Dispositifs interférentiels à division du front d'onde

Applications directes du cours

$\boxed{1}$ En travaux pratiques, on réalise l'expérience des fentes d'Young avec une fente source S fine et monochromatique. Les fentes d'Young sont distantes de $a = 1$ mm et l'écran est placé à une distance $D = 1$ m du plan des fentes. Sur l'écran, on mesure la distance $\Delta x = 3$ mm entre les franges brillantes d'ordre -3 et $+3$. Que peut-on en déduire ?
On place à présent sur la fente S_1 une lame de verre d'épaisseur $e = 20$ μm et d'indice $n = 1,5$. Que se passe-t-il ? Comme faut-il agir sur la fente source pour que la figure d'interférence revienne dans son état initial.
On donne la distance $D' = 20$ cm entre la fente source et le plan des fente d'Young.

$\boxed{2}$ On réalise une expérience d'interférences avec deux trous d'Young dans l'air. On obtient un interfrange $i_0 = 2,0$ mm. Le dispositif est alors immergé totalement dans l'eau, d'indice $n = 1,33$.
Quelle est la nouvelle valeur de l'interfrange ?

$\boxed{3}$ On considère le dispositif des trous d'Young. Les deux trous sont identiques mais l'un des deux trous est recouvert d'une lame qui ne laisse passer que 50 % de l'intensité incidente, mais qui n'introduit aucune différence de marche notable.
Qu'y a-t-il de changé par rapport à la situation où les deux trous sont identiques ?

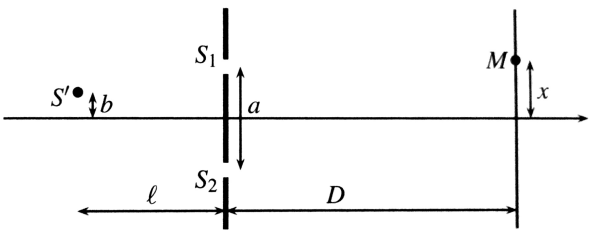
$\boxed{5}$ On éclaire un réseau ayant 500 traits par millimètre par un faisceau parallèle d'incidence normale ($\theta_0 = 0$) et de longueur d'onde $\lambda_0 = 600$ nm. Combien de pics de diffraction peut-on observer au maximum ?

Réponses : $\boxed{1}$ $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi 1)$, $A = 2A_1 \cos\left(\dfrac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)$;

Exercices

1. Méthode de Michelson et Pease

Une source monochromatique S' de longueur d'onde λ éclaire un dispositif classique de trous d'Young. Les notations sont précisées sur la figure suivante. La source S' n'est pas sur l'axe des fentes mais à une distance b de celui-ci.



On suppose $|x| \ll D$, $a \ll D$, $a \ll \ell$ et $b \ll \ell$.

1. En tenant compte de ces approximations, exprimer l'ordre d'interférences $p(M)$ en fonction de x, a, b, D, λ_0 et ℓ, où x représente l'abscisse du point M.
2. Une seconde source S'', identique à la précédente, est placée symétriquement à S' par rapport à l'axe du dispositif de fentes. Les sources S' et S'' sont supposées incohérentes. Un dispositif adapté permet de faire varier a, les paramètres $\varepsilon = \dfrac{2b}{\ell}$ et λ_0 restant fixes.

   Déterminer les valeurs de a qui correspondent à une annulation de la visibilité des franges d'interférences au point M.

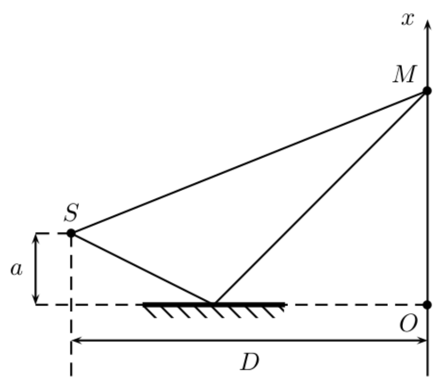
2. Mesure de l'épaisseur d'une lame

On considère le dispositif des trous d'Young, éclairé en incidence normale par une source ponctuelle de lumière blanche, suivie d'un filtre coloré permettant de sélectionner finement une composante spectrale de longueur d'onde $\lambda_0 = 500$ nm (qu'on supposera monochromatique). La distance entre les trous S_1 et S_2 est $a = 2,00$ mm et l'écran d'observation se trouve à distance $D = 3,00$ m du plan contenant les deux trous. L'ensemble du dispositif est placé dans l'air, dont on suppose l'indice égal à 1. Un point M de l'écran est repéré par ses coordonnées (x, y), l'axe (Ox) étant dans la direction des deux trous et le point O, origine des coordonnées, situé à égale distance des deux trous.

1. Quelle est l'expression de la différence de marche $\delta = (S_2M) - (S_1M)$ entre les ondes interférant en un point M de l'écran ? En déduire l'allure de la figure d'interférences observée sur l'écran. Calculer la valeur numérique de l'interfrange. Où se situe la frange d'ordre $p = 0$, correspondant à $\delta = 0$?
2. On rajoute devant le trou S_1 une lame d'indice $n = 1,4$ et d'épaisseur constante e. On considère que la lumière traverse cette lame en incidence normale et on néglige toute réflexion de la lumière sur ses faces. Exprimer la nouvelle différence de marche en M.
3. Où se situe maintenant la frange d'ordre $p = 0$? Exprimer son déplacement en unité d'interfrange. Vérifier que cela revient à exprimer la variation Δp de l'ordre d'interférences p due à l'introduction de la lame.
4. On retire à présent le filtre coloré pour éclairer en lumière blanche. On observe sur l'écran des franges irisées. Expliquer pourquoi. Justifier l'intérêt d'utiliser momentanément une source de lumière blanche dans cette expérience.
5. On estime le décalage de la frange d'ordre $p = 0$ égal à 6 interfranges, l'interfrange étant mesuré en présence du filtre coloré, donc en lumière monochromatique à $\lambda_0 = 500$ nm. En déduire une mesure de l'épaisseur e de la lame.

3. Miroir de Lloyd

On réalise l'expérience du miroir de Lloyd. La source lumineuse S est située à la distance a du plan du miroir. On réalise une observation en un point M situé sur un écran placé à grande distance D de S, repéré par ses coordonnées (x, y) :



1. Indiquer la région de l'espace où se superposent les deux faisceaux.
2. Montrer que ce système interférentiel est assimilable au système des trous d'Young.
3. Déterminer au point M la différence de marche, le déphasage, l'ordre d'interférence et l'intensité. En déduire l'interfrange.
4. Quelle est la nature de la frange en O. Pourquoi est-elle fictive ?
5. Monter que l'on peut remplacer S par un fente très fine mais assez longue sans changer la nature de l'interférogramme. On précisera la disposition de la fente.
6. On remplace S par une telle fente, très longue mais de largeur finie ℓ. Déterminer l'intensité et le contraste en M. Commenter.

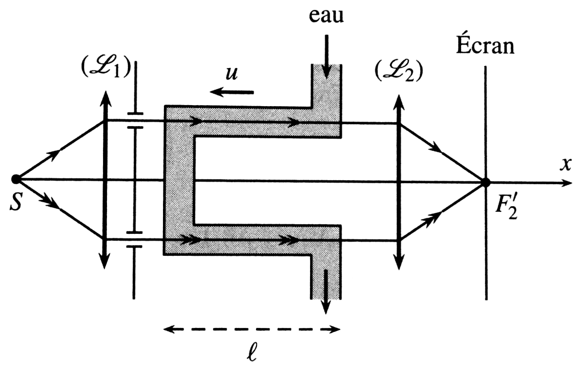
4. Observation d'une étoile double au travers de fentes d'Young

Les deux composantes d'une étoile double sont vues sous un angle α depuis la Terre. On pointe un système de deux trous d'Young vers le milieu des deux étoiles, et on place un écran à la distance D derrière les trous d'Young. On supposera que les deux étoiles sont de même luminosité, de même longueur d'onde et placées symétriquement de part et autre de l'axe optique.

1. Déterminer les intensités lumineuses de chacune des étoiles seules puis, donner l'expression de l'intensité totale sur l'écran.
2. En visant l'étoile double Capella de la constellation du Cocher, des astronomes ont obtenu une première annulation de contraste pour $a = 1,16$ m, dans le visible ($\lambda = 635$ nm). En déduire la distance angulaire α.
3. Expliquer l'intérêt de la méthode par rapport à une observation directe sachant que la turbulence atmosphérique limite la résolution environ à 1" (sans optique adaptative).

5. Expérience de Fizeau

En 1851, Fizeau réalisa l'expérience d'interférométrie suivante afin de vérifier l'hypothèse émise par Fresnel selon laquelle la vitesse de la lumière mesurée dans un référentiel en mouvement par rapport à l'éther n'obéissait pas à la loi de composition des vitesses galiléennes.



La source ponctuelle S est supposée monochromatique ($\lambda_0 = 530$ nm) même si Fizeau utilisa la lumière solaire. L'eau, initialement au repos, est mise en mouvement avec une vitesse d'écoulement constante u. On notera $v = \dfrac{c}{n}$ la vitesse de la lumière dans l'eau.

1. Estimer la différence de temps de propagation entre les deux rayons qui interfèrent en F_2' et en déduire la différence de marche δ correspondante :
   (a) en utilisant la loi de composition des vitesses galiléenne : $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$, où $\vec{v}'$ est la vitesse mesurée dans le référentiel $\mathcal{R}'$ en translation à la vitesse $\vec{u} = u\vec{e}_x$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}$ où est mesurée $\vec{v}$.
   (b) en utilisant la loi de composition des vitesses relativiste (avec les mêmes notations) :
$$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \dfrac{uv_x}{c^2}}$$
2. L'expérience de Fizeau consiste à observer les franges d'interférences avec l'eau immobile ($u = 0$) puis à mesurer le déplacement des franges quand on met l'eau en mouvement.

   Donner ce déplacement Δp, exprimé en nombre de franges, dans les deux cas ci-dessus (galiléen et relativiste).
3. Les valeurs des différents paramètres correspondant à l'expérience historique de Fizeau sont $n = 1,33$, $\ell = 1,5$ m et $u = 7\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$.

   Quelle est la loi de composition des vitesses qui donne un résultat théorique compatible avec l'expérience sachant que Fizeau mesura un décalage de $0,23$ frange, doublant l'effet en inversant le sens du courant ?

6. Trous d'Young en lumière polychromatique

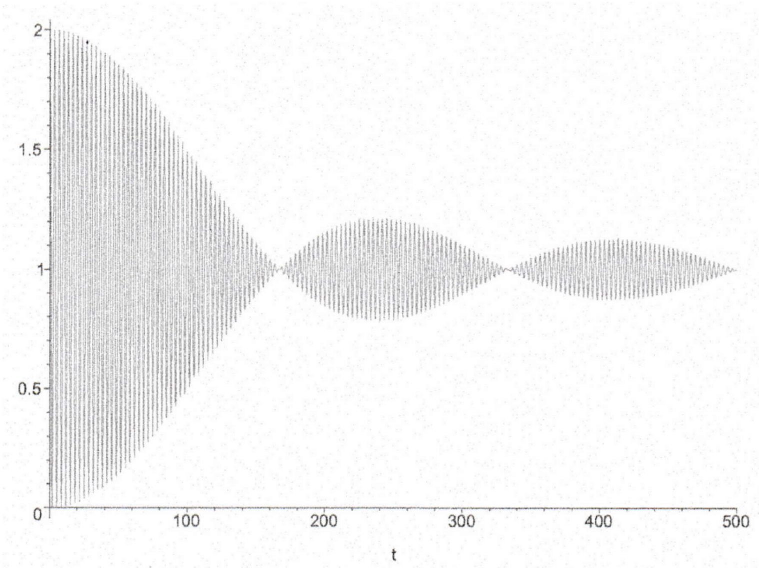
Deux trous d'Young S_1 et S_2 distants de $a = 4,0$ mm sont percés dans un diaphragme plan. Ils sont éclairés par une source ponctuelle S équidistante des trous et située à $d = 10$ cm du diaphragme.
On observe les franges d'interférences sur un écran situé à $D = 100$ cm du diaphragme et parallèle à lui.

1. La source comporte deux longueur d'onde (doublet jaune du sodium) : $\lambda_1 = 589,0$ nm et $\lambda_2 = 589,6$ nm. À quelle distance de la frange centrale y a–t-il disparition des franges pour la 1 ère fois ?

2. La source est une source de lumière blanche.
   Les trous sources sont maintenant espacés de $a = 1,2$ mm. Ils sont éclairés en lumière blanche de spectre continu entre $0,4$ μm et $0,75$ μm.
   On observe les interférences sur un écran à $D = 1$ m des trous. Sur cet écran, à 3,6 mm de la frange centrale, on place la fente d'un spectroscope. Combien y a-t-il de cannelures sombres dans le spectre et à quelles longueurs d'onde correspondent-elles ?

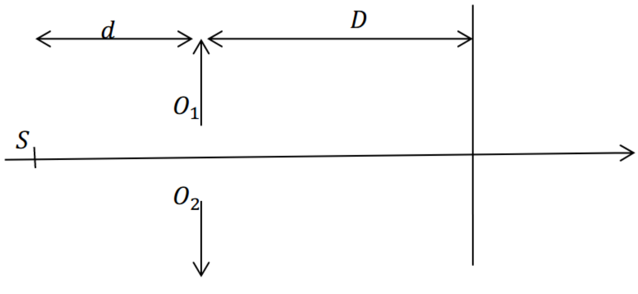
7. Mesure d'une largeur spectrale

Considérons une source ponctuelle dont le spectre est constitué d'une raie de longueur d'onde moyenne $\lambda_0 = 668$ nm et de largeur $\Delta\lambda$. Elle éclaire un dispositif de trous d'Young dont la distance $a(t)$ varie en fonction du temps : $a(0) = 0$ et $da/dt = V_0 = 100$ μm.s^{-1}. L'écran est à distance $D = 5,00$ m. On place un capteur sur l'écran en un point M à distance $x = 1,0$ cm du centre. Le graphe suivant présente l'intensité lumineuse reçue par le capteur en fonction du temps en secondes.
Déterminer une estimation de la largeur spectrale $\Delta\lambda$.



8. Demi-lentilles de Billet

On coupe en deux par un plan diamétral une lentille convergente de distance focale $f' = 0,50$ m et de rayon d'ouverture $R = 2,0$ cm. On écarte les deux demi-lentilles obtenues symétriquement de $e = 1,2$ mm perpendiculairement à l'axe de révolution initial de la lentille unique.
Sur cet axe, à une distance $d = 1,0$ m en avant de la position initiale du centre optique de la lentille unique, on place une fente source infiniment fine S émettant une lumière de longueur d'onde $\lambda = 550$ nm.



1. Déterminer les positions des images S_1 et S_2 de S à travers les demi-lentilles.
2. Expliquer l'existence de franges d'interférences sur un écran (E) perpendiculaire à l'axe de révolution.
3. Déterminer la distance minimale D des demi-lentilles à l'écran pour laquelle il y a interférences.
4. L'écran est placé à $D = 2,0$ m des demi-lentilles. Calculer l'interfrange, la largeur du champ d'interférences et le nombre de franges brillantes.