L'effet Doppler

objectifs

- Comprendre le phénomène
- Redémontrer les deux relations mathématiques du cours..

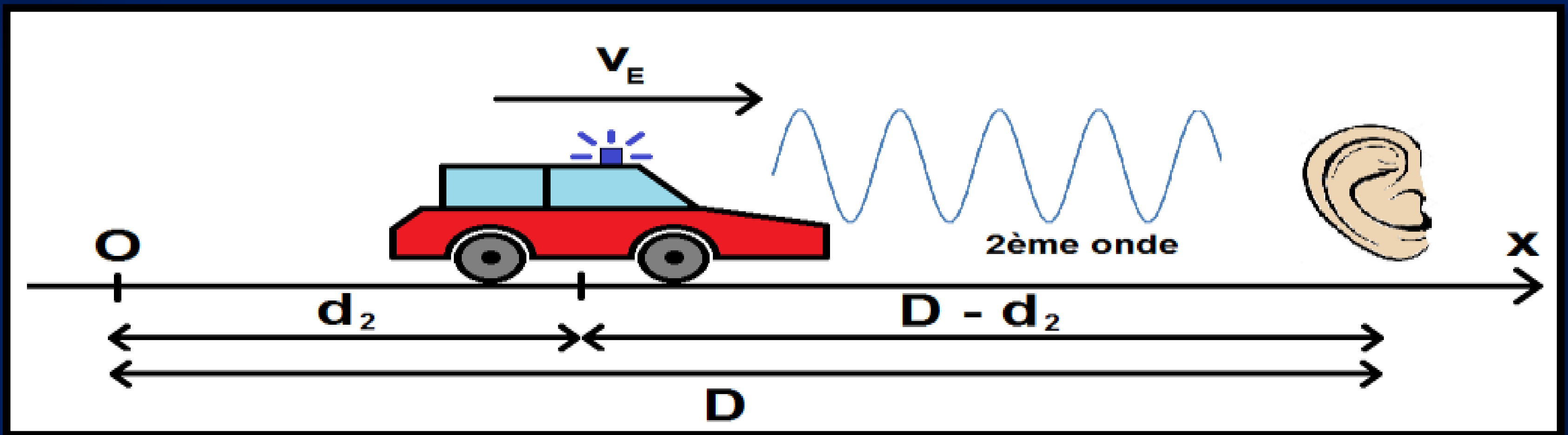
Effet foppler c’est quoi ?

L’effet doplpler est le décalage entre la fréquence observée et la fréquence Émise par une source lorsque celle-ci est en mouvement relatif par rapport À l’observateur

Le phénomène est observée pour les ondes éléctromagnétiques, mécaniques et acoustiques

Démonstration

Source s'approche et observateur immobile



$t_1 = 0$

$t_2 = T$

$d_2 = V_E\, T$

$t'_1 = \dfrac{D}{C}$

$t'_2 = t_2 + \dfrac{D - d_2}{C}$

$T' = t'_2 - t'_1 = T\left(1 - \dfrac{V_E}{C}\right)$

$f' = \dfrac{f}{1 - \dfrac{V_E}{C}}$

Source s'éloignant et observateur immobile

$$T' = T\left(1 + \frac{V_E}{C}\right) \qquad f' = \frac{f}{1 + \frac{V_E}{C}}$$

Explication de la démonstration

Étape 1 $t_1 = 0$

la voiture part du point « O » émet un premier bip qui arrive à l'observateur après Un temps t'_1, D est la distance totale entre observateur et « O » C est la celerité De l'onde acoutique

$$t'_1 = \frac{D}{C}$$

Étape 2 $t_2 = T$

Après un temps t_2 qui correspond à la periode T du signal sonore, la voiture émet Un deuxième bip après avoir parcourue la distance d_2

$$d_2 = V_E\, T$$

Temps que fait l'onde pour atteindre L'observateur

Étape 3

$$t'_2 = t_2 + \frac{D-d_2}{C}$$

Après un temps t'_2 le signal arrive à l'observateur, (l'origine des temps est prix au point « O »)

Étape 4

La periode apparente perçue par l'observateur est la différence entre les temps d'arrivée des deux bips

$$T' = t'_2 - t'_1 = T\left(1 - \frac{V_E}{C}\right)$$

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{V_E}{C}}$$

Application 1

En 1845, afin de vérifier expérimentalement la théorie de Christian Doppler, le scientifique Christoph Buys-Ballot a réalisé l'expérience suivante : des musiciens à bord d'un train jouent un La de fréquence f_E Des auditeurs, convenablement disposés le long de la voir ferrée, ont pu reconnaître la note jouée par les musiciens lors de l'approche du train.

Note	Fa	Fa♯	Sol	La♭	La	La♯	Si
f (Hz)	349	370	393	415	440	464	494

1. Quel est le phénomène à l'origine du décalage des fréquences entre l'onde émise et l'onde perçue ?

2. Quelle est la fréquence f_R de la note entendue par les auditeurs situés au bord de la voie ferrée ?

3. Dans cette situation, on a : $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{onde} - v}$

$v_{onde} = 340\ m.s^{-1}$ étant la célérité du son dans les conditions de température du jour de l'observation. Calculer la valeur de la vitesse de déplacement du train.

Solution

Le phénomène mis en jeu est l'effet Doppler.

Les musiciens situés au bord de la voie ferrée entendent un La#, soit une note de fréquence f_R égale à 464 Hz.

La valeur de la vitesse du train se déduit de l'expression du décalage Doppler

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{onde} - v}$$

Il vient $\Delta f \times (v_{onde} - v) = f_E \times v$

Et ensuite $\Delta f \times v_{onde} = f_E \times v + \Delta f \times v$

Soit $v \times (f_E + \Delta f) = \Delta f \times v_{onde}$ Or $\Delta f = f_R - f_E$

D'où $v \times f_R = (f_R - f_E) \times v_{onde}$

Ainsi $v = \frac{f_R - f_E}{f_R} \times v_{onde}$

Ce qui s'écrit aussi $v = v_{onde}\left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right)$

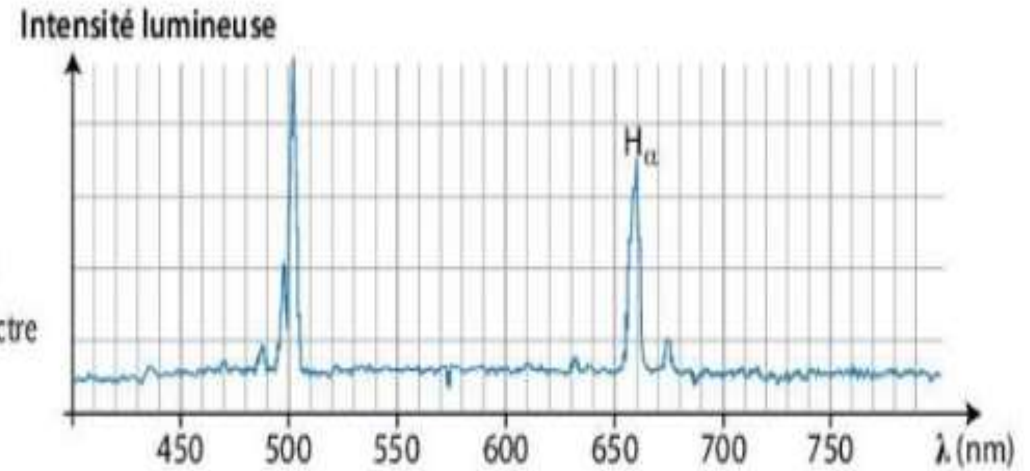
Donc $v = 340\left(1 - \frac{440}{464}\right) = 17{,}6 \text{ m.s}^{-1}$

Application 2

La valeur v de la vitesse d'un astre par rapport à la Terre est donnée par la formule de Doppler-Fizeau :

$$v = c \times \frac{|\lambda_{spectre} - \lambda_{référence}|}{\lambda_{référence}} \text{ avec}$$

- c : célérité de la lumière dans le vide ($c = 3{,}00 \times 10^8\ m \cdot s^{-1}$)
- $\lambda_{spectre}$: longueur d'onde d'une raie du spectre de la lumière venant de l'astre
- $\lambda_{référence}$: longueur d'onde de la même raie dans un spectre de référence (spectre obtenu sur Terre)



Spectre de la galaxie M77

1. Sachant que la longueur d'onde de la raie H_α mesurée sur Terre pour une source au repos est 656,3 nm, calculer le décalage de longueur d'onde pour la raie H_α de la galaxie nommée M77.

2. Préciser si la galaxie M77 s'éloigne ou se rapproche de la Terre.

3. Calculer la valeur de la vitesse de la galaxie M77 par rapport à la Terre.

Solution

omni-school.com

Le spectre de la galaxie M77 permet de trouver la longueur d'onde de la raie H_α. Elle vaut $\lambda_{spectre}$ = 600 nm.

Le décalage de longueur d'onde est donc :

$\Delta\lambda = |\lambda_{spectre} - \lambda_{référence}| = 660 - 656{,}3 = 4$ nm

Comme $\lambda_{spectre} > \lambda_{référence}$, la raie H_α est décalée vers les grandes longueurs d'onde. La galaxie s'éloigne de la Terre.

La valeur de la vitesse v de la galaxie M77 par rapport à la Terre est :

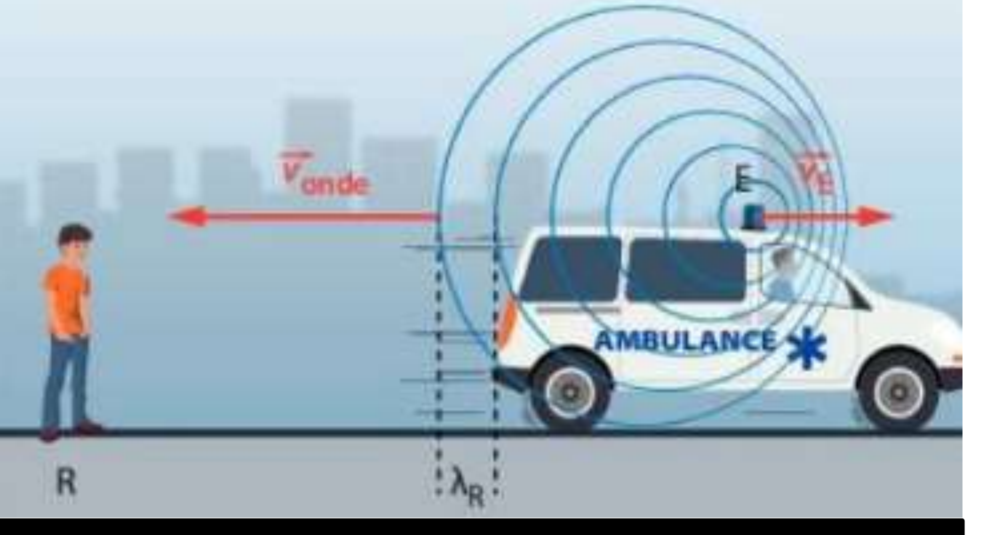
$$v = c \times \frac{|\lambda_{spectre} - \lambda_{référence}|}{\lambda_{référence}} = 3{,}00 \times 10^8 \times \frac{|660 - 656{,}3|}{656{,}3} = 1{,}7 \times 10^6\ m.s^{-1}$$

Application 3

L'effet Doppler permet de mesurer la valeur de la vitesse d'un émetteur E s'éloignant d'un observateur immobile R.
On se propose de relier :

- La fréquence f_E d'émission des signaux par E ;
- la fréquence f_R de réception des signaux par R ;
- la valeur v_{onde} de la célérité de l'onde émise par E ;
- la valeur v_E de la vitesse de l'émetteur.

Les valeurs des vitesses sont mesurées dans un référentiel terrestre et $v_E < v_{onde}$.



1. À l'instant initial $t_1 = 0$ s, E est à la distance d de R et émet une onde sonore se propageant à la célérité v_{onde}. Exprimer littéralement la date t_2 au bout de laquelle ce signal est reçu par R.

2. Déterminer l'expression de la distance d_E parcourue par l'émetteur pendant une durée égale à une période T_E du signal émis.

3. À la date $t_3 = T_E$, quelle est la distance qui sépare E et R ?

4. À la date $t_3 = T_E$, l'émetteur émet de nouveau un signal. À quel date t_4 le récepteur R reçoit-il ce signal ?

5. Quelle est la durée, notée T_R, séparant la réception par R de deux signaux consécutifs ? que représente cette durée T_R ?

6. Exprimer la relation entre les fréquences f_R et f_E, la célérité v_{onde} du signal et la valeur v_E.

Solution

1.

D'après la relation entre la valeur de la vitesse, la distance parcourue et la durée de parcours : $t_2 = \frac{d}{v_{onde}}$

2.

De même, $d_E = v_E \times T_E$

3.

La distance qui sépare E et R est : $d_3 = d + d_E = d + v_E \times T_E$.

4.

$$t_4 = T_E + \frac{d_3}{v_{onde}} = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{onde}}$$

5.

$T_R = t_4 - t_2$ soit :

$$T_R = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{onde}} - \frac{d}{v_{onde}} = T_E + \frac{v_E \times T_E}{v_{onde}} = T_E \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{onde}}\right)$$

6.

$$\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E} \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{onde}}\right) \qquad f_E = f_R \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{onde}}\right) \qquad f_E = f_R \times \frac{v_{onde} + v_E}{v_{onde}}.$$