LP n° 33 : Interférences à 2 ondes en optique

Moulié Vincent

09/01/2017

Prérequis

- Notions d'EM : structure d'une OEM, expression, énergie, théorème de superposition
- Notions d'ondes : OPPM (expression, relation de structure, aspect énergétique, polarisation)
- Notions d'optique physique : approximation scalaire des ondes lumineuses, différence de marche (δ) entre 2 ondes, expression du chemin optique et lien avec δ
- Notions sur les sources de lumière et les capteurs : principes de fonctionnement

Niveau

L3

Objectifs

- Comprendre le phénomène d'interférence (définition du phénomène physique et définition mathématique)
- Étabir la formule de Fresnel dans un cas relativement général
- Comprendre et exploiter les notions de cohérence relatives à l'obtention et à la visualisation d'interférences par un capteur
- Connaître le dispositif des fentes d'Young

Introduction

Expérience : lampe à incandescence (Quartz-iode), condenseur, filtre coloré, fente source réglable, diapos (1 fente et 2 fentes), capteur (CCD ou Thorlabs)

Montrer l'éclairement résultant au niveau du détecteur avec une fente. Puis, montrer celui résultant avec 2 fentes. Phénomène non intuitif ($\varepsilon(M) \neq \varepsilon_1(\mathrm{M}) + \varepsilon_2(\mathrm{M})$), traduisant le caractère ondulatoire de la lumière : interférences. Par ailleurs, on s'aperçoit qu'en « jouant » sur l'ouverture de la fente source, on va affecter notre capacité à observer la figure d'interférence. Ainsi des considérations géométriques mais aussi temporelles (changeant de source lumineuse) sont à prendre en compte et à étudier pour l'obtention de ce superbe phénomène. (Historiquement, Young (1801) et son expérience des trous d'Young vinrent définitivement convaincre la communauté que la lumière se devait d'être décrite comme une onde)

A Interférences à 2 ondes

A.1 Position du problème

2 sources ponctuelles monochromatiques et milieu homogène linéaire et isotrope (air assimilé à du vide)

$\overrightarrow{E_i}(M,t)$= $\overrightarrow{E_i}$cos($\omega_i t$ - φ_i(M)) avec φ_i(M) = -k$_i$.S_iM + $\phi_i(t)$ (Champs électriques associés à deux ondes) (dessin associé)

Champ résultant $\overrightarrow{E}(M,t)$= $\overrightarrow{E_1}(M,t)$ + $\overrightarrow{E_2}(M,t)$

$\overrightarrow{\Pi}(M,t)$= $\varepsilon_0 c$.|| $\overrightarrow{E}(M,t)$ ||^2. $\overrightarrow{u}$ $\propto$|| $\overrightarrow{E}(M,t)$ ||^2. $\overrightarrow{u}$; les capteurs étant sensibles au carré du champ électrique : mesurent la densité surfacique de puissance rayonnée (vecteur de Poynting)

Donc $\overrightarrow{\Pi}(M,t)$= $\overrightarrow{\Pi_1}(M,t)$ + $\overrightarrow{\Pi_2}(M,t)$ + $\varepsilon_0 c.\overrightarrow{E_1}(M,t).\overrightarrow{E_2}(M,t)$. $\overrightarrow{u}$

et, les capteurs intégrant la densité surfacique de puissance rayonnée (vecteur de Poynting) sur leur temps de réponse (noté τ_r), on obtient la grandeur mesurée par tout détecteur optique : l'éclairement (noté $\varepsilon(M)$) au point M tel que :

$< \overrightarrow{\Pi}(M,t) >_{\tau_r} = \frac{1}{\tau_r}\int \overrightarrow{\Pi}(M,t)$ dt = ε(M) = ε_1(M) +ε_2(M) + ε_{12}

avec ε_{12} = $<$ $\sqrt{\varepsilon_1.\varepsilon_2}\,\overrightarrow{e_1}.\,\overrightarrow{e_2}$cos($\omega_1 t$ - φ_1(M)).cos($\omega_2 t$ - φ_2(M)) $>_{\tau_r}$ = (ε_1(M) +ε_2(M)).(1 + ($\frac{\sqrt{\varepsilon_1.\varepsilon_2}}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}$ $\overrightarrow{e_1}$. $\overrightarrow{e_2}$). $<$ cos (($\omega_2 - \omega_1$).t + $\phi_2(t)$ - $\phi_1(t)$) $>_{\tau_r}$

On retrouve ainsi les deux membres de l'expression préalablement indiqués en intro : $\frac{\sqrt{\varepsilon_1.\varepsilon_2}}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}$ $\overrightarrow{e_1}$. $\overrightarrow{e_2}$; considérations géométriques et $<$ cos (($\omega_2 - \omega_1$).t + $\phi_2(t)$ - $\phi_1(t)$) $>_{\tau_r}$; considérations temporelles.

On définit le contraste C = |V| = $\frac{\varepsilon_{max}-\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}+\varepsilon_{min}}$. (V : visibilité)

A.2 Conditions d'obtention

Interférences visibles ssi V $\neq 0$ et $<$ cos(...) $>_{\tau_r} \neq 0$. Donc, il faut que :

$\omega_1 = \omega_2$

$\overrightarrow{e_1}$. $\overrightarrow{e_2}$ $\neq 0$

φ_2(M) - φ_1(M) $\neq$f(t) . Délicat à réaliser avec 2 sources ($\tau_r \gg$T$_1$,T$_2$, périodes temporelles des 2 ondes). Donc, utilisation d'une seule source de lumière dite primaire (cohérence mutuelle) dont on va induire 2 sources secondaires identiques via un dispositif de division du front d'onde ou d'amplitude (ici, division du front d'onde)

A.3 Source réelle

Expliquer, via le modèle simple des trains d'onde (schéma à l'appui), le critère de cohérence temporelle : δ(différence de marche) $<$ L$_c$(longueur de cohérence temporelle (et/ou du point de vue temporel avec la durée de cohérence temporelle) Exemples sur vidéoprojecteur (ODG)

B Cohérence spatiale

B.1 Source non ponctuelle

Soient des sources incohérentes entre elles ($\phi_i(t) \neq$)

Schéma à l'appui

$\delta = \frac{a.X}{d} + \frac{a.x}{D}$

D'où : ε(M) = $\int_{-L/2}^{L/2}$2.ε_0(1 + V.cos ($\frac{2\pi}{\lambda}\delta(X,x)$))dX , avec ε_1(M) =ε_2(M)

Hypothèses : V = 1 et cohérences mutuelles des sources S$_1$et S$_2$.

Ainsi, après calculs; ε(M) =ε_T(1 + γ.cos ($\frac{2\pi x a}{\lambda D}$)) avec γ= sinc($\frac{\pi L a}{\lambda d}$)

B.2 Cohérence spatiale ; longueur de cohérence spatiale

Schéma du sinc de γ avec l_c : diamètre du pic central. Ainsi, il n'y a plus d'interférences si $\frac{\pi l_c a}{\lambda d} = \pi$. D'où L < $\frac{\lambda d}{a}$ = Lc (longueur de cohérence spatiale)

AN à faire (ouverture de la fente source jusqu'au brouillage de la figure d'interférence)

C Cohérence temporelle

C.1 Source non monochromatique

Schéma d'une densité spectrale d'éclairement (forme rectangulaire suffisante, centrée en ω_0)

On a différents $\omega_i$qui vont interférer entre elles.

Ainsi, $\varepsilon = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\Delta\omega} \varepsilon(\omega) \mathrm{d}\omega$

$\varepsilon = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{-\Delta\omega/2}^{\Delta\omega/2} 2.\varepsilon_0 (1 + \cos(\frac{\omega}{c}\delta)) \mathrm{d}\omega$ (V=1)

$\varepsilon = 2.\varepsilon_0 (1 + \gamma.\cos(\frac{\omega}{c}\delta))$ avec $\gamma = \mathrm{sinc}\,(\frac{\Delta\omega\delta}{2c})$

C.2 Contraste

Schéma du sinc de γ. Condition d'interférences ; $\frac{\Delta\omega\delta}{2c} < \pi$ ssi $l_\tau < \frac{2c\pi}{\Delta\omega}$ (longueur de cohérence temporelle)

AN à faire (lampe à incandescence quartz-iode, lampe spectrale au sodium, LASER hélium-néon)

Conclusion

Cette leçon nous aura permis de mettre en évidence les conditions appelées cohérences (polarisation, mutuelle, spatiale, temporelle) à respecter afin de produire et visualiser des interférences.

Ouverture sur les réseaux, ou sur les interférences longitudinales (bulles de savon, Fabry Pérot, LASER via cavité optique...). Possibilité de parler également de l'utilisation de l'interférométrie par division du front d'onde : mesurer les diamètres apparents d'étoiles doubles, en considérant le système étudié comme celui de deux sources lumineuses et ainsi, via deux télescopes munis chacun d'une fente, de retrouver l'écart entre ces 2 étoiles proches (méthode de l'anticoincidence des deux figures d'interférence).

Bibliographie

[1] Physique MP MP* Tec et Doc

[2] Physique PC PC* Tec et Doc

[3] Physique Tout-en-un PC PC*

[4] Optique expérimentale, Sextant