Interférences à deux ondes en optique

June 7, 2025

Référence

Expérience : Fentes d'Young (mesures de l'interfrange)
Livre :

- Physique PC/PC* Tout-en-un, Dunod, 2022
- Optique – Une approche expérimentale et pratique, Houard
- Optique expérimentale, Sextant
- Optique physique et électronique, Mauras

Prérequis :

- Optique ondulatoire (modèle scalaire de la lumière, théorème de Malus, chemin optique, ondes sphériques)
- Ondes électromagnétiques (polarisation)

Niveau : PC

Introduction

Dispositif des fentes d'Young -> chaque fente émet de la lumière pourtant en éclairant les deux fentes simultanément, on observe des zones de lumière et d'ombres sur l'écran -> C'est le phénomène d'interférence et l'objectif de la leçon est d'expliquer ce phénomène.

1 Superposition de rayons lumineux

1.1 Éclairement

Récepteurs d'ondes lumineuses ont un temps de réponse faible devant la période de vibration de la lumière visible (de l'ordre de $10^{-14}s$) Mettre tableau de différents capteurs (oeil, photodiode, capteur CCD, etc) avec temps de réponse

Les récepteurs ne sont donc sensibles qu'à la valeur moyenne de la puissance lumineuse qui est reçu. Donc pour une onde scalaire s(M,t), on définit l'intensité vibratoire :

$I = \langle s(M,t)^2 \rangle$

Dans le cas d'une onde monochromatique, l'intensité vibratoire s'écrit : $I = \langle a(M)^2 \cos^2(\omega t - \phi(M)) \rangle = \frac{1}{2} a(M)^2$

Faire un schéma

Dans le cas où on a deux ondes monochromatiques de pulsation ω_1 et ω_2 arrivant sur le récepteur, l'intensité vibratoire reçue est :

$I = \langle (a_1(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M)) + a_2(M)\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)))^2 \rangle$

$I = \langle a_1(M)^2 \cos^2(\omega_1 t + \phi_1(M)) + a_2(M)^2 \cos^2(\omega_2 t + \phi_2(M)) + 2a_1(M)a_2(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \rangle$

$I = \langle s_1(M,t)^2 \rangle + \langle s_2(M,t)^2 \rangle + \langle 2a_1(M,t)a_2(M,t)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \rangle = I_1 + I_2 + I_{12}$

Le terme $I_{12} = \langle 2a_1(M)a_2(M)\cos(\omega_1 t + \phi_1(M))\cos(\omega_2 t + \phi_2(M)) \rangle$ est appelé terme d'interférence.

Si ce terme est nul, alors les deux ondes sont dites incohérentes et on trouve que l'intensité résultante est la somme des intensités de chaque onde.

Si ce terme est non nul, alors les ondes sont dites cohérentes.

1.2 Conditions de cohérence

On peut réécrire le terme I_{12} sous la forme suivante :

$I_{12} = \langle a_1(M)a_2(M)\cos((\omega_1+\omega_2)t+\phi_1(M)+\phi_2(M)) + a_1(M)a_2(M)\cos((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1(M)-\phi_2(M))\rangle$

Comme la pulsation de l'onde est très grande devant la fréquence d'acquisition du récepteur, la moyenne du terme $\cos(\omega t + \phi(M))$ est nulle tant que $\omega \neq 0$.

Donc $I_{12} = a_1(M)a_2(M)\langle\cos((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1(M)-\phi_2(M))\rangle$ est non nul pour $\omega_1 = \omega_2 = \omega$.

Dans ce cas, $I_{12} = a_1(M)a_2(M)\cos(\Delta\phi(M))$ où $\Delta\phi(M) = \phi_1(M) - \phi_2(M)$ est la différence de phase entre les deux ondes au point M

Formule de Fresnel pour deux ondes monochromatiques cohérentes de même pulsation : $I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1(M)I_2(M)}\cos(\Delta\phi(M))$

Interprétation physique : $\cos(\Delta\phi(M)) > 0$ correspond à un éclairement supérieur à la somme des éclairements, donc interférences constructives. $\cos(\Delta\phi(M)) < 0$ correspond à un éclairement inférieur à la somme des éclairements, donc interférences destructives.

Mettre graphe

2 Dispositif à fentes d'Young

2.1 Figure d'interférences

Schéma des fentes d'Young

La source lumineuse éclaire les deux fentes qui vont se comporter chacune comme une source de lumière sous forme d'ondes sphériques. Comme la lumière des deux fentes provient à l'origine d'une seule source, il n'y a pas de différence de phase propres entre les rayons. Ainsi la différence de phase au point M provient de la différence des chemins optiques suivis par les rayons.

On a donc : $\Delta\phi(M) = \frac{\omega}{c}((SM)_1 - (SM)_2) = \frac{2\pi}{\lambda}((SM)_1 - (SM)_2) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta(M)$ où $\delta(M)$ est la différence de marche entre les deux rayons lumineux

La différence de marche s'écrit : $\delta(M) = n\,(SS_1 + S_1M - SS_2 - S_2M) = n\,(S_1M - S_2M)$ car S est équidistant de S_1 et de S_2.

Soit O le point sur l'axe optique au niveau des fentes, on peut écrire S_1M et S_2M tel que : $\| \overrightarrow{S_1M} \|^2 = (\overrightarrow{S_1O} + \overrightarrow{OM})^2 = \| \overrightarrow{S_1O} \|^2 + \| \overrightarrow{OM} \|^2 + 2\overrightarrow{S_1O}\cdot\overrightarrow{OM}$

et $\| \overrightarrow{S_2M} \|^2 = \| \overrightarrow{S_2O} \|^2 + \| \overrightarrow{OM} \|^2 + 2\overrightarrow{S_2O}\cdot\overrightarrow{OM}$

Comme $S_1O = S_2O$, on en déduit que :

$\| \overrightarrow{S_1M} \|^2 - \| \overrightarrow{S_2M} \|^2 = 2(\overrightarrow{S_1O} - \overrightarrow{S_2O})\cdot\overrightarrow{OM} = 2\overrightarrow{S_1S_2}\cdot\overrightarrow{OM}$

On peut donc écrire la différence de marche :

$\delta(M) = n(S_1M - S_2M) = n\frac{S_1M^2 - S_2M^2}{S_1M + S_2M}$

Comme a/D « 1, on a, à l'ordre 0, $S_1M + S_2M \simeq 2OM = 2D$

Pour le produit scalaire, il est nécessaire d'aller à l'ordre 1 pour exprimer $\overrightarrow{OM}$.

Finalement, on trouve $\delta(M) = \frac{n\times a\times x}{D}$

Et donc, $I = 2I_0\left(1 + \cos\left(\frac{2\pi n a x}{\lambda_0 D}\right)\right)$

Mettre graphe résultat des fentes

On peut mesurer la période spatiale entre les franges (appelé interfrange) : $i = \frac{\lambda_0 D}{na}$

Manip expérimental

2.2 Élargissement d'une source

Parler de l'effet du déplacement de la source puis de l'élongation de la source dans la direction orthogonale au vecteur S1S2.

Parler de sources incohérentes et donc qu'il n'y a pas d'interférences entre ces sources et comme le déplacement ne change pas la figure d'interférences, on augmente la luminosité.

Expérience quantitative

Objectif de l'expérience

Mesurer l'écart entre deux fentes pour une bifente de Young

Matériels

- Lampe Quart-iode
- Écran/CCD
- Fente réglable (fente source)
- Bifentes d'Young

Protocole

Mettre une fente devant une lampe quartz-iode Faire l'image d'une fente source sur une bifente Placer l'écran/CCD à grande distance de la bifente Mesurer l'interfrange sur plusieurs ordres

Précautions expérimentales

Mettre un filtre anti-thermique devant le filtre interférentiel.