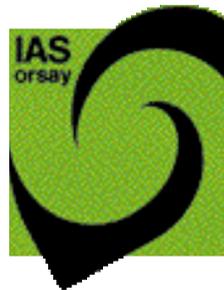


Colloque PNST 2005

Chauffage de la couronne solaire : des résultats et des perspectives

Sébastien Galtier

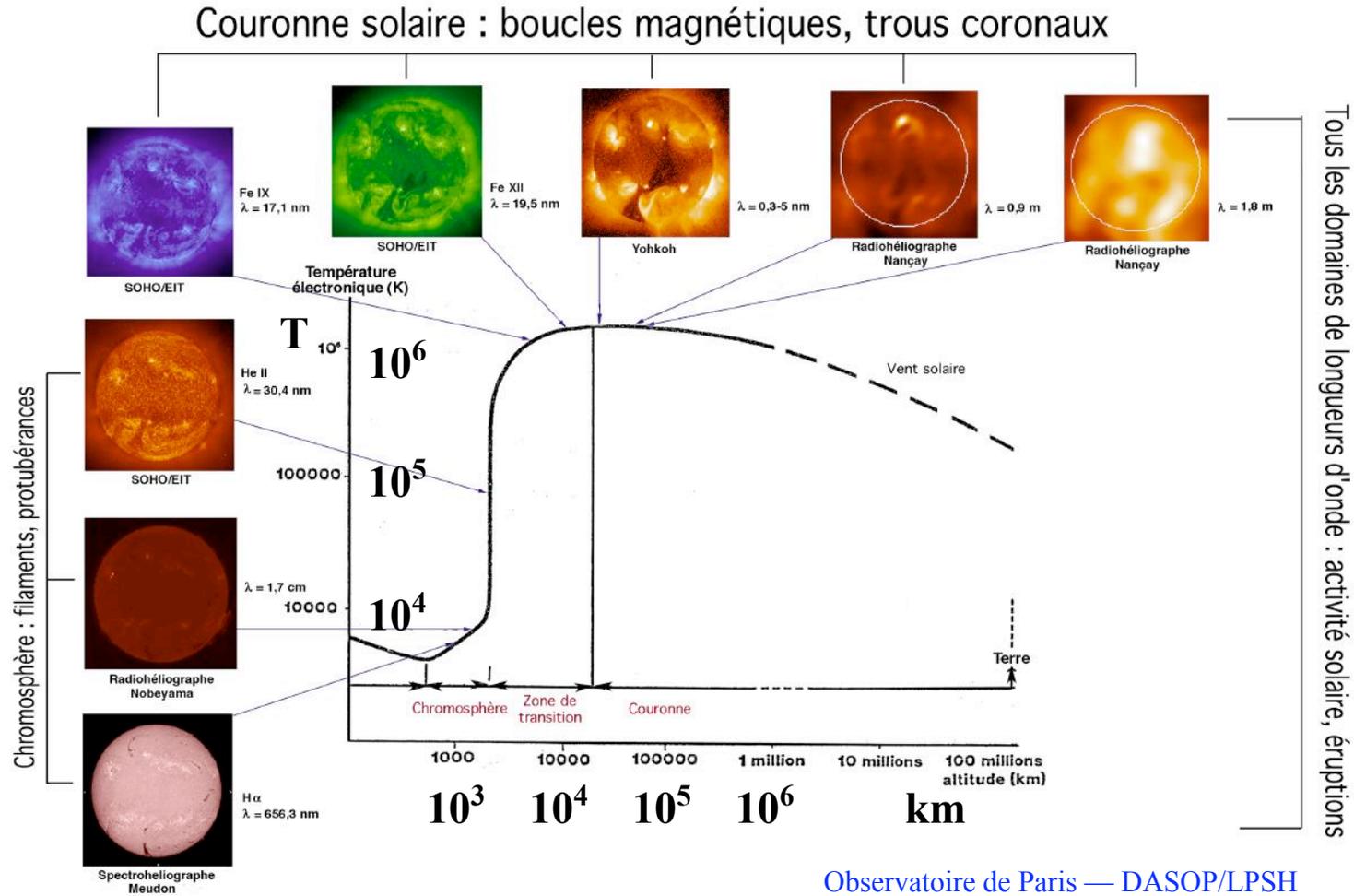


Institut d'Astrophysique Spatiale
Université Paris XI

Chauffage de la couronne

- Introduction générale
- Fluctuations intermittentes de la couronne et lois de puissance
- Modèle cinétique atmosphérique (trou coronal)
- Modèle MHD statistique de boucle magnétique (couronne calme)
- Topologie du champ magnétique (région active)
- Des conclusions et des perspectives

Chauffage de la couronne solaire

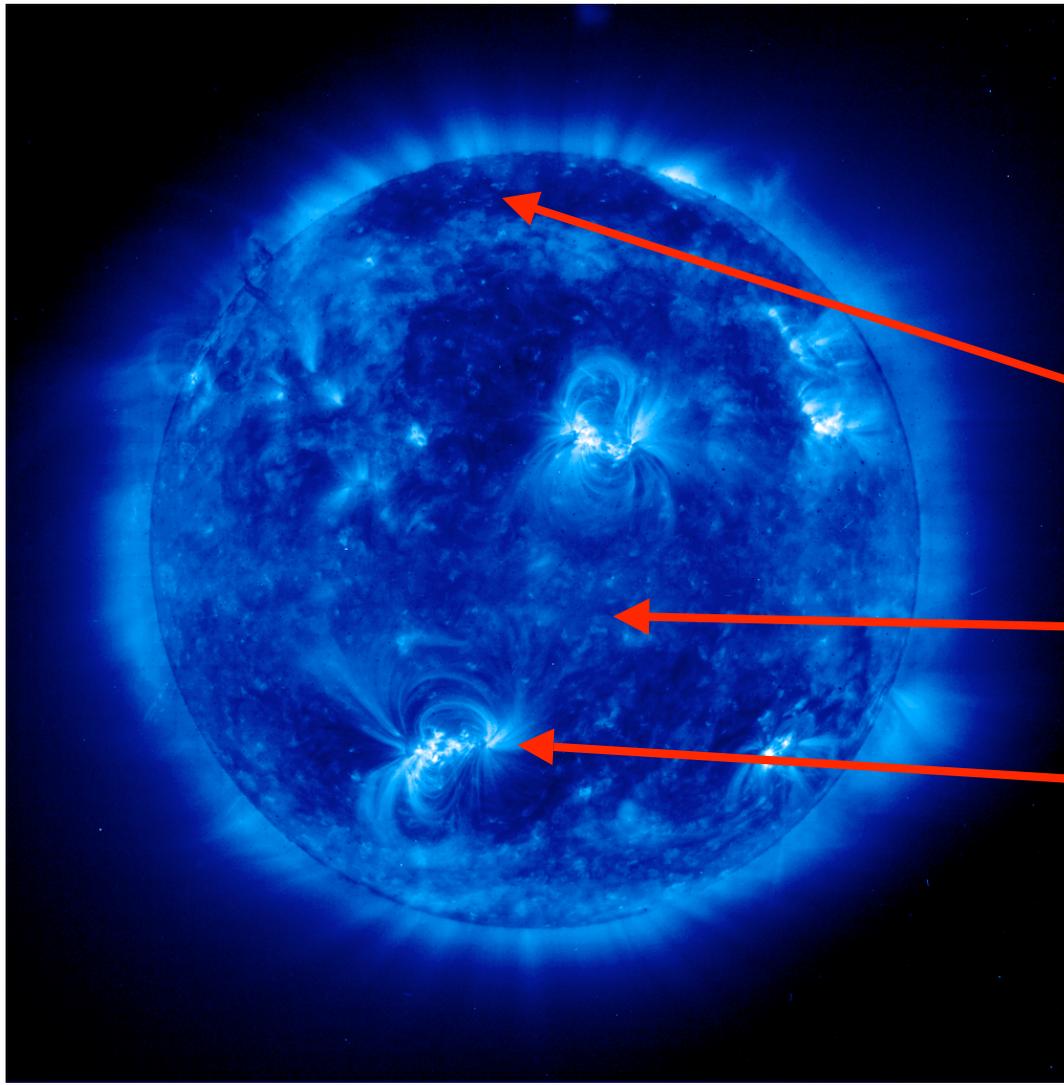


Pourquoi la couronne est-elle si chaude ($T_c > 100T_{\text{photo}}$) ?

Problème du chauffage coronal

- 1- Source d'énergie
- 2- Transfert et accumulation de l'énergie
- 3- Création des petites échelles
- 4- **Dissipation des petites échelles**

La couronne solaire



TRACE (171Å)
Résolution : 350 km

Trou coronal

Couronne calme

Région active

EIT / SoHO (171Å)
Résolution : 1850 km

~ 1 MK

Organisation et complexité

- Perpétuelle réorganisation **impulsive** des structures magnétiques
- Structures bipolaires – **anisotropes** – (boucle coronale)
- Inhomogénéité en température ($7 \cdot 10^5 \text{K}$ à $2 \cdot 10^7 \text{K}$)
- Vitesses Doppler et non thermique \leq **50 km/s** le long des boucles
- Échelles spatiale (350 km) et temporelle (1 s) **non résolues**
- Nombre de Reynolds \sim **10^{12}**

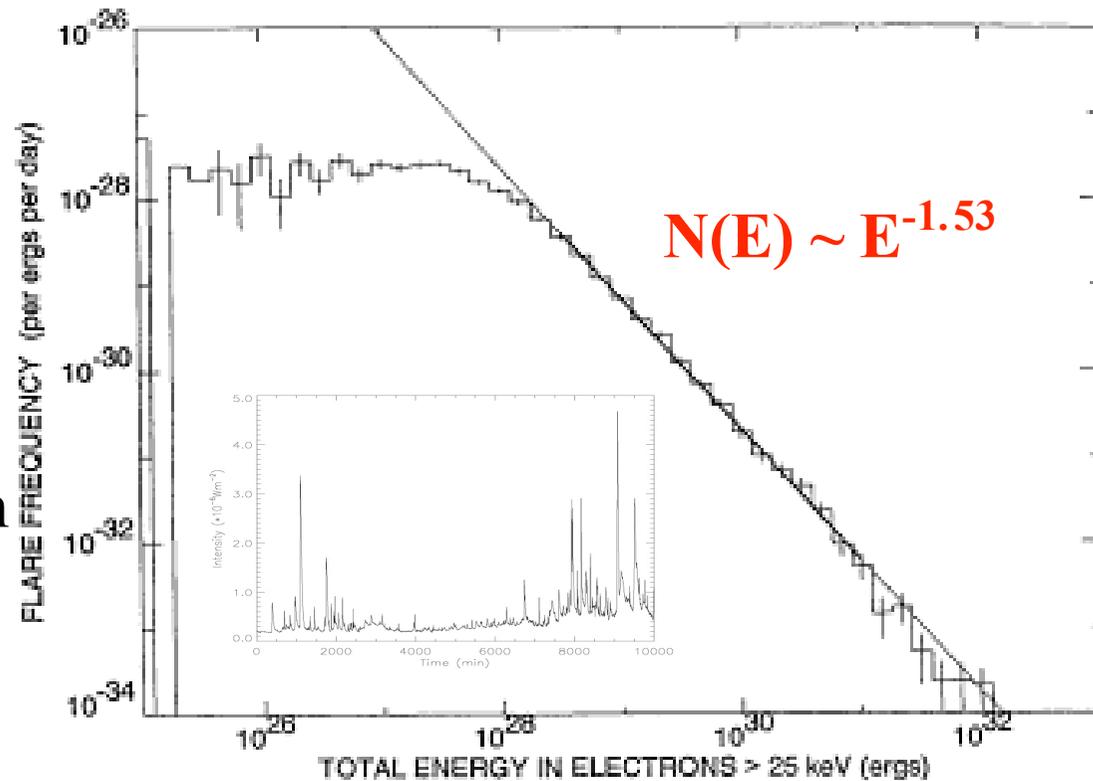
→ La couronne solaire a une dynamique **non-linéaire**

Présence de fluctuations intermittentes

Distribution en fréquence de l'énergie totale des « flares » en **X-dur** sur le Soleil non-résolu

HXRBS/SMM
Spectromètre à scintillation
(résolution = 128ms)

12776 événements entre
1980 et 1989



[Crosby et al., Sol. Physics 143, 275-299, 1993]

Existence de lois de puissance

- Résultat étendu à d'autres quantités (pics, durées, temps calmes) :

$$N(P) \sim P^{-1.7} ; \quad N(D) \sim D^{-2.2} ; \quad N(\tau) \sim \tau^{-2.4}$$

[Dennis, 1985; Crosby et al., 1993; Berghmans et al., 1998; Krucker et al., 1998; Aletti et al., 2000;...]

- Mesures faites avec différents instruments, à différents λ

Aletti et al. (2000) → pixels et événements
(EIT/SOHO à 19.5 nm)

Parnell et al. (2000) → distribution des événements
(TRACE à 17.3 nm et 19.5 nm)

•
•
•

Y a-t-il universalité ? (Origine du chauffage ?)

[Hudson, 1991]

C'est une question difficile !

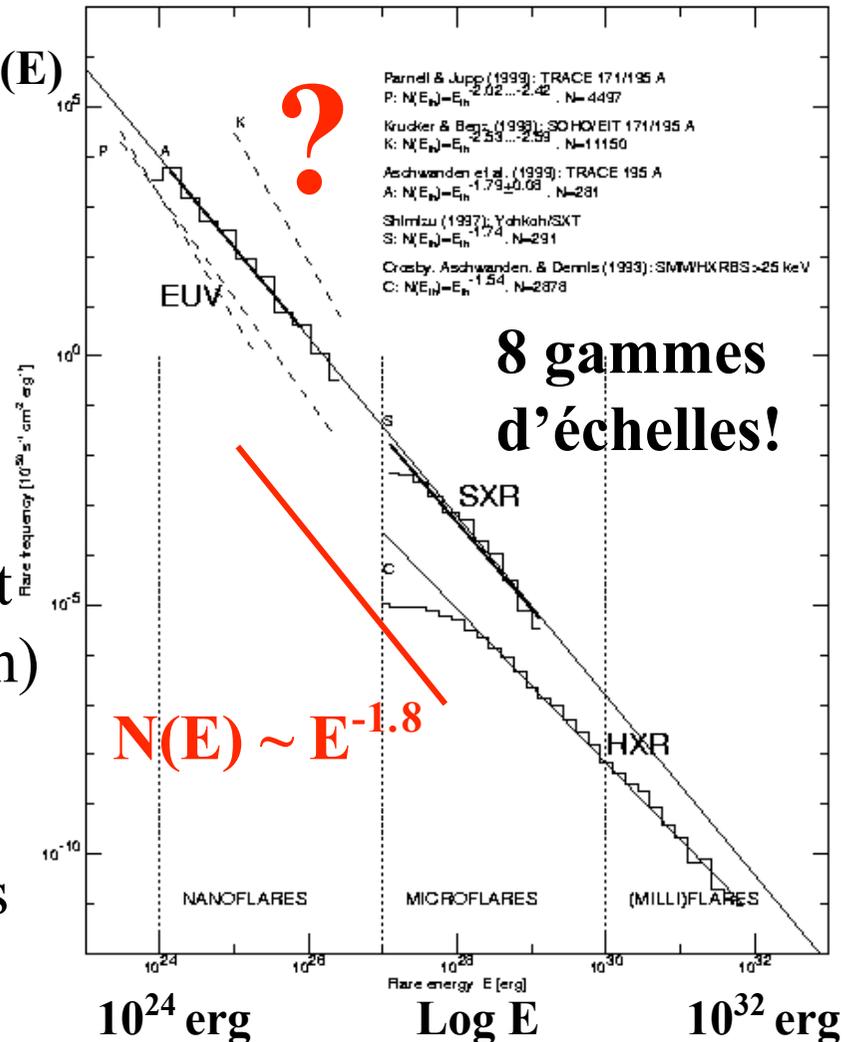
- Difficultés intrinsèques aux données (on ne dispose **jamais** de E_{tot})
- Problème de définition d'un événement (recherche de la « **meilleure** » définition)

[Buchlin et al., 2005]

- Comparaison difficile avec les modèles ($\eta J^2 \neq$ événement coronal radiatif)

[Cargill, 1994; Parenti et al., en préparation]

Log N(E)



Synthèse de la distribution N en énergie E des événements coronaux

[Aschwanden et al., 2000]

Quelle approche théorique choisir?

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : \text{libre parcours moyen} \\ H : \text{échelle typique des variations de } T, n \dots \end{array} \right.$$

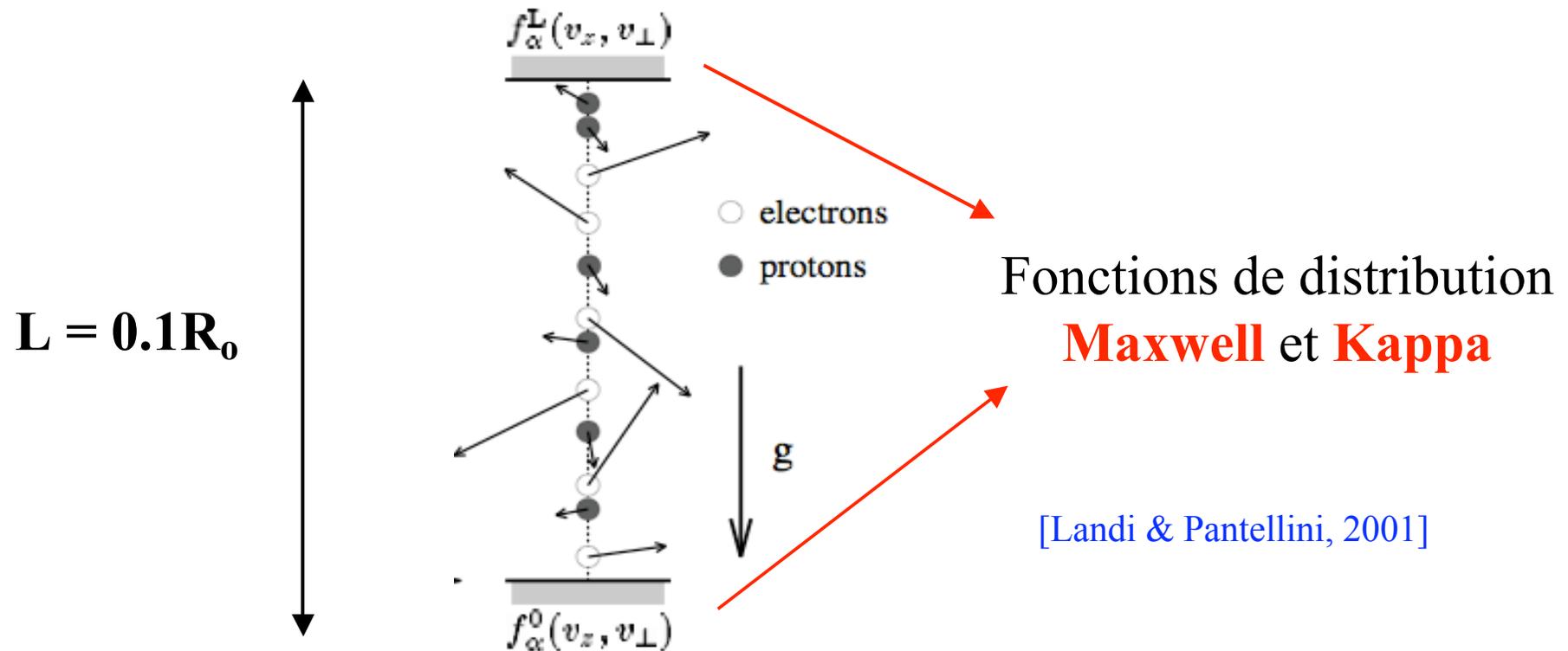
Dans la basse couronne : $\lambda / H \sim 10^{-4} \text{ à } 10^{-2}$

- L'approche fluide MHD est bien adaptée pour la couronne
- Y a-t-il des effets cinétiques non négligeables ?

Estimation (MHD à la Kolmogorov) de l'échelle dissipative :

$$L_{\text{Diss}} \sim L_0 \text{Re}^{-2/3} \sim 1 \text{ m} !!!$$

Modèle cinétique de la couronne



- Modèle atmosphérique **1D**, avec $\partial T / \partial z > 0$, sans forçage, $N=1000$
- Compétition entre les collisions élastiques (10^{10} chocs), g_z et E_z
 - Flux de chaleur électronique vers **le haut**
 - En général, **nécessité** d'un chauffage local

Approche MHD (statistique)

Le problème du chauffage coronal est de nature **non-linéaire**

⇒ études numériques **limitées** par la capacité des ordinateurs

- **Simplifier le traitement des non-linéarités** (Ex: Automate Cellulaire)

→ Règles phénoménologiques : mécanisme « on-off »

Il y a instabilité si un seuil est dépassé => **événement coronal**

[Lu et al., 1991; Vlahos et al., 1995; Isliker et al. 2000; Krasnoselskikh et al., 2002; Buchlin et al. 2003]

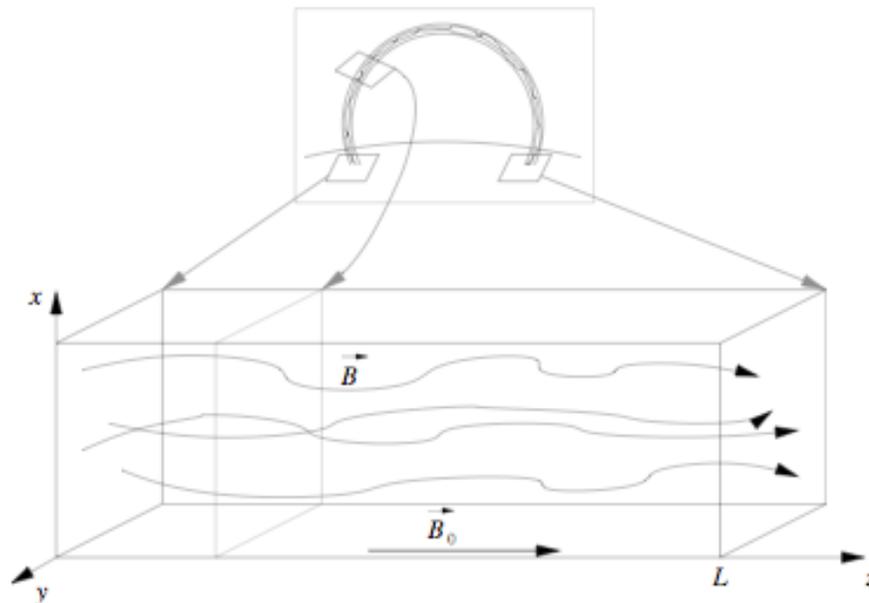
- **Simplifications MHD du problème** (Ex: MHD 2D, 1.5D, « shell »)

Événement dissipatif (ηJ^2) = **événement coronal**

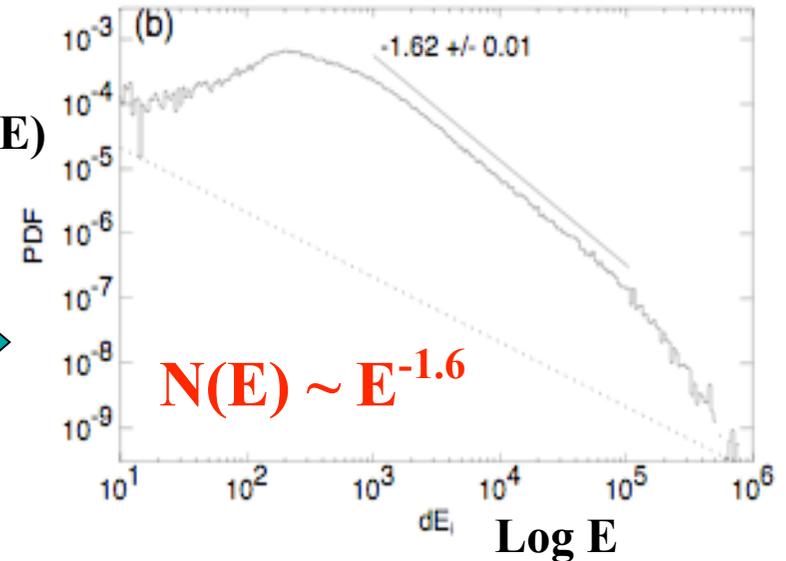
[Einaudi et al., 1996; Galtier et al., 1998; Georgoulis et al., 1998; Buchlin, 2004]

+ [Peter et al., 2004; Gudiksen & Nordlund, 2005]

Modèle MHD turbulent de boucle



Log N(E)



[Buchlin et al., 2003]

- **Forçage** externe sur les 2 plans frontières
- Information se propage de plan en plan (*via* les **ondes d'Alfvén**)
- **Modélisation** des non-linéarités (automate cellulaire ou shell)

Topologie magnétique des régions actives

Lois d'échelle relatives au champ magnétique : nouvelles contraintes pour les modèles

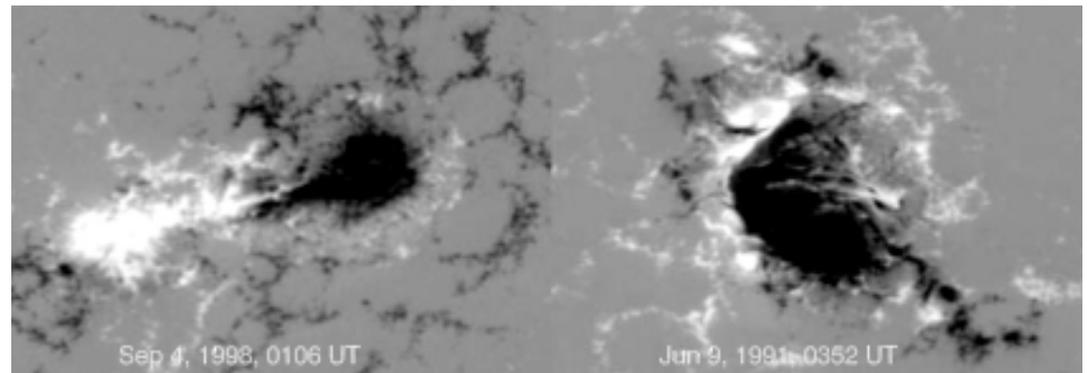
[Mandrini et al., 2000; Demoulin et al., 2003; Sorriso-Valvo et al., 2004; Abramenko, 2005]

- Mesure du champ magnétique photosphérique de régions actives
- Calcul des fonctions de structure à différents ordres:

$$S_q(\mathbf{r}) = \langle | \mathbf{B}_z(\mathbf{x}+\mathbf{r}) - \mathbf{B}_z(\mathbf{x}) |^q \rangle \sim r^{\zeta(q)}$$

(La moyenne est faite sur plus de 10^5 incréments)

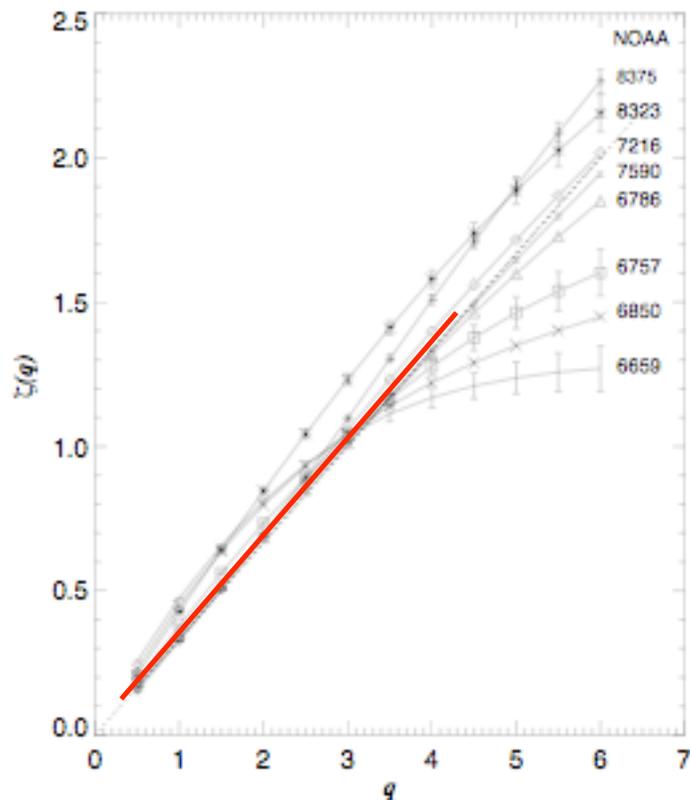
Magnétographe du HSOS
Raie du Fe I à 532.4nm
(AR 8323 et AR 6659)



Intermittence et activité éruptive

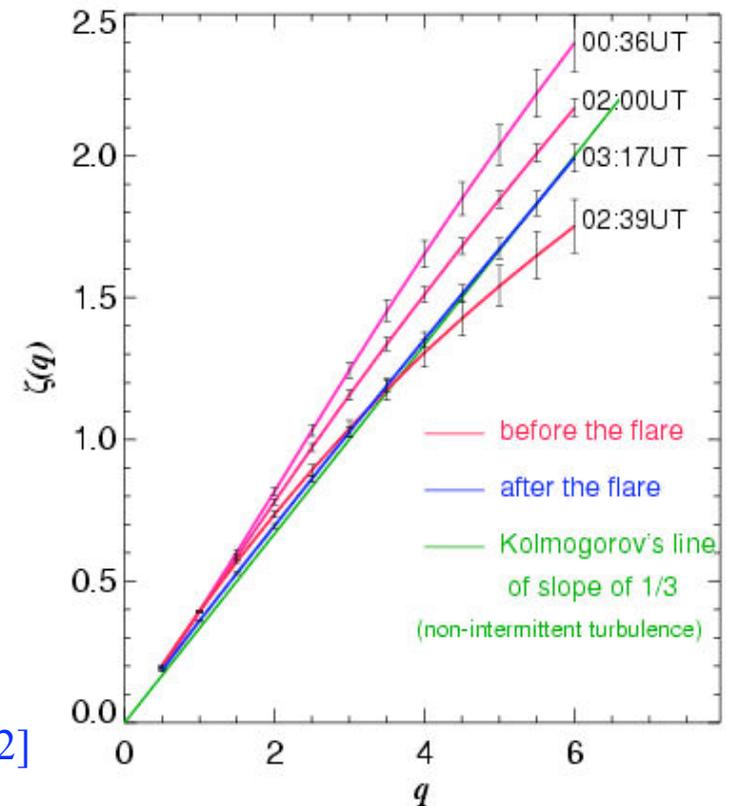
Exposants d'échelle $\zeta(q)$ des fonctions de structure à différents ordres q en fonction de q

Huit régions actives par ordre **d'activité croissante**



[Abramenko et al., 2002]

Une région active au **cours du temps**



Des conclusions et des perspectives

Que faire pour comprendre le chauffage coronal ?

- Nécessité d'étudier les **petites échelles** :
 - **Amélioration** des diagnostics : Solar Orbiter (0.2UA, $\delta x=35\text{km}$)...
 - Approche **théorique** différente : cinétiques / fluides (Hall/EMHD...)
- Y a-t-il **universalité** des lois observées (soleil calme et actif) ?
- Modélisation **plus fine** : thermodynamique (3D + turb.) ; numérique...
- Analyse **détaillée** des plasmas anisotropes turbulents
 - (Ex: $E(k_{\perp}, k_{\parallel}) \sim k_{\perp}^{-\alpha} k_{\parallel}^{-\beta}$ avec $3\alpha + 2\beta = 7$ [Galtier et al., 2005])
- Se tourner vers d'autres **observables** : accélération de particules...

Other slides

Signature possible de la turbulence

[Chae et al., ApJ 505, 957-973, 1998]

Mesures d'élargissements Doppler **excessifs** entre 10^4 K et $2 \cdot 10^6$ K

$$v^2 = 2kT/M + \xi^2$$

Étude de la couronne calme entre
04/1996 et 04/1997

30 raies UV de SUMER/SOHO
($\delta v = 1-2 \text{ km s}^{-1}$; $\delta x = 1 \times 2 \text{ arsec}$;
 $\delta t = 20-500 \text{ s}$)

→ ξ est interprété comme une
vitesse non thermique d'origine
turbulente

→ Mouvements **isotropes** ∇T

