

LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

📖 *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

➤ prérequis

Expériences

🔥 Biréfringence du quartz

Table des matières

1	Interférences avec une source étendue, localisation	3
1.1	Condition de non-brouillage	3
1.2	Points de non-brouillage, localisation	4
1.3	Théorème de localisation	4
2	Interféromètre de Michelson	5
2.1	Principe	5
2.2	Lame d'air	6
2.3	Coin d'air	8
2.4	Applications (bonus)	9
3	Interféromètre de Fabry-Pérot	9
3.1	Description	10
3.2	Finesse et applications	10
3.3	Applications	11

Jury

Le candidat doit réfléchir aux conséquences du mode d'éclairage de l'interféromètre (source étendue, faisceau parallèle ou non...). La distinction entre divisions du front d'onde et d'amplitude doit être précise. Le jury rappelle que l'utilisation d'une lame semi-réfléchissante ne conduit pas nécessairement à une division d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.

Préparation

Manip : Noter le contact optique en préparation, régler le Michelson en configuration lampe à sodium dans une coïncidence, avec des anneaux bien visibles.

Ressources : localisation de E. Thibierge, http://www.etienne-thibierge.fr/agreg/cplt_localisation.pdf Géogebra Michelson en lame d'air <https://www.geogebra.org/m/frKnrk2e>

Passage : marteler "Les interférences par division d'amplitude permettent de s'affranchir de la cohérence spatiale, au prix de la localisation des interférences."

Question : 🍷 division du front d'onde avec Michelson, avec lame 1/2 réfléchissante ? oui avec une source ponctuelle, cf. plus bas dans le texte. Sagnac, Mach-Zender, précision exigée sur l'épaisseur des lames et leur parallélisme. (cf. Gérard Fortunato, publié dans le BUP 795 : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=6130), longueur de cohérence, est-ce ce qu'on mesure sur l'écran ? culture : https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson_interferometer, citer 5 applications du Michelson,

Laura

<https://www.geogebra.org/m/frKnrk2e> Géogebra Michelson en lame d'air

Message

: Limites de la division du front d'onde : manip de fentes de Young avec perte de cohérence lorsqu'on élargit la fente source.

Introduction

Prérequis : cohérence spatiale, temporelle Les interférences à deux ondes obtenues dans le cas de la division d'amplitude (trous d'Young, fentes d'Young, miroirs de Fresnel), abordées dans une précédente leçon, ont permis d'aborder la notion de cohérence spatiale et temporelle. Les interférences sont délocalisées (visibles dans tout le champ d'interférence) dans le cas d'une source ponctuelle mais se brouillent lorsque l'on passe à une source étendue.

Cohérence spatiales et fentes de Young

On montre : <https://youtu.be/IqF2QWt4ySk?t=3> : fentes de Young avec perte de cohérence lorsqu'on élargit la fente source. Dans ce dispositif à division du front d'onde, élargir la source perpendiculairement aux fentes brouille la figure d'interférences

Définition : division d'amplitude/de front d'onde On rappelle que la division du front d'onde est une division géométrique alors que la division d'amplitude est une division énergétique. En division du front d'onde, la surface d'onde est modifiée. En division d'amplitude, où le front d'onde reste constant et où l'intensité est modifiée.

Objectifs Dans cette leçon, on va voir les interférences par division d'amplitude qui permet de s'affranchir de la cohérence spatiale, au prix de la localisation des interférences. On va aussi voir des réalisations pratiques comme l'interféromètre de Michelson (et l'interféromètre de Fabry-Pérot). Applications en métrologie.

1 Interférences avec une source étendue, localisation

Problème : on veut utiliser une source étendue pour augmenter le contraste mais on a vu en introduction que le contraste résultant peut diminuer. Comment savoir dans quel cas et comment on peut élargir la source ?

Objectif Dans cette première partie, nous allons mettre en évidence les conditions permettant d'observer des franges d'interférences avec une source étendue, et montrer que celles-ci sont en fait réalisées par la division d'amplitude

1.1 Condition de non-brouillage

Source étendue On considère une source étendue classique, considérée comme un ensemble de sources S incohérentes.

Cadre : lumière monochromatique Il serait utile de préciser que le calcul est fait en lumière monochromatique : on insiste de la sorte sur le fait que la cohérence spatiale est un problème distinct de la cohérence temporelle. Plus pragmatiquement, il est alors plus simple de savoir à quoi on doit comparer la variation de différence de marche entre points de la source pour ne pas avoir brouillage : la longueur d'onde de la source monochromatique.

Brouillage Dans le cas des fentes de Young, il a été vu que la différence de marche entre un point source S et un point de la figure M : $\delta(S, M)$ dépend du point source de S . Donc les figures d'interférences issues des sources élémentaires S ne sont pas les mêmes. Comme les sources sont incohérentes, lorsqu'on ajoute les figures d'interférence en intensité, on peut obtenir un brouillage. [On peut faire un schéma coincidence/anticoïncidence](#)

Condition de non-brouillage Ainsi, on comprend qu'une condition de non-brouillage en un point M serait donc que $\delta(S, M)$ dépend "peu" de S (on va préciser "peu"). En ces points M , toutes les sources élémentaires incohérentes donnent lieu à des interférences du même type qui ont donc un contraste parfait. Donc, malgré l'élargissement de la source, la figure de diffraction resterait contrastée. Il nous faut donc chercher où sont ces points.

1.2 Points de non-brouillage, localisation

Cadre : interféromètre à deux voies stigmatiques On se place dans le cadre d'un interféromètre à 2 voies d'un interféromètre, que l'on suppose stigmatique pour chacune d'entre elles. Donc un point M du champ d'interférence est le conjugué de deux points A1 et A2 tels que tout rayon passant par A1 suivra la voie 1 de l'interféromètre avant d'arriver en M. On note L1 le chemin optique (A1, M) qui ne dépend donc pas du rayon choisi donc pas de la position de S (et de même pour 2). [On fait un schéma.](#)

Critère de non-brouillage Considérons alors deux points de la source étendue S et S' On calcule alors $\delta(S, M)$ et $\delta(S', M)$ (cf. ma fiche et Brébec p.79)

$$\delta(S, M) = \delta(S', M) \iff \vec{S'S'} \cdot (\vec{u}_1 - \vec{u}_2) = 0 \quad (1)$$

au premier ordre en SS'/SM .

Localisation A priori, tous les points M de l'espace ne permettent pas de vérifier ce critère. Les interférences sont alors localisées au voisinage des points M qui le permettent. Une figure d'interférences est dite **localisée** lorsqu'elle n'est observable que dans une fraction du champ d'interférence, qui correspond aux points M vérifiant ce critère. La localisation n'apparaît qu'avec une **source étendue** : il s'agit d'une question de cohérence spatiale.

↓ *On va reformuler ce critère.*

1.3 Théorème de localisation

Le théorème de localisation indique, pour un interféromètre donné, si les interférences peuvent être localisées et une méthode permettant de déterminer la zone de localisation. ⚠ **Attention à l'interprétation de ce théorème, qui n'est pas forcément bien nommé : il donne un critère de non-brouillage de la figure d'interférences lorsque la source est étendue. En revanche, il ne dit pas que les interférences sont nécessairement localisées (cf. fentes d'Young) : pour savoir cela, il faut regarder où le critère de non-brouillage s'applique. Si c'est seulement dans une zone réduite du champ d'interférences, alors les interférences sont localisées dans cette zone.**

D'après le critère précédent, il y a deux possibilités pour que le contraste des interférences soit préservé quand la source est élargie :

- l'élargissement se fait orthogonalement aux rayons qui interfèrent. C'est une condition sur la source, donc indépendante du point M. C'est ce qui se passe lorsqu'on élargit la source parallèlement aux fentes de Young.
- ou bien, les rayons qui interfèrent vérifient $\vec{u}_1 = \vec{u}_2$, ce qui signifie qu'ils proviennent du même rayon incident. Ce n'est pas une condition contraignante sur la source mais sur l'interféromètre. En effet, il n'est pas possible de vérifier le critère $\vec{u}_1 = \vec{u}_2$ avec un interféromètre à division de front d'onde. Seul un interféromètre à division d'amplitude le permet.

On peut le reformuler sous la forme :

1. Seuls les interféromètres à division d'amplitude peuvent donner lieu à l'observation d'interférences contrastées produites par une source arbitrairement large.
2. Alors, ces interférences sont localisées au voisinage des points où les rayons qui interfèrent sont issus du même rayon entrant dans l'interféromètre.
3. Ces résultats ne sont valables qu'à l'ordre 1.

Conclusion

Les interférences par division d'amplitude permettent de s'affranchir de la cohérence spatiale, au prix de la localisation des interférences.

⚠ L'implication division d'amplitude $\Rightarrow$ localisation est fausse. Celle qui est juste est division d'amplitude + source étendue $\Rightarrow$ localisation. Pour l'interféromètre de Michelson, être conscient notamment que la localisation est plus stricte en coin d'air (vraie à l'ordre 1 seulement) qu'en lame d'air (vraie à tous les ordres).

2 Interféromètre de Michelson

2.1 Principe

Bonus : intérêt historique expérience de Michelson-Morley.

Présentation L'interféromètre de Michelson est un dispositif optique qui produit des interférences par division d'amplitude. Il est constitué essentiellement de deux miroirs et d'une lame semi-réfléchissante. [On montre un schéma projeté et sur le dispositif réel](#) Ce dispositif est délicat car les miroirs ont une très bonne planéité. **ODG:** planéité à 10 nm près. *Si l'on veut que le contraste ne soit pas trop affecté par l'amplitude du défaut ε (par exemple $V = 0,9$) il faut que ε soit de l'ordre de $\frac{\lambda}{10}$, cf BUP 795.* Ils sont donc très sensibles à toute déformation, en particulier, une QI utilisée sans filtre anti calorique peut les détériorer de manière irréparable. On peut orienter les miroirs avec des vis grossières et plus fines. On peut translater les miroirs avec des vis plus grossières et des vis de précision : c'est le chariotage. **ODG:** on peut contrôler les déplacements à 10 μm près.

Bonus : influence du défaut de planéité Si l'épaisseur e fluctue avec une distribution de probabilité $f(e)$, l'intensité au centre s'exprime

$$I = N \cdot 2I_0 \int \left(1 + \cos 2\pi \frac{2e}{\lambda} \right) f(e) de$$

Si l'on prend pour $f(e)$ une distribution uniforme, égale à $\frac{1}{\varepsilon}$ pour $e_0 - \frac{\varepsilon}{2} < e < e_0 + \frac{\varepsilon}{2}$ et nulle ailleurs, on obtient

$$1 = N \cdot 2I_0 \left(1 + V \cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2e_u \right)$$

avec

$$V = \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon}{\frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon}$$

Bonus : lame semi-réfléchissante pour les atomes ? An atomic beam which is incident on a laser beam can be reflected or transmitted depending on the choice of atomic and laser beam parameters. Une autre approche est d'utiliser des structures "micro-fabricated".

Deux voies de l'interféromètre L'interféromètre de Michelson offre deux voies possibles à la lumière incidente (i) voie 1 : la lumière incidente est d'abord transmise par le dispositif séparateur, réfléchi ensuite par le miroir (M_1), et enfin réfléchi par le dispositif séparateur avant d'émerger de l'interféromètre (ii) Voie 2 : la lumière incidente est d'abord réfléchi par le dispositif séparateur, réfléchi ensuite par le miroir (M_2), et enfin transmise par le dispositif séparateur avant d'émerger de l'interféromètre.

Compensatrice En pratique, la lame séparatrice est accompagnée d'une lame dite compensatrice. Sans compensatrice, les rayons passent 3 fois par le verre pour la voie 1 contre 1 fois pour la voie 2. Donc, si l'indice n est indépendant de la longueur d'onde, il y a une différence de marche constante. On pourrait l'ignorer en redéfinissant l'origine du chariotage. Mais cette différence de marche dépend de la longueur d'onde λ à travers $n(\lambda)$, car le verre est dispersif donc on ne peut pas s'en affranchir en chariotant. On utilise donc une compensatrice. En pratique, elles sont formées dans le même bloc de matière première pour qu'elles aient bien le même $n(\lambda)$. Avec compensatrice, il y a 4 traversées pour chaque voie. *Dans certains dispositifs, compensatrice et séparatrice ne sont pas accolées, dans ce cas il y a 3 traversées pour chaque voie* [On montre un schéma avec/sans compensatrice.](#) La compensatrice permet enfin d'égaliser l'absorption par le verre entre les deux voies, phénomène qui va toujours de pair avec la dispersion. Sans compensatrice, on obtient, en lumière blanche, du blanc d'ordre supérieur, et en lumière monochromatique, des franges en forme de coniques : il est donc quasiment impossible d'exploiter un tel interféromètre et la mise en place d'une lame compensatrice est indispensable. Dans toute la suite du cours, on considérera que l'ensemble des lames séparatrice et compensatrice est équivalent à une lame séparatrice d'épaisseur idéalement nulle, n'introduisant aucune différence de marche résiduelle. **ODG:** en pratique, les fabricants garantissent l'épaisseur de la séparatrice/compensatrice à des variations de 1 μm près, ce qui suffit à conserver les interférences à 1/10 ordre p près.

Bonus : tolérance sur le parallélisme des lames, de la séparatrice/compensatrice Pour étudier l'effet du non-parallélisme des faces, on peut considérer une onde plane incidente dans l'interféromètre réglé de façon que M' et M_a soient parallèles. Les deux lames se comportent comme deux prismes de très petit angle, qui vont provoquer une déviation de cette onde. À la sortie, on aura donc deux ondes planes faisant entre elles un petit angle (fonction de la longueur d'onde). Si cet angle est faible, on peut l'annuler en jouant sur la rotation des miroirs lorsque l'on règle. Le parallélisme des lames utilisées est caractérisé par l'angle de leurs deux faces qui est en général inférieur à 30''. Dans ces conditions, le chromatisme introduit par ces lames prismatiques est négligeable. Pour le parallélisme de la séparatrice et de la compensatrice, il faut une précision au moins égale à 3,5'. Cette opération est facile à réaliser en

observant les images réfléchies par les faces de ces deux lames (qui devraient se superposer) lorsque l'interféromètre est éclairé par un collimateur constituée d'un objectif+diaphragme en son foyer.

Bonus : questions techniques Est-ce que le parallélisme des faces de la séparatrice est important ? De la compensatrice ? Et leur planéité ? Quel écart à la planéité de la lame d'air peut-on détecter, c'est-à-dire quel est l'angle de coin d'air résultant alors qu'on a l'impression d'être en lame d'air ? Comment le mesurer ? Je veux mesurer un défaut de planéité de lame d'air de 200 nm, c'est possible ? Et un défaut de planéité de compensatrice d'autant ?

Bonus : répartition de l'intensité On montre que 50% de l'intensité incidente est transmise en sortie et 50% revient en entrée.

↓ Pour simplifier face aux degrés de liberté (position, angles), on introduit des configurations particulières plus simples.

2.2 lame d'air

Définition : lame d'air Un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air possède ses deux miroirs parallèles.

Sources équivalentes On montre les schémas du Dunod. ⚠ La justification importante est le stigmatisme de la séparatrice. Pour la voie 1 : un rayon lumineux issu de S est transmis par la lame séparatrice (Sp), réfléchi par le miroir (M_1) et réfléchi par la lame séparatrice.

$$S \xrightarrow{(M_1)} S'_1 \xrightarrow{(Sp)} S_1$$

Voie 2 : un rayon lumineux issu de S est réfléchi par la lame séparatrice (Sp), réfléchi par le miroir (M_2) et transmis par la lame séparatrice.

$$S \xrightarrow{(Sp)} S'_2 \xrightarrow{(M_2)} S_2$$

Épaisseur de la lame d'air On appelle épaisseur de la lame d'air la distance entre (M_2) et (M'_1). On la note e . On peut alors montrer que la distance entre S_1 et S_2 est : $S_1 S_2 = 2e$.

La dénomination lame d'air provient du fait que tout se passe comme si une lame d'air, d'épaisseur e , était emprisonnée entre les miroirs (M_2) et (M'_1) qui sont parallèles.

Localisation Lorsqu'on utilise une source étendue, pour trouver le lieu de localisation des interférences et utiliser le théorème de localisation, il faut considérer un rayon incident dans l'interféromètre et chercher où se coupent les deux rayons émergents, issus de ce rayon incident, et passés par chacun des bras du Michelson. On projette le schéma. Considérons un rayon arrivant sur la lame d'air avec un angle d'incidence i . Dans le cas représenté, les deux rayons émergents sont parallèles et se "coupent" donc à l'infini. Quelle que soit l'incidence i , "l'intersection" a toujours lieu à l'infini. On en conclut :

Un interféromètre de Michelson réglé en configuration lame d'air et éclairé par une source étendue donne lieu à des interférences localisées à l'infini.

Ainsi, chaque source incohérente produit la même figure d'interférence qui se superpose : en les observant dans le plan focal d'une lentille, la figure est particulièrement lumineuse. ⚠ Avec une source ponctuelle, la figure d'interférence n'est pas localisée, c'est celle de deux points fictifs, comme celle des trous d'Young. Le dispositif fonctionne en division d'amplitude et division du front d'onde : deux rayons émis dans des directions différentes peuvent interférer.

Lieu de localisation

On a un Michelson réglé en lame d'air que l'on éclairé avec une lampe à sodium et un condenseur (se placer dans une coïncidence). On ne met rien en sortie de l'interféromètre, on peut balader l'écran, le contraste est mauvais, mais de meilleur en meilleur lorsqu'on éloigne l'écran. On place alors une lentille de grande focale (1m par exemple) en sortie du Michelson et l'écran dans son plan focal. On retrouve alors un bien meilleur contraste.

Différence de marche. Si on calcule la différence de marche entre les deux rayons, (on peut ne pas le faire, on a déjà développé un calcul dans la leçon), on obtient $\delta = 2ne \cos(i)$. On a alors une intensité, pour un rayonnement monochromatique, donnée par la formule de Fresnel. On donne l'expression

$$\mathcal{E}(M) = \frac{\mathcal{E}_0}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi ne \cos i}{\lambda_0} \right) \right) \quad (2)$$

où $\mathcal{E}_0$ est l'intensité rayonnée par la source. Si on ne fait pas le bilan d'intensité, on peut enlever le facteur $1/2$.

Figure d'interférences : anneaux d'égale inclinaison. Le dispositif a une symétrie de révolution : on voit des anneaux. En effet, la différence de marche ne dépend que de θ .

La figure d'interférence en lame d'air est constituée d'anneaux d'égale inclinaison.

Bonus : rayon des anneaux successifs ➤ Sanz.

Eclairage Pour observer l'ensemble de la figure d'interférence, ou encore pour observer plusieurs anneaux, il faut que de nombreuses inclinaisons soient mises en jeu. On veillera donc à éclairer l'interféromètre avec un faisceau bien divergent.

Effet du chariotage Si on diminue e , pour garder l'ordre p constant donc δ constant, il faut augmenter $\cos \theta$ donc diminuer θ : les anneaux ont l'air de rentrer.

Effet du chariotage

On sort le code Python de Clément ou cette belle vidéo : <https://youtu.be/0hONqoTviNs?t=317>

Contact optique On définit le contact optique comme étant la configuration de l'interféromètre où l'épaisseur de la lame d'air $e = 0$. Au contact optique, l'écran est uniformément éclairé ; c'est la teinte plate. Si l'on veut, en pratique, se rapprocher du contact optique, on doit jouer sur la vis (V3) de sorte à faire rentrer les anneaux vers le centre pour en voir de moins.

Doublet du sodium

On montre la super vidéo : <https://youtu.be/0hONqoTviNs?t=317> On voit les anneaux défilier, ce qui est dû à λ_{moy} qui vaut 589.3 nm.

Anticoïncidence Montrer une anti-coïncidence. Dans le cas du doublet du sodium, on doit sommer deux figures d'interférences aux deux longueurs d'onde. SUPER animation pédagogique <https://youtu.be/7MBuQeFYRyw?t=192>

Spectroscopie On peut faire une analyse quantitative. Le calcul est sur ma fiche, ainsi que la formule du [contraste local](#). On a un contraste local. Avec la formule, on utilise les brouillages pour remonter à une information sur la source : en supposant λ_{moy} connu, avec la pente, on remonte à $\Delta\lambda$. Ce n'est pas important de remonter à l'écart expérimentalement, mais dire qu'il vaut 0.6nm. On peut donner la méthode : compter les franges qui défilent et utiliser la formule avec la pente. 📺 En fait, au facteur 2 près, chaque chariotage e entre deux anticoïncidences correspond à 1 longueur de cohérence $l_c = 2e$. Ici, on a juste mesuré une longueur de cohérence via le chariotage.

Bonus : pourquoi pas de contraste rigoureusement nul ? Comme les amplitudes des pics correspondant au doublet jaune du sodium ne sont pas égales, le battement n'est pas parfait, le contraste ne s'annule pas.

Bonus : largeur d'une raie Est-ce que l'on peut retrouver la largeur d'un pic du doublet jaune du sodium avec le Michelson ? Il faudrait estimer l'ordre de grandeur, mais cela demanderait de charioter longtemps.

Une autre application de cette configuration est la métrologie, en reliant un des miroir à un bras d'une machine outil, on peut contrôler son déplacement à une fraction de longueur d'onde près en comptant le défilement des anneaux ! On a utilisé une des deux configurations de l'interféromètre de Michelson, on va voir l'autre. Si on est short en temps, vaut mieux passer au Fabry-Pérot pour donner le S à InterféromètreS



2.3 Coin d'air

Configuration coin d'air On dit que l'interféromètre est configuré en coin d'air lorsque les deux miroirs (M_1) et (M_2) ne sont pas perpendiculaires.

Localisation en coin d'air

L'expérience montre que dans la configuration du coin d'air, éclairé par une source spatialement étendue, les interférences ne sont quasiment pas visibles lorsqu'on place un écran à la sortie de l'interféromètre. On constate que la visibilité de la figure d'interférences est maximale quand on les observe au voisinage des miroirs.

Configuration équivalente Comme avant, on replie un des miroirs. On montre le schéma Cela justifie l'appellation de coin d'air.

Localisation On considère un rayon incident. On montre le schéma. En éclairage parallèle, il s'avère que les rayons se coupent toujours dans le plan (Π), qui passe par l'arête du coin d'air et fait l'angle i avec (M'_2). Sur le dessin, les angles ont été exagérés. Pour construire le plan Π , il faudrait répéter la construction pour plusieurs angles d'incidence. A un angle d'incidence fixé, on repère les plans de l'espace d'éclairement maximal et on repère ensuite le lieu où tous ces plans se coupent : c'est là que les interférences sont les mieux contrastées, et donc là qu'elles sont localisées. Sur la figure, ce plan est très différent du fameux "plan des miroirs" : cela est dû au fait que les angles sont très exagérés pour que la figure soit lisible. En pratique, α et i sont presque nuls et les plans des deux miroirs et le plan Π sont quasiment confondus.

Un interféromètre de Michelson réglé en configuration coin d'air et éclairé par une source étendue donne lieu à des interférences localisées sur le plan des miroirs.

Pour observer les interférences, il faut projeter le plan des miroirs avec une lentille ou accommoder dessus avec l'oeil.

Eclairage parallèle Si la source présente beaucoup d'angles d'incidence, les systèmes de franges d'interférences formés par chaque point de la source ne coïncident pas exactement et la visibilité des franges est réduite si on élargit trop la source. En pratique, on choisit d'utiliser un éclairage parallèle.

Différence de marche On admet $\delta(M) = 2ne(M)$. Pour mémoriser facilement l'expression de la différence de marche, on peut retenir qu'elle correspond à un aller-retour sur l'épaisseur locale entre les miroirs, d'où le facteur $2e(M)$.

Franges d'égale épaisseur Cette frange est donc associée à une épaisseur e fixée. Elle passe par tous les points où l'épaisseur reste la même. On dit qu'il s'agit d'une frange d'égale épaisseur. Dans le cas de deux miroirs plans, comme c'est le cas pour l'interféromètre de Michelson, l'épaisseur $e(x) = \alpha x$ si l'angle α est suffisamment faible (ce qui est vérifié en pratique), l'éclairement est :

$$\mathcal{E}(M) = \frac{\mathcal{E}_0}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi n \alpha x}{\lambda_0} \right) \right)$$

L'éclairement ne dépend que de x : on obtient donc des franges d'égale épaisseur rectilignes. L'interfrange i correspond à la période spatiale de l'éclairement :

$$i = \frac{\lambda_0}{2n\alpha}$$

Jet de gaz

On montre la vidéo : <https://youtu.be/BAs0vTrmoQw?t=239> On éclaire en lumière blanche, on a des teintes de Newton comme pour les fentes de Young en lumière blanche. On peut visualiser les variations de différence de marche en mettant un jet de gaz (grande vitesse donc petite pression d'après Bernoulli, donc la densité donc l'indice optique diminue).

Manip

On se replace au contact optique noté en préparation. On place alors une QI, avec un éclairage parallèle (mais toujours une source étendue). on observe la teinte plate. On donne alors un angle à un miroir, et on obtient des belles franges d'égales épaisseur. Application : si on place une lame mince, on peut remonter à son épaisseur, en retrouvant la figure d'interférence, ou plus joli, on fait sortir du gaz d'un briquet, qui a un indice différent, donc la figure change !

Figure d'interférences On se place dans le cas d'un angle d'incidence nulle, alors la différence de marche vaut deux fois l'épaisseur du coin d'air, et on obtient des franges d'égale épaisseur. Il faut commenter !

Bonus : dissymétrie de couleur et défaut de parallélisme Toute dissymétrie de couleur dans la figure d'interférences est due à un réglage imparfait du parallélisme entre séparatrice et compensatrice. La couleur de la frange centrale est un problème épineux : l'explication usuelle avec les déphasages aux réflexions vitreuses est à connaître (cf. Cap Prépa par exemple), mais il semblerait que ce soit en fait plus compliqué.

Bonus : couleur de la frange centrale la couleur de la frange centrale du coin d'air en lumière blanche n'est pas une propriété intrinsèque de la source mais une propriété de l'interféromètre utilisé, en particulier de la lame réfléchissante. La frange centrale devrait toujours être noire car elle résulte d'une interférence destructive entre l'onde qui est issue de M1 non déphasée par la lame et l'onde issue de M2 déphasée de π par la lame. Pourtant, à cause du traitement de surface de la lame, on ne la voit pas toujours noire.

2.4 Applications (bonus)

Applications On utilise l'interféromètre de Michelson pour :

- tester la planéité et la qualité des miroirs, mesurer des distances.
- tomographie en cohérence optique, qui est une technique d'imagerie médicale,
- spectrométrie par TF
- la détection des ondes gravitationnelles.
- expérience Michelson-Morley

Spectroscopie par TF La spectroscopie par transformée de Fourier, utilisée en analyse spectrochimique. On mesure la figure d'interférence au centre du Michelson par translation, ce qui donne $I(e)$ donc la fonction de corrélation temporelle donc le spectre, par TF et Wiener-Khintchine.

Mesure de longueur de cohérence ⚠ Attention aux phrases malheureuses comme « on ne peut pas mesurer la longueur de cohérence temporelle de la lumière blanche avec un Michelson » : c'est faux ! Bien qu'elle soit plus petite que la précision du vernier, il est tout à fait possible de fabriquer un autre étalon à l'aide d'une source monochromatique (laser ou lampe QI + filtre interférentiel), et d'en déduire la longueur de cohérence de la QI. De même seuls quelques lasers monomodes stabilisés en fréquence ont « une longueur de cohérence temporelle de plusieurs kilomètres ». Pour les lasers de TP, l'ordre de grandeur est plutôt 50 cm.

On a vu un type d'interféromètre à division d'amplitude, l'interféromètre de Michelson qui utilise 2 ondes. Il permet d'obtenir des différences de marche importantes mais ne permet pas de séparer spatialement des franges correspondant à des longueurs d'onde très voisines comme le doublet du sodium. A l'opposé, les interféromètres à onde multiple comme l'interféromètre de Fabry-Pérot, font interférer un grand nombre d'ondes simultanément, ce donne une plus grande résolution spatiale et spectrale.

3 Interféromètre de Fabry-Pérot

Objectif On peut annoncer dès à présent que le but est d'augmenter la résolution. On peut d'ailleurs donner très tôt des valeurs pour les coefficients de réflexions et transmission en justifiant que plus r est grand, plus on a d'ondes qui interfèrent.

3.1 Description

Dans une certaine mesure, l'interféromètre de Fabry-Pérot est à l'interféromètre de Michelson ce que le réseau est aux fentes de Young. C'est interféromètre à N ondes, N étant fixé par l'angle d'incidence et la taille des miroirs.

Présentation Conçu par Fabry et Pérot à la fin du XIXe siècle, l'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux miroirs semi-réfléchissants parallèles, à hauts coefficients de réflexion. L'espace entre les deux lames de verre constitue une lame d'air. **ODG:** qqes mm d'épaisseur. [On montre un schéma+photo.](#)

Bonus : lame à transmission contrôlée Une lame à transmission contrôlée (faible pour un Fabry-Pérot, moitié pour la séparatrice d'un Michelson) est faite par dépôt métallique, typiquement de l'aluminium d'épaisseur contrôlée sur une lame de verre. 🚫 **On se méfiera des coefficients en amplitude t et r , et en énergie T et R : on a bien $R = |r|^2$, mais comme $R + T = 1$ $T \neq |t|^2$**

Localisation Chaque rayon émis par un point source S sous un angle i donne après réflexion et transmission multiples sur les faces internes des lames, une infinité de rayons qui émergent parallèle dans la direction d'incidence et donnent des ondes qui interfèrent à l'infini. La figure d'interférence est donc localisée à l'infini.

Figure d'interférence Comme dans l'interféromètre de Michelson réglé en lames d'air, la figure d'interférence est des anneaux d'égaux inclinaison. [On fait le calcul du profil d'intensité](#)

Influence du coefficient de réflexion, comparaison avec l'interféromètre de Michelson

[On sort le code python ou l'animation geogebra qui est plus pédagogique.](#)

Différence avec l'interféromètre de Michelson Donc pour des bons miroirs la figure d'interférence obtenue pour un rayonnement monochromatique est constituée de pics très fins. Si on utilise alors un rayonnement non-monochromatique, on va voir apparaître plusieurs pics, et non plus sommer des sinus comme pour l'interféromètre de Michelson. [On peut montrer le doublet du sodium à ce moment.](#)

Différence avec le réseau

3.2 Finesse et applications

Finesse On donne la définition de la finesse $\mathcal{F} = \Delta\phi/\delta\phi$ qui est le rapport de l'écart entre deux pics (2π) et la largeur à mi-hauteur de ces pics. On ne fait pas le calcul (on préfère faire le calcul du PR), mais on peut montrer que

$$\mathcal{F} = \pi\sqrt{R}/(1 - R) = \pi\sqrt{m}/2$$

. Avec les graphes précédents, on voit que plus la finesse est grande, plus les pics sont fins. **ODG:** Pour $R=0.8$, $\mathcal{F} = 14$, et pour $R=0.99$, $\mathcal{F} = 313$. Une faible augmentation de R permet ainsi un fort gain en finesse. On notera que la finesse des meilleures cavités Fabry-Pérot est actuellement de l'ordre de 100000. On peut également comparer cette finesse à celle qu'on pourrait définir pour le Michelson, qui serait de 2. Mais pour apprécier véritablement le sens de la finesse, on va calculer le pouvoir de résolution.

Pouvoir de résolution Le facteur de qualité, ou pouvoir de résolution, est défini comme l'inverse de la variation relative minimale de fréquence ou de longueur d'onde détectable par l'interféromètre. [Le calcul est sur fiche](#)

$$PR = \lambda/\Delta\lambda = p\mathcal{F}$$

. Il est d'autant plus grand que la finesse est grande et que l'ordre d'interférence est élevé. Contrairement à la finesse, sa valeur dépend donc de la façon dont on se sert de l'interféromètre!

Doublet du sodium La grande finesse du Fabry-Pérot permet résoudre directement le doublet du sodium. [On fait un calcul et on montre la photo](#) **ODG:** Il faut un PR de $598/0.6 \sim 10^3$ pour résoudre le doublet du sodium. Un Fabry-Pérot a typiquement un PR supérieur à 10^6 .

Considérations pratiques En réalité, la finesse est différente de celle théorique à cause du parallélisme des miroirs, il faut que l'épaisseur varie sur une distance inférieure à la longueur d'onde. On le fait manuellement avec des vis micrométrique ou électroniquement avec des quartz piézoélectriques. On utilise aussi le Fabry-Pérot en mode balayage, on fait varier e plutôt que l'angle d'incidence et on récupère le signal sur un capteur au foyer d'une lentille.

3.3 Applications

Laser Les lasers sont des résonateurs optiques et comportent une cavité optique constituée de miroirs en regard. La cavité permet de sélectionner un ou plusieurs modes de largeur spectrale fine

Couche anti-reflet Pour les lentilles des instruments d'optique ou les lunettes de vue, on veut maximiser l'intensité transmise donc minimiser le coefficient de réflexion R . Sur une interface air-verre en incidence normale, $R(\theta = 0) = (1 - 1.5)^2 / (1 + 1.5)^2 = 0.04$. Pour récupérer les 4% d'intensité perdue, on peut intercaler une lame mince d'indice n_2 et d'épaisseur e entre les deux surfaces, tel que $n_2^2 = n_1 n_3$ et $e = p\lambda_2/2$, alors $R = 0$ en incidence normale. Si p est trop grand, R passe rapidement d'un minimum à un maximum quand la longueur d'onde varie, il faut choisir e de l'ordre de la longueur d'onde. En fait on a fait une adaptation d'impédance.

Filtre interférentiel Un filtre interférentiel est une lame diélectrique à faces parallèles partiellement réfléchissante. Les longueurs d'ondes transmises sont celles qui réalisent les conditions d'interférence à ondes multiples. La fonction de transfert est celle d'une cavité Fabry-Pérot. *La longueur d'onde sélectionnées par le filtre interférentiel dépend de l'angle d'incidence. En toute rigueur, les filtres interférentiels doivent donc être éclairés en lumière parallèle. Plus précisément, ils sont calibrés (c'est-à-dire que la valeur annoncée pour le filtre est prévue) pour une incidence normale.*

Généralisation aux lames minces (cf. Tailler) on peut généraliser les résultats aux empilements de lames minces, ce qui explique les couleurs des bulles de savons, des flaques d'huiles, ou des ailes de papillons dont les ailes jouent le rôle de lame mince.

Bonus : remplacement par spectroscopie par TF Pourquoi n'utilise-t-on plus tellement les interféromètre de Fabry Pérot ? La résolution des spectroscopes à transformée de Fourier, reposant sur le fonctionnement de l'interféromètre de Michelson, est limitée non pas par les caractéristiques de l'interféromètre mais par des paramètres d'acquisition - durée, stabilité du moteur, échantillonnage - qui permettent avec l'informatique moderne d'obtenir des résultats plus précis et plus faciles à interpréter.

Bonus : effet Zeeman et mesure du magnéton de Bohr <https://www.youtube.com/watch?v=Ju-3Eu133KE>

Conclusion

La conclusion doit reprendre explicitement et presque en les martelant les idées fortes de la leçon : ici l'intérêt de la division d'amplitude (plus de problème de cohérence spatiale) et sa contrepartie, la localisation. Au cours de cette leçon, nous avons montré que les interféromètres à division d'amplitude s'affranchissaient des problèmes liés à la cohérence spatiale, mais que cela se paie au prix de la localisation des interférences. Ils permettent d'utiliser des sources étendues et de réaliser des mesures précises de plusieurs grandeurs (distances, indices optiques, spectroscopie). On a cité le Michelson et le Fabry-Pérot, mais on peut aussi mentionner le Mach-Zehnder (mesure de cohérence en mécanique quantique) ou l'interféromètre de Sagnac (qui mesure des vitesses de rotation). Les mesures d'interférométrie par division d'amplitude sont encore utilisées aujourd'hui. Les projets de détection des ondes gravitationnelles (VIRGO, LIGO) sont des interféromètres de Michelson parcouru par un Laser sous vide avec des bras de 3km dans les quels on a inséré des cavités de Fabry-Pérot pour encore rallonger le chemin. On peut ainsi détecter des déformations de l'ordre de 10^{-22} m, ce qui a permis de détecter des ondes gravitationnelles en 2015.

Ouverture :

Compléments/Questions

Questions

- Qu'est-ce que la cohérence spatiale ? De quoi dépend-elle ? Qu'est-ce qui la caractérise ?
- Dans le théorème de localisation, à quoi doit-on comparer la variation de différence de marche calculée pour savoir s'il y a brouillage ou non ?
- Expliquer concrètement pourquoi on n'a plus de problème de cohérence spatiale avec l'interféromètre de Michelson en lame d'air ? (La source est artificiellement renvoyée à l'infini : on la voit dès lors sous un angle infinitésimal.)
- Qu'est-ce que le pouvoir de résolution ? Qu'est-ce que la finesse ? Comment la définir pour l'interféromètre de Michelson ?

- **Pourquoi n'utilise-t-on plus tellement les interféromètre de Fabry Pérot ?** (La résolution des spectres à transformée de Fourier, reposant sur le fonctionnement de l'interféromètre de Michelson, est limitée non pas par les caractéristiques de l'interféromètre mais par des paramètres d'acquisition - durée, stabilité du moteur, échantillonnage - qui permettent avec l'informatique moderne d'obtenir des résultats plus précis et plus faciles à interpréter.)
- Ordres de grandeurs de longueurs et d'angles mesurables par interférométrie ?
- Peut-on faire de la division du front d'onde avec un Michelson ?
- Comment on fait des mesures d'indices avec un Michelson en pratique ? Avec un autre dispositif ? Quel est l'intérêt historique du Michelson ? Redéfinir division du front d'onde et division d'amplitude Dispositif où ΔS est perpendiculaire à $u_2 - u_1$? (voir perez chapitre 23) Redémontrer diff marche = $2\cos i$ en 1 ligne et un dessin (sources secondaires du Michelson) Transfo Fourier et cohérence : nom des théorèmes associés ?
- Qu'est-ce qu'un ordre d'interférence ? Pourquoi la résolution du Michelson est-elle inférieure à celle du Fabry-Pérot ?
- Expliquer la localisation des franges pour le coin d'air. Quelles autres applications du Michelson en lame d'air connaissez-vous ? (j'avais cité la spectrométrie, l'expérience de Michelson et Morley, le contrôle de l'état de surface d'un matériau). Pourquoi les sources images vibrent-elles en phase ? Justifier la façon de calculer le chemin optique dans le cas de la lame d'air. Vous avez dit « charioter » à plusieurs reprises, est-ce que c'est français (si, si, j'ai eu cette question). Commentaires : sujet bien maîtrisé, mais ce n'est pas ce qu'on juge à l'oral ; 68 leçon mal structurée : je suis resté longtemps sur la lame d'air. Pas assez de temps sur le Fabry-Perot, pas la peine de le traiter si c'est incomplet. Diapos pas complètement exploitées (je n'avais pas commenté suffisamment des enregistrements correspondant à divers spectres) ; manipulations intéressantes mais pas suffisamment commentées. Les techniciens ont installé et réglé le Michelson pour que je puisse montrer les anneaux de la lampe à sodium en lame d'air. Je suis passé en coin d'air en lumière blanche pendant la leçon, ce qui a été apprécié mais pas récompensé puisque je n'ai pas fait assez de commentaires.
- Pour la séparatrice, vous avez parlé de dépôt métallique, comment fait-on autrement pour avoir un coefficient de réflexion bien contrôlé ? On a vu des anneaux pas parfaitement ronds, à quoi est-ce dû ? Applications d'un Fabry-Pérot ? Comment marche un filtre interférentiel ? À quoi sert la compensatrice ? Seulement à corriger une différence de marche constante ? Et en lumière polychromatique ? Vous pensez vraiment que la dispersion par les lois de Descartes joue un rôle ? Est-ce que le parallélisme des faces de la séparatrice est important ? De la compensatrice ? Et leur planéité ? Quel écart à la planéité de la lame d'air peut on détecter, c'est-à-dire quel est l'angle de coin d'air résultant alors qu'on a l'impression d'être en lame d'air ? Comment le mesurer ? Je veux mesurer un défaut de planéité de lame d'air de 200 nm, c'est possible ? Et un défaut de planéité de compensatrice d'autant ? Est-ce que vous pouvez retrouver par un argument simple le déphasage du coin d'air, sans faire de calcul de chemin optique ? Les techniciens ne savaient pas régler le Michelson, ce qui m'a pas mal stressé, mais finalement un prof préparateur l'a fait pour moi. Le jury m'a dit avoir beaucoup aimé la démonstration du théorème de localisation, qui était particulièrement claire paraît-il. Ils ont aimé que je vérifie à la main que les signes étaient bons en commentant le schéma, et que je sépare bien dans la conclusion de cette partie la condition de non-brouillage et la localisation. Pour le Michelson, je me suis limité aux calculs de différence de marche sans jamais écrire la formule des interférences, mais c'est tout à fait suffisant. Le passage en lumière blanche a raté (j'ai dû prendre mes notes pour la position du contact optique) mais ce n'est pas rédhibitoire, ni d'être seulement qualitatif sur le Fabry-Perot parce que j'ai bien expliqué les points importants, à savoir comment on l'éclaire et la localisation. D'après le jury, la problématique de la leçon est bien de montrer en quoi la division d'amplitude solutionne le problème de la cohérence spatiale, plus que de présenter des interféromètres. Ainsi, ils estiment que la démonstration du théorème de localisation est plus importante que de faire des calculs sur le Fabry-Perot.
- Pourquoi ne regarde-t-on pas en transmission sur une lame d'air en coin ? La différence d'amplitude entre les deux ondes donne un mauvais contraste. D'où vient la proximité entre les deux raies du sodium ? Dédoublage isotopique du sodium. Qu'est ce qui limite la finesse des fabry-pérot en pratique ? Le parallélisme des lames de verre. Est ce que avec des interféromètres par division d'amplitude on s'affranchit complètement de l'étendue spatiale de la source ? Non il faut quand même qu'elle soit inférieure à la taille de l'image formée car par translation d'un point source on translate d'une même quantité l'image formée. Est ce que l'on place la compensatrice avant ou après la séparatrice ? Avant Comment une variation de température modifie-t-elle l'indice de l'air ? Loi de Goldstone En chimie les appareils utilisent toujours des réseaux et non des interféromètres à division d'amplitude. Peut on réaliser de la spectroscopie par transformée de Fourier avec le Fabry-Pérot ? Non car cette propriété repose sur la variation cosinusoidale de l'intensité de l'onde transmise. Dans quel cas utilise-t-on plutôt un Michelson ou un fabry-Pérot ? . Fabry Pérot pour effet Zeeman, lorsque qu'on cherche à déterminer des raies très proches mais sinon le Michelson est plus simple d'utilisation et moins d'énergie est réfléchi à l'entrée Ordres

de grandeurs dans Virgo — Virgo : interféromètre de Michelson avec des bras de 3km et une précision de la dizaine de nanomètre sur la position des miroirs. — Cavity Fabry-Pérot placée dans chaque bras pour augmenter la longueur du chemin optique suivi. — Détection de signaux de l'ordre de 10^{22} — Les interférences dans la vie de tous les jours : — Michelson permet de reproduire : lames minces (films de savons, bulles, lames d'air (coin d'air) — Utilisation technologique : traitement anti-reflet, métrologie, cavités laser — en sciences : Analyse spectrale, métrologie, Virgo — Histoire des sciences : Ether — Les rayons se croisent toujours au voisinage des miroirs : Non, mais on fait les hypothèses pour que ce soit le cas et ensuite on éclaire en lumière parallèle pour se placer dans les conditions expérimentales correspondant à nos hypothèses. — Nombre d'AR dans un Fabry-Pérot : dépend du r des miroirs. L'ordre de grandeur est donnée par la finesse de la cavité. — Ordre de grandeur de : de l'ordre de 10^4 rad — Séparatrice et compensatrice : Avec uniquement la séparatrice, les rayons ne traversent pas le même nombre de fois la lame. Ainsi le rôle de la compensatrice est de rattraper la différence de chemin optique introduite par la séparatrice.

Attention de ne pas dire "le Michelson", le "Fabry-Pérot", mais l'interféromètre de Michelson, l'interféromètre de Fabry-Pérot.

Que se passe-t-il si on ne met pas l'écran dans le plan focal de la lentille ? On voit toujours des franges mais moins contrastées.

Rôle de la compensatrice ?

Longueur de cohérence de la lampe quartz-iode ? Quelques micromètres. $\Delta\lambda = \lambda^2/l_c$.

Quels types de source utiliser selon la configuration de l'interféromètre de Michelson ?

Application simple des Fabry-Perot (?) ? Traitement anti-reflet. Anti-reflet usé ? Si on ne voit plus de reflet bleu.

Autre traitement sur lunettes ? Polariseur pour les reflets.

Autre interféromètre à division d'amplitude ? Mach-Zender. En biréfringence.

Comment interpréter le Fabry-Pérot autrement ? C'est une cavité résonante. Utilisé dans ? Lasers.

Longueur entre les pics ? $L = n\lambda$. La largeur des pics dépend de ? la finesse, qui dépend du coefficient de réflexion.

Biréfringence.

Commentaires

Insister sur la nécessité de la division d'amplitude. On peut montrer les fentes d'Young en introduction : on veut plus de luminosité en élargissant la source mais ça brouille. Solution : utiliser la division d'amplitude. On s'affranchit de la cohérence spatiale au prix de la localisation des franges.

Important de parler de cohérence spatiale/temporelle. Applications.

Biblio. Taillet pour Fabry-Pérot. H Prépa, théorème de localisation. Dunod PC ancien programme.