LP34 : Interférométrie à division d'amplitude.

Niveau

Commentaires du jury

— 2017 : Le candidat doit réfléchir aux conséquences du mode d'éclairage de l'interféromètre (source étendue,faisceau parallèle ou non...). Il est judicieux de ne pas se limiter à l'exemple de l'interféromètre de Michelson.
— 2016 : La distinction entre divisions du front d'onde et d'amplitude doit être précise. Le jury rappelle quel'utilisation d'une lame semi-réfléchissante ne conduit pas nécessairement à une division d'amplitude.
— 2015 : Les notions de cohérence doivent être présentées.
— 2014 : Un interféromètre comportant une lame séparatrice n'est pas obligatoirement utilisé en diviseur d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.Jusqu'en 2013, le titre était : Interféromètres à division d'amplitude. Applications.
— 2009, 2010 : Le calcul des différences de marche doit être effectué aussi simplement que possible, en exploitant au maximum les « dépliements » de rayons. L'influence de l'extension spatiale de la source sur la figure d'interférences est au coeur de la leçon.
— 2008 : Il est indispensable de développer des applications.
— 2005 : Le Michelson n'est souvent utilisé qu'en lame d'air. Les problèmes de localisation et les détails expérimentaux sont rarement présents, tout comme les applications. On peut, pour cette leçon, admettre que les dispositifs par division du front d'onde ont déjà été étudiés auparavant, ce qui permet au candidat d'entrer tout de suite dans le vif du sujet de la division d'amplitude et de son intérêt.
— 2004 : Si le jury souhaite naturellement une solide illustration expérimentale de la leçon, il ne faut pas la transformer en une succession d'observations purement qualitatives. Cette leçon doit être l'occasion pour le candidat de montrer qu'il sait conduire l'analyse théorique du phénomène expérimental montré.
— 2001 : Il faut prendre le temps de justifier la nature du lieu de localisation et réfléchir à l'intérêt de l'utilisation des interféromètres à division d'amplitude.
— 2000 : L'interféromètre de Michelson est habituellement présenté dans cette leçon. Rappelons que, si la source est ponctuelle, l'interféromètre de Michelson permet d'observer des interférences non localisées. Dans ce cas deux rayons distincts partant de la source interfèrent, et on n'est donc pas dans le cadre d'interférence à division d'amplitude. Par conséquent, dans cette leçon, il n'est pas utile de présenter une multitude de schémas illustrant cette situation.
— 1999 : Dans cette leçon aussi la notion de cohérence, spatiale et temporelle, est centrale et doit être abordée.
— 1998 : La motivation des dispositifs étudiés dans cette leçon est l'obtention d'interférences avec une source étendue et conventionnelle, donc spatialement incohérente. L'intérêt des interféromètres à division d'amplitude sur ceux qui utilisent la division du front d'onde doit clairement ressortir de l'exposé. Compte tenu de l'importance expérimentale de ces appareils il est inutile de perdre du temps à l'étude exhaustive des lames d'indice n dans l'air, qu'elles soient à faces parallèles ou non, et il est souhaitable de développer quelques applications des interféromètres étudiés.

Bibliographie

— Animation géogebra
— Localisation
— Vidéo très très très jolie
— fempto physique

pré-requis

— Formule de Fresnel
— Cohérences spatiale et temporelle
—

Expériences

— Anim géogebra Michelson en coin d'air : Ce lien

Table des matières

1 Localisation **2**
1.1 Condition de non brouillage . . . 3
1.2 Position des points de non-brouillage . . . 3
1.3 Théorème de localisation . . . 4

2 Interferomètre de Michelson **4**
2.1 Principe . . . 4
2.2 Lame d'aire . . . 5
2.3 Coin d'air . . . 7

3 Interféromètre de Fabry Pérot **8**
3.1 Description . . . 8
3.2 Finesse . . . 8
3.3 Application (partie tampon et idées d'ouvertures) . . . 9

Introduction

On a vu les interférence à deux ondes. On a vu que pour la division de front d'onde, les interférences sont délocalisées mais on doit utiliser une source ponctuelle. Dès que l'on agrandie la source, on a du brouillage qui apparaît.

> Faire une manip en focalisant une QI+AC sur une fente réglable. On place ensuite 2 fentes d'Young. Lorsque la fente est fine, on observe des franges d'interférence (regarder avec un capteur CCD ?). En élargissant la fente, il y a brouillage. Le faire avec un filtre interférentiel ou un laser au faisceau élargi pour montrer qu'il ne s'agit pas d'un effet de cohérence temporelle.
> En vidéo.

Ceci nous empêche d'avoir suffisamment de luminosité... C'est intrinsèque à la divison de front d'onde. Aujourd'hui, on va découvrir une nouvelle façon d'obtenir des interférences, qui s'affranchit des problèmes de cohérence spatiale. On verra également les contraintes que cela impose.

Division d'amplitude : Schéma de principe. La division d'amplitude est une division énergétique, tandis que la division de front d'onde est une division géométrique. *Schématiquement : si on a un système équivalent à 2 sources : division de front d'onde. Si on a une seule source séparée en 2, c'est une division d'amplitude.*

1 Localisation

Le problème est donc le suivant : utiliser une source étendue pour observer des interférences pour gagner en luminosité. On se place en lumière mono-chromatique : on a vu que ce n'était pas de là que venait le problème.

1.1 Condition de non brouillage

On utilise une source étendue, que l'on assimile à un ensemble de sous-sources incohérentes entre elles.

Dans le cas des fentes d'Young, on a vu que la différence de marche en un point M de l'écran dépend du point source considéré : il dépend du trajet parcouru avec les fentes. Les figures d'interférences ne sont donc pas les mêmes pour toutes les sous-sources. En particulier, si les zones claires d'un point se recouvrent avec les zones sombres d'un point, il y a brouillage et on ne voit plus rien.

Ainsi, la condition de non brouillage en un point M de l'écran serait que la différence de marche dépende peu du point source considéré. Pour ca, on va chercher où on doit placer la source.

1.2 Position des points de non-brouillage

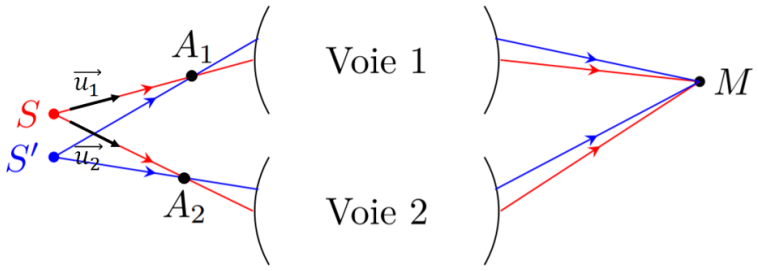

FIGURE 1 – *Interferomètre à deux voies stigmatique (Cabart).*

On considère 2 points S et S' d'une source étendue, émettant des rayons lumineux passant à travers un dispositif optique stigmatique à 2 voies. Un point M du champ d'interférence est le conjugué de 2 points A_1 et A_2 : en particulier, le chemin optique A_1M ne dépend pas du rayon lumineux choisi (et de même pour A_2M). (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 avec le même chemin optique).

Différences de marche des rayons issus de S et S' :

$$\delta = (SA_2) + (A_2M) - (SA_1) - (A_1M)$$
$$\delta' = (S'A_2) + (A_2M) - (S'A_1) - (A_1M)$$

On veut que ces différences de marches soient égales (ou que la "différence de différence de marche" soit nulle, youhou ca s'écrit $\Delta\delta$ c'est drôle) :

$$(SA_2) - (SA_1) = (S'A_2) - (S'A_1)$$

On se place dans un milieu homogène, et d'indice 1 tant qu'à faire (comme l'air assimilé au vide). Dans ce cadre, $(SA_i) = \vec{SA_i} \cdot \vec{u_i} = (\vec{SS'} + \vec{S'A_i}) \cdot \vec{u_i}$ de sorte que :

$$\vec{SS'} \cdot (\vec{u_2} - \vec{u_2}) = 0$$

On en déduit les 2 (3 ?) possibilités suivantes pour préserver le contraste de la figure d'interférence :

— $\vec{SS'} \perp \Pi(\vec{u_1}, \vec{u_2})$: on élargit les sources dans le plan perpendiculaire à la feuille (c'est ce qu'on fait en utilisant des fentes et pas des trous).

— La source est ponctuelle : $\vec{SS'} = \vec{0}$, mais bon on est là pour étendre la source... Les interférences sont délocalisées.

— On utilise le même rayon $\vec{u_1} = \vec{u_2}$! Au point M, on aura un contraste parfait. Mais c'est seulement au point M ! On dit que les interférences sont **localisées.** L'utilisation du même rayon est impossible en division du front d'onde.

1.3 Théorème de localisation

On va reformuler tout ça :

> Seuls les interféromètres à division d'amplitude peuvent donner lieu à l'observation d'interférences contrastées produites par une source arbitrairement large. Alors, ces interférences sont localisées au voisinage des points où les rayons qui interfèrent sont issus du même rayon entrant dans l'interféromètre (*ie*, à l'image géométrique de la source pour les dispositifs classiques).

C'est toujours le cas avec des sources pas trop grandes. **Attention :** on a fait l'hypothèse de stigmatisme approché pour que S et S' donnent le même point M. Cette condition doit être vérifiée, donc la source ne doit pas être trop étendue.

Les interférences par division d'amplitude permettent de s'affranchir de la cohérence spatiale, mais avec la contrepartie de localiser les interférences.

ATTENTION : une source ponctuelle à travers un dispositif à division d'amplitude ne donne pas de localisation des franges.

2 Interferomètre de Michelson

2.1 Principe

Historique L'interféromètre de Michelson a été historiquement réalisé par Michelson et Morley pour tester l'existence de l'éther. Michelson reçoit en 1907 le PN de Physique pour "pour ses instruments optiques de précision ainsi que les études spectroscopiques et métrologiques menées avec ceux-ci"

Principe : Le Michelson est un interférommètre à division d'amplitude.

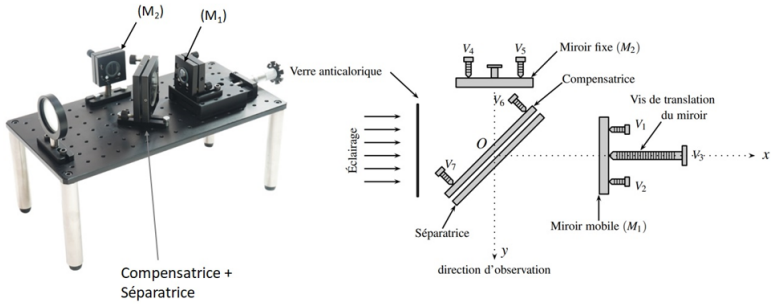

FIGURE 2 – *Interféromètre de Michelson*

Il est constitué des deux miroirs (réglables) et d'une séparatrice.

C'est un dispositif fragile, en effet les miroirs doivent d'être d'une grande planéité (à 10nm près en ordre de grandeur) BUP 795 Il 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. On peut contrôler les déplacements à 10 μm près.

L'interféromètre de Michelson offre deux voies possibles à la lumière incident :

— voie 1 : la lumière incidente est d'abord transmise par le dispositif séparateur, réfléchie ensuite par le miroir(M1),et enfin réfléchie par le dispositif séparateur avant d'émerger de l'interféromètre

— Voie 2 : la lumière incidente est d'abord réfléchie par le dispositif séparateur, réfléchie ensuite par le miroir(M2),et enfin transmise par le dispositif séparateur avant d'émerger de l'interféromètre.

Sépartrice Sépare le faiseceau en 2 en donnant 50% d'intensité de chaque côté.

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

estindépendant 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. La compensatrice permet ainsi d'éviter un eventuelle astigmatisme et dispersion dans le verre lors de l'utilisation de sources étendues ou polychromatiques. Elle permet également de pouvoir considérer le système semi-réfléchissant comme d'épaisseur nulle, en évitant toute différence de marche entre les rayons des différents bras. *Sans compensatrice, on obtient, en lumière blanche, du blanc d'ordre superieur, 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.*BUP 795 Dans toute la suite du cours, on considérera

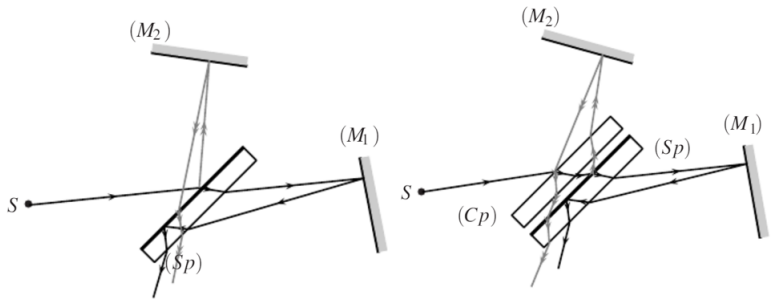

FIGURE 3 – *Compensatrice (Sanz PC)*

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 garantissement l'épaisseur de la spératrice/conensatrice à des variations de $1\mu m$ près, ce qui suffit à conserver les interférences à $1/10$ ordre p près.

A quelle point est-ce un instrument de précision ? : Plénité des miroirs BUP 795 page 43 Li le miroir n'est pas plat, on peut le modéliser par une épaisseur de miroir qui fluctue avec une distribution de probabilité $f(e)$. L'intensité au centre s'exprime comme dans le BUP. On trouve une visibilité (contraste) :

$$V = (\frac{2\pi\epsilon}{\lambda})$$

Avec ϵ l'ampitude des défauts. Si on veux une bonne visibilité $V = 0.9$ par exemple, il faut $\epsilon \simeq \lambda/10$

2.2 Lame d'aire

La manière la plus simple de créer une différence de marche est de jouer sur la longueur des bras : si un des deux rayons parcourt une distance plus grande que l'autre alors il y aura création d'une différence démarche. Et le dispositif de déplacement de M_2 permet de quantifier ce déplacement et donc de connaître précisément la différence de marche.

On éclaire le Michelson avec une lampe à vapeur de sodium. On simule une source pontuelle avec un diaphragme : les interférences sont non localisées, on les voit partout avec le même contraste,et peu intenses. Elles ont la forme d'anneaux.Lorsque le diaphragme est ouvert, on passe à une source étendue et le contraste se détériore, on dit qu'il y a brouillage du fait de la cohérence spatiale. Cette fois-ci les interférences sont localisées en l'infini, visible au foyer d'une lentille. L'intensité est nettement supérieure. (et on prie pour voir quelque chose)

On se propose d'expliquer ces résultats par une étude théorique du dispositif interférométrique. Déjà on peut (grandement) se simplifier la vie en travaillant sur un schéma équivalent **La justification importante est le stigmatisme de la séparatrice** :

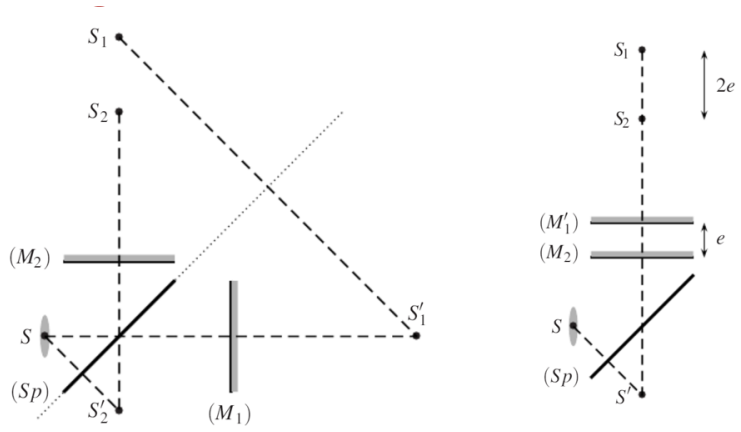

FIGURE 4 – *Michelson équivalent (Sanz PC) (un autre est dans les figures en plus)*

Remarques :

— Invariance par rotation du système : (on le voit avec le schéma équaivalent) Cela se retrouve dans les interférences : On a des anneaux

— Les interférences sont localisé à l'infinie (ie au foyer d'une lentille)

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 *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.*

Différence de marche

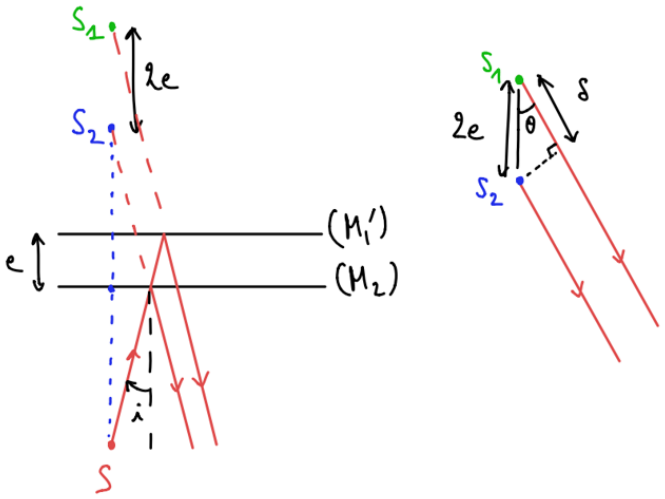

FIGURE 5 – *Calcul de différence de marche. Schéma très clair de Pascal Wang à reproduire au tableau)*

$$\delta = 2ne\cos(i)$$

La formule de fresnel nous donne :

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos\left(\frac{4\pi ne\cos(i)}{\lambda}\right))$$

Ce qui joue c'est les angles : aussi on va impacter l'interferomètre avec le plus d'angle possible.

Contact optique : On définit le contact optique comme étant la configuration de l'interféromètre où l'épaisseur dela 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.

Cohérence temporelle :
Doublet du sodium. L'idées c'est juste de montrer un brouyage. Je pense pas qu'il y ait le temps de faire plus... Sinon leçon coherence pour les calculs

Au centre on a

$$I = 2I_0\left[1 + \cos\left(2\pi\frac{\lambda}{\lambda_0^2}e\right)\cos\left(\frac{4\pi e}{\lambda_0}\right)\right]$$

Au anticoincidence on a $e_p = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+p\right)\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2}$

2.3 Coin d'air

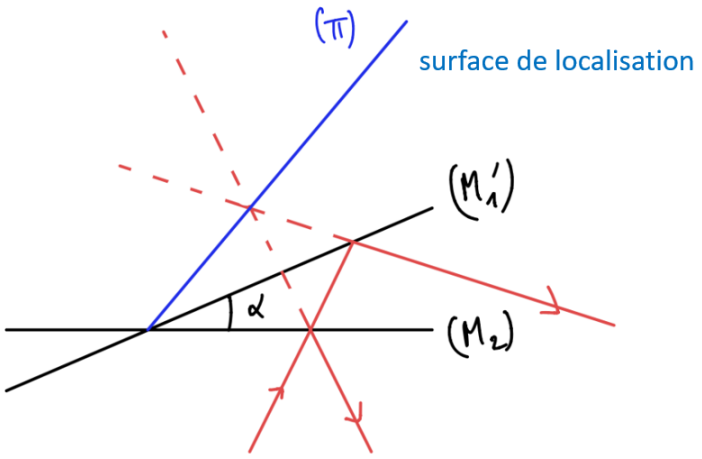

FIGURE 6 – *Coin d'aire. (Schéma très clair de Pascal Wang à reproduire au tableau)*

Localisation : On considère un rayon incident. L'éclairage est 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(M2). 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 repèrer 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 le figure soit lisible. En pratique, α et i sont presque nuls et les plans des deux miroirs et leplansont quasiment confondus

Il faut un éclairage 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.

On peut refaire le calcul de différence de marche... Pas grand intéret.. Pour un angle entre les miroirs α suffisamment faible :

$$\delta = \alpha x$$
$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos\left(\frac{2\pi n\alpha x}{\lambda}\right))$$

Remarque pour les questions : 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 depar la lame. Pourtant, à cause du traitement de surface de la lame, on ne la voit pas toujours noire.

On passe ne coin d'air grâce à l avaleur du contact optique qu'on a noté en préparation. On observer en lumière blanche les franges irisé

3 Interféromètre de Fabry Pérot

3.1 Description

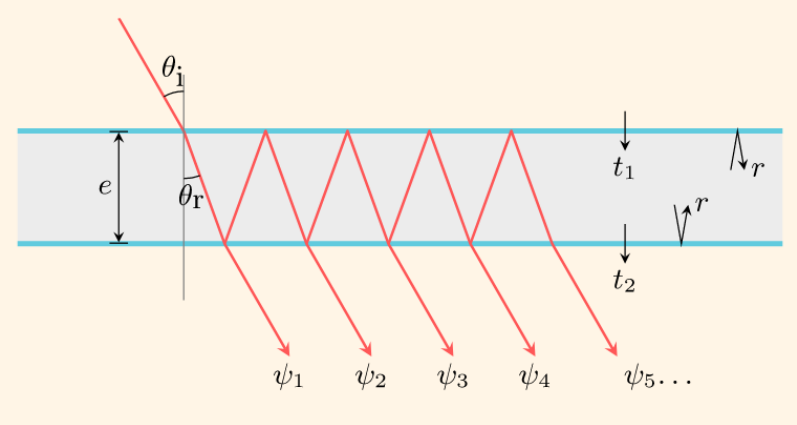

FIGURE 7 – *Schéma Fabry-Pérot (femto-phyisque)*

Le fabry-Pérot est constitué de 2 lames parallèles. Mais en quoi ca diffère du Michelson ? C'est comme un multi-Michelson, parce que les rayons font plusieurs allers-retour dans la cavité. A chaque réflexion, il y a un petit décalage donc on augmente le nombre d'ondes qui interfèrent. Cela aura pour effet d'augmenter la résolution des images obtenues : on a donc intérêt à avoir des miroirs très réfléchissants !

L'interféromètre est donc un interféromètre à N ondes. Il est conçu par Fabry et Pérot à la fin du XIX^{e}siècle. Typiquement, le coefficient de réflexion en énergie est de 99% ; la lame d'air fait quelques mm d'épaisseur.

Lien entre coef de réflexion/transmission en amplitude et en énergie : $R = r^2$ et $T = tt'$. On distingue t et t' pour le passage air-cavité et cavité air.

Figure d'interférence : le schéma proposé ressemble à la situation du Michelson. Les rayons émergents sont parallèles, donc les franges sont localisées à l'infini. La figure d'interférence est des anneaux d'égale inclinaison.

> Montrer les anneaux ?

3.2 Finesse

Chaque onde est déphasée par rapport à l'onde précédente de $\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = 4\pi\frac{e}{\lambda}$. L'amplitude de sortie (après les deux réflexions en plus) :

$$A = A_1 \sum_n \left(r^2 e^{i\phi}\right)^n = \frac{A_1}{1 - Re^{i\phi}}$$

On en déduit :

$$I = \frac{I_{max}}{1 + m\sin^2(\phi/2)} \quad \text{avec} \quad m = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

Animation et il y un code en plus

Finesse : on introduit la finesse comme $\mathcal{F} = \frac{\Delta\phi}{\delta\phi}$, où $\Delta\phi$ est la distance entre 2 pics et $\delta\phi$ leur largeur (faire un dessin).

L'écart entre les pics est donné par les annulations de $\sin^2\phi/2$, qui a lieu tous les 2π.

Largeur du pic en 0 : OOn se place autour de 0. On cherche donc :

$$\frac{I_{max}}{2} = \frac{I_{max}}{1 + m\sin^2(\delta\phi/2)} \implies m\sin^2(\delta\phi/2) = 1 \implies \frac{\delta\phi^2}{4} = 1/m \implies \delta\phi \approx \frac{2}{\sqrt{m}}$$

Il faut doubler pour avoir la largeur à mi-hauteur.

D'où : $\mathcal{F} = \pi/2\sqrt{m} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$

Pouvoir de résolution : il traduit à quel point on arrive à séparer des longueurs d'onde. On le définit comme : $PR = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$

Pour le calculer, il faut repasser de ϕ aux longueurs d'ondes : là c'est un peu la merde parce que différencier $\delta\lambda$ et $\delta \times \lambda$ c cho. Notons plutot $\mathrm{d}\phi$ et $\mathrm{d}\lambda$ pour le moment.

$$\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \implies \mathrm{d}\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda^2}\mathrm{d}\lambda \implies \frac{\mathrm{d}\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda \mathrm{d}\phi}{2\pi\delta}$$

On identifie la finesse $\frac{2\pi}{\mathrm{d}\phi}$ et $\frac{\delta}{\lambda}$ l'ordre d'interférence. Donc :

$$PR = p\mathcal{F}$$

ODG : on trouve le PR en incidence normale et on en déduit $\mathrm{d}\lambda$ avec les valeurs de la lecon de Clément : ici même

> On peut apprendre à régler le Fabry-Pérot.
> Ou alors montrer cette vidéo : On voit le dédoublement des anneaux du au doublet du sodium.

3.3 Application (partie tampon et idées d'ouvertures)

> Le fabry pérot pour le laser ! ! On arrive à séparer les raies du laser.

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 fonctionde transfert est celle d'une cavité Fabry-Pérot.La longueur d'onde sélectionnées par le filtre interférentiel dépend del'angle d'incidence. En toute rigueur, les filtres interférentiels doivent donc être éclairés en lumière parallèle. Plusprécisément, ils sont calibrés (c'est-à-dire que la valeur annoncée pour le filtre est prévue) pour une incidence normale.

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, $R(\theta = 0) = (11.5)^2/(1 + 1.5)^2 = 0.04$. Pour récupérer les 4% d'intensité perdue, on peut intercaler une lameminces d'indice ${}_n2$ et d'épaisseur e entre les deux surfaces, tel que $n_2^2 = n_1 n_2$ 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.

Cavité LASER : la cavité LASER a pour rôle de sélectionner certaines longueurs d'onde et se comporte comme une cavité Fabry-Perot

Conclusion

Nous avons vu que la division d'amplitude nous permettait de nous affranchir des problèmes de cohérence spatiale que l'on rencontre dans les interféromètres à division de front d'onde. En résulte une localisation des franges ! Cela nous permet de nous concentrer par exemple plus spécifiquement sur la cohérence temporelle. Nous avons étudié 2 interféromètre. L'interféromètre de Michelson permet deux configurations et sera manipulé dans l'année en TP. L'interféromètre de Fabry Pérot, plus fin car permet des interférences à N ondes. Ouverture sur tout ce qu'on a pas dit en dernière partie