

## DM 9 de Physique à rendre le 12/12/25

### L'énigme des pérítios

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'expliquer clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Les grandeurs complexes sont notées soulignées.

Certaines données numériques et un formulaire sont disponibles en fin d'énoncé ; d'autres données relèvent de l'initiative du candidat.

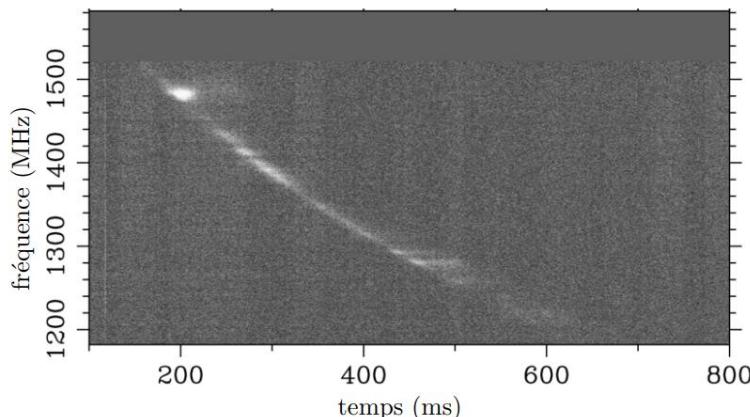
En astronomie, les sursauts radio rapides (*fast radio burst*) sont de brèves émissions radio intenses, d'une durée allant d'une fraction de milliseconde à 3 secondes, dont l'origine est encore mal comprise. Ils sont étudiés à l'aide de radiotélescopes, comme celui de Parkes en Australie. En 2010, 16 sursauts atypiques ont été découverts, dont on a essayé de comprendre l'origine. Ils ont été appelés pérítios (*perytons*), du nom de l'animal imaginaire maléfique, mi-oiseau et mi-cerf, au plumage bleu ou vert.

Leur origine a finalement été identifiée en 2015.

L'observatoire de Parkes, en Australie, dispose d'un radiotélescope de 64 m de diamètre, utilisé entre autres pour l'étude des pulsars. En 2007, il a permis de découvrir des sursauts radio rapides, observés dès 2001, dont on a établi l'origine extragalactique. Ils seraient émis par des étoiles à neutrons particulières.

En analysant d'anciens enregistrements, on a trouvé qu'en 1998 le télescope de Parkes a détecté des signaux similaires aux sursauts rapides, appelés « pérítios ». Leur origine fut une énigme, résolue seulement en 2015.

Les pérítios sont des signaux radio d'une durée de quelques centaines de millisecondes, présentant une variation de fréquence similaire à la dispersion des impulsions émises par les pulsars s'étant propagées à travers un plasma froid dilué. La figure 6 représente la structure temporelle et fréquentielle d'un pérítio qui est donc un signal quasiment sinusoïdal dont la fréquence varie lentement avec le temps.



**Figure 6** Structure temporelle et fréquentielle d'un pérítio

#### I.B.1)

Afin de caractériser la variation temporelle de fréquence caractéristique lors de la réception d'une impulsion radio, détaillons la modélisation d'un plasma froid dilué. Il est constitué :

- de cations de masse  $M$ , de charge  $+e$  à la densité volumique  $n_c$  ;
- d'électrons de masse  $m$ , de charge  $-e$  à la densité volumique  $n_e$ .

On fait les hypothèses suivantes :

- on néglige les interactions entre les particules (plasma peu dense), elles ne sont alors soumises qu'au champ électromagnétique de l'onde présente dans le plasma ;
- comme  $M \gg m$ , les ions, du fait de leur inertie, sont considérés comme immobiles ; c'est le modèle du « plasma froid » où l'on néglige l'énergie d'agitation thermique des ions, considérés comme « froids » ;
- en l'absence d'onde, le plasma est localement neutre : les cations et les électrons ont la même densité volumique  $n$  ;
- le plasma est soumis à une onde électromagnétique plane pseudo-progressive harmonique *transverse*

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 \exp(i(\omega t - \underline{k}x))$$

avec  $\vec{E}_0 \cdot \vec{u}_x = 0$  pour une onde transverse se propageant selon  $\underline{k} = \underline{k}\vec{u}_x$ .

**Q 16.** Montrer que le plasma reste localement neutre en présence de l'onde. Que peut-on alors dire de la densité volumique  $n_e$  d'électrons dans le plasma ?

**Q 17.** En considérant que les électrons ne sont soumis qu'à la seule force électrique (on néglige l'effet du champ magnétique), montrer que la densité volumique de courant dans le plasma est reliée au champ électrique par une relation de la forme

$$\underline{j} = \underline{\theta}_B \vec{E}$$

et exprimer la conductivité complexe  $\underline{\theta}_B$  en fonction des données.

**Q 18.** À partir des équations de Maxwell, établir la relation de dispersion sous la forme

$$\underline{k}^2 = \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{c^2}$$

où l'on exprimera la pulsation plasma  $\omega_p$  en fonction de  $n$ ,  $m$ ,  $e$  et  $\varepsilon_0$ .

**Q 19.** À quelle condition sur  $\omega$  l'onde peut-elle se propager dans le plasma ?

**Q 20.** Établir alors l'expression de la vitesse de groupe  $v_g$  en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_p$  et  $c$ .

### I.B.2)

On considère une onde électromagnétique émise par un astre à une distance  $L$  de la Terre. Le temps de parcours de la composante de l'onde à la pulsation  $\omega$  est

$$t(\omega) = \int_0^L \frac{d\ell}{v_g(\omega)}.$$

**Q 21.** Pourquoi ne peut-on pas écrire a priori  $t(\omega) = \frac{L}{v_g}$  ?

**Q 22.** Établir l'expression de  $t(\infty)$ . Quelle est son interprétation physique ?

**Q 23.** Quel est le signe de  $\tau(\omega) = t(\omega) - t(\infty)$  et quel sens concret donner à cette grandeur ?

On définit la mesure de dispersion DM (pour *dispersion measure*) par

$$DM = \int_0^L n_e d\ell.$$

Pour un plasma interstellaire, on a typiquement  $n_e \approx 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ .

**Q 24.** Montrer que pour des ondes d'une fréquence  $f$  de l'ordre du gigahertz, on peut écrire

$$\tau(f) = A \frac{DM}{f^2}$$

où l'on exprimera  $A$  en fonction de  $e$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $m$  et  $c$ .

**Q 25.** Calculer la valeur de  $A$ .

**Q 26.** Cette relation est-elle qualitativement en accord avec l'enregistrement de la figure 6 ?

Dans la définition  $DM = \int_0^L n_e d\ell$ , on exprime usuellement la densité électronique  $n_e$  en  $\text{cm}^{-3}$  et la distance  $L$  en parsec, unité de distance astronomique ; la mesure de dispersion est alors donnée en  $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

**Q 27.** À partir de la figure 6, estimer la mesure de dispersion DM, en exprimant le résultat d'abord en unités du système international puis en  $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

**Q 28.** Les mesures de dispersion mesurées pour des objets extragalactiques sont usuellement de quelques centaines de  $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Peut-on exclure une origine extragalactique aux péritos ?

Différents indices ont fait pencher la balance vers une origine terrestre des pérítios : détections dans des directions en dessous de la ligne d'horizon, ou sur un large champ de visée. Et surtout, ces phénomènes se produisent pendant les heures de bureau, en semaine.

En 2014, l'observatoire de Parkes s'est doté d'un enregistreur plus performant, pouvant couvrir une bande de fréquence allant de 402 MHz à 3 GHz, l'équipement utilisé jusqu'alors ne permettant d'explorer qu'une bande de 400 MHz de large, centrée sur 1382 MHz.

Des chercheurs ont alors découvert que plusieurs pérítios sont associés à une émission d'onde électromagnétique dans le domaine de fréquence de 2,3 à 2,5 GHz, inaccessible avec l'ancien matériel. Il est apparu que les pérítios sont toujours accompagnés d'une émission à 2,4 GHz, mais que l'on observe de nombreuses émissions à 2,4 GHz non accompagnées de pérítio. L'analyse des enregistrements sur deux mois montre que les pérítios sont répartis pendant la journée, entre 9h et 17h. Ces observations ont permis aux chercheurs de trouver le coupable : un four à micro-ondes utilisé par le personnel de l'observatoire. La sous-partie I.C étudie le four à micro-ondes afin de déterminer si l'ouverture de la porte du four avant la fin de son fonctionnement permet d'expliquer les pérítios observés.

## Données

Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Parsec	$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m}$
Constante des gaz parfait	$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

## Formulaire

Soit  $\vec{A}$  un champ vectoriel s'exprimant en coordonnées cartésiennes par  $\vec{A} = A_x(x, y, z)\vec{u}_x + A_y(x, y, z)\vec{u}_y + A_z(x, y, z)\vec{u}_z$ .

$$\begin{aligned} \vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}} \vec{A}) &= \vec{\text{grad}}(\text{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A} \\ \vec{\text{rot}} \vec{A} &= \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{u}_x + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{u}_y + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{u}_z \end{aligned}$$