

Atelier 1

Quelques généralités sur la propagation d'une onde.

Valable pour un grand nombre de phénomènes : onde acoustique, de pression, thermique...et électromagnétique

Equation de propagation :

$$\frac{d^2 f}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 f}{dt^2}$$

Dont la solution générale est :

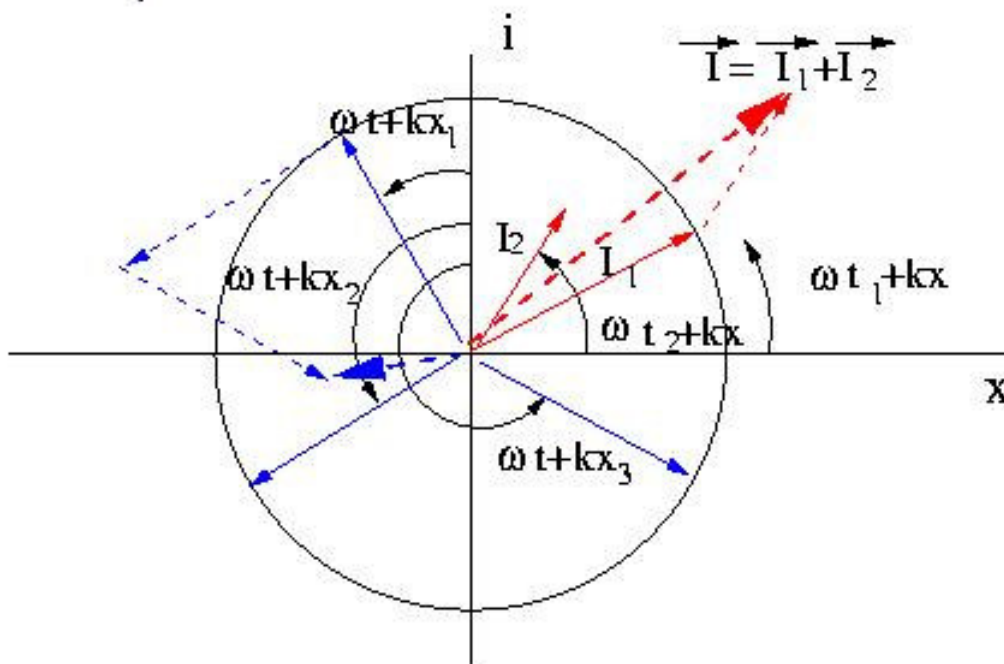
$$f = I_0 \exp^{i(\omega t + kx)}$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad k = 2\pi/\lambda$$

ν est la fréquence, λ la longueur d'onde = c/ν , k est le nombre d'onde

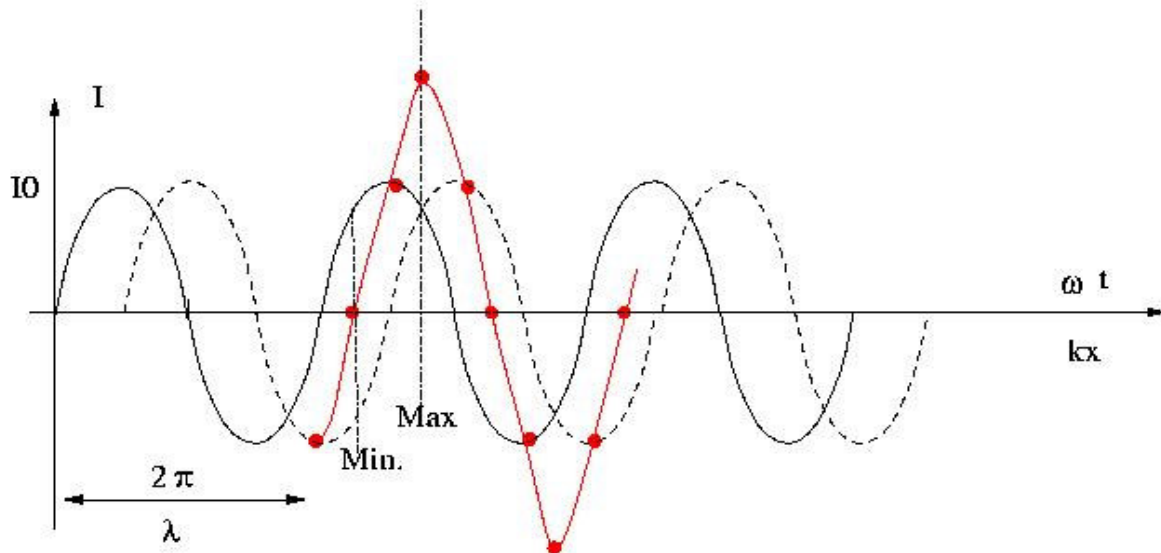
Représentation graphique : composition d'ondes, exemples.

- Deux ondes à des temps différents.
- Trois ondes à des positions différentes.



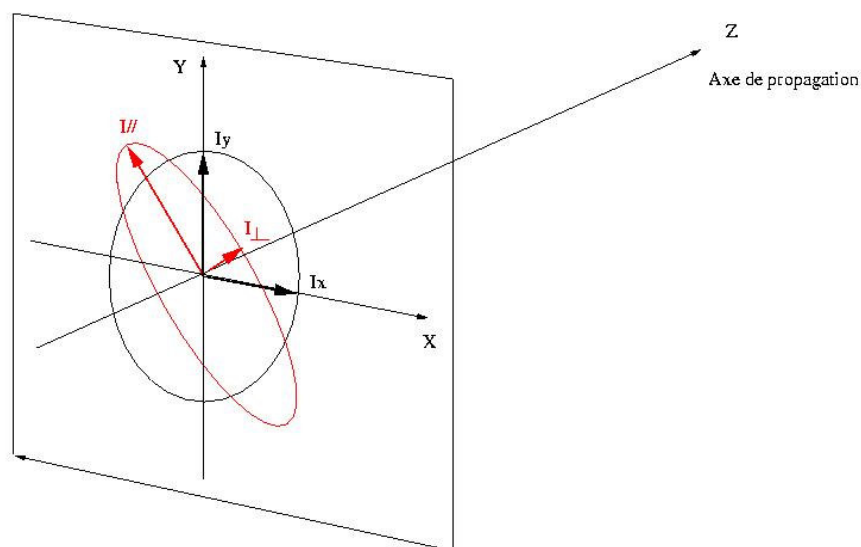
Les amplitudes s'additionnent **vectoriellement** : les phases relatives sont importantes : deux rayons lumineux (sous certaines conditions de cohérence) peuvent donner une intensité augmentée ou s'annuler : phénomènes constatés dans les images de diffraction et d'interférences utilisées en spectroscopie.

Autre représentation graphique : 2 ondes décalées dans l'espace



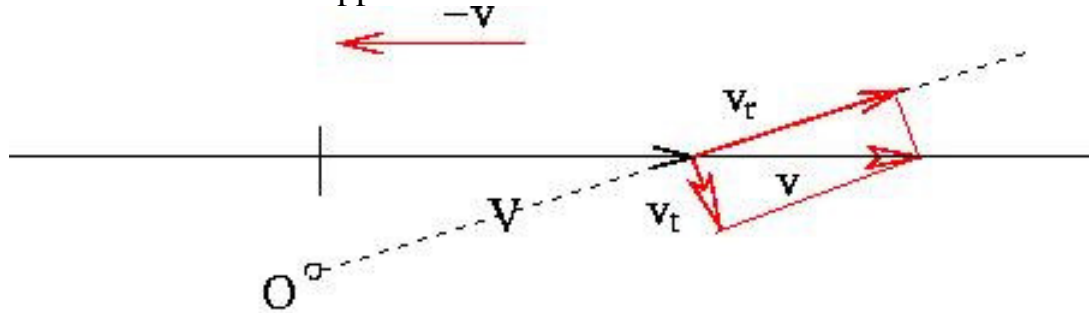
Polarisation.

Les vibrations lumineuses sont transversales par rapport à la direction de propagation. Les composantes peuvent être égales dans le plan transverse, la lumière est dite non polarisée, ou inégales, elle est alors dite polarisée avec un certain taux qui est égal au rapport des axes principaux de l'ellipse. Elle peut même être complètement polarisée selon un seul axe. Des dispositifs optiques produisent naturellement de la polarisation et peuvent aussi en séparer les composantes



Effet Doppler Fizeau.

Cet effet a d'abord été mis en évidence par Doppler en acoustique : c'est la modification apparente de la fréquence, et donc la longueur d'onde, d'une vibration quand la source est en mouvement par rapport à l'observateur. Fizeau a ensuite étendu son application à la lumière.



$$\lambda_1 = \lambda_0 \frac{(V + v_r)}{V} \quad (+ \text{ ou } - v)$$

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{V}$$

La vitesse de propagation du signal est V , celle de l'émetteur est v (+ ou - selon que l'émetteur s'éloigne, ou se rapproche de l'observateur fixe O mais la direction de propagation n'est pas forcément alignée sur l'observateur. En 1 sec. les n périodes de l'oscillation sont réparties sur $V + v_r$, v_r étant la vitesse radiale projection de v sur la direction de l'observateur, la vitesse tangentielle v_t n'a aucun effet. La longueur d'onde apparente passe donc de λ_0 à λ_1 comme indiqué, et le déplacement relatif différence des longueurs d'onde rapporté à la longueur d'onde initiale est v_r/V .

Ceci est vrai pour un signal mécanique ou acoustique, quand il s'agit de lumière il faut tenir compte de la vitesse limite de transfert du signal c , donc travailler en relativité restreinte qui dilate le temps, alors la vitesse v , que l'on ramène souvent à la vitesse de la lumière $\beta = v/c$ devient

$$v = \frac{\beta c}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Le déplacement des longueurs d'ondes est donc égal à v_r / c

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = Z = \frac{\beta_r}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Le déplacement de la longueur d'onde peut être positif, la source s'éloigne, la longueur d'onde augmente et va vers le rouge, red shift, si la source se rapproche la longueur d'onde diminue : blue shift.

On voit aussi que si β devient proche de 1, le dénominateur devient très petit et le shift peut devenir très grand : il est ~ 1100 pour le fond cosmologique, 6 pour les premières galaxies.

La longueur d'onde réelle est égale à celle observée corrigée $\lambda_o = \lambda (Z + 1)$

Là encore ce n'est que la vitesse radiale qui est cause du déplacement des raies. Pour des objets hors galaxie les vitesses tangentielles sont pratiquement négligeables, dans la galaxie les Z sont faibles et les deux composantes sont souvent du même ordre de grandeur. Heureusement le mouvement global circulaire est connu et on peut en déduire la direction du mouvement.

Remarque.

Dans l'hypothèse de relativité restreinte la vitesse radiale peut donc être calculée à partir de la mesure de Z

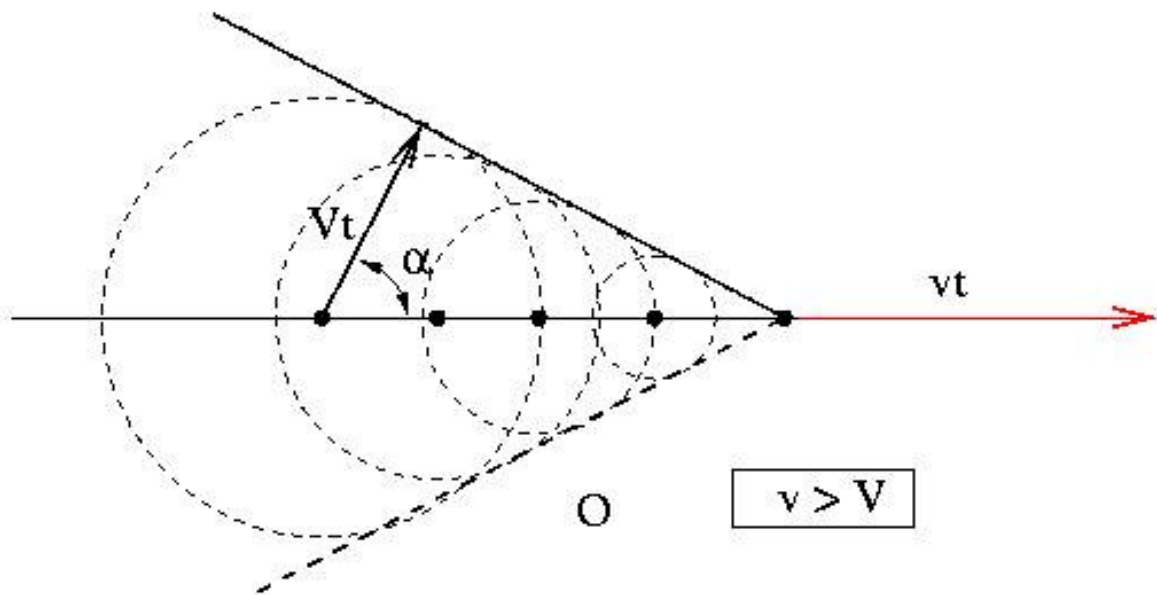
$$v_r = c \times \frac{(1 + Z^2) - 1}{(1 + Z^2) + 1}$$

mais cette formule n'est valable que pour les petits Z (Dans la galaxie ou pour les galaxies proches, disons $Z < 0,5$). En fait il faut faire très attention à l'utilisation de cette formule qui est issue de la relativité restreinte quand on passe à son utilisation pour l'évaluation de distances, ou de temps, cosmologiques, il faut alors passer en relativité générale qui tient compte de l'expansion de l'Univers, la mesure des coordonnées est une fonction du temps, donc de Z ...et ce n'est plus aussi simple et cela dépend du modèle d'Univers. C'est ce qui permet de différencier les modèles d'Univers à partir de la mesure simultanée de Z et de la distance.

Problème : $v > V$

Que se passe-t-il quand la vitesse de la source est supérieure à la vitesse de propagation du signal ?

La source devance toujours le signal donc l'observateur ne le recevra pas avant que la source ne l'ait dépassé, c'est le problème du mur du son en acoustique. Comme indiqué sur le schéma les ondes sonores se combinent pour créer une onde de compression qui accompagne le mouvement, ce n'est qu'après son passage que l'on perçoit l'émission sonore retardée .



Onde de choc $\cos \alpha = \frac{V}{v}$

Effet Cerenkov : $\cos \alpha = \frac{1}{n \beta}$

$\beta = \frac{v}{c}$

Ce même phénomène se produit en optique car si c est une vitesse absolue qui ne peut être dépassée par une source en mouvement, la vitesse de la lumière v dans un milieu transparent peut y être inférieure, le rapport c/v est appelé indice de réfraction : n . Tous les petits photons accompagnant la particule chargée vont se concentrer sur une surface d'onde conique dont l'angle d'émission est fonction de l'indice de réfraction et de la vitesse de la particule qui, elle, n'est pas affectée par le milieu traversé. Cet effet Cerenkov (un physicien Russe qui l'a découvert) existe en particulier pour tous les rayons cosmiques dans l'atmosphère et quand ils traversent du verre par exemple, mais c'est un effet faiblement lumineux et peu gênant.