Turbulence dans le vent solaire

Roland Grappin (*LUTH et LPP*) j'ai eu de nombreuses discussions sur ce thème récemment avec LPP: G.Belmont, Y. Dong (thésard), Ö. Gürcan Lesia: O. Alexandrova, F. Pantellini Garching: W.-C. Müller ; SIDC (Bruxelles): A. Verdini

On s'intéresse ici à ce que voit un satellite dans l'intervalle [1s, 1 jour] Ce satellite voit "de la turbulence" et en plus il voit que le plasma se refroidit anormalement lentement au cours de son advection/expansion par le vent

Donc il se pourrait que la turbulence se thermalise...

Dans cette gamme d'échelles, on va examiner ce qui colle et ce qui ne colle pas quand on tente, ô sacrilège, d'utiliser une description fluide (et même MHD, et même RMHD, et même ... incompressible !?!)

et on va conclure en disant ce que selon nous il faudrait faire pour que cela marche peut-être bien...

Colloque PNST 2012

Turbulence \Rightarrow dissipation

1. Ecoulement laminaire (une

seule échelle) la dissipation dépend de la viscosité µ du fluide

 $\mu \rightarrow 0 \Rightarrow \text{dissipation} \rightarrow 0$

2. Ecoulement turbulent (un spectre d'échelles)

la dissipation ne dépend PAS de μ , parce que la taille des plus petits tourbillons s'ajuste pour que la dissipation $\approx O(1)$ quand $\mu \rightarrow 0$

 $\mu \rightarrow 0 \Rightarrow \text{dissipation} \approx O(1)$



TOUILLETTE Du latin touillus, touillum : celui qui remue.



3 applications de la formule $\tau = L/u$

•vitesse limite d'une voiture de puissance W = 100 kWatt Masse d'un tourbillon $1m^3 \approx 1$ kg, dimension L $\approx 1m$ Dissipation d'énergie W = E/ τ = MU²/(L/U) = MU³/L V \approx vitesse limite de la voiture => U = (WL/M)^{1/3} $\approx (10^5 \text{x} 1/1)^{1/3} \approx 46 \text{m/s}$

•vitesse limite d'un nageur (brasse) de puissance 40W (wikipedia) masse d'un tourbillon (d'eau...): M $\approx 10^3$ kg => U ≈ 0.3 m/s => soit 20 minutes pour faire 300m: ... correct!

•vitesse limite d'un fleuve à l'embouchure (Volga, Rhône...) Sans turbulence: U $\approx (2gH)^{1/2} \approx 200m/s$ (chute libre depuis la montagne) Avec turbulence: U $\approx (2gL)^{1/2} \approx 4m/s$ (L $\approx 0.5m$): correct !





Sources du vent



2009 JANUARY 14 (STEREO B VIEW)

Maximum d'activité



Wang Y.-M. 2009

Variations radiales de vitesse et des fluctuations



Scott Coles Bourgois 1983

Vitesse du vent (km/s) en fonction de R

Scintillation radio des radio-sources La zone d'acclération du vent coincide avec le pic des fluctuations, vers 10 rayons solaires

Fluctuations δu en fonction de R

Variation du spectre magnétique entre 0.3 et 1 AU



Mission Helios

 Basse fréquence 1/f: L'énergie baisse avec R (effet linéaire de l'expansion du vent) B²≈1/R³ (régime onde...)

2) Haute fréquence f^{-5/3}: La cassure se déplace vers la gauche quand R passe de 0.3 à 1 AU marquant la limite entre grandes échelles linéaires et petites échelles non-linéaire : *Tu et al 1984 Tu et Marsch 1990*



Evaluer le chauffage (2)



Phénoménologie: forte ou faible?



Phénoménologie: forte ou faible?







Les spectres à 1 AU: pentes \neq pour Ev et Eb

Les spectres à 1 AU: une seule pente? (2)

Boldyrev Perez Borowsky Podesta 2011

Wind: deux mois de données, minimum solaire

Spectres Eb par tranche de température des ions: pentes entre 1.59 (jets chauds) et 1.72 (froids)

La turbulence semble plus stationnaire dans les jets froids (Grappin Velli Mangeney 1991)
 On voit ici que les jets chauds ont un régime unique (Eb et E+), (pas les jets froids!)

Simulations RMHD (2)

Boldyrev Perez Borowsky Podesta 2011

Simulations forcées

•E+>>E-

les pentes spectrales Ev (3/2) et Eb (5/3) "ressemblent" aux valeurs observées vers 1 AU

•E+≈E-:

les spectres simulés sont **plus plats** les spectres observées sont **plus pentus**

Discussion

Le forçage *semble* déterminer le régime turbulent (voir les résultats opposés de Boldyrev et al 2011 Chen et al 2011 Grappin Müller 2010)
Or le **forçage** dans le vent solaire est assuré par **l'expansion...**

Conclusion: il faut donc inclure l'expansion dans le forçage turbulent

Deux méthodes:

a) Shell RMHD (thèse Buchlin 2004, Nigro et al 2004, Buchlin Velli 2007) ⇒ adapté au vent solaire avec advection/expansion + piégeage par TR mais B° radial
b) MHD comobile (pseudo-lagrangien) (Grappin Mangeney Velli 1993, Grappin Velli 1996) ⇒ version 3D pour décrire la turbulence

Shell-RMHD piégeage/fuite et chauffage coronal

ICI exemple de la turbulence coronale (Vitesse d'Alfvén constante par morceaux): 3 couches: chromosphère + couronne + chromosphère

Verdini Grappin Velli 2011

Shell-RMHD: piégeage et cascade ds régions ouvertes (R<20Rs)

Verdini Grappin Pinto Velli 2012 (voir poster)

> T.R. LOW HIGH SOLAR CORONA **CORONA** WIND REFLECTION U≤V_A V_>>U V₊~V_ V₊>>V₋~0 WEAK z+ WEAK z⁺ WEAK z-STRONG z-

MHD comobile: turbulence 3D et expansion (R>20Rs)

Le modèle inclut l'expansion + stratification via la décroissance des quantités moyennes liées à l'expansion MAIS pas de piégeage (⇒ restriction R>20Rs) Grandes échelles

1.Expansion principalement \perp à $\hat{e}_r \Rightarrow$ Vect. d'onde tournent \rightarrow **Radiale**

2.⇒ cascade \perp ê_r retardée, cascade // favorisée

Petites échelles (dominées par NL)

1.B° favorise cascade \perp B°

2.mais (B°, \hat{e}_r) augmente avec R !

Résultat?

Numerical model of MHD/hybrid plasma including expansion ("expanding box model"): Grappin Velli Mangeney 1993, Grappin Velli 1996 (MHD), Hellinger et al 2003, 2005 (Hybrid simulations)

Ex: résultats de MHD 2D comobile

Grappin 1996

Formation d'anisotropie en δU et δB

<u>1. Formation de</u> <u>l'anisotropie</u> <u>grande échelle</u> (transport de 0.1 à 1 AU d'un vortex Alfvénique avec champ moyen radial, après t = 24temps de retournement

• Le vortex forme deux jets **radiaux**

le vortex
 magnétique forme
 des structures
 transverses

2. <u>Formation de la</u> <u>corrélation observée</u> <u>entre *onde réfléchie* z-<u>et fluctuation de</u> <u>densité</u> (échelle de l'heure)</u>

La corrélation s'obtient **uniquement** en tenant compte de l'expansion $(\varepsilon = \text{divU}^{\circ} \approx 1/t_{\text{NL}}^{\circ})$

Conclusion

Nous avons considéré le problème de la formation, de l'évolution du spectre dans le vent solaire et du chauffage qu'il peut générer.

Les simulations MHD indiquent que le forçage est fondamental pour déterminer le régime turbulent qui n'est pas universel

Or le forçage par l'expansion est très particulier et "force" différemment chaque degré de liberté - ceci n'est PAS pris en compte dans les simulations standard Par ailleurs, le recyclage des ondes réfléchies en ondes montantes sur la TR est fondamental pour déterminer la formation du spectre à grande échelle.

Ces deux aspects sont pris en compte successivement par le modèle en **deux temps**: a) $R \leq 20Rs$: stratification: vitesse d'Alfvén + vent (mais $B//\hat{e}_r$) modèle Shell-RMHD b) R>20Rs: expansion vent uniforme + simulations directes MHD 3D "comobile"

buts principaux

a) décrire l'évolution du spectre en 1/f à partir de la couronne

b) comprendre comment les deux axes de symétrie, radiale et champ magnétique se combinent au cours de la cascade