

DM 14 – Principe de l'interférométrie stellaire

Les objets observés en astronomie sont souvent de dimension angulaire trop faible pour être résolus par un télescope. C'est le cas par exemple des exoplanètes orbitant autour d'étoiles, ou des disques de matière et de gaz se formant autour de certaines étoiles. La résolution d'un télescope est en effet limitée par :

- les aberrations optiques (non stigmatisme : l'image d'un point n'est pas exactement un point),
- les fluctuations atmosphériques (qui déforment le front d'onde et troublent l'image, comme quand on regarde au dessus d'un radiateur et que l'air chaud trouble ce qui est derrière),
- la diffraction par l'ouverture du télescope : même pour des optiques parfaites, un télescope de diamètre d produit d'un objet ponctuel à l'infini une image qui est, dans le plan focal image, une tache de demi-diamètre angulaire $\theta \simeq d/\lambda$.

Le but de cet énoncé est de montrer que l'on peut améliorer cette limite due à la diffraction non pas en construisant des télescopes de diamètres gigantesques (et coûteux), mais en utilisant les interférences entre les faisceaux captés par deux télescopes plus petits.

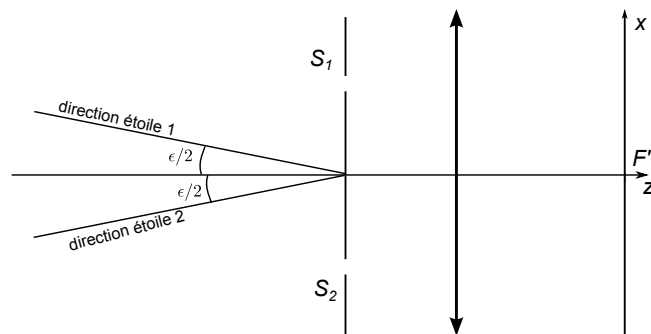
On s'intéresse à l'étude d'une étoile double. Il s'agit de deux étoiles en orbite l'une autour de l'autre. Par exemple l'image ci-contre est celle du système binaire Albireo vu par un télescope. C'est un cas où les étoiles sont assez séparées pour être observables directement, mais ce n'est pas toujours le cas, et il faut alors utiliser le dispositif interférentiel décrit ici.



On note ϵ la séparation angulaire entre les deux étoiles.

On modélise d'abord le télescope interférentiel comme deux trous d'Young, devant lesquels on place un filtre monochromatique qui ne laisse passer que les longueurs d'onde autour de λ_0 , et d'un écran placé dans le plan focal image d'une lentille.

Les étoiles sont à l'infini, l'une dans la direction faisant un angle $\epsilon/2$ avec l'axe de la lentille, l'autre un angle $-\epsilon/2$.



On a $\epsilon \ll 1$, et la lentille est utilisée dans les conditions de Gauss.

1 - Pourquoi les deux étoiles peuvent-elles être supposées comme étant des sources incohérentes ?

2 - On considère d'abord l'étoile 1, qui fait un angle $+\epsilon/2$ avec l'axe de la lentille.

Montrer que la différence de marche au point M d'abscisse x entre deux rayons, l'un passant par S_1 et l'autre par S_2 , est donnée par l'expression $\delta_M = -\left(\frac{x}{f'} + \frac{\epsilon}{2}\right)a$.

On soignera toutes les étapes de la démonstration.

En déduire que l'éclairement sur l'écran dû à l'étoile 1 est $I_{*1}(x) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \left(\frac{x}{f'} + \frac{\epsilon}{2}\right)a\right) \right]$.

3 - En déduire, par analogie (ou si besoin en refaisant le calcul), l'expression de l'éclairement $I_{*2}(x)$ dû à l'étoile 2.

4 - Tracer ces deux intensités sur un même graphique.

Peut-on comprendre pourquoi, lorsque l'on augmente a , le contraste de l'image finira par être nul (sans faire de calcul) ?

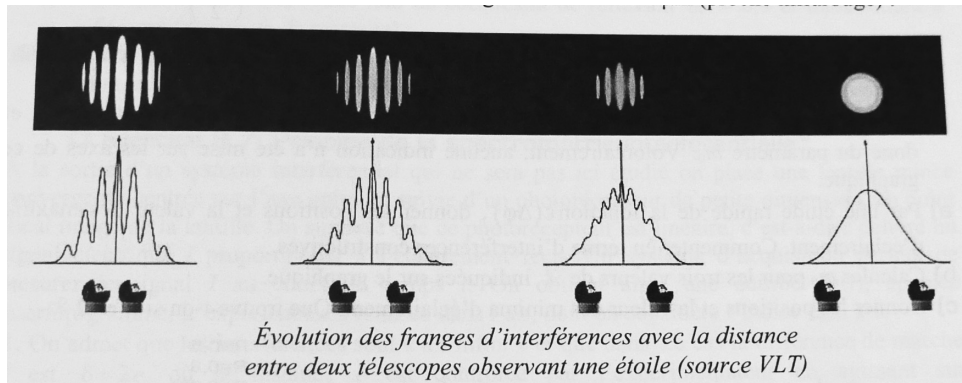
5 - Montrer que l'intensité totale s'écrit $I_{\text{tot}}(x) = 4I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi a \epsilon}{\lambda_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi a x}{\lambda_0 f'}\right) \right]$.

Déterminer l'expression du contraste.

Montrer qu'il s'annule pour des valeurs a_k de a , k entier, dont on donnera l'expression.

En pratique, on ne place pas une énorme lentille derrière deux trous d'Young (cela serait du gâchis car la majeure partie de la lentille ne sert pas). Au lieu de cela, on utilise deux petits télescopes, qui jouent chacun le rôle d'un trou d'Young. On capte la lumière reçue par chacun, on l'achemine par des fibres optiques, et on fait interférer ces deux lumières.

On a donc, très schématiquement, le fonctionnement suivant :



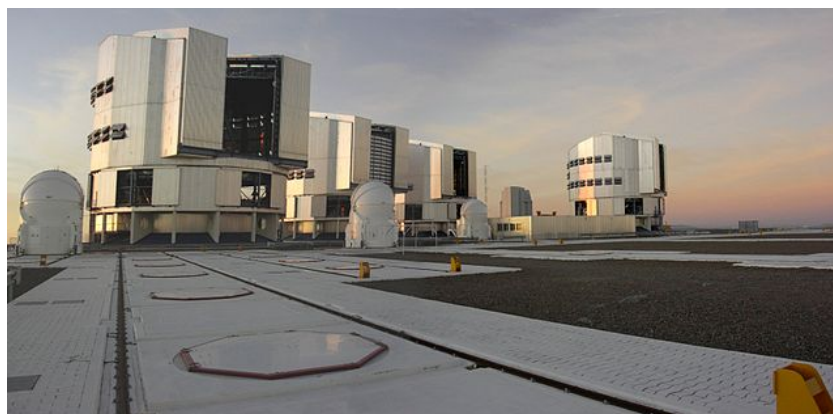
Cette image exprime l'idée qu'on déplace les télescopes afin de faire varier a , et que si l'étoile est double, alors il y a annulation du contraste pour un certain a . Ceci permet ensuite de remonter à la valeur de la séparation ϵ .

6 - (facultatif) L'observation de l'étoile Capella donne un brouillage pour une séparation $a_0 = 116.5$ cm. On en déduit donc qu'il s'agit d'une étoile double.

La longueur d'onde utilisée est $\lambda_0 = 635$ nm. Quelle est la séparation angulaire entre les deux étoiles ?

7 - (facultatif) Le VLT (Very Large Telescope) au Chili permet de séparer les deux télescopes de $a = 200$ m. Quelle est alors la résolution angulaire maximale ϵ ?

Si on voulait atteindre une telle résolution avec un seul télescope, quel devrait être son diamètre d ?



Photographie du VLT. Il est composé de 4 gros télescopes (les 4 bâtiments cylindriques les plus gros), et de 4 télescopes plus petits (on en voit 3 sur la photo : les 3 en forme de dôme). Les petits télescopes peuvent être déplacés sur des rails pour atteindre des écartements de 200 m. On voit un tel rail en avant plan.