

LP33 – Interférences à deux ondes en optique

29 juin 2020

Pascal Wang & Laura Guislain

Niveau :L2

Commentaires du jury

Bibliographie

- ✦ *Dunod PC PC**, **Sanz**
- ✦ *Optique*, **Houard**
- ✦ *Optique physique*, **Taillet**

Prérequis

- Equations de Maxwell
- Notions de diffraction
- Optique géométrique, chemin optique

Table des matières

1	Condition d'interférences à deux ondes	3
1.1	Processus de détection	3
1.2	Superposition de deux ondes	3
1.3	Terme de déphasage	3
2	Les fentes de Young	3
2.1	Présentation et observations	3
2.2	Figure d'interférence	4
3	Sources réelle et cohérence temporelle.	5
3.1	Effet de deux longueurs d'ondes	5
3.2	Source réelle	5
3.3	Cohérence spatial	5
4	Commentaire sur l'outil informatique	6

Préparation

Ressources : il y a 3 scripts python !

Préparation : la plupart est sur la fiche

Passage : donner des interprétations avec les mains, discussions physiques à chaque expression mathématique

Questions : ODG des élargissements spectraux, interféromètre Labeyrie (cf. ma fiche), interprétation temps de cohérence τ_c en terme de largeur spectrale (Wiener-Khintchine), définition formelle de τ_c (fonction de corrélation), cohérence pour les ondes mécaniques, théorème de localisation, Un atome, quand il se désexcite, émet un photon de façon finie dans le temps. Ce photon est donc un paquet d'onde. Cela remet-il en question la formule $E = h\nu$? *Yes, when you measure the energy of the photon, you get a random outcome. However, there is a quantum-mechanical correlation between this energy and the energy of the atom, so that energy is exactly conserved (not just statistically, on an average basis). If the photon is emitted in some superposition of energies distributed according to some $f(e)$ (I'll assume discrete energy) then the joint system of the photon and the emitting atom should be described by the entangled state*

$$|\psi\rangle = \sum_e f(e)|e\rangle_{\text{photon}}|E - e\rangle_{\text{atom}}$$

where E is the initial energy of the atom (assuming it was in an energy eigenstate) and the kets in the sum are energy eigenstates. Then, when the photon's energy is measured both the atom and the photon collapse into a consistent energy conserving product state. It does not make sense for the photon to be in energy superposition while the atom is in energy eigenstate. Mais du coup les états propres de l'atomes n'ont pas des niveaux discrets mais peuvent s'étaler? Oui, quand ils sont couplés au fluctuations du vide, les "anciens" états propres de l'atome ne le sont plus, et donc de sont plus stationnaires, d'où l'émission spontanée.

Excited states have a finite lifetime. By the time-energy uncertainty principle, they do not have a definite energy, and, each time they decay, the energy they release is slightly different. The average energy of the outgoing photon has a peak at the theoretical energy of the state, but the distribution has a finite width called the natural linewidth. Fast-decaying states have a broad linewidth, while slow-decaying states have a narrow linewidth. The same linewidth effect also makes it difficult to specify the rest mass of unstable, fast-decaying particles in particle physics. The faster the particle decays (the shorter its lifetime), the less certain is its mass (the larger the particle's width).

Introduction

Définition : interférence On parle d'interférences lorsque l'intensité issue d'une superposition d'ondes est différente de la somme des intensités.

Interférences en ondes gravito-capillaires On observe des interférences dans de nombreux domaines de la physique : optique, acoustique, mécanique quantique. Pour donner une intuition au phénomène de superposition et d'interférence, on prend un exemple familier à tout enfant qui a joué dans une baignoire.

Ondes à la surface de l'eau

On montre la vidéo suivante à 5min <https://youtu.be/Iuv6hY6zsd0?t=300>. Une personne excite deux flotteurs à la surface de l'eau. On voit que l'amplitude ne se somme pas mais les intensités si, on voit notamment des zones qui ont une amplitude d'oscillation élevée. On y reviendra par la suite.

Interférences en optique 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 d'obtention d'interférences semble plus dure en optique.

1 Condition d'interférences à deux ondes

1.1 Processus de détection

On est sensible non pas au champ électrique, mais à la moyenne temporelle du vecteur de Poynting. Cette moyenne se réalise sur un temps qui dépend du capteur. On donne sur diaporama des ordres de grandeurs des différents capteurs (œil, caméra ccd, photodiode). On remarque que la période des ondes optique est beaucoup plus faible que ce temps de moyennage.

Bonus : éclairage, intensité L'éclairement énergétique est $\mathcal{E} = \langle |\vec{\Pi}| \rangle_T$ en W/m². L'éclairement photométrique est en lux (pondération) ou cd/sr/m². L'intensité d'une onde est en $I = n \langle E^2 \rangle$. L'intensité énergétique d'une *source lumineuse* est en W/sr. L'intensité photométrique est en candela.

1.2 Superposition de deux ondes

On considère deux ondes monochromatiques. On additionne les champs. Puis on écrit l'intensité à partir du vecteur de Poynting. On obtient la formule de Fresnel, en prenant en compte que $T_{\text{recepteur}} \gg T_{\text{onde}}$.

1.3 Terme de déphasage

Il faut maintenant interpréter le terme de déphasage. Il a deux origines :

- Une origine géométrique due au retard de propagation des deux signaux. $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta(M)$ avec δ la différence de marche.
- Une origine liée à l'émission du rayonnement. Les photons sont émis par désexcitation des atomes d'un état excité à un état désexcité. L'état excité a un temps de vie finie τ_c . Si deux trains d'ondes sont séparés de plus de τ_c , ils sont déphasés aléatoirement. Le terme de phase est nul. C'est la particularité de l'optique : les ondes qui interfèrent doivent provenir de la même source, ce qui explique qu'on n'observe pas d'interférence avec deux lampes torches.

2 Les fentes de Young

2.1 Présentation et observations

Expérience des bifentes de Young

🔴 **Etre pédagogique quand on différencie figure de diffraction et figure d'interférence.** On d'abord la figure de diffraction due à une seule fente : <https://youtu.be/9D8cPrEAGyc?t=42>. On voit une figure de diffraction due à la largeur finie de la fente. Maintenant, on montre l'effet de la bifente <https://youtu.be/9D8cPrEAGyc?t=108> et on projette un schéma des fentes de Young sur diapositive. On voit des franges à l'intérieur de la figure de diffrac-

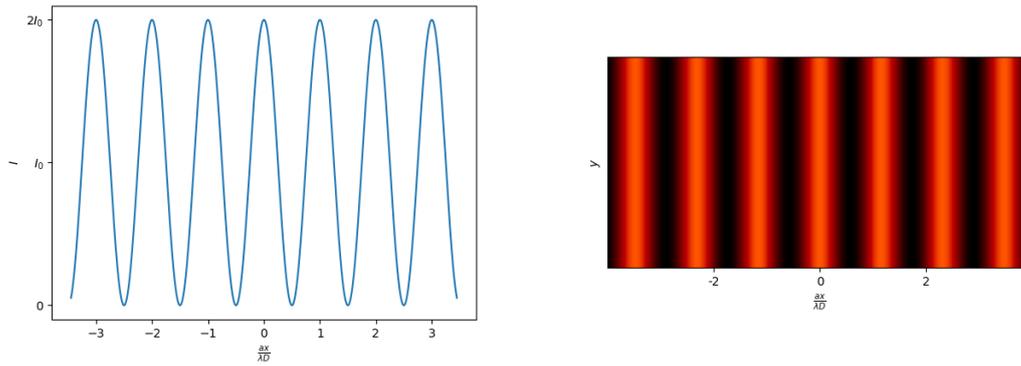


FIGURE 1 – Intensité et répartition de l'intensité sur l'écran.

tion. Sur la vidéo, on a l'influence de la longueur d'onde mais l'espacement des bifentes est fixé. Sur cette vidéo : <https://youtu.be/PVvYJFzx7zig?t=74> la l'espacement entre les bifentes double : les franges sont plus espacées.

On observe :

- Des franges verticales
- Un interfrange régulier
- Quand la distance fente-écran augmente, l'interfrange augmente.

On va maintenant essayer d'expliquer ces observations.

2.2 Figure d'interférence

Avec les mains 🎯 **Dessin pédagogique** Dessin pour expliquer aux élèves interférences destructives ? (2 ondes déphasées de π et addition des amplitudes)

A l'aide du schéma, on calcule la différence de marche entre les rayons passant par chacune des fentes. 🎯 Il faut contrôler l'ordre du DL. Les infiniment petits sont x/D , y/D et a/D . On trouve que le terme d'ordre le plus bas est d'ordre 2 en ax/D . EN regardant le calcul (cf. fiche ou Sanz PC), le terme suivant est d'ordre 4, donc le résultat $\delta \approx ax/D$ est vrai à l'ordre 3 ! Mais en fait, pour contrôler le terme suivant, on doit pas le comparer à l'ordre 2, mais à la longueur d'onde λ .

Résultat On trouve $\delta(M) = \frac{ax}{D}$. On obtient donc que l'intensité sur l'écran est :

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda d}\right) \right)$$

. On utilise python pour tracer l'intensité sur l'écran et la figure d'interférence (1)

Commentaires :

- Invariance selon y
- Franges brillantes $x_p = p \frac{D\lambda}{a}$
- Interfrange : $i = \frac{\lambda D}{a}$

Simulation ds variations instantannées optique

On revient sur le fait qu'on moyenne dans le temps pour avoir le profil d'intensité. Pour cela on montre l'animation <https://femto-physique.fr/simulations/young-experience.php>. On revient sur la vidéo de départ que l'on a moyennée sur diaporama. On retrouve la même figure que en optique !

3 Sources réelle et cohérence temporelle.

3.1 Effet de deux longueurs d’ondes

Les sources réelles ne sont pas monochromatiques, elles ont une certaine largeur spectrale. On va étudier l’influence de la largeur spectrale sur la figure d’interférence.

Effet de deux longueurs d’ondes. On somme les intensités pour deux longueurs d’ondes différentes. On remarque une perte de contraste. On trace le résultat avec python (2)

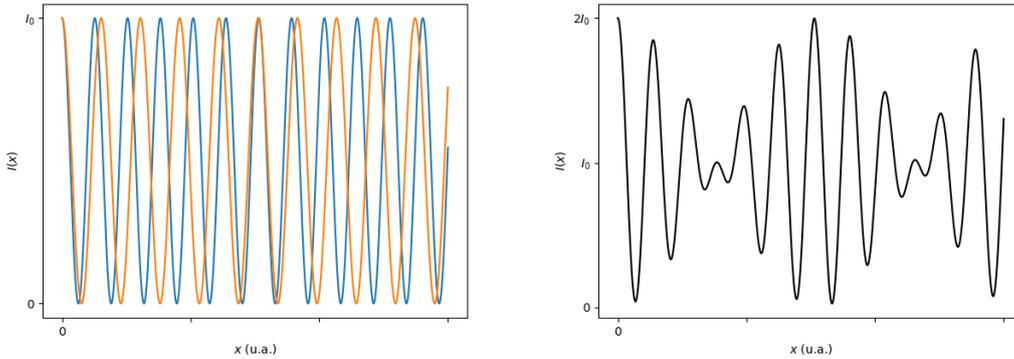


FIGURE 2 – Illustration de la perte de cohérence pour deux ondes monochromatiques.

3.2 Source réelle

Une source réelle à un spectre continu. On met en diaporama les sources d’élargissement spectrale.

Fentes de Young en Lumière blanche

<https://www.youtube.com/watch?v=r4PpKKHAquY#t=2m13s>

On modélise un spectre réel par une porte. On fait le calcul, et on trace le résultat sur python (3). On remarque un brouillage spatiale des franges. On l’explique avec une figure python qui illustre l’addition de plusieurs longueurs d’ondes(3 à droite). On retrouve le spectre cannelé de Newton, et le blanc d’ordre supérieur. On l’illustre avec une lumière blanche et les fentes de Young.

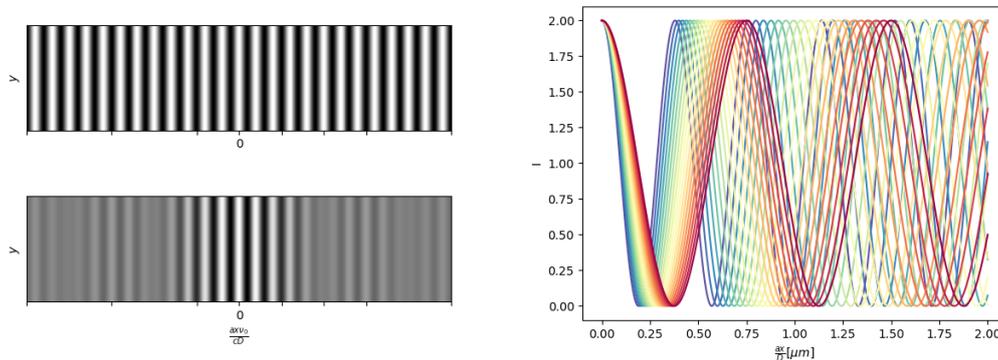


FIGURE 3 – Illustration de la perte de cohérence pour un spectre modélisé par une porte

3.3 Cohérence spatiale

Interprétation physique : les systèmes de franges de chaque point source sont décalés. Comme elles sont incohérentes, les franges se somment en intensité. Lorsqu’il y a des anticoincidence, cela se brouille.

Conclusion

- On a vu des critères d'obtention d'interférences en optique, dû à la séparation des échelles temporelles de capteur et de l'onde.
- On peut utiliser les phénomènes d'interférences pour des mesures de précision (indice optique)
- On a vu l'effet de la cohérence temporelle. Mais on a considéré ici une source ponctuelle. Toute source réelle à une certaine extension spatiale, il va y avoir une perte de cohérence spatiale qui va entraîner un brouillage totale des franges sur l'écran.

4 Commentaire sur l'outil informatique

Dans cette leçon, l'outil informatique a permis d'illustrer les différentes notions abordées.

Lors de l'introduction, on utilise une vidéo pour illustrer un phénomène : les interférences sur l'eau. Cela nous permet de faire un parallèle avec une expérience (avec les lampes) que l'on fait en direct. On revient sur cette vidéo à la fin de la partie 2, afin d'insister sur la généralité du phénomène d'interférence, et la différence entre les ondes à la surface de l'eau et l'optique. (On utilise aussi une simulation sur un site internet pour insister sur l'analogie).

Ensuite, on utilise plusieurs fois des scripts python pour pouvoir illustrer les résultats théoriques obtenus. On trace aussi l'intensité sur l'écran afin qu'une comparaison directe avec l'expérience soit effectuée. Ces illustrations sont très utile afin que l'élève puisse visualiser les résultats théoriques. La figure 3 de droite est un bon exemple de ce qu'apporte les codes python : on trace l'intensité en fonction de la différence de marche pour différentes longueurs d'ondes, avec une couleur (correspondant à la longueur d'onde) pour chaque signal. Même si ce dessin pourrait être dessiné à la main, la figure nous permet de mieux visualiser le spectre cannelé et la perte de contraste.

Enfin, on utilise aussi un diaporama comme support pour montrer les différents schéma (schéma des fentes de Young, ordres de grandeurs).

Questions

Vrac

- D'où provient le delta nu selon les différents types de source) , sur la longueur de cohérence (comment on la mesure expérimentalement...)
- lien entre longueur de cohérence et contraste, est-ce que le brouillage est immédiat en dépassant la longueur de cohérence ? fonctionnement du montage pour la mesure de la taille d'une étoile ?
- une application équivalente du casque anti bruit en optique pure ? optique adaptative ?
- **Corrélation d'intensité ?** on relève les intensités instantanées et on les injecte dans un circuit multiplieur puis on moyenne, ce qui permet de remonter à la séparation angulaire $\delta \vec{k}$ donc le diamètre. Ce ne sont pas vraiment des interférences car les amplitudes de sont jamais sommées. La méthode de corrélation d'intensité mesure $g^{(2)}(\Delta \vec{r}, \Delta t) \equiv \langle I(\vec{r}, t) I(\vec{r} + \Delta \vec{r}, t + \Delta t) \rangle / \langle I(\vec{r}, t) \rangle^2$. Ex : 1956 mesure du diamètre de l'étoile Sirius. Moins sensible aux fluctuations de $\delta \vec{k}$ donc à la turbulence atmosphérique.
- une application en interférométrie qui utilise la polarisation ? LCD, obturateur/isolateur par effet Faraday.
- Quand on utilise la vibration lumineuse s, a-t-on vraiment $I = \langle ss^* \rangle$? Ou proportionnalité ? Et avec le champ électrique directement ? Si on ne peut pas utiliser la notation complexe, comment fait-on ? Quel est le lien entre la longueur de cohérence et la largeur de raie ? Comment fait-on les calculs pour des interférences à 3 ondes ? On verrait quoi ? Définition de la différence de marche ? λ ou λ_0 dans les formules ? Quels sont les mécanismes d'émission de la lumière ? Qu'est-ce qu'une source cohérente ? Quelles sont les conditions qui doivent être respectées pour pouvoir faire le développement limité dans le calcul de la différence de marche pour les trous d'Young ? L'équation (S2M) - (S1M) = constante correspond-elle seulement à des hyperboloides de révolution ? Est-ce que ça pourrait être des ellipsoïdes de révolution ? Est-ce qu'on a vraiment besoin de la moyenne temporelle ? (pas compris cette question) Quel était le but initial de l'expérience de Young ?
-

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/m² ou cd sr/m²).
- 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 10¹⁵ Hz. **ODG:** Elargissement Doppler : 10⁹ Hz, élargissement collisionnel : 10⁸ Hz, élargissement intrinsèque : 10⁸ Hz. Pour plus de détails, voir la leçon et l'annexe.
- 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 $d\delta = \overrightarrow{S_1 S_2} \cdot (\vec{u}_1 - \vec{u}_2)$.
- 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-Zehnder 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) Elargissement 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 éclairement et intensité? Eclairement : 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 sinusoïdaux indépendants, dont la phase relative est aléatoire. Ainsi, on ne peut considérer que l'onde est associée à une seule et même sinusoïde que sur des temps inférieurs au 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.