

## Examen TC10 : Plasmas et fluides en astrophysique (cours de N. Meyer)/Déc. 2004

- Notes autorisées ; calculettes 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 29 ; comme l'examen est noté sur 20, vous avez un certain choix.
- On trouvera en dernière page les constantes et paramètres éventuellement utiles.

### I. Ondes en plasmas

#### 1. Généralités (2)

a) On s'intéresse d'abord à la propagation des ondes électromagnétiques dans un plasma, *en l'absence de champ magnétique permanent*. Donner (sans justification) une expression approchée de l'indice de réfraction et en donner une (brève) interprétation physique en indiquant le rôle des électrons et des ions. Expliquez pourquoi (en première approximation) l'agitation thermique des particules ne modifie pas l'indice.

b) Expliquer brièvement comment le champ magnétique modifie la propagation des ondes électromagnétiques en plasma. Donner (sans démonstration) l'expression de l'indice de réfraction pour les ondes se propageant *parallèlement* au champ magnétique, à des fréquences assez grandes pour qu'on puisse négliger le mouvement des ions. Quelle est la différence entre l'onde droite et l'onde gauche ?

#### 2. Deux cas limites (3)

a) Que vaut l'indice de réfraction pour les ondes électromagnétiques se propageant parallèlement au champ magnétique dans la limite où le champ magnétique est très grand. Donner une interprétation physique du résultat.

b) Que vaut l'indice de réfraction pour les ondes électromagnétiques se propageant parallèlement au champ magnétique dans la limite  $\omega \rightarrow \omega_g$  ? De quel mode s'agit-il ? L'onde est absorbée par le milieu. Donnez-en une interprétation physique en comparant le sens de gyration des électrons et celui de l'onde. L'approximation "plasma froid" est-elle justifiée dans ce cas ?

#### 3. Signal radio d'un pulsar (4)

a) On étudie le signal radio d'un pulsar situé à une distance inconnue. Le signal de fréquence 150 MHz arrive après celui de fréquence 200 MHz. Pourquoi ? Le délai est de 3 secondes. Si la densité moyenne du milieu interstellaire est  $4 \times 10^4$  électrons/m<sup>3</sup>, quelle est la distance du pulsar ? On négligera le champ magnétique.

b) Quelles autres hypothèses plus ou moins douteuses avez-vous faites pour obtenir ce résultat ?

#### 4. Domaines de propagation (3)

Y-a-t-il des domaines de fréquence où aucune onde électromagnétique ne se propage parallèlement au champ magnétique et lesquels ? Comment la réponse dépend-elle du rapport  $\omega_p/\omega_g$  ?

## II. Collisions, viscosité, et conductivité thermique

### 1. Collisions (1)

Quelle est la différence fondamentale entre les collisions des particules dans un gaz neutre et dans un plasma ? Comment le libre parcours moyen des particules varie-t-il avec la température dans les deux cas ?

### 2. Viscosité et conductivité thermique (2)

a) Expliquer brièvement à quoi est due la viscosité d'un fluide (non turbulent), quel est son rôle dans la dynamique, et pourquoi dans un plasma la viscosité est déterminée par les ions.

b) Expliquer brièvement à quoi est due la conductivité thermique d'un fluide (non turbulent), quel est son rôle dans le bilan énergétique, et pourquoi dans un plasma la conductivité thermique est déterminée par les électrons.

### 3. L'oreille interne (3)

a) L'oreille interne contient un mécanisme servant à l'équilibre, constitué de canaux de diamètre environ 1 mm qui sont remplis d'un liquide de propriétés physiques voisines de celles de l'eau, avec un organe qui détecte les mouvements du liquide par rapport au canal. Lorsque vous tournez la tête, ce qui met en mouvement un canal, l'ensemble du liquide ne suit pas immédiatement le mouvement. Pourquoi ?

b) Si le mouvement de la tête persiste, quel est l'ordre de grandeur du temps que met l'ensemble du liquide à suivre le mouvement ?

### 4. Transport de chaleur dans la couronne solaire (5)

a) On se place dans une région de la couronne solaire où la densité des électrons est  $n \sim 10^{14} \text{ m}^{-3}$  et la température  $T \sim 10^6 \text{ K}$ . Estimez le libre parcours moyen des électrons. Montrer que la conductivité thermique  $\kappa \propto T^{5/2}$ .

b) Pensez-vous que la formule que vous avez utilisée pour démontrer cette dernière relation est justifiée ?

c) Supposez que la couronne est immobile, que le rayonnement contribue de façon négligeable au bilan d'énergie, et que le problème est à symétrie sphérique. Montrez que dans ce cas le flux de chaleur est dirigé radialement et que la température obéit à l'équation

$$\frac{d}{dr} \left( r^2 T^{5/2} \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

où  $r$  est la distance au soleil.

- d) En déduire la variation de la température avec  $r$  en supposant que  $T \rightarrow 0$  quand  $r \rightarrow \infty$ .

### III. Une étoile sans couronne (6)

On considère une étoile de masse  $M$ , isolée dans un milieu qui se comporte comme un gaz parfait de masse moyenne par particule  $\mu$  et dont la température  $T$  est uniforme. On supposera le problème stationnaire et à symétrie sphérique (les quantités ne dépendent que de la distance  $r$  à l'étoile).

a) Montrer que si le milieu est *statique* (vitesse d'ensemble nulle), sa densité à la distance  $r$  est de la forme :

$$\rho = \rho_\infty e^{r_B/r} \quad (2)$$

où

$$r_B = \frac{\mu M G}{k_B T} \quad (3)$$

et  $\rho_\infty$  est la densité à l'infini.

b) On suppose que l'étoile a la même masse et le même rayon que le soleil mais (contrairement au soleil) *n'est pas entourée d'une couronne chaude*. On suppose aussi que le milieu interstellaire ambiant contient  $n \sim 10^5$  protons et électrons par  $\text{m}^3$  à grande distance de l'étoile, et que sa température est uniforme et vaut  $T \sim 10^4$  K. Si la formule (2) est correcte, quelle est la densité du milieu près de la surface de l'étoile ?

c) Que pensez-vous du résultat trouvé ? Que se passe-t-il si on abandonne l'hypothèse faite en a) ?

#### Paramètres divers :

Canaux de l'oreille interne :

- diamètre : environ 1 mm,
- viscosité cinématique de l'eau :  $\nu \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

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.).

Divergence en coordonnées sphériques (cas à symétrie sphérique) :

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 A_r)$$

Paramètres du soleil :

- masse :  $M_{\odot} = 2. \times 10^{30}$  kg,
- rayon :  $R_{\odot} = 7. \times 10^8$  m.

