

## Examen TC9 : Plasmas astrophysiques (cours N. Meyer)/28 Novembre 2007

- 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 26, l'examen étant noté sur 20.
- On trouvera en dernière page des constantes et paramètres éventuellement utiles.

### I. Particules dans un champ magnétique

#### 1. Caractéristiques du mouvement (6)

Résumer en quelques lignes les points qui vous paraissent essentiels dans les caractéristiques du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique :

- les caractéristiques de la trajectoire d'une particule de charge, masse au repos, et énergie données dans un champ magnétique constant,
- ce qui est modifié si le champ magnétique n'est pas constant,
- comment accélérer une particule.

Efforcez-vous d'aller à l'essentiel, sans formules détaillées ni démonstrations, avec clarté et concision (pas plus d'une page).

#### 2. Rayons de gyration (2)

Calculer le rayon de gyration d'un proton d'énergie  $10^7$  eV se déplaçant perpendiculairement au champ magnétique, dans les cas suivants :

- dans l'ionosphère terrestre, près de l'équateur ;
- dans la Galaxie ( $B \simeq 3 \times 10^{-10}$  T) ;
- (c)-(d) mêmes questions pour des électrons de même énergie.

#### 3. Filtrage de particules par le champ magnétique terrestre (3)

- L'arrivée à la surface de la Terre de protons d'énergie  $10^7$  eV venant de l'espace est-elle (pour la plupart des directions d'arrivée) affectée par le champ magnétique terrestre ? Justifiez votre réponse.
- Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie minimum que doivent avoir des protons venant de l'espace pour ne pas être affectés significativement par le champ magnétique terrestre quelle que soit leur direction d'arrivée ?
- Quel trajet suivent les particules arrivant verticalement au dessus des pôles magnétiques ?

#### 4. Structures magnétiques (3)

- Quelles sont les caractéristiques de la structure de champ magnétique où pourraient être produits des protons d'énergie  $10^{20}$  eV ?
- Si la dimension d'une telle structure est d'environ 50 parsecs, quelle est la valeur

minimum de son champ magnétique ? Commenter.

(c) Comment sont modifiés ces résultats pour des atomes de Fer ( $Z = 26$ ) complètement ionisés ?

## II. Détection de poussières dans l'espace

### 1. Energie d'ionisation (1)

Quelle est l'ordre de grandeur de l'énergie qu'il faut fournir à un atome pour l'ioniser une fois ? Justifiez votre réponse.

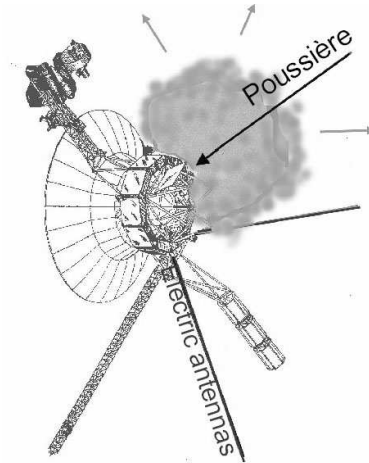


FIG. 1 – Schéma du nuage de plasma produit par une poussière impactant une sonde spatiale Voyager

### 2. Ionisation suivant un impact (1)

Lorsqu'un grain de poussière heurte la surface d'une sonde spatiale avec une vitesse suffisante, il est vaporisé et ionisé.

(a) Quelle condition nécessaire doit satisfaire l'énergie cinétique par atome de poussière pour que l'impact ionise l'atome (en supposant que l'essentiel de cette énergie sert à ioniser) ?

(b) Évaluer numériquement cette vitesse pour des grains de glace d'eau (masse d'un atome =  $18 \times m_p$ ).

### 3. Nuage de plasma (2)

On suppose que toute la matière du grain se vaporise, et qu'elle s'ionise en produisant un nuage de gaz partiellement ionisé, contenant des atomes neutres  $\text{H}_2\text{O}$ , des électrons, et des ions  $\text{H}_2\text{O}^+$  avec un taux d'ionisation (rapport entre la densité des électrons et la densité des neutres) de  $10^{-3}$ . Montrer que le nombre total d'électrons dans le nuage produit par un grain de glace d'eau (densité  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ), de rayon  $a = 1\mu\text{m}$  vaut  $N \simeq 1.4 \times 10^8$ .

#### 4. Longueur de Debye (3)

Ce nuage est en expansion à la vitesse  $V \simeq 10$  km/s, et on le représente par une sphère dont le rayon au temps  $t$  vaut  $R = Vt$ , à la température  $T = 10^4$  K.

- (a) Calculer un ordre de grandeur de la longueur de Debye dans le nuage en fonction du temps (on négligera dans cette estimation l'inhomogénéité dans le nuage et les variations de la vitesse d'expansion et de la température).
- (b) Comparer la dimension du nuage à sa longueur de Debye. Que représente physiquement ici la longueur de Debye ?

#### 5. Champ électrique (2)

- (a) A quelle condition le nuage produit-il à l'extérieur un champ électrique significatif et au bout de combien de temps cela se produit-il ?
- (b) Calculer un ordre de grandeur de la valeur maximale de ce champ.

#### 6. Collisions (3)

- (a) Evaluer numériquement le libre parcours moyen des électrons pour leurs collisions avec les atomes neutres dans le nuage en fonction du temps.
- (b) Même question pour les collisions des électrons entre eux.
- (c) Quelles conclusions tirez-vous de ces résultats ? Les collisions jouent-elles un rôle important dans le nuage ?

#### 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.).

Rayon de la Terre : 6400 km

Champ magnétique à l'équateur  $B_0 \simeq 3 \times 10^{-5}$  T

1 Parsec  $\simeq 3.1 \times 10^{16}$  m