

LP 33 - Interférences à deux ondes en optique

Niveau : L2

Bibliographie :

- Dunod PC-PC⁺, Sans
- Harard, Optique → fentes d'Young
- Tillet, Optique physique
 - ↳ commentaires pédagogiques
 - ↳ inspiration des figures p118

Prérequis : Equations de Maxwell / linéaire pour la superposition des champs
 Notions de diffraction
 Optique géométrique, chemin optique

- Plan :
- I) Conditions d'interférences à deux ondes
 - a) processus de détection
 - b) superposition de deux ondes
 - c) terme de déphasage
 - II) le dispositif des fentes de Young
 - a) présentation et observation
 - b) figure d'interférence
 - III) Sources réelles et cohérence
 - a) source polychromatique cohérente temporelle
 - b) largeur de la source, cohérence spatiale

Préparation :

- deux lampes torches
- monter les fentes de Young avec
 - (i) laser + objectif de microscope + bifentes de taille différentes (100, 200, 500 μm) + fente simple + règle ou papier millimètre.
 - (ii) quartz iode + condenseur + fente source variable + bifentes de taille fixe + lentille qui fait l'image de la fente source si l'écran.

NB: accéder la bifente à la lentille pour plus de luminosité

- sur l'ordinateur, lancer :
 - le diapo
 - le video Youtube
 - l'animation du site <https://femto-physique.fr/simulations/young-experience.php>

Introduction

- Interférences : l'intensité issue d'une superposition d'ondes est différente de la somme des intensités.
- Interférences dans de nombreux domaines de la physique : optique, acoustique, mécanique quantique. Pour donner une intuition du phénomène de superposition et d'interférence, on prend un exemple familier à tout enfant qui a joué dans une baignoire.
 - video youtube @ ~5:00 Une personne excite deux flotteurs à la surface de l'eau. On voit que l'amplitude n'est pas la somme mais pas les intensités, notamment on voit des zones qui ont une amplitude d'oscillation élevée on y reviendra par la suite.
- On essaye de faire la même chose en optique avec deux lampes torches. On a l'impression que ce sont les intensités qui s'additionnent. La condition pour voir des interf. en optique semble plus dure.

- écrire au tableau
- mémoriser
- diapo

I) Conditions d'interf. à deux ondes

a) processus de détection

$$\mathcal{E} = \epsilon_0 m c \frac{|\vec{E}(t)|^2}{2} = |\vec{\Pi}| \text{ en W/m}^2$$

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \langle |\vec{\Pi}| \rangle$$

- On est sensible à $\mathcal{E} = \langle |\vec{\Pi}| \rangle_T = \epsilon_0 \langle |\vec{E}|^2 \rangle_T$ avec T un temps de moyennage qui dépend du capteur. Il est important d'avoir une notion d'ODC de ces temps → tableau

Capteur	Temps de moyennage
Oeil	0.06 s
Caméra CCD	$< 10^{-3}$ s
Photodiode	$< 10^{-6}$ s
Capteur photoélectrique	10^{-6} à 10^{-8} s

Période d'un rayonnement dans le spectre visible: $\sim 10^{-15}$ s

• en optique $T_{\text{visible}} \ll T_{\text{moyenne}} \ll 10^9$

on va voir la conséquence sur la condition d'obtention d'interférences

b) Superposition de deux ondes

On considère des ondes:

- Hypo: monochromatique
- à un point fixe M



• $\vec{E}_{1,2} = E_{0,1,2} \cos(\omega_{1,2}t + \varphi_{1,2})$ $I_{1,2} = \langle |\vec{E}_{1,2}|^2 \rangle$
 • Par linéarité des équations de Maxwell, $\vec{E}_{\text{TOT}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$
 • On calcule $|\vec{E}_{\text{TOT}}|^2 = |\vec{E}_1|^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + |\vec{E}_2|^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + 2 \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2)$
 (Note: "intensité" is written in red above the first term, and "on a simplifié le 2 avec celui des cosinus" is written in green below the first term. "intensité vibratoire" is written in green above the second term, and "terme d'interférence" is written in green below the last term.)

• On voit que: (i) $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 0 \Rightarrow I_{\text{TOT}} = I_1 + I_2$, pas d'interférences.

• On passe à la valeur moyenne en considérant par simplicité $I_0 = I_1 = I_2$ et $\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02}$
 $I_{\text{TOT}} = 2I_0 (1 + \langle \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2) \rangle + \langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2) \rangle)$

0 avec les 006 cités précédemment

(ii) Si $|\omega_1 - \omega_2| > 10^6$ Hz, pas d'interférences
 C'est la particularité de l'optique: deux ondes doivent être synchrones à 10^9 près en écart relatif pour les fréquences du visible pour interférer

Pour la suite on suppose $\omega_1 = \omega_2$.
 $I_{\text{TOT}} = 2I_0 (1 + \langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle)$

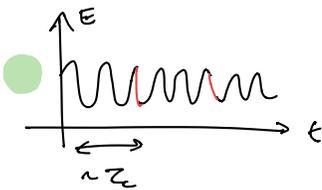
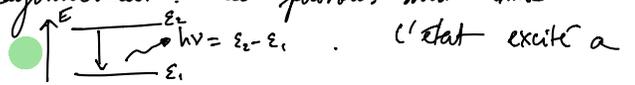
il reste à étudier $\varphi_1 - \varphi_2$

c) terme de déphasage

• $\varphi_1 - \varphi_2$ a une origine géométrique, dû au retard de propagation des deux signaux.

$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} ((S_1 M) - (S_2 M))$
 S différence de marche

• $\varphi_1 - \varphi_2$ a une origine due à l'émission du rayonnement. Les photons sont émis par désexcitation des atomes d'un état excité à un temps de vie fini τ_c , ce qui se traduit à l'émission de trains d'ondes ayant une durée moyenne de corrélation τ_c . Si deux trains d'ondes sont espacés de τ_c , ils sont déphasés aléatoirement.



(iii) les trains d'onde qui interfèrent sont les mêmes pour qu'il y ait interf. \rightarrow même source primaire.

Cela se traduit aussi sur la différence de marche.

Si $S \geq c \cdot \tau_c = l_c$, longueur de cohérence, superposition de deux trains d'onde décorrélés $\rightarrow \langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle = 0$.

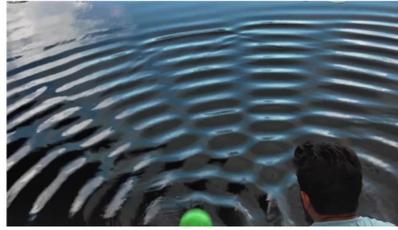
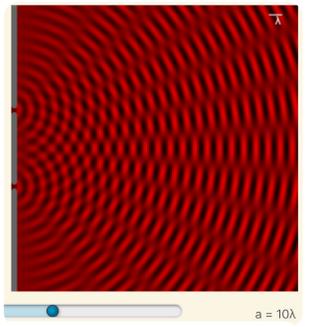
• c'est la particularité de l'optique: les ondes qui interfèrent doivent provenir de la même source primaire \rightarrow cela explique pourquoi on observait pas d'interf. avec 2 lampes torches mais on en observe avec des ondes à la surface de l'eau.

Conclusion

Condition d'interférences

	Formule de Fresnel
(i) $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \neq 0$	$I = 2I_0 (1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} S))$
(ii) synchronie	
(iii) même source	

- On revient sur le fait qu'on moyenne dans le temps pour trouver les profils d'intensité. → monter l'animation reels.
- On voit une coupe horizontale du profil d'intensité → une verticale.
- Si on fait une simulation, on retrouve les oscillations temporelles du champ électrique, montrées ici au ralenti. On retrouve ce qu'on a vu sur la vidéo avec les ondes à la surface de l'eau → remonter la photo.
- Pour en finir 4 fois pour toutes avec l'analogie, on a moyenné dans le temps la vidéo → on retrouve les franges qu'on a observées en optique.



Moyenné sur < 0.1 s

Moyenné sur 3 s

IV) Sources réelles et notion de cohérence

a) source polychromatique, cohérence temporelle

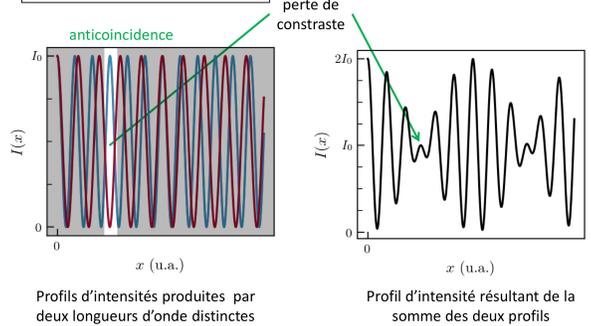
- Jusqu'ici, on a considéré uniquement des sources monochromatiques. Mais les sources réelles comme le laser ont une largeur spectrale. On va étudier l'influence de l'élargissement spectral et en quoi elle influence le contraste des franges. (et des sources polychromatiques)

(i) effet de deux longueurs d'ondes

Quel est l'effet qualitatif de la polychromaticité?

- diaps. Quand il y a 2 λ , les intensités s'additionnent on somme les profils d'intensité
- perte de contraste sur l'écran, ce qui est une caractéristique des systèmes en éclairage non monochromatique.

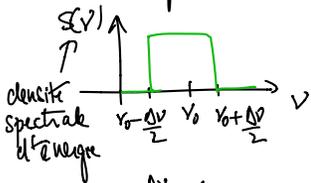
Cohérence temporelle



(ii) une source réelle a un spectre continu

→ diaps sur les sources d'élargissement

(iii) effet quantitatif. On modélise, par simplification, le spectre d'une source par une porte.



On somme les intensités :

$$dI = I(\nu) d\nu$$

$$\text{avec } I(\nu) = \frac{2I_0}{\Delta\nu} (1 + \cos(\frac{2\pi}{c} \nu \cdot \frac{ax}{D}))$$

$$I(x) = \int_{-\frac{\Delta\nu}{2} + \nu_0}^{+\frac{\Delta\nu}{2} + \nu_0} d\nu \cdot \frac{2I_0}{\Delta\nu} (1 + \cos(\frac{2\pi}{c} \nu \cdot \frac{ax}{D}))$$

$$I(x) = 2I_0 (1 + \sin(\frac{2\pi}{c} (\nu_0 + \frac{\Delta\nu}{2}) \frac{ax}{D}) - \sin(\frac{2\pi}{c} (\nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2}) \frac{ax}{D}))$$

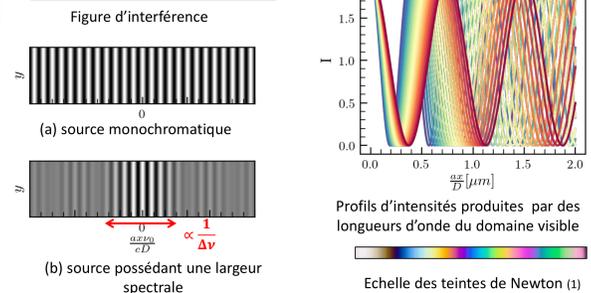
$$\frac{2\pi ax}{c} \Delta\nu$$

Cohérence temporelle

Cause d'élargissement spectral	Largeur spectrale typique
Élargissement Doppler	10 ⁹ Hz
Élargissement naturel	10 ⁸ Hz
Élargissement collisionnel	10 ⁸ Hz

Laser : $\Delta\nu = 10^9$ Hz
Source spectrale : $\Delta\nu = 10^{11}$ Hz

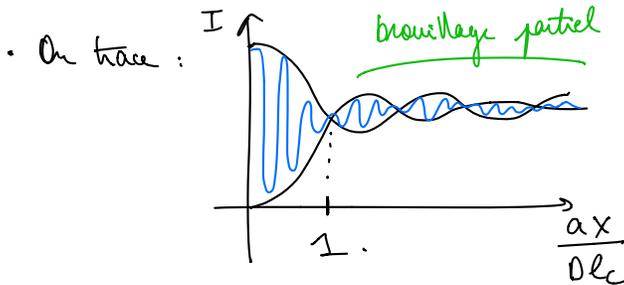
Cohérence temporelle



(1) <http://olivier.granier.free.fr>

$$I(x) = 2I_0 \left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{c} \Delta\nu \frac{ax}{D}\right)}{\frac{\pi}{c} \frac{ax}{D} \Delta\nu} \cdot \cos\left(\frac{2\pi\nu_0 ax}{cD}\right) \right) = 2I_0 \left(1 + \underbrace{\text{sinc}\left(\frac{\pi}{c} \Delta\nu \frac{ax}{D}\right)}_{\text{contraste}} \underbrace{\cos\left(\frac{2\pi\nu_0 ax}{cD}\right)}_{\text{terme monochromatique}} \right)$$

• **Contraste** $\mathcal{C} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ $\mathcal{C} = \left| \text{sinc}\left(\frac{\pi}{c} \Delta\nu \frac{ax}{D}\right) \right|$



→ diapo, figure d'interf. correspondante
 → annulation du contraste $\bar{\alpha} \times \lambda_{\text{vis}} \sim 10^4 \text{ m}$
 pour $\begin{cases} D = 2 \text{ m} \\ a = 200 \mu\text{m} \\ \Delta\nu = 10^9 \text{ Hz (lum)} \end{cases}$
 → on ne la voit pas avec un laser
 → transition → on passe en lumière blanche

• pour l'œil, une lumière blanche est une source qui a une largeur spectrale donnée par le spectre du visible : $\Delta\nu \sim 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \rightarrow \lambda_{\text{vis}} \sim 1 \text{ cm}$
 → manyp : on voit en lumière blanche un brouillage mais qui peut être dû à la figure de diffraction (réseau). Mais on voit des couleurs qu'on peut interpréter
 → figure s/ le diapo. le bleu est éteint en premier et revient en premier aux différences de marche élevées, le spectre est cannelé : certaines longueurs d'onde sont éteintes. On peut voir des teintes de Newton.

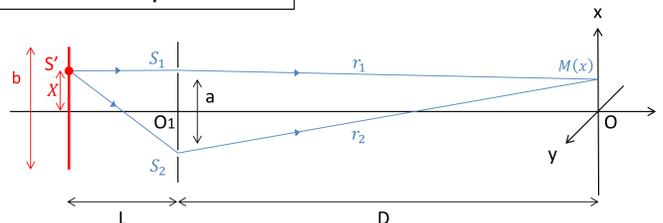
→ Planp de transition : jusqu'ici on a considéré une source ponctuelle. Sur la manyp c'est la fente source. Que se passe-t-il si on l'élargit la source → **brouillage sur tout l'écran** contrairement à la cohérence temporelle où on a un brouillage partiel puis les franges réapparaissent mais avec un faible contraste. On va expliquer ceci avec la notion de cohérence spatiale

b) largeur de la source et cohérence spatiale.

→ sur diapo

- on considère une source hors axe
- on calcule S .
- on somme les intensités
- terme de contraste uniforme $\mathcal{C}(x)$

Cohérence spatiale



$$\delta(M) = \frac{ax}{D} + \frac{ax}{L}$$

symétrique → on réutilises le calcul précédent

Source de largeur b, perpendiculaire aux fentes, centrée sur l'axe z :
 on additionne les intensités $dI = \frac{I(x)}{b} dx$

$$I = I_0 \left(1 + \text{sinc}\left(\frac{\pi ab}{\lambda L}\right) \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda D}\right) \right)$$

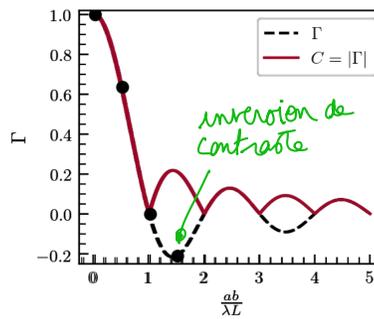
$$c = \left| \text{sinc}\left(\frac{\pi ab}{\lambda L}\right) \right|$$

terme de contraste $\underbrace{\text{angle sous lequel est vue la source depuis les fentes}}_{\text{indép de } x}$

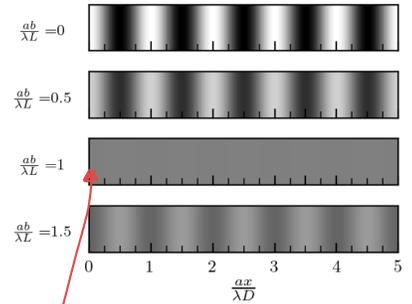
- On trace le contraste.
- b augmente $\rightarrow \ell \rightarrow$ jusqu'à $\ell=0$
terme uniforme
 $\rightarrow \ell$ remonte avec les franges d'éclairement: *inversion de contraste*

• condition de bruyage $\frac{ab}{L\lambda} < 1$

Cohérence spatiale



Contraste C de la figure d'interférence en fonction de la largeur de la source b , supposée monochromatique



Figures d'interférence pour différentes largeurs de source b

*bruyage des franges sur la totalité de l'écran.
 En cohérence temporelle, on n'obtient que un bruyage partiel.*

Conclusion

- On a vu des critères d'obtention d'interférences en optique, dû à la séparation des échelles temporelles du capteur et de l'onde
- On peut utiliser le phénomène d'interférences pour des mesures de précision (longueur, indice optique)
- On a vu l'effet de la cohérence spatiale/temporelle sur le contraste de la figure. On a utilisé un dispositif à division du front d'onde mais on aurait pu utiliser un dispositif à division d'amplitude ce qui permet de s'affranchir du pb de cohérence spatiale, au prix de la localisation des franges. Mais la perte de contraste n'est pas gérable, on peut s'en servir pour faire des mesures, par ex en astronomie.
 (→ interf. Cabryne)

Compléments

Wiener Khintchin: pour la cohérence temporelle (source ponctuelle polychromatique)

degré de cohérence temporelle :
$$\gamma(t_1, t_2) = \frac{\langle S(t_1) S^*(t_2) \rangle}{\sqrt{I(t_1) I(t_2)}}$$

degré de cohérence = $\frac{1}{\text{largeur}} \int \text{densité spectrale de la source}$

Van Cittert et Zernike / cohérence spatiale (source étendue monochromatique)

degré de cohérence = $\frac{1}{\text{largeur}} \int \text{profil d'intensité de la source}$



$$\gamma = \frac{\langle V_{\text{obs}} \cdot V_{\text{obs}}^* \rangle}{\sqrt{\langle V_{\text{obs}}^2 \rangle \langle V_{\text{obs}}^2 \rangle}} = \frac{\int I(x, y) e^{2\pi i (px + qy)} dx dy}{\int dx dy I(x, y)}$$

ODG: laser ≠ cohérence temporelle $t_c = 10^{-8}$ s
 $l_c = 3$ m

* hélium Néon $\lambda = 632,8$ nm (rouge)
 $\lambda = 543,365$ nm (vert) $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$

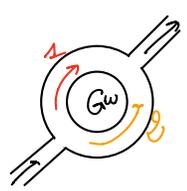
doublet jaune	sodium	588,9 et 589,5 nm	$\Delta\lambda = 0,6$ nm	$\Delta\nu = 5,2 \cdot 10^{11}$ Hz
	mercure	577 et 579,1 nm	$\Delta\lambda = 2,1$ nm	$\Delta\nu = 1,9 \cdot 10^{12}$ Hz
		$\nu_0 \sim 0,5 \cdot 10^{15}$ Hz		

lumière blanche visible : $\lambda \sim 380$ nm - 780 nm
 $\nu \sim 0,79 \cdot 10^{15}$ - $0,38 \cdot 10^{15}$ Hz
 $\nu_0 \sim 0,58 \cdot 10^{15}$ Hz, $\Delta\nu = 0,4 \cdot 10^{15}$ Hz
 $\Delta\nu/\nu_0 \sim 0,7$

Autre phénomène d'élargissement des raies : effet Stark - (modification des états électroniques sous l'effet d'un champ \vec{E}) (hydrogène 3mm)

Autres dispositifs et application de la cohérence:

- effet Sagnac



utilisé dans les gyroscopes
 rotation entraîne une différence de marche $\neq 0$
 (calcul relativiste)
 en pratique utilise plus tous de fibre optique pour maximiser d .

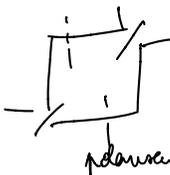
Condition de non brouillage des franges sous élargissement de la source : $\Delta \sigma(\sigma) = 0$ AU PREMIER ORDRE

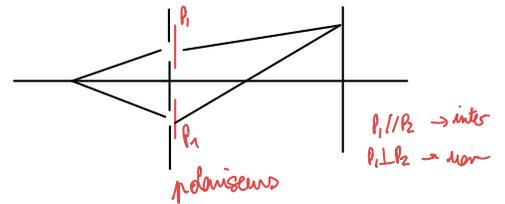
$$\vec{S} \cdot (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) = 0$$

- 2 conditions :
- $\vec{S} \perp (\vec{u}_2 - \vec{u}_1)$: élargissement de la source suivant ao ou o ne trouble pas les franges dans les fentes d'éclairage
 - $\vec{u}_2 - \vec{u}_1 = \vec{0}$: même rayons incidents : interféromètres à division du front d'onde impossible.

Énoncé du thm : "La différence de marche δ suite au déplacement du point source est nulle au premier ordre si les rayons qui interfèrent proviennent du même rayon incident." Les dispositifs à division d'amplitude s'affranchissent de la perte de cohérence spatiale au prix de la localisation des interférences.

- Capacité de Fresnel Arago : cohérence de polarisation

- Nach Fender  \Rightarrow linéarité + polariseurs.



Questions

Optique

- Quelle est la différence entre intensité et éclairement ? L'intensité est un flux lumineux par unité d'angle solide (W/sr) et l'éclairement par unité de surface (W/m^2 ou $\text{cd sr}/\text{m}^2$).
- Quelles sont les sources d'élargissement spectral ? Ordre de grandeur ? Largeur intrinsèque (profil Lorentzien), largeur Doppler (profil Gaussien), largeur suite aux collisions (profil Lorentzien), effet Stark, etc. La convolution d'un profil Gaussien et d'un profil Lorentzien est appelée profil de Voigt. Pour la lumière visible, la fréquence est de l'ordre de 10^{15} Hz. **ODG**: Elargissement Doppler : 10^9 Hz, élargissement collisionnel : 10^8 Hz, élargissement intrinsèque : 10^8 Hz. Pour plus de détails, voir la leçon et l'annexe. * nommé "Voigt"
- Qu'est-ce qu'un filtre interférentiel ? Un interféromètre de Fabry-Pérot.
- Quelles sont les hypothèses du modèle scalaire de la lumière ? On considère des ondes polarisées aléatoirement ou des ondes qui ont la même polarisation. On remplace les grandeurs vectorielles par un scalaire : l'intensité vibratoire. Certains rajoutent la condition des milieux lentement variables : les dimensions caractéristiques du milieu sont faibles devant la longueur d'onde.
- Qu'est-ce qu'un polariseurs ? Des polymères sous contrainte mécanique *i.e.* étirés dans une direction. Ils absorbent alors le champ polarisé dans cette direction.
- Comment fonctionne une lampe spectrale ? On fait circuler un courant dans la vapeur du gaz (exemple, lampe à vapeur de sodium). Les collisions avec les électrons accélérés excitent les atomes qui se dés excitent en émettant des photons.
- Comment fonctionne un laser ? Cavité résonante, émission stimulée.
- Qu'est-ce que le spectre cannelé et le blanc d'ordre supérieur ? Longueurs d'ondes éteintes dans le spectre. Blanc d'ordre supérieur : on dirait du blanc mais des longueurs d'onde sont éteintes. Comment l'observer ? Spectromètre.

Interférences

- Citer des dispositifs à division du front d'onde : Fentes de Young, miroirs de Fresnels, miroirs de Lloyd, bilentille de Billet.
- Citer des dispositifs à division d'amplitude : Michelson, Fabry-Pérot, Mach-Zehnder, Sagnac.
- Avantage du miroir de Fresnel par rapport aux fentes de Young ? On n'est plus limité par la diffraction des fentes mais par la taille des miroirs.
- Que dit le théorème de localisation des interférences ? Avantages/inconvénients de la division d'amplitude/de front d'onde ? La différence de marche δ suite au déplacement du point source est nulle au premier ordre si les rayons qui interfèrent proviennent d'un même rayon incident ou si l'élargissement se fait orthogonalement aux rayons : la différentielle de la différence de marche est $d\delta = \vec{S}_1 \vec{S}_2 \cdot (\vec{u}_1 - \vec{u}_2)$.
- Différence entre les dispositifs à division d'amplitude et division du front d'onde ? Les dispositifs à division d'amplitude s'affranchissent de la perte de cohérence spatiale au prix de la localisation des interférences (d'après le théorème de localisation).
- Quel théorème mathématique est associé à la notion de cohérence spatiale ? Que dit-il ? Le théorème de Van-Cittert-Zernike : le degré de cohérence pour une source étendue monochromatique est égale à la transformée de Fourier du profil d'intensité de la source.
- Quel théorème mathématique est associé à la notion de cohérence spatiale ? Que dit-il ? Le théorème de Wiener-Khinchin : le degré de cohérence pour une source ponctuelle polychromatique est égale à la transformée de Fourier de la densité spectrale de la source.
- La perte de contraste est-elle toujours un défaut ? Exemples d'application ? Non, on peut faire des mesures avec. La perte de cohérence temporelle permet d'étudier les raies spectrales (écart entre les raies du doublet du sodium, etc.) L'interféromètre de Labeyrie tire profit de la perte de cohérence spatiale pour déterminer le diamètre des étoiles.
- Quelle expérience célèbre met en évidence la cohérence de polarisation ? L'expérience de Fresnel-Arago : mettre des polariseurs en sortie de trous d'Young modifie le contraste.

- Equivalent de l'expérience de Fresnel-Arago ou Mach-Zender avec polariseurs en optique anisotrope? Les interférences en biréfringence.
- Quelles sont les différences fondamentales entre ondes lumineuse et mécanique? (i) Une onde lumineuse à une fréquence bien plus élevée dans le domaine de l'optique qu'une onde mécanique. (ii) Il n'est pas possible de contrôler la phase d'émission des excitateurs optiques, i.e. des électrons qui se désexcitent vers l'état fondamental de l'atome.
- Comment est obtenu le déphasage lors de la réflexion à une interface avec un milieu dont l'indice est moins élevé? Avec les conditions de continuité des champs qui donnent les coefficients de Fresnel.
- Interférences dans d'autres domaines? Mécanique quantique : interférences entre les ondes de matières, fentes d'Young avec des électrons. Acoustique. Ondes de surface.
- Interférences dans la vie de tous les jours? Couleurs d'une bulle de savon. Lecture de CD. Casques antibruit en acoustique.
- Pourquoi y a-t-il plusieurs couleurs sur une bulle de savon? Suivant l'épaisseur du film de savon, la différence de marche des rayons transmis varie, les longueurs d'onde allumées et éteintes varient.

Fentes de Young

- Que peut-on dire de la validité du développement limité permettant d'obtenir la figure d'interférences? Il faut vérifier que l'ordre suivant est bien négligeable, ce qui n'est pas le cas en particulier dès qu'on s'éloigne suffisamment de l'axe optique, donc sur les bords de l'écran. On voit la courbure des franges et une variation de l'interfrange. En y/D , l'ordre 3 est nul par symétrie.
- Pourquoi 2 points issus du même point de la lampe au sodium et qui éclairent 2 points de coordonnée verticale y différente n'interfèrent-ils pas dans l'expérience des fentes d'Young? Ce qui dévie les faisceaux après la double fente, c'est la diffraction. Celle-ci n'intervient (quasiment) que dans la direction horizontale (orthogonale aux fentes) et donc les 2 rayons ne vont pas arriver au même point sur l'écran.
- Source utilisée par Young pour ses expériences? Lumière blanche et trous assez fins.
- Que se passe-t-il si on immerge le dispositif dans un milieu d'indice n ? Cela ajoute un facteur n dans la différence de marche. Cela rétrécit l'interfrange.
- Dessin du profil d'intensité sur l'écran pour les fentes d'Young? Figure de diffraction (sinus cardinal) en enveloppe et franges d'interférence à l'intérieur.
- Différence entre les trous et les fentes d'Young? Intensité et forme de la tache de diffraction.

Autres

- Que voit-on sur la vidéo? Où sont les maxima et les minima? Quand le niveau de l'onde est constant c'est que les ondes sont en opposition de phase, ce sont les franges sombres.
- Comment illustrer la cohérence temporelle d'une autre manière? Avec un doublet proche (sodium, mercure) et perte de contraste OU avec un filtre interférentiel, décomposer la lumière.

Annexes

Causes d'élargissement spectral

Causes d'élargissement spectral : (i) élargissement naturel. Les états propres du hamiltonien de l'atome isolé sont différents de celui avec interaction avec le champ électromagnétique \rightarrow les états excités ne sont pas stables \rightarrow ils ont un temps de cohérence τ (donné par le coefficient d'Einstein d'émission spontanée $\tau = 1/A_{i \rightarrow j}$), la probabilité d'être dans un état excité décroît comme $e^{-t/\tau}$ comme la désintégration radioactive \rightarrow écart à l'énergie propre du hamiltonien sans interaction $\Delta E \sim \hbar/\tau$, profil Lorentzien (élargissement dit homogène) par transformée de Fourier. **ODG:** $\Delta\lambda_{nat} \sim 10^{-5}$ nm.

(ii) Élargissement collisionnel. Une collision élastique détruit la phase donc réduit le temps de cohérence τ donc élargit les raies. Largeur proportionnelle à la section efficace des collisions, la densité (donc la pression), la vitesse relative moyenne. Exemple : dans la lampe Hg, collisions entre Hg, Hg⁺, e⁻, Ar. Profil lorentzien. En pratique, visible que dans les lampes à haute pression. **ODG:** $\Delta\lambda_{coll} \sim 10^{-3}$ à 10^{-2} nm.

(iii) Elargissement Doppler thermique. Dépend de la température du gaz. Profil gaussien. **ODG:** $\Delta\lambda_{Doppler} \sim 10^{-3}$ à 10^{-2} nm.

(iv) Elargissement par l'appareil de mesure. Dans un spectromètre, un élément dispersif (prisme, réseau) sépare spatialement les différentes longueurs d'onde de la lumière à analyser et un détecteur (CCD, plaque photographie) enregistre la distribution spatiale du rayonnement pour remonter à la distribution spectrale. Plus la fente (ou fibre optique) est large, plus l'image spatiale d'une longueur d'onde est large. Mais on ne peut pas diminuer la taille de la fente sous la limite de diffraction. La résolution du capteur n'est pas le facteur limitant pour les spectromètres commerciaux. **ODG:** $\Delta\lambda_{fente} \sim 0.5$ à 5 nm.

(v) Elargissement isotopique dû aux isotopes d'abondance variée.

(vi) Elargissement cristallin dû aux impuretés du réseau.

Les profils d'élargissements s'ajoutent par convolution. La convolution de deux lorentziennes est une lorentzienne. La convolution d'une gaussienne avec une lorentzienne est un profil de Voigt (centre gaussien et ailes lorentziennes).

Timing

Timings de fin. Intro : 1 :20. I) 1) 2 :44 2) terme d'interférence 5 :00 Condition d'interférence, formule de Fresnel, 12 :00 II) 1) manip : 14 :15 2) calcul de la différence de marche 17 :15 passage à la simu : 18 :52. Moyennage de la vidéo 19 :44 III) 1) Fin du calcul de la porte 26 :00 ODG de largeur spectrale 31 :10 2) Fin de la manip de variation de la largeur de la fente source 35 :00. Fin diapo cohérence spatiale 39 :00 Fin conclusion 39 :55.

Commentaires

$\omega_1 = \omega_2$ exactement. Baisser le tableau blanc pour les légendes du diapo. Densité spectrale d'énergie. Faire partir le cosinus du haut. Lapsus lumière couleur. Toutes les longueurs d'onde s'annulent.

Passage

Questions

- Qu'est-ce que l'interféromètre de Labeyrie? C'est un interféromètre stellaire. En augmentant l'écart entre les deux bras et en repérant l'écart qui réalise l'annulation de contraste, on mesure le diamètre angulaire de l'étoile.
- Source utilisée par Young pour ses expériences? Lumière blanche et trous assez fins.
- Différence entre éclairage et intensité? Eclairage : flux d'énergie (norme du vecteur de Poynting). Intensité : flux par unité d'angle solide. On appelle aussi intensité vibratoire (différente de l'intensité photonique) la moyenne du champ électrique au carré.
- Que voit-on sur la vidéo? Où sont les maxima et les minima? Quand le niveau de l'onde est constant c'est que les ondes sont en opposition de phase, ce sont les franges sombres.
- Interférences dans d'autres domaines? Ondes de matière, surface de l'eau. Couleurs d'une bulle de savon. Casques antibruit. CD.
- Pourquoi y a-t-il plusieurs couleurs sur une bulle de savon? Suivant l'épaisseur du film de savon, la différence de marche des rayons transmis varie, les longueurs d'onde allumées et éteintes varient.
- Que se passe-t-il si on immerge le dispositif dans un milieu d'indice n ? Cela ajoute un facteur n dans la différence de marche. Cela rétrécit l'interfrange.
- Avantage du miroir de Fresnel par rapport aux fentes? On n'est plus limité par la diffraction des fentes mais par la taille des miroirs.
- Dessin du profil d'intensité sur l'écran pour les fentes d'Young? Figure de diffraction (sinus cardinal) en enveloppe et franges d'interférence à l'intérieur.
- Approximation du champ scalaire? On ne prend pas en compte la polarisation. OK si on prend de la lumière polarisée aléatoirement on polarisée identiquement.
- Qu'est-ce que ça change si on utilise une lumière polarisée? Cela rajoute un terme de contraste. Expérience connue pour l'illustrer? Expérience de Fresnel Arago. Quel type de polarisation peut-on avoir? Rectiligne, circulaire.
- Comment fonctionne un polariseur? On étire des polymères dans une direction et ils absorbent le rayonnement dans cette direction.

- Comment relier le temps de cohérence au spectre d'énergie ? Largeur spectrale = inverse du temps de cohérence par TF et Wiener Khintchine.
- Comment fonctionne une lampe spectrale ? On fait circuler un courant dans la vapeur du gaz (exemple, lampe à vapeur de sodium). Les collisions avec les électrons accélérés excitent les atomes qui se désexcitent en émettant des photons.
- Comment fonctionne un laser ? Cavité résonante, émission stimulée.
- Comment illustrer la cohérence temporelle d'une autre manière ? Avec un doublet proche (sodium, mercure) et perte de contraste OU avec un filtre interférentiel, décomposer la lumière.
- Développement limité en y/D ? Il faut vérifier que l'ordre 2 est négligeable. L'ordre 3 est nul par symétrie.
- Profil d'énergie spectral pour les causes d'élargissement ? Gaussienne pour l'effet Doppler, Lorentzienne pour collisionnel et naturel. Convolution de Lorentzienne et Gaussienne : profil de Voigt.
- Pourquoi est-il plus facile de voir des interférences en mécanique comparé à l'optique ? (i) période petite comparée au temps de moyennage des capteurs (ii) phase aléatoire.
- Qu'est-ce que le spectre cannelé et blanc d'ordre supérieur ? Longueurs d'ondes éteintes dans le spectre. Blanc d'ordre supérieur : on dirait du blanc mais des longueurs d'onde sont éteintes. Comment l'observer ? Spectromètre.
- Différence entre les trous et les fentes d'Young ? Intensité et forme de la tache de diffraction.
- Qu'est ce que la division d'amplitude, exemple ? Division d'amplitude sépare un rayon en deux (avec une lame $1/2$ réfléchissante). Ex : Michelson, Fabry-Pérot, Mach-Zender, Sagnac. Que gagne/perd-t-on avec un dispositif avec division du front d'onde ? Pas de pb de cohérence spatiale mais franges localisées.
- Théorèmes pour cohérence spatiale et temporelle ? Van Cittert-Zernike et Wiener-Khintchine.
- Que se passe-t-il si on éloigne beaucoup l'écran ? Le développement limité n'est plus valable. On voit des franges courbées.
- Comment expliquer à un élève pourquoi deux trains d'onde vont interférer ou pas ? Avec un dessin, si on moyenne le produit d'un grand nombre de trains d'onde déphasés aléatoirement, on va trouver 0.

Commentaires

Points positifs : bon enchaînement du plan et choix des exemples. Manip de la lampe torche. Couleurs au tableau. Plots python visuels. Récapitulatifs et bilans entre les parties.

A améliorer : Début rapide, il faut ralentir. Baisser les écrans sur la paillasse pour mieux voir au tableau. Attention, ce ne sont pas 2 rayons qui interfèrent, mais beaucoup. On peut montrer l'invariance par translation sur la manip. Pour les monotonies de i avec D , λ , au lieu de mettre des flèches rapides au tableau, on peut faire un tableau récapitulatif sur diapo. "Je vais essayer de faire la manip" à éviter. Numérotation des sous parties : rester consistant.

Conseils : Pour gagner du temps, on peut gagner du temps sur les ordres de grandeur des annulations de contraste pour la laser/lampe spectrale. C'est pas gênant de ne pas faire l'inversion de contraste et le garder pour les questions. On pourrait juste faire le début. Alternative : utiliser le détecteur Caliens. Pour rendre plus clair l'effet de la diffraction, on pourrait montrer l'effet d'une fente simple avant les bifentes.

Idées pendant la construction de la leçon

2017 : bonne partie sur la localisation des franges à lire.

Parler de la cohérence de polarisation (pas faire une étude complète, mais important de le mentionner). En parler si choisit de traiter le modèle scalaire. (se place t'on dans une lumière non polarisée ou tout est polarisé de la même manière ?).

Après les fentes de Young, émission en isotropie. On suppose que la tache de diffraction est grande. Contrôler les termes dans le DL (car en vrai, terme ordre 3 ? non négligeable et on peut l'observer (?)). Faire un calcul difficile ie un calcul d'intégration. Pour la superposition des vibrations lumineuses, mettre en prérequis soit Maxwell ou d'Alembert (linéarité).

Pour la densité spectrale en porte, mentionner brièvement les sources d'élargissement spectrale et la forme réelle. En conclusion, parler des interféromètres à division d'amplitude qui permettent de s'affranchir de la cohérence spatiale.

Pour les fentes de Young : Le tracé au tableau de l'éclairement en fonction de la position sur l'écran pourrait être avantageusement remplacé par une animation." Bien justifier au passage la forme des franges (éléments de symétries par exemple).

Définitions du dictionnaire de physique : Interférences : Phénomène par lequel la superposition de plusieurs ondes produit localement une intensité qui est différente de la somme des intensités individuelles. Si l'intensité résultante est supérieure, on parle d'interférences constructives et dans le cas contraire, d'interférences destructives. Ce phénomène présente un intérêt particulier en optique, mais aussi pour d'autres types d'onde (ondes radios, acoustique, . . .).

Cohérence spatiale : Nom générique donné aux caractéristiques d'un dispositif interférentiel associées à la baisse de contraste des figures d'interférence, du fait de l'extension spatiale de la source lumineuse utilisée. En effet, une expérience d'interférence typique fait interférer plusieurs rayons issus de chaque point de la source, chacun d'entre eux produisant sa propre figure d'interférence à l'endroit où l'on observe le phénomène. Ainsi, il peut arriver que la superposition des figures d'interférence dues aux différents points de la source donne une figure de visibilité plus faible, comme c'est le cas par exemple pour l'expérience des trous d'Young. Lorsque cette situation se présente, on dit que la cohérence spatiale est diminuée. La cohérence spatiale dépend de l'angle sous lequel on voit la source depuis le dispositif interférentiel, et non directement de la taille réelle de la source. Par exemple, la cohérence spatiale de la lumière venant d'une étoile (autre que le Soleil) est bien meilleure que celle venant d'une bougie placée à quelques mètres. Cette notion fut introduite par Augustin Fresnel (1788-2127).

Cohérence temporelle : Nom générique donné aux caractéristiques d'une figure d'interférence ou d'un dispositif interférentiel liées à la nature non parfaitement monochromatique de la source utilisée. En effet, une onde quelconque peut être décrite comme une succession de trains d'onde sinusoidaux indépendants, dont la phase relative est aléatoire. Ainsi, on ne peut considérer que l'onde est associée à une seule et même sinusoidale que sur des temps inférieurs aux temps de cohérence τ_c , lequel est relié à la largeur spectrale de la source. Les lasers et masers sont des exemples de dispositifs qualifiés de cohérents, pour lesquels le temps de cohérence est grand devant la période de l'onde émise. Pour un dispositif interférentiel donné, les interférences sont brouillées si la différence de marche des rayons que l'on recombine est de l'ordre de τ_c ou plus. On dit que la cohérence temporelle est perdue. Cette notion fut introduite par Augustin Fresnel (1788-1827).

bien préciser que l'on obtient des franges d'interférences dans la zone de recouvrement des faisceaux dû à la diffraction dans l'expérience des fentes d'Young.

on peut utiliser une fente en V au lieu d'une double fente pour illustrer la cohérence spatiale.

lorsque l'on considère une fente large pour illustrer la cohérence dans l'expérience des fentes d'Young, il faut dire que l'on suppose la fente source incohérente. En effet, celle-ci a une certaine cohérence spatiale ; deux points de la fente source peuvent provenir du même point de la lampe au sodium et donc être corrélés.

Sur la polarisation : Si on veut introduire la polarisation dans cette leçon c'est en conclusion en ouverture en disant que si les ondes sont polarisées alors il faut faire attention si les interférences sont possibles mais c'est compliqué parfois. Ainsi pour commencer en douceur et poser les choses proprement on suppose qu'on se place dans le modèle scalaire de la lumière (en énumérant toutes les hypothèses) et on fait les calculs dans ce cas. Tout cela permettra de clarifier le début de la leçon et de gagner du temps sur un point qui n'est pas essentiel. De plus, dans le modèle scalaire de la lumière l'hypothèse sur la polarisation est qu'on suppose que la lumière n'est pas polarisée, c'est-à-dire qu'elle fluctue de manière aléatoire dans le temps.

L'hypothèse qui consiste à ne pas tenir compte de la courbure des ondes lumineuses (c'est-à-dire considérer une onde plane à la sortie des fentes alors qu'il s'agit d'ondes sphériques), n'a pas été très bien exprimée par l'étudiant.

Localisation des interférences : Cette partie peut-être intéressante dans ce thème des interférences mais n'est pas indispensable sachant tout ce qui doit être abordé précédemment. Elle peut servir de partie "tampon" qu'on peut traiter si jamais on a du temps à la fin.

Agrégation de physique : fiche de correction de leçon 2018

Nom : *Laura Guislain*
 Correcteur.trice.s : *CHARDAC*

Note : *16/20*

Numéro et titre de la leçon (écrire LPxx, ou Dxx si docteur) :

LP33 interférence à 2 ondes en optique

Structure de la leçon (juge la forme)	😊😊	😊	😞	😞😞
Gestion du temps (durée visée 40 min)	X			
Qualité de l'introduction ? (Est-elle présente, est-elle de qualité)	X			
Le plan de la leçon apparaît-il clairement ? (la structure de la leçon apparaît-elle lors de la présentation)	X			
Qualité de la conclusion ? (Est-elle présente, est-elle de qualité)	X			
Gestion du tableau (écriture, orthographe, axes sur les graphiques, ...)	X			
Diversité des supports de communication	X			
Attitude (communication verbale, dynamisme, interaction avec les correcteur.trice.s ...)	X			

Attention aux abréviations

Cohérence de la leçon (juge le fond)	😊😊	😊	😞	😞😞
Est-elle dans le sujet ?	X			
Son contenu est-il suffisant ?	X			
Son articulation est-elle bonne ?	X			
Est-elle contextualisée ?		X		
Pertinence des choix didactiques ? (choix des exemples, des calculs à faire ou non, ...)			X	
Illustration expérimentale (présence et pertinence)			X	
Illustration informatique (présence et pertinence)	X			

Partie visuelle
TB

Faire des choix pour parler moins vite (et garder des questions)

Approche expérimentale (si format docteur)	😊😊	😊	😞	😞😞
Choix de l'expérience				
Durée de l'approche expérimentale				
Réalisation de la mesure en direct				
Analyse et traitement des résultats				
Discussion des sources d'erreur et des incertitudes				

Réponse aux questions	😊😊	😊	😞	😞😞
Sur les choix relatifs à la leçon	X			
Sur la culture connexe à la présentation		X		
Sur la partie expérimentale (LP docteur)				

Commentaires éventuels au dos :

TRÈS bonne utilisation de Python. Bonne culture des interférences.
 Leçon très complète et bien construite MAIS il faut faire des choix (notamment les OSG dans la partie III) pour parler plus lentement.