

L2
Année 2022-2023
Premier Semestre
2^{ème} Session

UFR des Sciences Fondamentales et
Biomédicales

Faculté de Pharmacie de Paris

UE SA03M070

Physique des Ondes

Le sujet fait 6 pages, page de garde comprise

NB : Tout signe distinctif porté sur la copie pouvant indiquer sa provenance constitue une fraude.

Document et/ou matériel autorisés : *calculatrice non programmable*

Durée totale de l'épreuve : 1h

1) Effet Doppler

Un cycliste se déplace à la vitesse v_c et entend une ambulance qui se déplace dans la même direction que lui à la vitesse v_a . L'ambulance émet un signal de fréquence v .

- 1) Exprimer v' , la fréquence détectée par le cycliste en fonction de v , v_a , v_c et c , vitesse du son dans l'air dans le cas général.

Source = ambulance $\Rightarrow v_s = v_a$

Récepteur = cycliste $\Rightarrow v_r = v_c$

$$v' = v \frac{\left(1 - \frac{v_c}{c} \cos(\theta_c)\right)}{\left(1 - \frac{v_a}{c} \cos(\theta_a)\right)} = v \frac{\left(1 - \frac{\vec{v}_c \cdot \vec{c}}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{\vec{v}_a \cdot \vec{c}}{c^2}\right)}$$

- 2) Exprimer v' quand l'ambulance rattrape le cycliste.

Dans ce cas, le son se propage dans la même direction que le cycliste et l'ambulance $\Rightarrow$ tous les $\theta = 0$

$$v' = v \frac{\left(1 - \frac{v_c}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v_a}{c}\right)}$$

- 3) Exprimer v' , quand l'ambulance s'éloigne du cycliste (après l'avoir doublé)

Dans ce cas, le son se propage dans la direction opposée à celle des mobiles

$\Rightarrow$ tous les $\theta = \pi$

$$v' = v \frac{\left(1 + \frac{v_c}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v_a}{c}\right)}$$

- 4) $v' < v$; est ce que l'ambulance s'éloigne ou se rapproche du cycliste ?

L'ambulance s'éloigne du cycliste

- 5) Calculer la variation relative de fréquence $\frac{v' - v}{v}$ dans ce cas (on posera $\frac{v_i}{c} \ll 1$ et on négligera les termes du second ordre en c , c.a.d. en $\frac{v_i v_j}{c^2}$)

$$\frac{v' - v}{v} = \left(v \frac{\left(1 + \frac{v_c}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v_a}{c}\right)} - v \right) \cdot \frac{1}{v} = \frac{\left(1 + \frac{v_c}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v_a}{c}\right)} - 1 = \frac{\left(1 + \frac{v_c}{c}\right) - \left(1 + \frac{v_a}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v_a}{c}\right)}$$

$$\frac{v' - v}{v} = \left(\frac{v_c}{c} - \frac{v_a}{c}\right) \left(1 + \frac{v_a}{c}\right)^{-1} \approx \left(\frac{v_c}{c} - \frac{v_a}{c}\right) \left(1 - \frac{v_a}{c}\right) = \left(\frac{v_c}{c} - \frac{v_a}{c}\right)$$

- 6) Cette variation relative est de 4%, calculer la vitesse de l'ambulance sachant que le cycliste se déplace à 20 km/h et que la vitesse du son est de 340 m/s.

$$\frac{v' - v}{v} = \left(\frac{v_c}{c} - \frac{v_a}{c}\right) = -0,04 \Rightarrow \frac{v_a}{c} = \frac{v_c}{c} + 0,04 \Rightarrow v_a = v_c + 0,04.c$$

$$v_a = 20 + 0,04.(0,340.3600) \approx 69 \text{ km.h}^{-1}$$

2) Exercice : ondes sonores

Un observateur placé à égale distance de deux haut-parleurs S_1 et S_2 entend une note musicale pure (monofréquence) à son intensité maximum. Il se déplace suivant la ligne joignant ces deux haut-parleurs et constate qu'il n'entend plus rien quand il se trouve à 3 m de S_2 et 2,40 m de S_1 . Calculer la fréquence de cette note sachant que la célérité de l'onde dans l'air est de 330 m/s (on rappelle que la distance entre deux nœuds voisins, identique à celle entre deux ventres voisins, est égale à $\frac{\lambda}{2}$).

$$\overline{S_1 S_2} = 2,4 + 3 = 5,4 \text{ m} \Rightarrow \frac{\overline{S_1 S_2}}{2} = 2,7 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda}{4} = 2,7 - 2,4 = 0,3 \text{ m} \Rightarrow \lambda = 1,2 \text{ m}$$

$$\lambda = c.T \Rightarrow T = \frac{\lambda}{c} = \frac{1,2}{330} \text{ s}$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{330}{1,2} = 275 \text{ Hz}$$

3 Ondes

On considère un axe Ox sur lequel on place en $x = 0$ une source lumineuse dont la longueur d'onde λ est de 600 nanomètres. Il en résulte une onde plane dans le sens positif.

1) Calculer le vecteur d'onde k , la fréquence ν et la pulsation ω correspondant (sans oublier les unités). On rappelle que la vitesse de propagation de la lumière c , est égale à 300000 km.sec⁻¹.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{600} \approx 0,0105 \text{ nm}^{-1} = 1.05 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi\nu = 3,14 \cdot 10^{15} \text{ rad / s}$$

2) Cette onde correspond à la propagation d'un champ électromagnétique E . Exprimer $E_1(x,t)$ sous forme complexe. On notera E_0 l'amplitude maximale du champ.

$$E_1(x,t) = E_0 e^{i(\omega t - kx + \varphi)}$$

3) Exprimer $E_1(x,t)$ sous forme réelle, on choisira pour origine l'instant où le champ est nul et à $x=0$.

$$E_1(x, t) = E_0 \cos\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2} + n\pi\right)$$

$$n = 0 \Rightarrow E_1(x, t) = E_0 \cos\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}\right) = E_0 \sin \omega t - kx = E_0 \sin(3,14 \cdot 10^{15} t - 1,05 \cdot 10^7 x)$$

4) Exprimer l'équation spatiale du champ pour les temps :

$$t_1 = 0 \text{ s}, t_2 = \frac{\pi}{2\omega} \text{ s}, t_3 = \frac{\pi}{\omega} \text{ s}, t_4 = \frac{3\pi}{2\omega} \text{ s}$$

$$E(x, 0) = E_0 \sin(\omega \cdot 0 - kx) = E_0 \sin(-kx) = -E_0 \sin(kx)$$

$$E(x, \frac{\pi}{2\omega}) = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - kx\right) = E_0 \cos(kx)$$

$$E(x, \frac{\pi}{\omega}) = E_0 \sin(\pi - kx) = E_0 \sin(kx)$$

$$E(x, \frac{3\pi}{2\omega}) = E_0 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - kx\right) = -E_0 \cos(kx)$$

5) On place sur la trajectoire de cette onde à une distance $\Delta x > 0$, une seconde source transparente et émettant un signal identique et dans la même direction. Les deux sources sont en phase temporelle, c.a.d. que le champ produit sur chaque source y est maximum à des instants identiques.

Exprimer sous forme réelle $E_2(x, t)$, l'équation du champ créée par cette seconde source en fonction des mêmes unités .

$$E_2(x, t) = E_0 \sin(\omega t - k(x - \Delta x))$$

7) Calculer φ le déphasage (spatial) entre les deux sources en fonction de Δx .

$$\varphi = k\Delta x$$

8) Quelle est la nature de l'onde produite par l'ensemble de ces deux sources ?

C'est une onde plane progressive

9) L'intensité lumineuse est le module au carré du champ électrique total. Calculer $I_T(\varphi)$, l'intensité lumineuse résultant de la somme de ces deux sources (l'utilisation de la notation complexe est recommandée mais non obligatoire).

$$E_T(x, t) = E_1(x, t) + E_2(x, t) = E_0 e^{i\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}\right)} + E_0 e^{i\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2} + \varphi\right)} = E_0 e^{i\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}\right)} (1 + e^{i\varphi})$$

$$I_T(x, t) = E_0^2 (1 + e^{i\varphi} + 1 + e^{-i\varphi}) = E_0^2 (2 + 2 \cos \varphi) ; \quad \varphi = k \Delta x$$

- 10) Que vaut le rapport $\frac{I_T}{I_0}$ pour $\varphi = 2N\pi$, N étant un entier et I_0 l'intensité lumineuse de la première onde.

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{E_0^2 (2 + 2 \cos(2N\pi))}{E_0^2} = 4$$

- 11) Calculer la relation entre Δx et λ dans ce cas.

$$\varphi = k \Delta x = 2N\pi \Rightarrow \Delta x = \frac{2N\pi}{k} = \frac{2N\pi \cdot \lambda}{2\pi} = N \cdot \lambda$$

- 12) Quelle doit être la relation entre Δx et λ pour que l'intensité I_T soit minimum ?

$$\text{Il faut } \cos(\varphi) = -1 ; \varphi = (2N + 1)\pi \Rightarrow k \Delta x = (2N + 1)\pi \Rightarrow \Delta x = \frac{(2N + 1)\pi}{2\pi} \lambda = \left(N + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

- 13) Que vaut alors le rapport $\frac{I_T}{I_0}$?

$$\cos(\varphi) = -1 \Rightarrow (2 + 2 \cos(\varphi)) = 0 \Rightarrow I_T = 0 \Rightarrow \frac{I_T}{I_0} = 0$$