06 08:08:10

Instabilités des boucles magnétiques satellite SDO

20120719_0400 AIA 304

 $T = 10^{5} K$

20120719_0400 AIA 171

 10^{6} K

20120719_0400 AIA 131

Boucles magnétiques Satellite TRACE



Instabilités magnétiques à grande échelle



Ejections de masse coronale et relations Soleil Terre

Reconnexion magnétique et instabilités





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







Reconnexion magnétique: un processus à l'œuvre dans les éruptions



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









Quelques exemples de reconstruction par imagerie Zeeman Doppler