L'effet Doppler

Niveau 2ème année PC-PC*
Pre Requis: base de la physique des ondes et de l'optiq ondulatoire
introduct° à la relativité

Introduction

Décalage entre fréquence du signal reçu & émis.
1842 - Doppler
Etendu aux ondes électromag par Fizeau en 1848
Obs tt les jours (ambulance voiture s/ un circuit)

~~Util~~ Utile pr la cinémomètrie.

I) Calculs théorique.

a) Decalage en fréquence

parler des ≠ cas.
- E fixe
- R mobile

sce émet des bips à une freq fe.
→ mvt relatif sce / recep. selon une droite 1 dim.

- E mobile / R mobile

Lorsque 2ème bip produit
1er bip $d_0 = c.T_e$. parcourue

→ precisé que onde sonore

ds le ref du milieu où se propage l'onde, la sce s'étant déplacée de $v_e T_e$, la distance séparant deux bips est:

⊕ c pas vitesse lumière

$$d_1 = (c - v_e)T_e$$

T_r = tps séparant la détect° des 2 bips.
au bout de Te le recepteur a parcouru la distance $v_r T_r$
(recept° 2ème bip)
donc le 2ème bip aura parcourut la dist:

$$d_2 = d_1 + v_r T_r = c T_r$$

↳ vitesse de l'onde

$$f_r = \frac{1}{T_r} = \frac{c - v_r}{d_1} = \frac{c - v_r}{c - v_e} \frac{1}{T_e} = \frac{c - v_r}{c - v_e} f_e$$

donc $\frac{f_e}{f_r} = \frac{c - v_e}{c - v_r}$

si c très grand => $f_e / f_r \simeq 1$

=> le signal est très difficile à observer car décalage de freq sur faible.

-> sur le train.

-> on utilise alors le phénomène de battement

2) Phénomènes de battements.

2 ondes de fréquences ≠

$$A_1 = A_0 \cos(k_1 x - \omega_1 t)$$
$$A_2 = A_0 \cos(k_2 x - \omega_2 t)$$

$$A = A_1 + A_2 = 2A \cos(\bar{k} x - \bar{\omega} t) \cos(k_m x - \omega_m t)$$

avec $\bar{k} = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$ $\quad \omega_m = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$

$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ $\quad k_m = \frac{1}{2}(k_1 - k_2)$

Ce qui correspond à une amplitude variable de :

$$A = 2A_0(x,t)\cos(\bar{k}x + \bar{\omega}t)$$

-> montrer ce que l'on obtient en chgt les variable ds le scripte python.

-> on va pvr déterminer la vitesse du train par cinémométrie.

II) Cinémométrie Doppler. — cinématique.

↳ mvt ss tenir compte des cause ≠ dynamique étude mvt ~~xxx~~ en étudiant les causes.

-> valeur de la vitesse

1) Mesure de la vitesse du son

-> mesure de la vitesse de l'onde + calcul incertitude.

2) Mesure vitesse du train

$$\Delta f = f_{rec} - f_{em}.$$

$$v_{em} = c \frac{\Delta f}{\Delta f + f_{em}}.$$

incertitude : ΔT : periode lue sur oscillo
Δc : incertitude sur vitesse de l'onde.

→ Interet ⊖ d'erreur que si à la main ⊕ ⊕ rapide car avec chronomètre il faudrait messuré f_{em} sur gde distance.

III) Application :

1) Radar. cf leçon lycée

Application numérique : $f_{em} = 24,125$ GHz
entendue mesure 10 à 300 km/h.
precision 1 km/h
valeur contrôle 100 km/h.

2) Astrophysique.

a) Approximation des faibles vitesses.

Très utilisé en astrophy, pr det la vitesse d'objet lumineux

objet lumineux ⇒ travail avec long. d'onde λ ⇒ convertir les formules enlever la partie non relativisk et ~~???~~ refaire la Transfo de Lorentz

mvt par rap à la Terre : $v_{rec} = 0$ $v_e = -v$ ($\ominus$ = obj s'approche)

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_e} = \frac{c+v}{c} = 1+\beta .$$

En notant $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_0$ ac λ_0 = ~~raie ou~~ long. d'onde ou raie se situerait si obj immobile

λ_{obs} : mesurée

→ image decallage de raie

λ_0 raie bien connue s/ Terre (choisir)

Technique utilisée pr ~~obs~~ mesure vitesse de rotat° d'une étoile autour barycentre d'un sys étoile-planete.

GIF $\quad -1 < \beta < 1$

dc $\quad 0 < \dfrac{\lambda_{obs}}{\lambda_0} < 2$

$0 < \delta < 2$

Exp calcul pr quasar (noyau de galaxie extremem^t lumineux région compact autour du trou noir supermassif au centre d'une galaxie massive)

raie α de l'H de Lyman $\quad \lambda_{L\alpha} = 122\,nm$.

$\lambda_{obs} = 586\,nm$

⇒ $\delta = 4,82$ ⇒ imp

⇒ il faut prendre en compte la relat car vitesse gde

$$\underset{\sim}{K} = \begin{cases} k_x = k_x \\ k_y = k_y \\ k_z = k_z \\ k_t = \dfrac{\omega}{c} \end{cases} \qquad \underset{\sim}{R} = \begin{cases} ct \\ x \\ y \\ z \end{cases}_{\mathcal{R}}$$

$\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ galiléen

↳ en translation l'un par rap. à l'autre ac une vitesse v.

$$\begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}_{R_T} \qquad \begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix}_{R'}$$

$$\begin{cases} ct' = \gamma(ct - \beta x) \\ x' = \gamma(x - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} ct = \gamma(ct' + \beta x') \\ x = \gamma(x' + \beta ct') \\ \dots \\ \dots \end{cases}$$

$$(ct')^2 - x'^2 = ct^2 - x^2$$ (invariant relativité)

$$\begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \gamma\beta \\ \gamma\beta & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} \qquad \beta = \frac{v}{c}$$

$$\frac{dx}{dt} = \underbrace{\frac{dx'}{dt}}_{v_R} + \underbrace{c\beta}_{v_e} = v.$$

vitesse relativité ↗ v_R ; v_e ↳ vitesse entraînement

b) avec effets relativiste.

Preciser les référentiels. Galiléen + T. Lorentz.
def événement : temps + coordonnées spatiales.

$T_r^{\infty} = \gamma T_r$

période mesurée sur Terre ds le ref du quasar

période mesurée sur Terre ds ref terrestre

γ : facteur de Lorentz $= \dfrac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

or : $\dfrac{f_e}{f_r} = \dfrac{c+v}{c} = 1+\beta$

$$f_e^* = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\beta} f_e$$

$$f_r^* = \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1+\beta}} f_e.$$

=> avec cette formule $\beta = 0,917$ i.e. $v = 0,92c$

=> décalage vers le rouge

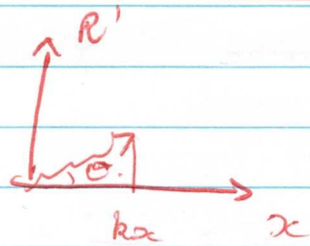
Conclusion :

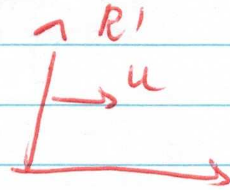
-> Effet Doppler aussi utile ds la vie de tt les jours échographie radar.

-> vrai aussi ơ l'ơ^t petit car effet s/ largeur des bandes en spectro => mesure T° par effet Doppler

-> partir de la rélat puis dire que pas relat
$v \lll c$
on retrouve ~~ce~~ les formules non relativiste.

$$\begin{pmatrix} \frac{\omega}{c} \\ k_x \end{pmatrix}_R \qquad \begin{pmatrix} \frac{\omega'}{c} \\ k'_x \end{pmatrix}_{R'}$$





$$\frac{\omega'}{c} = \gamma\left(\frac{\omega}{c} - \beta k_x\right) \rightarrow \text{effet Doppler}$$

$$k'_x = \gamma\left(k_x - \beta \frac{\omega}{c}\right) \rightarrow \text{abhération lumineuse}$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{cT}$ ω.

$k_x = k\cos\theta$.

$\theta = 0$ effet Doppler longitudinale

$\theta = \frac{\pi}{2}$ transversale

$$\frac{\omega'}{c} = \gamma\left(\frac{\omega}{c} - \beta\frac{\omega}{c}\right)$$

$$\frac{\omega'}{c} = \gamma\frac{\omega}{c}(1 - \beta)$$