

Examen TC9 : Plasmas astrophysiques (cours N. Meyer)/17 Décembre 2008

- Notes et polys autorisés; calculatrices fortement recommandées.
- Les 2 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 27, l'examen étant noté sur 20.
- On trouvera en dernière page des constantes, notations et paramètres éventuellement utiles.

I. Nanoparticules dans l'héliosphère

On considère un grain de poussière, qu'on assimilera pour ce problème à une sphère de rayon a , dans le vent solaire dont les caractéristiques utiles sont rappelées en dernière page.

1. Flux d'électrons arrivant sur le grain (2+2+1)

- Montrer qu'on peut en première approximation négliger la vitesse d'ensemble V du vent solaire par rapport aux vitesses d'agitation thermique des électrons. Calculer la moyenne du module de la vitesse des électrons, v_e , en supposant que la fonction de distribution est Maxwellienne. Montrer que $v_e = (8k_B T / (\pi m_e))^{1/2}$. Que pensez-vous des approximations de ce calcul?
- Expliquer pourquoi lorsque le grain n'est pas chargé électriquement, le nombre d'électrons du plasma arrivant sur le grain par seconde vaut : $N_{e0} \simeq n v_e \pi a^2$.
- En déduire une expression numérique de N_{e0} en fonction du rayon du grain a et de la distance au soleil (exprimée en UA) d_{UA} .

2. Charge électrique (2+2+2)

On suppose qu'à 1 UA du soleil, le grain éjecte $N_{ph0} \simeq 10^{14} \times \pi a^2$ photoélectrons par seconde, de température $T_{ph} \simeq 2$ eV.

- Montrer que le grain (de surface supposée équipotentielle) se charge électriquement et qu'à l'équilibre son potentiel électrostatique vaut $\phi \simeq 5$ V.
- Montrer que la charge électrique sur le grain vaut approximativement $q \simeq 4\pi\epsilon_0 a \phi$. Calculer numériquement q en fonction de a et montrer qu'elle est indépendante de la distance au soleil. Quelle est la valeur de q pour $a = 5 \times 10^{-9}$ m? Quelle est la valeur minimum de a pour que ce calcul soit valable?
- Calculer l'ordre de grandeur du temps que le grain met à se charger ainsi. Comment ce temps varie-t-il avec la distance au soleil?

3. Forces exercées sur le grain (2+2+1)

Compte-tenu de la petite taille du grain on négligera la force due à la pression de radiation.

- On suppose d'abord le grain en orbite képlérienne circulaire autour du soleil à 1 UA. Montrer que sa vitesse par rapport au vent solaire est en première approximation égale à la vitesse du vent solaire, et en déduire la force de Lorentz sur le grain en fonction de a et de la distance au soleil (exprimée en UA) d_{UA} .
- On suppose que la masse volumique du grain vaut $\rho \simeq 2 \times 10^3$ kg m⁻³. Calculer le rapport entre la force d'attraction gravitationnelle du soleil sur le grain et la force de Lorentz en fonction de a et de d_{UA} . Quelle est la force qui domine à 1 AU pour $a = 5 \times 10^{-9}$ m?

(c) Montrer que le paramètre clé pour répondre à cette question est le rapport charge-sur-masse q/m du grain. A partir de quelle valeur de q/m peut-on négliger la force de gravitation à 1 AU ?

4. Mouvement du grain dans le champ magnétique du vent solaire (2+2+2)

On considère un grain de rapport charge-sur-masse $q/m = 3 \times 10^3$ Cb/kg.

(a) Comparez cette valeur de q/m à la valeur pour un proton. Quel type de mouvement effectue le grain ? On se placera dans le repère où le vent solaire est immobile et on supposera que la force dominante est la force de Lorentz.

(b) Calculer son rayon de gyration et sa période de gyration en fonction de a et de la distance au soleil.

(c) Calculer ces valeurs à 1 UA et commenter ces résultats. Le moment magnétique est-il conservé ? Justifiez votre réponse.

II. Signal radio d'un pulsar (1+3+1)

On étudie depuis un observatoire situé sur Terre le signal radio d'un pulsar situé à une distance inconnue, aux fréquences 200 et 300 MHz.

(1) Le signal est-il modifié significativement par la traversée de l'ionosphère terrestre ? Et par celle de l'héliosphère ? Justifiez votre réponse.

(2) Le signal de fréquence 200 MHz arrive après celui de fréquence 300 MHz. Pourquoi ? Le délai est de 4 secondes. Si la distance du pulsar est de 10^3 parsecs, quelle est densité moyenne du milieu interstellaire situé sur le trajet de l'onde ? On négligera le champ magnétique.

(3) Quelles hypothèses avez-vous faites pour ce calcul et qu'en pensez-vous ?

Constantes fondamentales et valeurs numériques éventuellement utiles :

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 vent solaire :

d_{UA} = distance au soleil exprimée en UA ;

1 UA $\simeq 1.5 \times 10^{11}$ m ;

Densité des électrons à la distance d_{UA} du soleil : $n \sim 5 \times 10^6 / d_{UA}^2$ m $^{-3}$;

Température des électrons : $T \sim 10^5$ K à 1 UA du soleil (on négligera sa variation avec la distance ;

Vitesse d'ensemble $V \sim 400$ km/s ;

Composante du champ magnétique perpendiculaire à la vitesse à la distance d_{UA} : $B \sim 4 \times 10^{-9} / d_{UA}$ T ;

Composante du champ magnétique parallèle à la vitesse, à la distance d_{UA} : $B \sim 4 \times 10^{-9} / d_{UA}^2$ T ;

Masse du soleil : 2×10^{30} kg ;

1 parsec $\simeq 3 \times 10^{16}$ m