

LP36

Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.

Correcteurs : Jacques Bayet¹ et Etienne Thibierge²

Leçon présentée le vendredi 12 octobre 2012

Cette correction reprend et complète les points discutés en classe. La définition des interférences ayant fait débat, j'y ai réfléchi de nouveau, j'ai regardé plusieurs livres, et j'essaie ici de la clarifier. Si vous avez encore des doutes, n'hésitez pas à discuter avec Arnaud Le Diffon en cours d'optique.

Comme tout ça a entraîné un peu de flottement de mon coté (sorry!), j'ajoute aussi dans ce corrigé des commentaires que j'ai oublié de dire en classe.

Rapports du jury

- ▷ (2010, 2009) Il faut réfléchir à l'opération de moyenne réalisée par le détecteur et il est bon de connaître quelques ordres de grandeurs à ce sujet.
- ▷ (2005) Dans cette leçon doivent apparaître les problèmes liés aux détecteurs (moyennes quadratiques) et aux sources (processus d'émission et nature des ondes émises), conduisant à la nécessité d'utiliser des montages interférométriques pour obtenir un terme de corrélation. Les phénomènes de localisation sont souvent mal formulés ou ignorés.
- ▷ (2003) Cette leçon doit être illustrée expérimentalement, le candidat devant être en mesure de montrer clairement les effets de cohérence spatiale ou temporelle de la source.
- ▷ (2002) On ne doit pas se polariser d'emblée sur les dispositifs à division d'amplitude qui constituent la réponse au problème de perte de contraste par élargissement de la source.
- ▷ (1999) La notion de cohérence n'est pas un point annexe mais un point central de cette leçon.
- ▷ (1998) Dans cette leçon difficile, la première partie relative à l'obtention des interférences à deux ondes doit être traitée soigneusement, même si elle paraît simple. La partie *notion de cohérence* doit faire l'objet d'une approche pragmatique, en évitant de présenter systématiquement un facteur de visibilité comme une transformée de Fourier. En particulier, il est important de faire comprendre pourquoi les résultats ne sont pas identiques avec une source quasi-ponctuelle et avec une source étendue.

Commentaires généraux

La leçon était dynamique et agréable à suivre, et tous les points attendus ont été traités. Le tableau était très bien présenté, et Helmy s'est efforcé d'insister sur les points importants, ce qui est appréciable.

Le rythme était soutenu, mais la leçon a duré près de 55 minutes. Le respect du chronomètre est impératif à l'oral, le jury ne vous laissera pas dépasser comme nous l'avons fait. Je pense qu'il ne faut pas escompter parler beaucoup plus vite qu'Helmy ne l'a fait le jour de l'oral, où vous n'aurez évidemment pas répété votre leçon.

Sur le plan de la physique, on peut regretter un certain manque de rigueur dans l'utilisation du vocabulaire consacré. Des mots tels que champ d'interférence, chemin optique, longueur de cohérence spatiale, doivent être définis et utilisés systématiquement dans cette leçon.

Enfin, je reste convaincu qu'il y a eu méprise entre les interférences et la superposition linéaire de deux ondes. Dans les différents livres que j'ai consultés (Cap Prépa, H-Prépa, Dunod comme livres de prépa, Taillet comme livre plus spécialisé) les interférences sont à **chaque fois** définies à partir de l'éclairement, qui est à **chaque fois** défini avec une moyenne temporelle. Comme je l'ai dit pendant la correction, vous êtes évidemment libres de présenter comme vous voulez, mais je pense que c'est assez audacieux d'aller à l'encontre des définitions données dans les livres de prépa sur une telle leçon.

Retour sur la leçon présentée

Introduction

Il faut annoncer dès l'introduction le niveau auquel la leçon est traitée : ici L2 ou spé convient parfaitement.

C'est une bonne idée de parler de la généralité du phénomène d'interférences dès l'introduction. Par contre, dire qu'il y a interférences quand deux personnes parlent en même temps est abusif : il faut deux haut-parleurs ou deux choristes qui arrivent à stabiliser leur voix pour les entendre pour de vrai !

Après réflexion, je ne suis plus si sûr que l'expérience avec la cuve d'eau soit vraiment pertinente : pour moi elle montre davantage la superposition linéaire de deux ondes que des interférences (pas de moyenne ni d'énergie ici). Des remarques sur les interférences à la surface de l'eau sont données dans le Taillet pp. 62-64.

I) Expérience des fentes d'Young

A) Expérience

C'est une très bonne idée de commencer l'expérience en montrant la diffraction par une fente, pour insister sur le changement qu'apporte la deuxième fente. Penser à projeter un schéma de l'expérience pendant sa réalisation.

1. jq.bayet@free.fr

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr, <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

Attention à la sécurité laser : il y avait lors de la leçon des réflexions sur la porte de la salle.

Les figures de diffraction à une puis deux fentes n'avaient pas la même largeur caractéristique. Ceci est dû au fait que la fente simple n'avait pas exactement la même largeur que les bifentes. Nul besoin de procéder à des vérifications poussées en leçon, mais soyez-en conscients pour répondre aux questions.

Il est important ici de définir précisément le champ d'interférences et la localisation. Des interférences sont dites non-localisées si elles sont observables en tout point du champ d'interférence. La distinction faite par Helmy domaine de l'espace vs. surface me semble un peu douteuse, ne serait-ce que d'un point de vue expérimental.

B) Modèle scalaire

Il peut être intéressant (mais pas incontournable) de relier la vibration lumineuse au champ électrique, ce qui suppose d'ajouter les ondes électromagnétiques en pré-requis. Cela permet à la fois de traiter de la cohérence de polarisation dans la leçon, et d'introduire l'éclairement de façon plus naturelle en lien avec le vecteur de Poynting (cf. par exemple Cap Prépa qui suit cette approche). Si vous choisissez de ne pas le faire en leçon, il faut vous attendre à des questions à ce sujet.

La définition de l'éclairement donnée dans la leçon est fautive. Il est à définir avec une valeur moyenne temporelle sur le temps de réponse du détecteur. Par contre, toute la discussion qui a suivi pour savoir ce que l'œil (ou le photodétecteur) voit réellement est essentielle dans la leçon. Ne pas hésiter à donner beaucoup d'ordres de grandeurs (temps de réponse de l'œil, d'une photodiode, fréquences optiques ...).

Attention à la distinction entre éclairement et intensité, qui sont deux grandeurs photométriques différentes (cf. Sextant). L'abus de langage est très souvent commis, et on ne vous en tiendra sans doute pas rigueur, mais il vaut mieux privilégier le vocabulaire exact.

Il est important de bien commenter la courbe représentant l'éclairement en fonction du déphasage. Il faut insister sur l'aspect contre-intuitif : en certains points l'énergie est supérieure à celle produite par les deux ondes séparément. Dire aussi que ce n'est pas contradictoire avec la conservation de l'énergie, qui est simplement redistribuée spatialement.

C) Retour sur l'expérience

L'étude théorique des fentes d'Young a été très bien menée, et les développements limités faits précisément et soigneusement.

On peut tout à fait calculer le déphasage avec les temps de vol, mais il est nécessaire d'introduire le vocabulaire chemin optique et différence de marche. Attention à ne pas oublier l'indice optique (qu'on prendra aussitôt égal à 1) dans la définition du chemin optique.

Il faut définir plus précisément l'interfrange : c'est la période spatiale de l'éclairement sur l'écran.

L'application numérique présentée pour la valeur de i était grossièrement fautive. On vous pardonnera sans pro-

blème de vous être trompés avec votre calculette, mais pas de ne pas vous en rendre compte.

Enfin je crois qu'il faut définir la notion de contraste à un moment de la leçon, ici ou dans la partie suivante.

II) Notion de cohérence

C'est une bonne chose d'introduire cette partie par l'observation quotidienne. Ceci étant attention à ne pas être trop formel : on peut observer des interférences optiques dans la vie de tous les jours, par exemple avec un film fin d'hydrocarbure à la surface d'une flaque d'eau.

A) Largeur spectrale de la source

On peut choisir de commencer par un modèle à deux pulsations, mais attention à ne pas s'arrêter là. En effet, un tel modèle fait apparaître des battements mais pas vraiment de la cohérence : on peut avoir des interférences parfaitement contrastées avec une différence de marche arbitrairement grande.

La notation d'Helmy $s(\omega)$ est maladroite car elle laisse penser qu'on s'intéresse à un spectre de Fourier. Notez plutôt la pulsation en indice ou en exposant, en réservant à t le statut de variable entre parenthèses : $s_\omega(t)$.

Il faut profiter de l'énoncé du critère de cohérence pour revenir sur le fait que deux sources lumineuses de laboratoire distinctes ne peuvent donner lieu à des interférences. Cela permet ainsi d'interpréter l'expérience introductive avec les lampes de poche.

L'analyse qualitative du brouillage a été bien menée, et les transparents vert et rouge bien appréciés, modulo les imperfections de dessin sans gravité. Cette discussion mériterait presque de commencer cette partie.

La longueur de cohérence temporelle a été correctement définie. Penser à indiquer que c'est une longueur caractéristique (on ne passe pas abruptement d'un contraste parfait à un contraste nul), et il faut absolument en donner des ordres de grandeur raisonnables pour différentes sources.

L'illustration expérimentale a été peu convaincante : l'image de la fente sur l'écran n'était pas nette, et la fente source mal choisie. Illustrer ainsi la cohérence temporelle est quelque chose de délicat, qui nécessite un très bon noir. Je pense qu'il vaut mieux privilégier l'illustration expérimentale de la cohérence spatiale, beaucoup plus simple à réaliser. Helmy a également mentionné l'achat de fentes plus fines, mais je ne suis pas sûr que vous soyez vraiment gagnants car des fentes plus fines conduiraient à une figure d'interférences encore moins lumineuse.

Les origines de l'élargissement spectral ont été bien présentées, sans erreur et avec des ordres de grandeur pertinents. J'ai beaucoup apprécié ce passage, mais je pense que c'est la partie la moins importante de la leçon. S'il faut enlever quelque chose pour gagner du temps, je pense que c'est ça, tout en ayant la discussion en tête pour les questions.

Attention aussi à ne pas avoir une vision semi-classique trop naïve : les trains d'ondes restent un **modèle** permettant d'expliquer certaines observations avec l'avantage d'être particulièrement simple. Il ne faut pas espérer

le relier intégralement aux processus quantiques d'émission. Par exemple Taillet pp. 28-30 interprète les trains d'ondes d'une façon assez différente, mais pas moins pertinente.

B) Influence de la taille de la source

Cette partie a été abordée au bout de 42 minutes, ce qui est trop tardif. Le problème a été qualitativement bien posé, mais le temps a manqué pour les calculs.

Je ne suis pas certain que le calcul du nombre de trains d'ondes à partir de la puissance soit vraiment valable. Cette remarque rejoint celle de la naïveté de la vision semi-classique. En revanche l'argument du grand nombre de trains d'onde et du moyennage en nombre est évidemment le bon.

L'explication qualitative du décalage des franges est attendue et a été bien menée.

Penser à bien énoncer les hypothèses supplémentaires lors du calcul de la longueur de cohérence spatiale, qu'il faut appeler par son nom. Penser à bien commenter ses dépendances : L_s dépend de la source via λ , de l'interféromètre via a et de leur position relative via d . Elle n'est donc pas une caractéristique intrinsèque de la source (contrairement à la longueur de cohérence temporelle L_t), mais du système optique source + interféromètre. On peut faire remarquer aussi qu'elle n'a pas de signification en terme de différence de marche, contrairement à L_t .

Conclusion

La conclusion doit reprendre les grands messages de la leçon, ce qui a été correctement fait par Helmy. L'ouverture à la division d'amplitude comme solution au problème de la cohérence spatiale est tout à fait pertinente.

Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon, puis *ensuite* à tester vos connaissances plus largement. Voici des pistes de questions d'ouverture

envisageables, qu'on n'a pas toutes posées pendant la correction.

S'il n'a pas été abordé dans la leçon, le lien avec l'électromagnétisme fera sûrement l'objet de questions. Pour observer des interférences parfaitement contrastées, il faut que les polarisations des deux ondes soient identiques. Pour des polarisations différentes, le contraste diminue jusqu'à s'annuler si les polarisations sont orthogonales. L'expérience de Fresnel-Arago permet de mettre ces phénomènes en évidence.

Le profil spectral des raies peut aussi faire l'objet de questions. Une lampe basse pression présente des raies gaussiennes, dominées par l'élargissement Doppler. Dans une lampe haute pression, le profil est lorentzien, gouverné par les collisions entre atomes. Dans les cas intermédiaires le profil est appelé profil de Voigt. C'est un produit de convolution entre une gaussienne et une lorentzienne (cf. Wikipédia).

Il est possible aussi que vous soyez interrogés sur les théorèmes de Wiener-Kinchine et de Zernike-van Cittert, qui font appel à la transformation de Fourier. Je pense qu'il faut au moins en avoir une idée qualitative pour les questions, mais c'est inutile de les présenter en leçon.

Enfin, si elle n'a pas été abordée dans la leçon, la distinction entre division du front d'onde et d'amplitude peut faire l'objet de questions.

Conclusion

La définition des interférences donnée par Helmy me semble risquée, et je suis incapable de dire comment la leçon aurait été perçue. Cependant il y a indéniablement beaucoup de points positifs dans la deuxième partie. L'approche qualitative de la cohérence, sans faire appel à la transformée de Fourier, a notamment été très appréciée.

Si vous avez d'autres questions, je reste à votre disposition par mail, en TP ou dans de futures séances de correction.