

# Corrigé résumé de l'examen TC9 : Plasmas astrophysiques (cours N. Meyer)/29 Novembre 2006

## I. Processus collisionnels en plasma

Voir les polys.

## II. Milieu interstellaire et astrosphères

### 1. Pressions du plasma (2)

(a) Pression du **plasma** interstellaire (électrons + protons) :  $2n_I k_B T_I$ . Pression magnétique :  $B_I^2/(2\mu_0)$ . Total :  $\simeq 4 \times 10^{-14}$  Pa.

(b) Pression dynamique du **plasma** :  $n_I m_p V_I^2 \simeq 5 \times 10^{-14}$  Pa (on néglige les électrons car  $m_e \ll m_p$ ).

### 2. Taille de l'héliosphère (2)

(a) A cause de la conservation des particules avec  $V \simeq$  constante, la densité des protons du vent solaire :  $n \simeq 5 \times 10^6 / r_{UA}^2$ , d'où la pression dynamique :  $nm_p V^2 \simeq 1.3 \times 10^{-9} / r_{UA}^2$  Pa.

(b)  $r_{UA} \simeq [1.3 \times 10^{-9} / 2 \times 10^{-13}]^{1/2} \simeq 81$ .

(c) On pourrait noter que l'égalité des pressions équivalentes n'est pas réalisée au choc mais à l'"héliopause" (la frontière entre les deux milieux), mais cela ne change pas les ordres de grandeur. En première approximation les neutres sont négligeables car leur couplage au plasma est faible; mais pour un calcul précis, on doit tenir compte des collisions des neutres avec les particules chargées et de leur échange de charge avec les protons.

### 3. La sonde Voyager 1 (2)

L'énoncé indiquant que la sonde est approximée par une sphère conductrice, elle est équipotentielle. Le potentiel est donc calculé en faisant le bilan des courants totaux : courant de photoélectrons éjectés par la partie exposée au soleil (surface projetée  $\pi R^2$ ), et courant du plasma sur toute la surface ( $4\pi R^2$ ). Donc :

- Photoélectrons éjectés par s par sphère de rayon  $R$  :  $I_{ph} \simeq 10^{14} \times \pi R^2 / r_{UA}^2$ .

- Electrons ambiants collectés par seconde par la sphère de rayon  $R$  :  $I_{eI} \simeq n_I \times 4\pi R^2 \times v_{eI} / 4$  où moyenne du module de la vitesse des électrons :  $v_{eI} = [8k_B T_I / (\pi m_e)]^{1/2} \gg V_I$ . Le flux de protons est négligeable.

D'où :  $I_{ph} / I_{eI} \simeq 3 \times 10^3 / r_{UA}^2 < 1$  puisque dans le milieu interstellaire  $r_{UA} > 10^2$ . Donc potentiel négatif  $\simeq$  quelques Volts (puisque  $T_I \sim 1$  eV).

### 4. Astrosphère (4)

A la frontière de l'astrosphère, située à la distance  $D$  de l'étoile, on a  $P_{totI} \simeq nm_p V^2$ , où  $n$  est la densité de protons (ou électrons) dans le vent à cette distance et  $V$  la vitesse du vent. D'où la masse éjectée par s par le vent :  $nm_p V \times 4\pi D^2 \simeq 4\pi D^2 \times$

$P_{totI}/V \simeq 10^{16}$  kg/s. Cette valeur est très supérieure à la masse éjectée par le Soleil  $\simeq nm_p V \times 4\pi D^2$  où pour le vent solaire  $n \simeq 5 \times 10^6$  m<sup>-3</sup> et  $V \simeq 4 \times 10^5$  m/s à  $D = 1$  UA ( $1.5 \times 10^{11}$  m), soit  $\simeq 10^9$  kg/s.

### III. Champ électrostatique de polarisation autour d'une étoile

#### 1. Champ électrique dans une atmosphère statique (6)

(a) Puisque  $m_e \ll m_p$ , les forces sont égales si  $m_p g - eE \simeq eE$  (avec  $g = MG/r^2$  et  $E$  le champ électrique), d'où  $E \simeq m_p MG/(2er^2)$ , dirigé dans le sens opposé à l'attraction gravitationnelle.

(b) D'où potentiel électrostatique  $\Phi \simeq m_p MG/(2er) \simeq 250$  V pour  $r = 4R_\odot$ . D'où  $e\Phi \simeq k_B T$ .

(c) Poisson :  $\nabla^2 \Phi = -(n_p - n_e)e/\epsilon_0$ . Avec  $\Phi \propto 1/r$ ,  $\nabla^2 \Phi = 2\Phi/r^2$ , d'où  $n_p - n_e = -2\Phi\epsilon_0/(er^2) \simeq 3 \times 10^{-9}$ , complètement négligeable devant la densité dans une couronne typique.

#### 2. Champ électrique en présence d'un vent (6)

(a) Avec  $e\Phi \simeq k_B T$ , le potentiel ne retient pas assez les électrons pour empêcher leur flux éjecté d'être très supérieur (d'un facteur  $\sim v_{the}/v_{thp} \simeq (m_p/m_e)^{1/2}$ ) au flux de protons éjectés.

(b) Pour que les flux soient égaux, il faut que le potentiel satisfasse en ordre de grandeur :  $(m_p/m_e)^{1/2} \simeq \exp(e\Phi/k_B T)$ , soit  $\Phi \simeq k_B T \ln(43)/e \simeq 650$  V.

(c) L'ordre de grandeur de la vitesse maximale  $V_{max}$  est donné par  $m_p V_{max}^2/2 \simeq e\Phi$ , soit 350 km/s.

Pour la petite histoire, au début des théories du vent solaire, les modèles cinétiques avaient été abandonnés parce que le champ électrique était calculé comme en 1), et était donc trop petit. Lorsqu'on tient compte du vent, le champ électrique est plus grand, surtout si la fonction de distribution a une queue suprathermique.