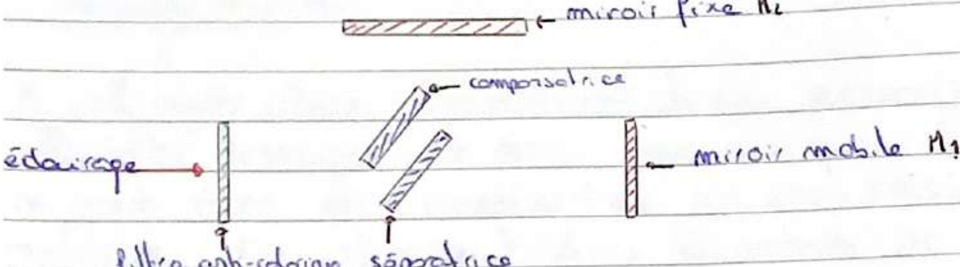
Interféromètre de Michelson

L'interféromètre de Michelson porte le nom d'Albert Michelson, prix nobel de physique en 1907. Il conçut et utilisa cet interféromètre pour tester de vérifier la loi de composition des vitesses galiléenne et de mesurer la vitesse d'entraînement de la lumière (résultat négatif). De nos jours, cet appareil est très employé pour réaliser des mesures de grandes précision : LIGO et VIRGO ⇒ mise en évidence des ondes gravitationnelles

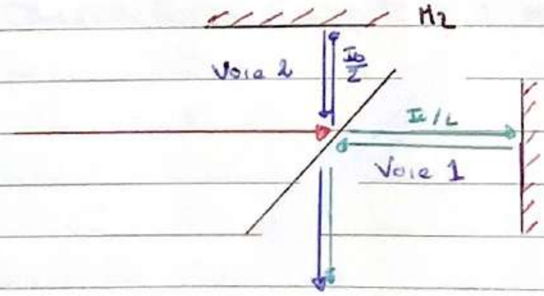
interféromètres: dispositifs qui permettant de déterminer avec une très grande précision les distances ou variations de distance, par comptage ou défilement d'un nombre de franges d'interférences

1. L'interféromètre de Michelson

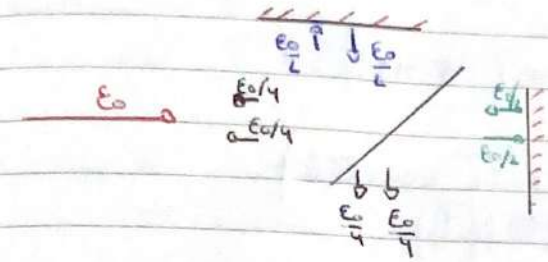


filtre anticalorique : permet d'absorber le rayonnement infrarouge, protégeant l'optique de l'interféromètre.

lame compensatrice : la séparatrice a une épaisseur non nulle et est traversée par une incidence oblique. Elle induit un astigmatisme. L'onde qui suit la voie 1 la traverse 3 fois et celle sur la voie 2 une seule fois. On compense en ajoutant une lame. Les deux ondes traversent donc la même épaisseur. → On la considérera dans l'ensemble {séparatrice + compensatrice}. Ça peut aussi compenser la différence de longueur de marche et de dispersion



Le dispositif séparateur est conçu pour réfléchir 50% de l'éclairement incident, quelle que soit le faisceau, et pour transmettre 50% de l'éclairement.



2. Configuration de la lame d'air éclairée par une source étendue

Schéma complet

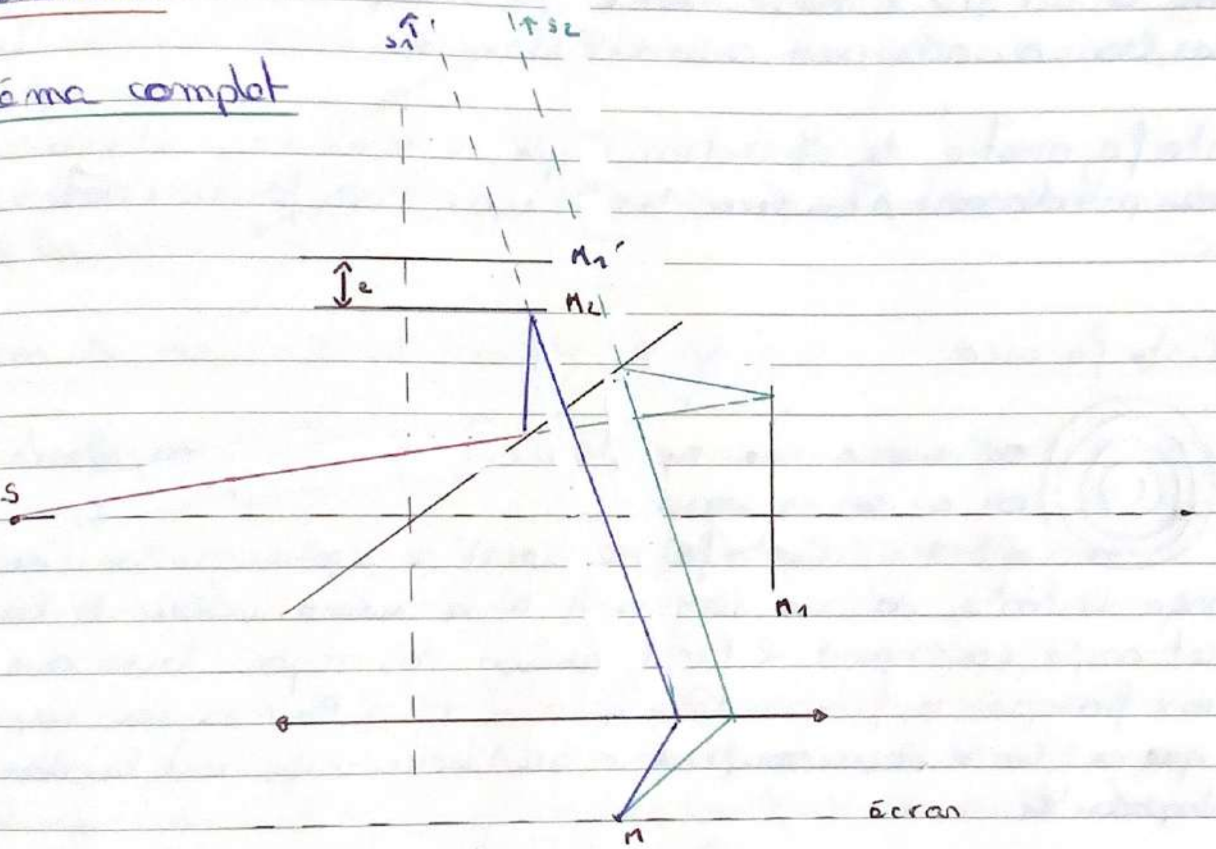
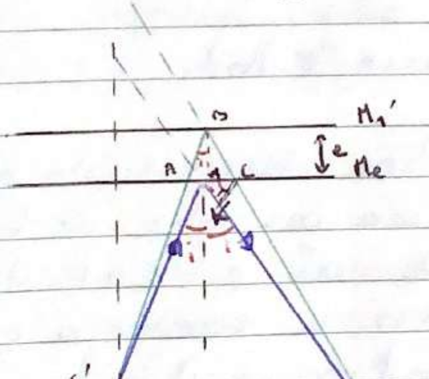


Schéma simplifié



Pour ce Michelson :

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

← différence de marche.

démo : $n = 1$.

$$\delta = 2AB - AK = \left(\frac{2e}{\cos(i)} - \frac{2e\sin(i)^2}{\cos(i)}\right)$$

$$= \frac{2e}{\cos(i)}(1 - \sin^2(i))$$

$$= 2e\cos(i)$$

La différence de phase est : $\Delta\varphi(M) = \frac{2\pi\,\delta(M)}{\lambda_0} = \frac{4\pi n e \cos(i)}{\lambda_0}$

L'ordre d'interférences est : $p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda_0} = \frac{2ne\cos(i)}{\lambda_0}$

L'éclairement est : $\mathcal{E}(M) = \frac{\mathcal{E}_0}{2}\left(1 + \cos(\Delta\varphi(M))\right)$

démonstration : $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right)$
$\Rightarrow I = 2\frac{I_0}{4}\left(1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta(i)}{\lambda_0}\right)\right)$
$\Rightarrow I = \frac{I_0}{2}\left(1 + \cos(\Delta\varphi(M))\right)$

Définition : On dit que l'interféromètre est configuré en lame d'air lorsque les deux miroirs sont perpendiculaires.

Pour l'interféromètre de Michelson, réglé en lame d'air et éclairé par une source spatialement étendue, les franges d'interférences sont localisées à l'infini.

Figure d'interférence

On observe une symétrie de révolution des rayons.
On a des anneaux.
L'ordre d'interférences $p(M)$ ne dépend que de l'angle i.
Une frange brillante donnée correspond à la même valeur de l'angle i.
Comme cet angle correspond à l'inclinaison des rayons lumineux, on qualifie ces franges de franges d'égale inclinaison. Pour en voir beaucoup il faut que i varie beaucoup, donc que l'éclairage soit le plus convergent possible.

Calcul du rayon des anneaux brillants

$p(M) = \frac{2ne\cos(i)}{\lambda_0}$ est une fonction décroissante de i. La valeur maximale est donc réalisée au centre de la figure d'interférence pour i. On note $p(i=0) = p_0 + \varepsilon$ où $p_0 = \lfloor p(i=0) \rfloor$ et $0 \leq \varepsilon \leq 1$. On appelle ε l'excédent fractionnaire. Comme p est une fonction décroissante de i, le premier anneau brillant correspond à la valeur de p_0 de l'ordre d'interférences. On appelle O le centre de la figure d'interférences et on pose $r = OM$. On se met dans les conditions tel que : $i \simeq \tan i = \frac{r}{f'}$

$$p_0 = \frac{2ne}{\lambda_0}\cos(i_1) \simeq \frac{2ne}{\lambda_0}\left(1 - \frac{i_1^2}{2}\right) = \frac{2ne}{\lambda_0}\left(1 - \frac{r_1^2}{2f'^2}\right)$$

On en déduit le rayon r_1 du premier anneau :

$$r_1 = f'\sqrt{2\left(1 - \frac{\lambda_0}{2ne}p_0\right)}$$

Le rayon du m-ième anneau est donc :

$$r_m = \boxed{f'}\sqrt{2\left(1 - \frac{\lambda_0}{2ne}(p_0 - m + 1)\right)}$$

pout joeur

Lorsqu'on diminue l'épaisseur e de la lame d'air, un anneau donné rétrécit et finit par disparaître au centre de la figure d'interférences.

Au contact optique e = 0, l'écran est uniformément éclairé ; c'est la teinte plate.

Notion de division d'amplitude

Cet interféromètre n'opère pas par division du front d'onde : il n'y a qu'un seul rayon qui émerge de la source. Il est ensuite divisé par la lame séparatrice. On dit que l'interféromètre fonctionne par division d'amplitude.

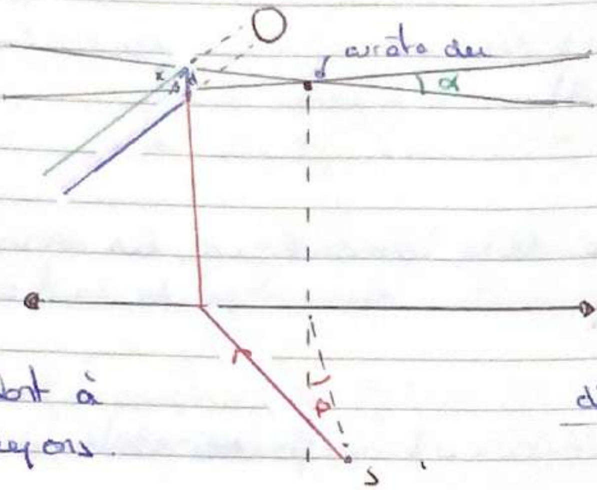
Lorsqu'un dispositif interférentiel, éclairé par une source étendue, fonctionne par division d'amplitude, les franges d'interférences sont localisées sur une surface appelée surface de localisation où la visibilité des franges est maximale.
Les franges sont localisées à l'infini.

3. Configuration du coin d'air éclairé par une source étendue

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

Pour l'interféromètre de Michelson, réglé en coin d'air, et éclairé par une source spatialement étendue, les franges sont localisées au voisinage des miroirs.

Schéma simplifié



→ équivalent à deux rayons.

La différence de marche est

$$\delta(M) = 2\alpha x$$

démonstration : $\delta(M) = n_{air}\left((SI)_2 - (SI)_1\right)$
$= 2d$

$\tan\alpha = \dfrac{d}{x} \Leftrightarrow x\tan\alpha = d$
$\Leftrightarrow d \simeq \alpha x$

L'intensité en sortie est : $I(M) = \dfrac{I_0}{2}\left(1 + \cos\left(\dfrac{2\pi}{\lambda_0} \times 2\alpha x\right)\right)$

Pour un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air et éclairé par une source spatialement étendue, les interférences sont localisées sur une surface voisine des miroirs. En un point M de cette surface, où l'épaisseur locale entre les deux miroirs est $e(M)$, l'ordre d'interférence $p(M)$ et la différence de marche $\delta(M)$ sont :

$$p(M) = \frac{2n\,e(M)}{\lambda_0}$$

- la différence de marche correspond à un aller-retour sur l'épaisseur locale entre les miroirs, d'où le facteur $2e(M)$.

De la même manière qu'on parlait de franges d'égale inclinaison en lame d'air, on parle ici de franges d'égale épaisseur.

On définit l'interfrange comme la période spatiale de l'éclairement :

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

Figure d'interférence

Utilités : • contrôle du polissage d'un miroir
• mesure de l'épaisseur d'une lame
• indice de réfraction d'un gaz.