

LP Téléscopes

alexandre.pricoupenko et jm.schlachter

Octobre 2021

Niveau L2 (Fin 2e année CPGE)

Prérequis :

Optique Géométrique (1ere année CPGE)

Modèle Oeil

Interférences

Diffraction de Fraunhofer

Introduction

Motivation : Pour observer des objets très éloignés nettement. (voir Bonus pour plus d'infos possibles, ODG etc...)

→ Lunettes astronomiques et Telescopes. (collecteurs de lumière)

Un peu d'histoire :

Cela commence au XVIIe avec les lunettes astronomiques qui utilise des lentilles.

Problème majeur : Aberration chromatique

→ Newton (après qqs expériences) décide de s'en affranchir avec un miroir sphérique et crée ainsi le premier modèle reconnu de télescope.

1 Le télescope de Newton

1.1 Présentation

Schéma + Tracé des rayons. (Slide 1)

Objectif : Miroir sphérique de diamètre D de rayon de courbure $R_1 < 0$. Pièce maîtresse du télescope. Rappel : $R_1 = 2SF_1 = 2f_1$.

Miroir secondaire plan incliné à 45° : Permet d'observer sans occulter le faisceau incident.

Oculaire : Focale convergente. Joue le rôle de loupe (interchangeable). Envoie l'image à l'infini pour permettre de voir l'image sans accommoder pour l'oeil normal (emmétrope).

Récapitulatif trajet rayons :

$$A_\infty \rightarrow A_1 = F_1 \rightarrow A_2 = F_2 \rightarrow A'_\infty \quad (1)$$

→ Système afocal

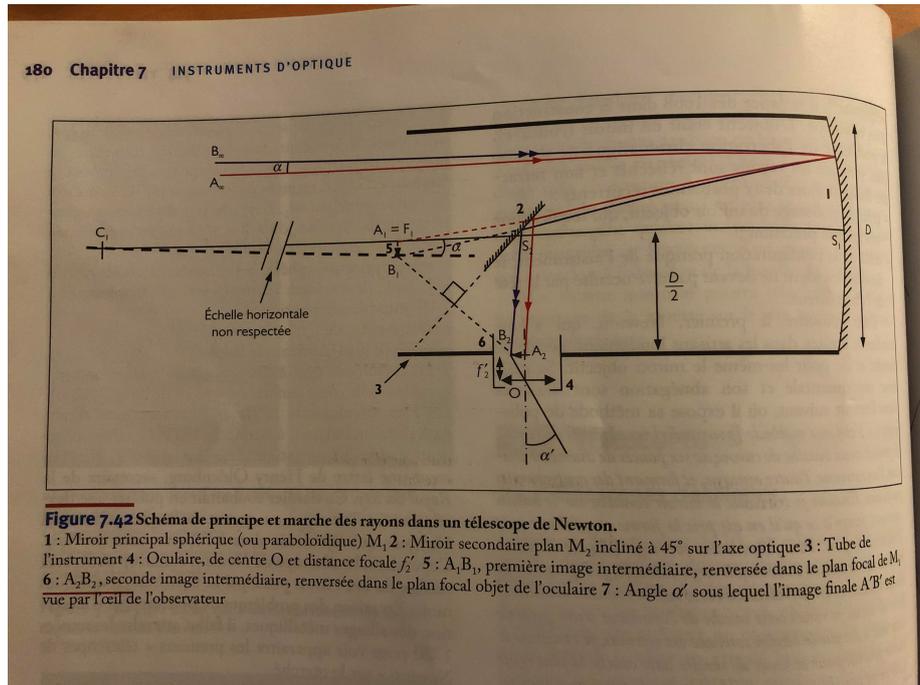


Figure 7.42 Schéma de principe et marche des rayons dans un télescope de Newton.

1 : Miroir principal sphérique (ou paraboloidique) M_1 , 2 : Miroir secondaire plan M_2 , incliné à 45° sur l'axe optique 3 : Tube de l'instrument 4 : Oculaire, de centre O et distance focale f'_2 5 : A_1B_1 , première image intermédiaire, renversée dans le plan focal objet de M_1 6 : A_2B_2 , seconde image intermédiaire, renversée dans le plan focal objet de l'oculaire 7 : Angle α' sous lequel l'image finale $A'B'$ est vue par l'œil de l'observateur

FIGURE 1 – Schéma Telescope Newton Houard

1.2 Caractéristiques

Grossissement (cf schéma)

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A_2B_2}{f'_2} \frac{|f_1|}{A_1B_1} = \frac{|f_1|}{f'_2} \quad (2)$$

Idee : En augmentant G , il semblerait qu'on peut agrandir indéfiniment les détails d'un astre ($\alpha \rightarrow 0$) cf ($\alpha' = \alpha|f_1|/f'_2$).

Question : Si on oublie **les aberrations géométriques** encore présentes, est-ce toujours possible de résoudre deux étoiles ponctuelles séparées d'un angle α ?

2 Les limites de résolution

2.1 Limite de Diffraction

On a pas d'image ponctuelle à cause de la diffraction : on va donc avoir une limite fondamentale liée à la nature ondulatoire de la lumière.

Télescope : Pupille (diaphragme d'ouverture) circulaire de diamètre D . Diffraction à l'infini (Fraunhofer) \rightarrow Tâche d'Airy centré sur l'image géométrique. (Schéma Tableau) ($\rho = \alpha|f_1|$) (Slide 2)

$$I(u)/I_{\max} = \left[\frac{2J_1(\pi u)}{\pi u} \right]^2 \quad u = \frac{D\rho}{|f_1|\lambda} \quad (3)$$

Critère de Rayleigh : 2 objets ponctuels de même luminosité sont tout juste résolus si le maximum de la figure de diffraction de l'un correspond au premier minimum de la figure de diffraction de l'autre.

Pour deux tâches d'Airy α_R , angle maximum de résolution vérifiée (multiplier par $|f|$ pour le rayon :

$$\alpha_R = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

Utiliser couleurs Schéma **attention erreur tache B_∞ a mettre en bas sur le schéma (ie le symetrique de la tache de l'image de B ici par rapport à l axe optique)!**

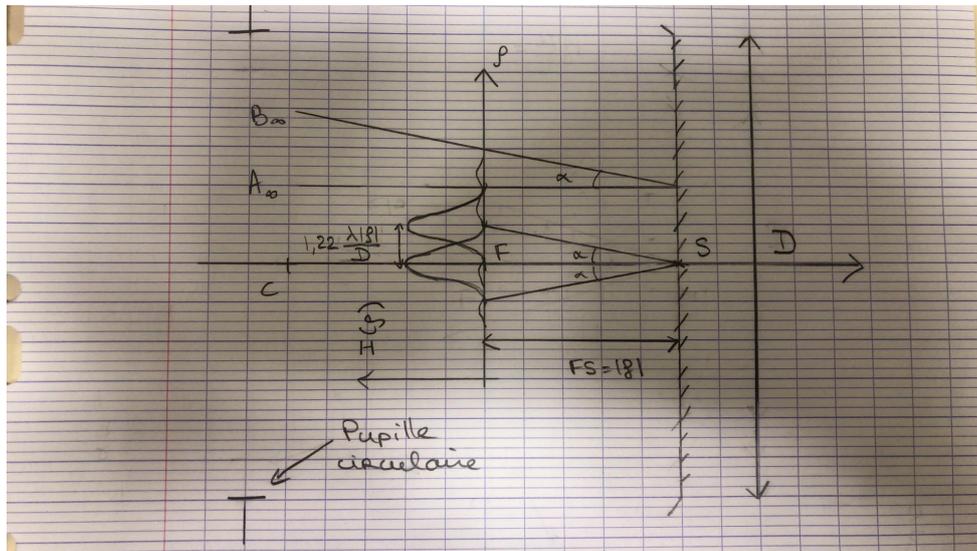


FIGURE 2 – Limite de diffraction et tâche d'Airy

Conclusion : On veut augmenter D (en + on gagne en intensité)

ODG avec $\bar{\lambda} = 550 \text{ nm}$

$D \simeq 150 \text{ mm}$ d'où $\alpha_R \simeq 0,92''$ i.e. 1,7 km détails sur la Lune (environ x 60 / à l'oeil)!

Telescope ajd : $D \simeq 1 \text{ m} \rightarrow 260 \text{ m}$ détails sur la Lune.

2.2 Limite principale (à priori) : Turbulence atmosphérique

En traversant l'atmosphère, les rayons qui proviennent de l'astre subissent des réfraction multiples et aléatoires (cf variation d'indice) \rightarrow Déformation du front d'onde \rightarrow Déformation image aléatoire en fonction du temps (Schéma tableau)

ODG variation temperature et variation indice ?

\rightarrow Phénomène de scintillement d'étoiles observable à l'oeil nu. (dépend notamment du diamètre apparent de la source).

Lien Vidéo (Slide 3) (cliquer) : <https://www.youtube.com/watch?v=SIY56hIdeuEt=29s>

Rq : + De scintillement à l'horizon qu'au zénith

Revenons à notre télescope. Turbulence augmente taille de l' image. Solution ultime : Envoyer un télescope dans l'espace! (Hubble)

→ Paramètre de Fried r_0 : taille maximum du télescope équivalent vis à vis de notre résolution. (remplace diamètre D) (ODG : $r_0 \sim 10 - 20cm$ d'où $\alpha_R \sim 1''$ ordre de résolution des télescopes de Newton d'amateurs ...!)

Pourquoi faire de grands télescopes alors ? Comment faire pour régler ce problème ?

L'optique adaptative permet de corriger ces déformations en temps réel avec pour but de retrouver la tâche de diffraction qu'on avait sans turbulences. Technique qui s'est développée dans les années 90.

Concrètement ? Lien Animation (cliquer) (Slide 4) : <https://media4.obspm.fr/public>

Explication : On recueille le front d'onde déformé qu'on va analyser (matrice de microlentilles de rayons r_0 + capteurs CCD) et utiliser un miroir déformable (actionneurs piézo-électriques/verins) pour corriger front d'onde en temps réel (cf système de rétroaction).

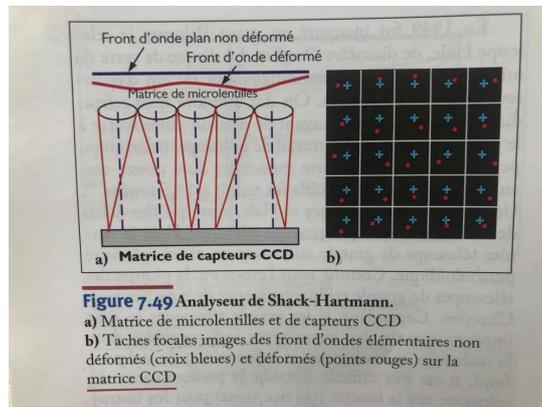


FIGURE 3 – Analyseur de Shack-Hartmann

On doit avoir $\tau_{OA} \ll \tau_T$ où τ_T est le temps caractéristique associé aux variations d'indices de l'air et τ_{OA} le temps carac de notre système. ODG $\tau_{OA} \sim 10^{-2}s$

Rq : En pratique on regarde l'image d'une étoile repère dans le même champ qui a plus d'intensité

On reprend donc la course à des D plus grands ?

Projet Extremely Large Telescope (ELT) $D \sim 40$ m OA nécessite d'échantillonner sur un nombre de micro lentilles $\propto (D/r_0)^2$, donc 10^5 pour ELT

Pas très pratique ... ! Heureusement, depuis environ un siècle, des techniques d'interférométries nous permettent de pallier aux limitations d'un télescope unique. (du coup quand l'OA n'existait pas semble t il mais du coup je vois pas trop en fait)

3 Interférométrie stellaire

Si on admet qu'on a retrouvé notre limite de diffraction cf OA, on va voir mtn que l'interférométrie entre télescopes permet d'améliorer la résolution d'un télescope unique. (cf Labeyrie p.189 Houard avant dernier paragraphe Telescope)

VLT : Association de 4 télescopes dans le désert d'Atacama Chili. Association de télescopes sur rails.

Cas simple : 2 telescopes. Schéma. Ligne de retard nécessaire. (Schéma tableau)(Fig.4 et Fig.5)

On se ramène a une modelisation en incidence normale avec un angle alpha. Equivalente interferometre Fizeau mais avec 2 télescopes à la place des trous !

Calcul intensité (Deux sources incoherentes). Facteur Visibilite et contraste. Resolution d'un système de deux étoiles cf annulation du contraste .

Expérience : (Bon bah pas le temps pendant ma présentation + pas nécessaire en fait (cf 1 membre du jury) donc on peut skipper mais je laisse le texte ci-dessous)

Pas de trou avec distance réglable donc on va plutot faire varier largeur de la source pour 2 fentes avec distance fixe entre les deux.

Pourquoi équivalent ? Calcul Houard (p.209 Houard)

$$I(M) = 2I_0[1 + V(b) \cos(2\pi x/i)] \quad (5)$$

avec $i = \lambda f'_2/a$ est l'interfrange et le facteur de visibilité est ici $V(b) = \text{sinc}(\frac{\pi ab}{\lambda f'_1})$.

Donc ici au lieu de faire varier a , on fait varier $\alpha = b/f'_1$

(Slide 6)

Montage (p.209 Houard) : QI éclaire fente réglable qui joue le rôle de source dans plan focal objet de L_1 (autocollimation avec fente fine mieux) puis deux fentes et enfin une lentille L_2 derrière et image dans plan focal de L_2 (facile à avoir donc).

On augmente la largeur de la fente pour aller jusqu'à la première annulation du contraste (et pourquoi pas jusqu'à la 2e aussi mais expliquer que moins d'intensité cf diffraction, en particulier si $b > a$ là c'est venter).

Conclusion

Hubble ODG 0,058'' donc 110 m de détails sur la Lune.

Photo Hubble! (Slide 6)

Interférometrie entre télescopes dans l'espace pour détecter vie sur exoplanètes ?

ODG : $\alpha = d_{ville}/D_{exo}$ avec $D_{exo} \sim 10^{13}$ km et $d_{ville} \sim 10$ km

On trouve $D \sim 500km$. Nice! Mais du coup la ligne de retard doit être bien gérée!