Exercice 1 : effet Doppler

Les chauves-souris émettent des ultrasons pour éviter les obstacles grâce aux échos. Certaines peuvent aussi déterminer la vitesse des proies par effet Doppler.

1. Une chauve-souris émet des cris brefs à la fréquence de 80 kHz. Pourquoi la chauve-souris utilise-t-elle ces fréquences élevées ? Si la chauve-souris vole vers un obstacle fixe à la vitesse de 5,0 m.s^{-1}, quelle est la fréquence ν'' perçue par l'animal après réflexion sur l'obstacle?
2. Le grand rhinolophe est une espèce de chauve-souris qui utilise une autre technique de chasse. Il émet une onde sonore pure de 83 kHz pour détecter des proies en mouvement car sa sensibilité auditive présente un pic aigu autour de cette fréquence (fovéa acoustique). Lorsqu'une onde ayant subi un déplacement en fréquence est détectée, la chauve-souris abaisse sa propre fréquence d'émission jusqu'à ce que l'onde renvoyée s'ajuste à 83 kHz. Quelle est la fréquence d'émission appropriée au cas d'une chauve-souris qui se déplace à la vitesse v = 5,0 m.s^{-1} vers une proie qui se rapproche d'elle à la vitesse v_P = 3,0 m.s^{-1} pour que l'écho corresponde à une fréquence de 83 kHz ? L'animal peut ainsi déceler une modulation de fréquence due aux battements des ailes de la proie…

Données : célérité du son dans l'air à 15°C : 340 m.s^{-1}

Correction :

1. Longueur d'onde ~ 4 mm, adaptée à la taille des proies. La fréquence reçue et réfléchie par l'obstacle est $\nu'=\nu/(1-v/c)$. La fréquence reçue par le récepteur chauve-souris mobile est donc $\nu''= \nu'(1+v/c) = \nu(1+v/c)/(1-v/c)$ = 82 kHz
2. $\nu''=\nu(1+v/c)(1+v_P/c)/[(1-v/c)(1+v_P/c)]$ soit ν = 79 kHz

Exercice 2 : sublimation d'un filament de tungstène

On considère un filament de tungstène d'une ampoule parcouru par un courant continu. L'ampoule est supposée vide en dehors du filament. En régime stationnaire, la puissance reçue par le filament est égale à la puissance rayonnée sous forme électromagnétique. On rappelle la loi de Stefan : tout corps porté à une température T émet un rayonnement électromagnétique dont la puissance P croît avec la température (absolue) et la surface extérieure S du corps chauffée selon $P/S= \sigma T^4$, où σ est la constante de Stefan.

1. En considérant un filament cylindrique de longueur l, de rayon r, de résistivité ρ uniforme et constante, montrer que la température absolue T du filament est proportionnelle à une puissance de r que l'on identifiera.

2. En réalité le tungstène se sublime peu à peu (passage de l'état solide à l'état gazeux) mais ne se redépose pas de manière uniforme : le filament présente des variations de sa section. Expliquer pourquoi ce phénomène peut conduire à la rupture du filament.

Correction : $P_J = RI^2=(\rho l/\pi r^2)I^2=\sigma 2\pi r l T^4$ d'où $T = k\, r^{-3/4}$

Si r diminue, T augmente : la sublimation est accélérée, la redéposition freinée. Le filament est de plus en plus chaud dans les zones où il s'affine, jusqu'à rompre.

Exercice 3 : vitesse d'une image

On considère une lentille mince convergente de distance focale f'. Le point source se situe du côté objet réel à une distance $x_0>f'$. Le point source est mis en mouvement en direction de la lentille à une vitesse v. Déterminer la vitesse v' de l'image du point source. Le résultat est-il compatible avec la théorie de la relativité ?
Dans le cadre de cette théorie, quelle est la vitesse de l'image ? (on pourra faire un raisonnement impliquant les rayons paraxiaux).

Correction : le problème est que les conditions d'application de l'optique géométrique ne sont pas vérifiées. Si on dérive directement la relation de conjugaison 1/x'+1/x=1/f ' d'une lentille mince, on obtient $v' = v\, f'^2/(x-f')^2$ qui peut devenir supérieure à c. Mais le raisonnement sous-entend l'hypothèse fausse d'une célérité infinie de la lumière. En tenant compte que la vitesse de la lumière est c, on peut faire le raisonnement suivant pour des rayons paraxiaux :
A la date t, la source est à la distance x. Les photons convergent en x' à l'intant $t_1=t+(x+x')/c$.
A la date t+dt, la source est à la distance x-vdt. Les photons convergent en x'+dx' à la date $t_2=t+dt+(x-vdt+x+dx')/c$ avec $dx'= [f'^2/(x-f')^2]vdt$
La vitesse de l'image est $v'=dx'/(t_2-t_1)=dx'/(dt+(dx'-vdt)/c)=f'^2v/[(x-f')^2(1-v/c)+f'^2v/c]$
On a alors forcément $v'<c$
Mais si on ne se limite pas aux rayons paraxiaux, les photons ne convergent pas à la même date. L'image devient floue d'autant plus que v est élevée.