

## Examen TC9 : Plasmas astrophysiques (cours N. Meyer)/29 Novembre 2006

- Notes et polys autorisés ; calculatrices fortement recommandées.
- Les 3 parties peuvent être traitées dans un ordre quelconque ; dans chacune, il est préférable (mais pas toujours indispensable) de traiter les questions dans l'ordre.
- Pour chaque question numérotée, le barème est indiqué entre parenthèses, avec un total de 30 ; l'examen étant noté sur 20, vous avez un certain choix.
- On trouvera en dernière page des constantes et paramètres éventuellement utiles.

### I. Processus collisionnels en plasma

#### 1. Collisions entre particules chargées (4)

Résumer en quelques lignes le principe du calcul du libre parcours moyen dans un plasma pour les collisions entre particules chargées, en expliquant brièvement :

- Pourquoi les collisions lointaines jouent un rôle important,
- Pourquoi le libre parcours moyen est proportionnel au carré de la température (pour un plasma Maxwellien),
- Comment le libre parcours collisionnel d'un électron de vitesse  $v$  varie avec  $v$  ; justifier brièvement. Même question pour un ion de vitesse  $v$ .
- Expliquez brièvement pourquoi les fonctions de distribution des particules ne sont généralement pas Maxwelliennes dans les plasmas faiblement collisionnels ; quelle partie de la fonction de distribution n'est pas Maxwellienne et pourquoi ?

#### 2. Collisions des électrons avec les particules neutres (2)

Si le plasma n'est pas (presque) complètement ionisé, il faut a priori tenir compte aussi des collisions avec les particules neutres.

- Résumer en quelques lignes le principe du calcul du libre parcours moyen des électrons pour les collisions avec les neutres.
- A quelle condition peut-on négliger les collisions avec les neutres pour calculer le libre parcours moyen des électrons ? Montrer que cette condition peut s'exprimer comme :  $n_n/n \ll \alpha/T^2$  (où  $n$  et  $n_n$  désignent respectivement les densités des électrons et des particules neutres,  $T$  la température des électrons, et  $\alpha$  est un coefficient numérique variant peu avec les paramètres du milieu).

#### 3. Conductivité électrique (2)

Donner une expression simple de la conductivité électrique d'un plasma en fonction de la température. Quelles sont les conditions pour pouvoir appliquer cette formule ?

### II. Milieu interstellaire et astrosphères

Le nuage interstellaire local dans lequel se trouve en ce moment le Soleil est formé d'hydrogène partiellement ionisé, dont les paramètres sont indiqués en fin d'énoncé.

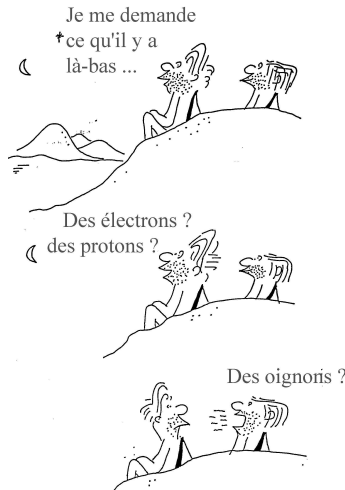


FIG. 1 – Le milieu interstellaire local

### 1. Pressions du plasma (2)

- (a) Calculer numériquement les contributions à la pression du plasma interstellaire dues à l'agitation thermique des particules et au champ magnétique.
- (b) Calculer numériquement la pression dynamique du plasma interstellaire due à son mouvement par rapport au Soleil. En supposant que les rayons cosmiques ajoutent aux contributions précédentes une contribution égale à la somme des contributions que vous avez calculées, montrer que la pression équivalente totale agissant sur l'héliosphère est environ  $P_{totI} \simeq 2 \times 10^{-13}$  Pa.

### 2. Taille de l'héliosphère (2)

On suppose que la densité des protons du vent solaire est  $n = 5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$  à 1 UA du Soleil avec une vitesse d'ensemble  $V = 400 \text{ km/s}$ , supposée constante.

- (a) Calculer numériquement la pression dynamique exercée par le vent sur le plasma interstellaire, à la distance  $r_{UA}$  du Soleil (exprimée en Unités Astronomiques).
- (b) L'impact du vent solaire supersonique sur le plasma interstellaire forme un choc, à l'endroit où les pressions équivalentes totales des deux plasmas sont approximativement égales. Calculez numériquement cette distance. (Pour le vent solaire, on négligera les contributions des pressions dues à l'agitation thermique des particules et au champ magnétique.)
- (c) Que pensez-vous de ce calcul ? En particulier, est-il justifié de négliger les particules neutres du milieu interstellaire ?

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

La sonde Voyager 1 a observé des indications de la présence d'un choc à environ 94 AU. Au-delà de cette distance, le vent solaire, devenu subsonique, ralentit, et rencontre le milieu interstellaire à une distance d'environ une centaine d'UA, où se trouve l'"héliopause" : la frontière de l'héliosphère.

Estimer quel devrait être le potentiel électrostatique de cette sonde dans le milieu interstellaire. On approximera la sonde par une sphère conductrice dont la partie exposée au soleil éjecte environ  $10^{14}$  photoélectrons par s par  $\text{m}^2$  de surface projetée perpendiculairement à la direction du Soleil (soit  $10^{14} \times \pi R^2$  pour une sphère de rayon  $R$ ) lorsque sa distance au soleil est 1 UA.

#### 4. Astrosphère (4)

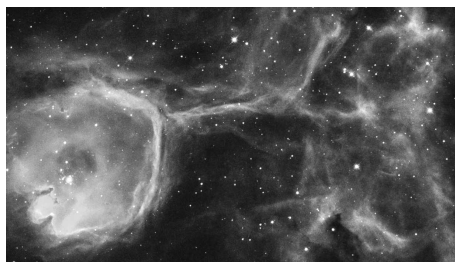


FIG. 2 – Image d'une 'astrosphère'. Image Hubble Space Telescope, credit ESA/NASA, Yael Nazé (University of Liège, Belgium) et You-Hua Chu (University of Illinois, Urbana, USA).

Nous n'avons pas d'image de l'héliosphère entourant le soleil, mais la figure 2 montre l'image d'une "astrosphère" produite par le vent d'une étoile brillante jeune rencontrant le milieu interstellaire. Sachant que le rayon de cette structure est environ  $10^{17}$  m, et que le vent de cette étoile est formé de protons éjectés à environ 2000 km/s, en déduire un ordre de grandeur de la perte de masse correspondante (en kg/s), en supposant que les paramètres du milieu interstellaire qui l'entoure sont les mêmes que dans le cas du Soleil. Comparer cette perte de masse à celle du Soleil.

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

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

On considère une étoile de masse  $M$  et rayon  $R$  entourée d'une couronne formée de protons et d'électrons supposés en équilibre thermodynamique statique à la température  $T = 2 \times 10^6$  K.

- Montrer que pour que les protons et les électrons de la couronne soient soumis à la même force, il doit exister un champ électrique radial dirigé vers l'extérieur. Calculer l'amplitude de ce champ en fonction de la distance  $r$  du centre de l'étoile.
- Calculer le potentiel électrostatique correspondant en fonction de  $r$ . Donner sa valeur numérique à la distance  $r_0 = 4R$  du centre de l'étoile en supposant que la masse et le rayon de l'étoile sont les mêmes que pour le Soleil. Montrez qu'à cette distance l'énergie électrostatique des particules dans ce potentiel est du même ordre de grandeur que leur énergie thermique.
- En utilisant l'équation de Poisson, donner l'ordre de grandeur de la différence

entre les densités des électrons et des protons en présence de ce potentiel. Montrer qu'elle est négligeable et que donc la neutralité électrique est pratiquement respectée.

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

On suppose maintenant que la couronne est en expansion radiale, produisant un vent. On suppose qu'à partir de la distance  $r_0 = 4R$  du centre de l'étoile, toutes les particules ont une vitesse dirigée vers l'extérieur, et que la moyenne du module de leur vitesse est la même que pour une Maxwellienne.

(a) Montrer que si le champ électrostatique n'est pas plus grand que celui calculé en l'absence de vent, l'atmosphère éjecte vers l'extérieur beaucoup plus d'électrons que de protons.

(b) A l'équilibre, l'atmosphère doit éjecter autant d'électrons que de protons. Faire une estimation approchée du potentiel électrostatique à la distance  $r_0$  pour que cette condition soit remplie en supposant que la masse et le rayon de l'étoile sont les mêmes que pour le Soleil. Montrer que ce potentiel est très supérieur à sa valeur en l'absence de vent.

(c) Le champ électrique correspondant accélère les protons vers l'extérieur. En appliquant la conservation de l'énergie, donner un ordre de grandeur de la vitesse maximale que les protons peuvent atteindre de cette façon.

### Constantes fondamentales :

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 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.).

### Paramètres du nuage interstellaire local :

densité des particules neutres :  $n_{nI} \simeq 10^5$  m<sup>-3</sup>

densité des électrons :  $n_I \sim 0.05 \times 10^6$  m<sup>-3</sup>

température :  $T_I \simeq 10^4$  K

vitesse d'ensemble par rapport au Soleil :  $V_I \simeq 2.5 \times 10^4$  m/s

champ magnétique  $B_I \simeq 2.5 \times 10^{-10}$  T.

### Paramètres du vent solaire :

densité des électrons  $n = 5 \times 10^6$  m<sup>-3</sup> à 1 UA du Soleil

vitesse d'ensemble  $V = 400$  km/s

1 unité astronomique (UA) =  $1.5 \times 10^{11}$  m.

### Paramètres du Soleil :

masse :  $M_\odot \simeq 2. \times 10^{30}$  kg,

rayon :  $R_\odot \simeq 7. \times 10^8$  m.