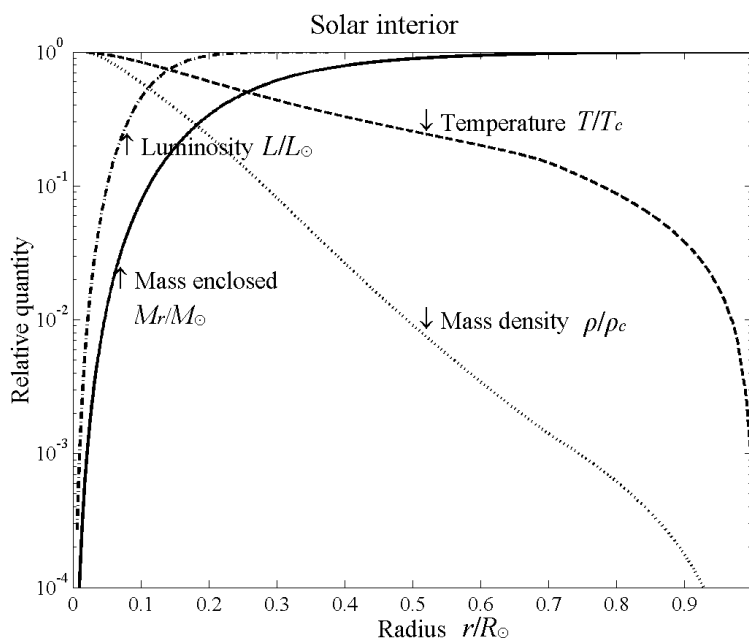


Examen TC10 : Plasmas et fluides en astrophysique/Déc. 2003

- Les 3 problèmes peuvent être traités dans un ordre quelconque.
- Chaque question est notée sur 1 point environ.
- On trouvera en dernière page les constantes et paramètres éventuellement utiles.



1. Quelques considérations sur l'intérieur du soleil



La figure montre quelques paramètres à l'intérieur du soleil déduits d'un modèle récent. La densité de masse ρ et la température T sont normalisées aux valeurs au centre du soleil : $T_c = 1.57 \times 10^7$ K and $\rho_c = 1.52 \times 10^5$ kg/m³. Le milieu est constitué essentiellement d'hydrogène (on négligera les autres éléments).

1.1 Etat du milieu

- On se place à une distance d'environ $0.7R_{\odot}$ du centre du soleil (haut de la zone radiative et bas de la zone convective) et on utilisera la figure ci-dessus.

- 1.1.1 Pouvez-vous expliquer brièvement pourquoi le milieu est significativement ionisé ?
- 1.1.2 Peut-on le considérer comme un gaz ? Est-il dégénéré ? Relativiste ?
- 1.1.3 Comparez la densité d'énergie du rayonnement à celle des particules et commentez brièvement.
- 1.1.4 Ecrivez une équation d'état approchée du milieu.
- 1.1.5 Indiquez très brièvement l'origine de la conductivité électrique et de la conductivité thermique et estimez numériquement leurs ordres de grandeur.

1.2 Quelques aspects du comportement du milieu

- 1.2.1 Ecrire l'équation d'équilibre hydrostatique (en négligeant l'effet du champ magnétique) à la distance r du centre du soleil, et montrer que sur une distance très petite devant le rayon, la densité décroît exponentiellement avec la distance.
- 1.2.2 Calculer la valeur numérique de l'échelle caractéristique H de variation de la densité à $r = 0.7R_{\odot}$ du centre, et comparez avec la figure en commentant brièvement.
- 1.2.3 Certains modèles prédisent un champ magnétique de l'ordre de 1 T à cette distance du centre. Quel effet ce champ a-t-il sur l'équilibre hydrostatique ?
- 1.2.4 A cette distance, pensez-vous que la conduction thermique joue un rôle important dans la propagation de la chaleur ? Justifiez votre réponse.
- 1.2.5 Un champ magnétique occupant tout le soleil au-delà de $0.7R_{\odot}$ pourrait-il avoir survécu depuis la formation du soleil ? Justifiez votre réponse.

2. Onde d'Alfvén

- 2.1 On considère une onde d'Alfvén plane de petite amplitude se propageant parallèlement au champ magnétique \mathbf{B}_0 dans un plasma initialement immobile et uniforme, à une vitesse de phase petite devant la vitesse de la lumière. Indiquez l'orientation des champs électrique et magnétique de l'onde par rapport à \mathbf{B}_0 à un instant donné, et donner l'expression de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe en fonction de paramètres du plasma.
- 2.2 Dessiner la forme de plusieurs lignes de champ magnétique (a) à un instant donné et (b) $1/2$ période plus tard. Donner une relation (en module et direction) entre le champ magnétique et la vitesse du plasma dans l'onde.
- 2.3 Montrer que la force due au gradient de pression magnétique est négligeable devant la tension magnétique.
- 2.4 Donner une expression du champ électrique de l'onde et comparer les densités d'énergie électrique et magnétique dans l'onde.
- 2.5 Calculer la vitesse de dérive des ions et celle des électrons. Comparez avec les résultats ci-dessus et commentez brièvement.

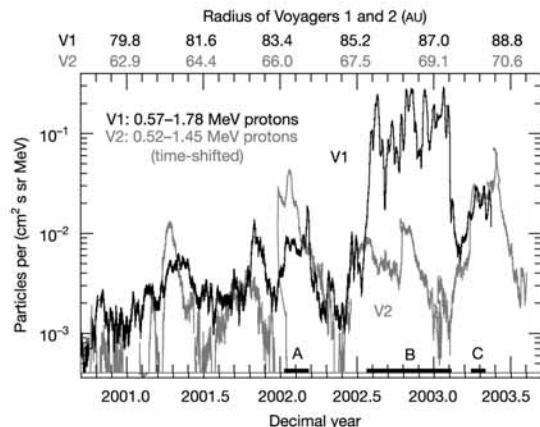
3. La sonde Voyager 1 est-elle sortie du vent solaire ?

Un article paru dans la revue *Nature* du 6 Novembre 2003 (c.f. ci-dessus) annonce que la sonde spatiale Voyager 1 a traversé l'onde de choc qui termine le vent solaire.

Voyager 1 exited the solar wind at a distance of ~ 85 AU from the Sun

S. M. Krimigis¹, R. B. Decker¹, M. E. Hill², T. P. Armstrong³, G. Gloeckler², D. C. Hamilton², L. J. Lanzerotti^{4,5} & E. C. Roelof¹

The outer limit of the Solar System is often considered to be at the distance from the Sun where the solar wind changes from supersonic to subsonic flow¹. Theory predicts that a termination shock marks this boundary, with locations ranging² from a few to over 100 AU. (1 AU $\approx 1.5 \times 10^8$ km, the distance from Earth to the Sun) [...]. We argue that the spacecraft exited the supersonic solar wind and passed into the subsonic region (possibly beyond the termination shock) on about 1 August 2002 at a distance of ~ 85 AU



Le soleil se déplace dans le milieu interstellaire, qui constitue un obstacle obligeant le vent solaire à stopper. Comme le vent solaire est supersonique, cela devrait impliquer une onde de choc. La distance du choc au soleil peut être très grossièrement estimée en écrivant que la densité d'énergie du vent solaire en amont du choc est égale à celle du milieu interstellaire.

On ne peut pas détecter ce choc en mesurant la vitesse du vent car l'instrument ne fonctionne plus. Mais un autre instrument a détecté une augmentation considérable des particules énergétiques (Figure) que les auteurs attribuent à une accélération au voisinage du choc.

3.1 Calculez le rayon de gyration des protons de 1 MeV (10^6 eV) dans le vent solaire à 85 U.A. du soleil. Quelle est la dimension minimum d'une structure capable d'accélérer ces particules ?

3.2 Estimez numériquement la vitesse de dérive d'un proton de 1 MeV due à la variation du champ magnétique du vent solaire, à cette distance du soleil, au voisinage du plan de l'écliptique (on considèrera un proton de vitesse presque perpendiculaire au champ magnétique). Quelle est sa direction ?

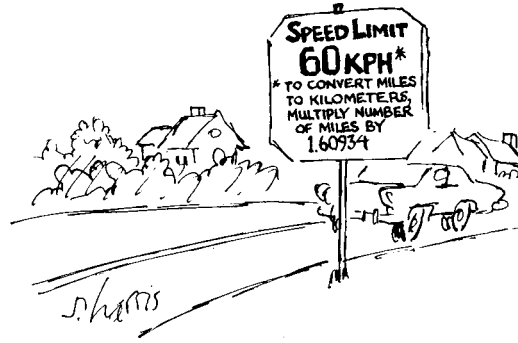
3.3 A quelle vitesse le long du champ magnétique se propagent les perturbations magnétiques et celles de densité de masse ?

3.4 En supposant que pour chacun des milieux (vent solaire et milieu interstellaire), la contribution principale à la densité d'énergie est l'énergie cinétique du mouvement d'ensemble, estimez la distance du choc au soleil. Comparez à ce que suggère l'article et commentez brièvement.

3.5 Un autre article de la revue *Nature* conteste que la sonde Voyager ait traversé le choc. Pourriez-vous dire pourquoi observer des particules très énergétiques à bord de Voyager n'implique pas forcément que la sonde traverse le choc ?

3.6 Compte-tenu des paramètres, pensez-vous que les fonctions de distribution des vitesses des particules soient Maxwelliennes ? Justifiez votre réponse.

3.7 A 85 U.A. du soleil, la surface de la sonde émet environ 10^{10} photoélectrons/m²/s. Montrer qu'elle est chargée positivement et indiquez comment (qualitativement) cela modifie les fonctions de distribution des vitesses des particules mesurées à bord.



- 1 parsec = $3. \times 10^{16}$ m,
- 1 U.A. = 1.5×10^{11} m,
- 1 eV = 1.6×10^{-19} J
- 1 année $\simeq 3. \times 10^7$ secondes

Paramètres du vent solaire à grande distance du soleil ($r \gg 1$ U.A.) :

- champ magnétique : environ $3. \times 10^{-9}/r_{U.A.}$ T où $r_{U.A.}$ désigne la distance au soleil exprimée en U.A., sa direction est presque azimuthale près du plan de l'écliptique,
- densité des protons (et des électrons) : environ $5. \times 10^6/r_{U.A.}^2$ m⁻³,
- vitesse du vent : environ 300 km/s,
- température : environ 10^4 K.

Paramètres du milieu interstellaire dans l'environnement solaire :

- densité des protons (et des électrons) : environ 10^5 m⁻³,
- vitesse par rapport au soleil : 26 km/s,
- température : environ 10^4 K.

Paramètres du soleil :

- masse : $M_{\odot} = 2. \times 10^{30}$ kg,
- rayon : $R_{\odot} = 7. \times 10^8$ m,
- âge : environ 4.6×10^9 années

- charge de l'électron : $e = 1.6 \times 10^{-19}$ Cb,
- vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3. \times 10^8$ m/s,
- masse de l'électron : $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg,
- masse du proton : $m_p = 1.7 \times 10^{-27}$ kg,
- constante de Planck $h = 6.6 \times 10^{-34}$ Js,
- constante de rayonnement $a = \pi^2 k_B^4 / 15 h^3 c^3 = 7.6 \times 10^{-16}$ J/m³/K⁴,
- constante de gravitation $G = 6.7 \times 10^{-11}$ (unités S.I.),
- constante de Boltzmann $k_B = 1.4 \times 10^{-23}$ J/K,
- perméabilité du vide $\epsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (unités S.I.).