



Télescopes

Les télescopes

La fonction première des systèmes tels que les lunettes ou les télescopes est d'observer nettement des objets extrêmement éloignés et souvent à peine visibles. Astronomiquement parlant, il s'agit de pouvoir *résoudre* des objets, c'est-à-dire de distinguer des détails au sein d'un même corps céleste, par exemple deux étoiles dans un système binaire. De la même manière, un satellite espion qui permet de reconnaître un uniforme est encore plus intéressant qu'un satellite capable de détecter le déplacement d'individus au sol. Le paramètre important est donc ici la **résolution** ou le **pouvoir séparateur**.

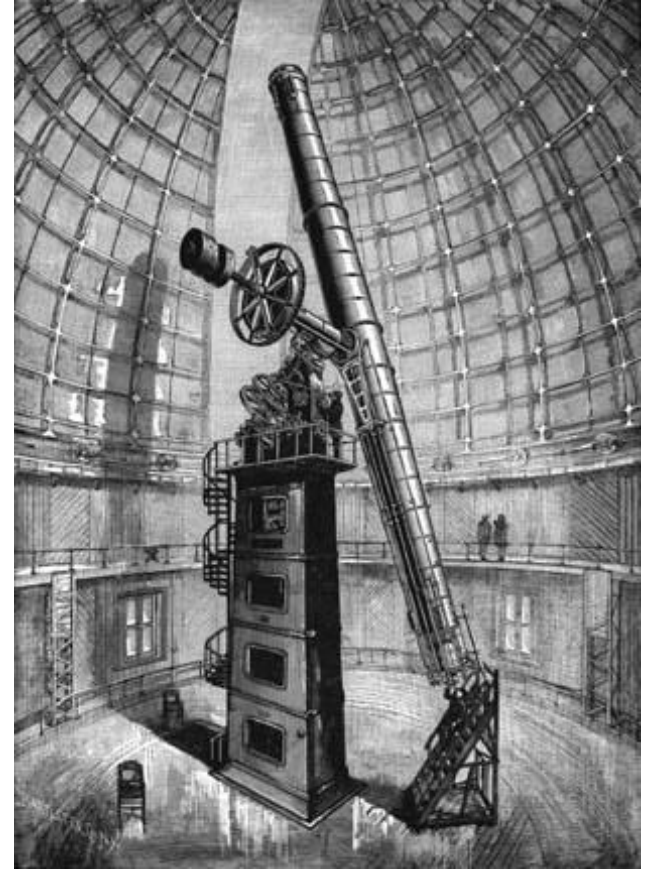
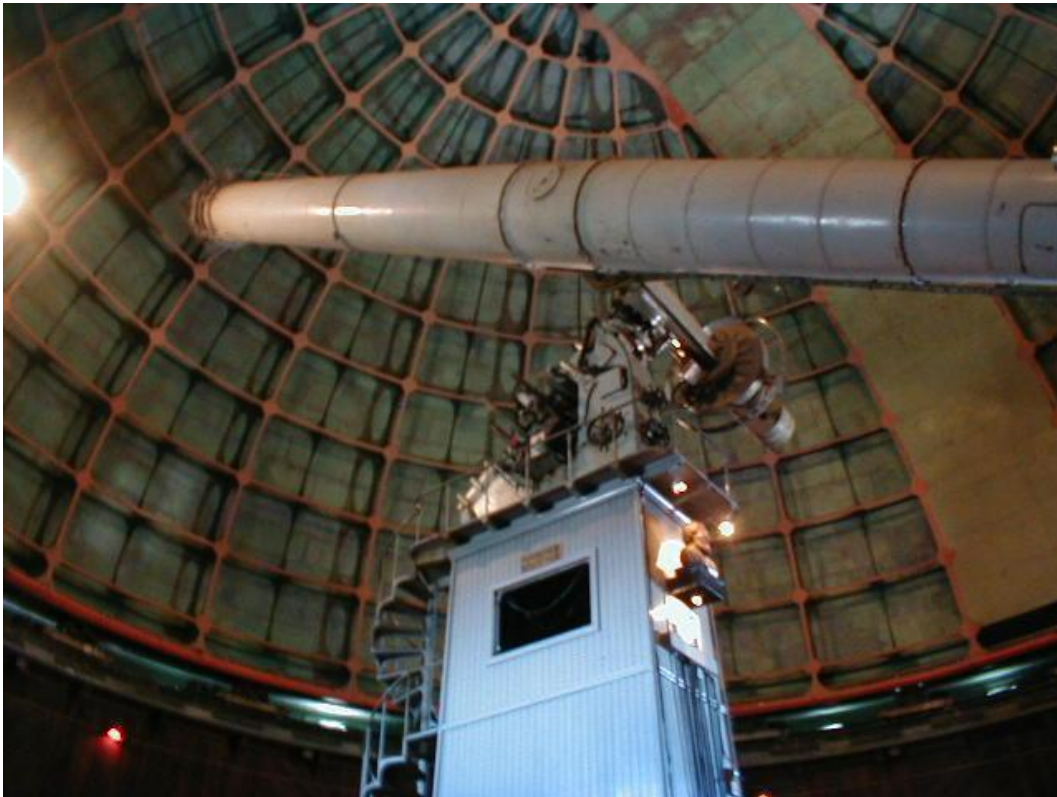
Pouvoir séparateur d'un télescope

Celui-ci caractérise la capacité d'un instrument à *séparer* deux objets très proches l'un de l'autre. On peut montrer qu'il augmente avec le diamètre (D) de l'ouverture de l'instrument. À paramètres équivalents (dans des conditions idéales d'observation), un instrument de large diamètre aura une meilleure résolution qu'un autre à diamètre plus petit. Il y a d'ailleurs un autre avantage à avoir une optique d'entrée de grande taille : celui de pouvoir **capter un maximum de lumière**. Un système possédant une grande ouverture pourra collecter plus de photons et voir des objets moins lumineux ou plus éloignés qu'un autre système identique, mais à pupille plus petite.

Les télescopes: lentilles ou miroirs

Le problème est qu'il n'est pas facile de fabriquer des lentilles de qualité avec un très grand diamètre. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : alors que les plus grands télescopes à miroirs ont des diamètres d'entrée de plus de 8 mètres, l'objectif de la plus grande lunette astronomique ne mesure qu'un mètre de diamètre (*Observatoire Yerkes*, Wisconsin, USA). Les raisons sont évidentes. Une lentille doit être parfaitement transparente et dépourvue de défauts à la fois internes (bulles...) et de surface. Un miroir en face avant n'est concerné que par la qualité de sa surface. Une lentille ne peut être tenue que par une monture externe et peut se déformer sous son propre poids. Un miroir peut en revanche être maintenu à la fois par ses bords mais aussi par l'arrière. Les miroirs ont enfin l'avantage de ne pas fonctionner par réfraction. Les systèmes à miroirs ne sont donc pas soumis aux aberrations chromatiques et leur distance focale n'est donc pas fonction de la longueur d'onde des rayonnements. Pour ces différentes raisons, ainsi que d'autres (par exemple, leur domaine spectral étendu), les grands instruments sont constitués de systèmes à miroirs.

Les plus grandes lunettes astronomiques



Télescope à miroirs

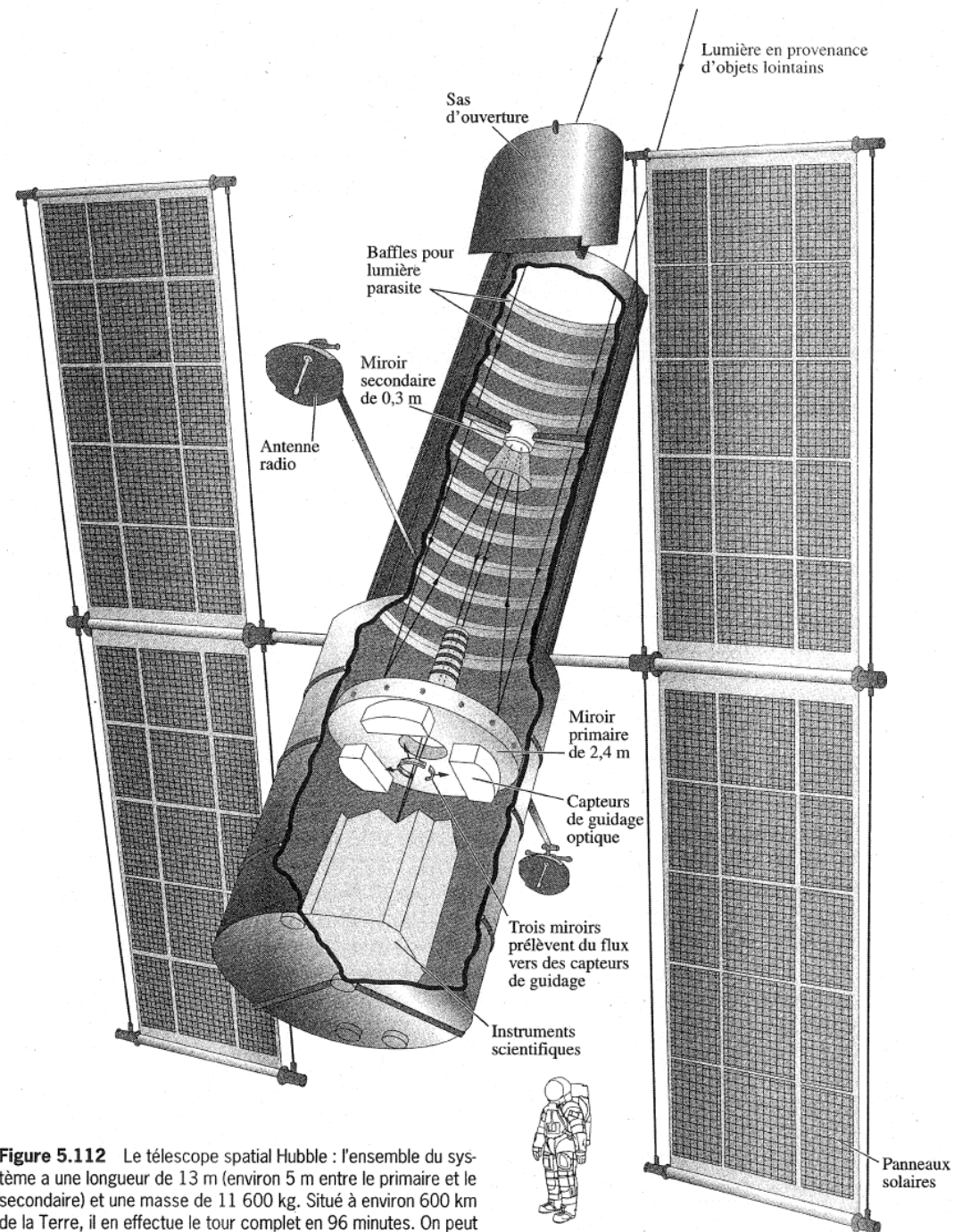
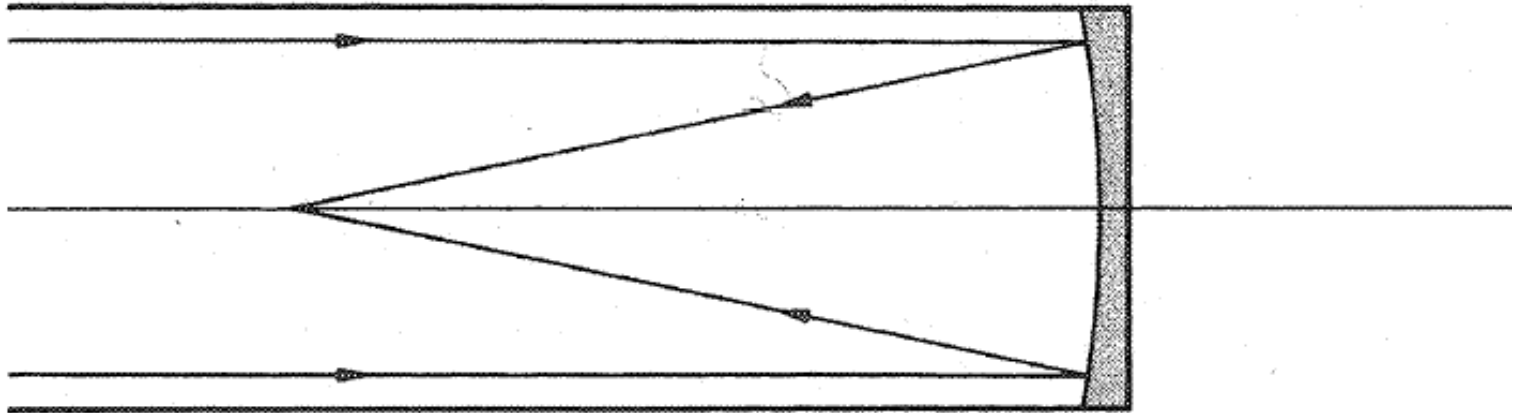
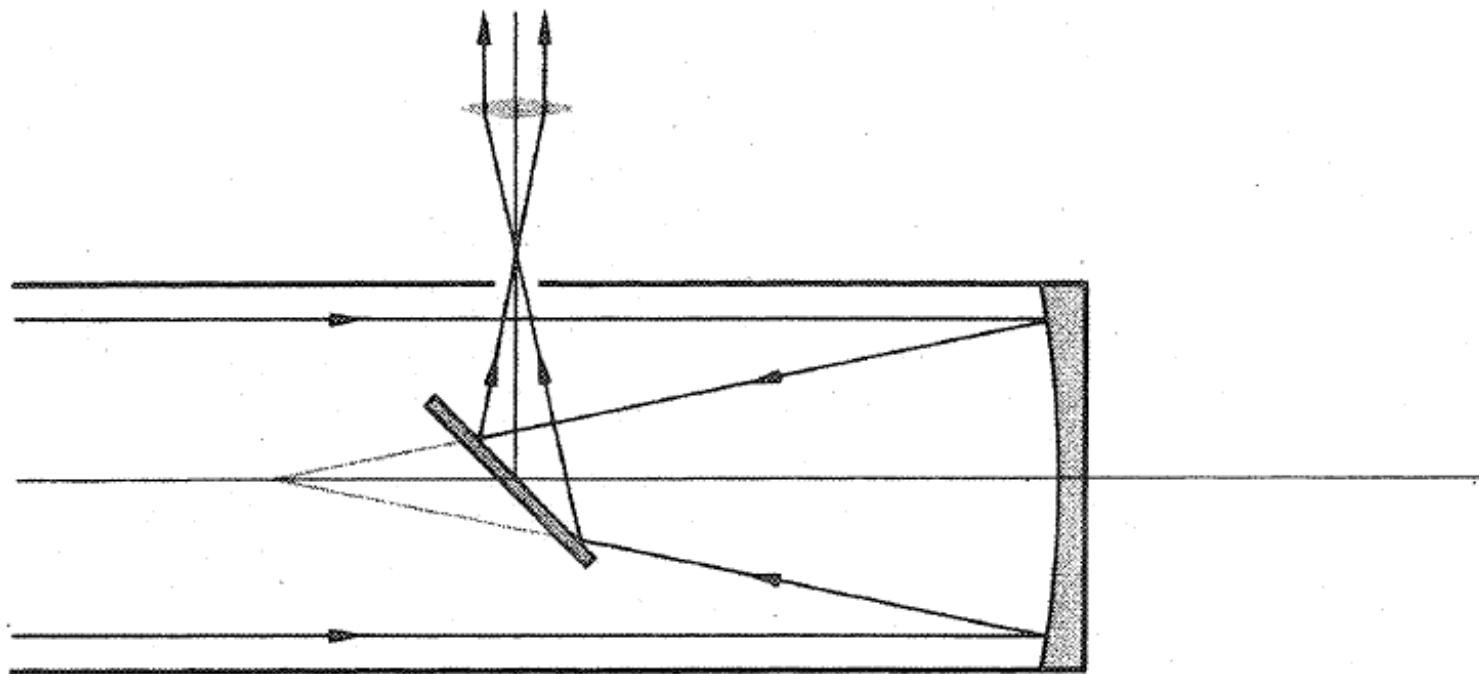


Figure 5.112 Le télescope spatial Hubble : l'ensemble du système a une longueur de 13 m (environ 5 m entre le primaire et le secondaire) et une masse de 11 600 kg. Situé à environ 600 km de la Terre, il en effectue le tour complet en 96 minutes. On peut voir une photographie du miroir primaire p. 188.

Configurations de télescopes

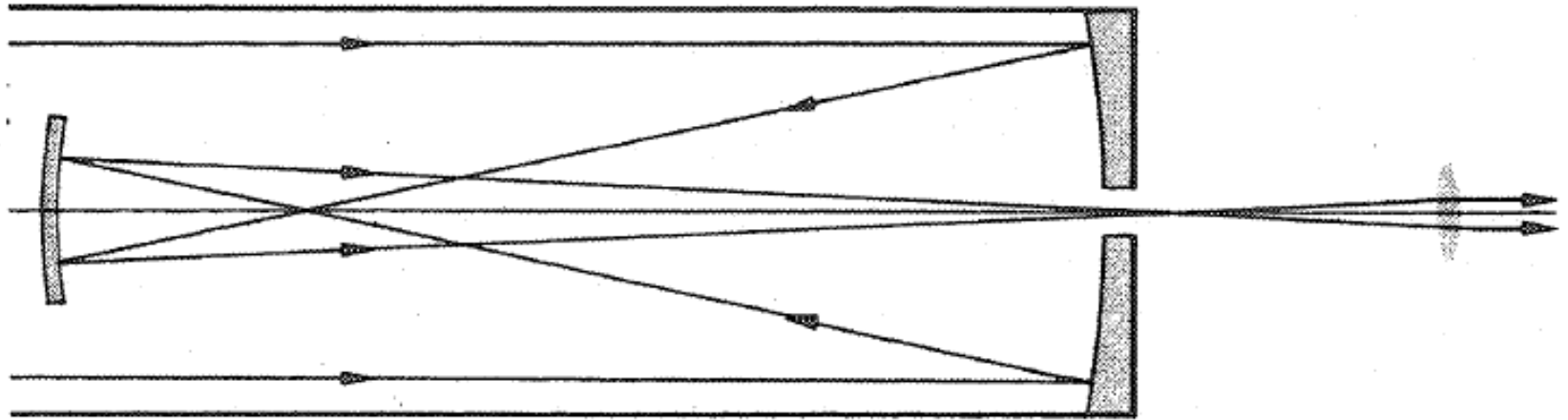


Foyer primaire (a)



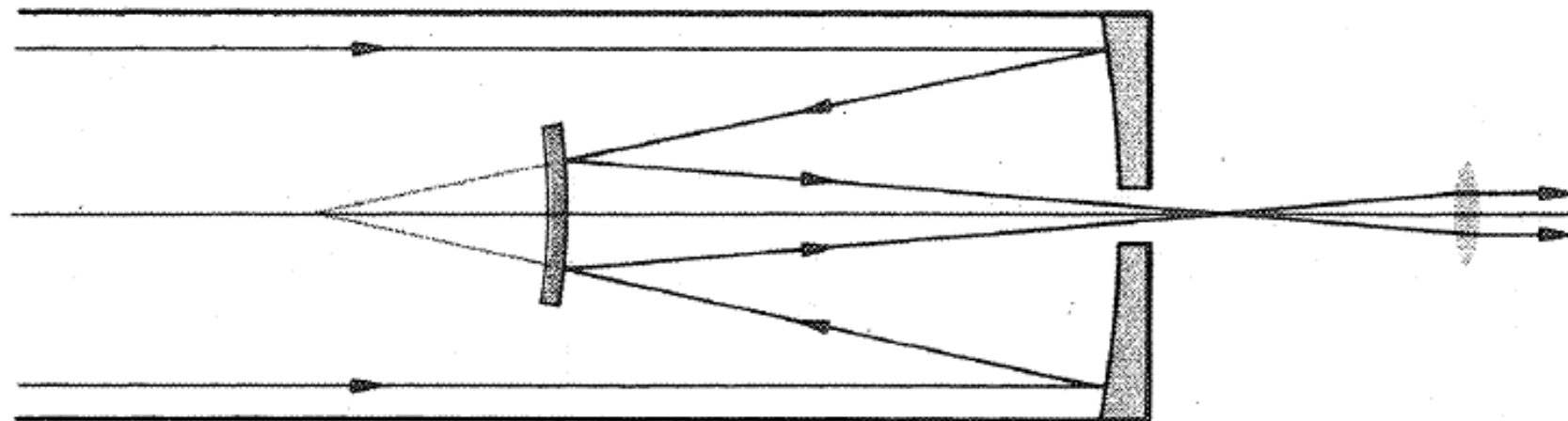
Newton (b)

Configurations de télescopes



Gregory (c)

Dans la configuration de *Gregory* (figure 5.111c), un miroir secondaire ellipsoïdal concave redresse l'image et l'envoie à travers une ouverture pratiquée au centre du miroir primaire.

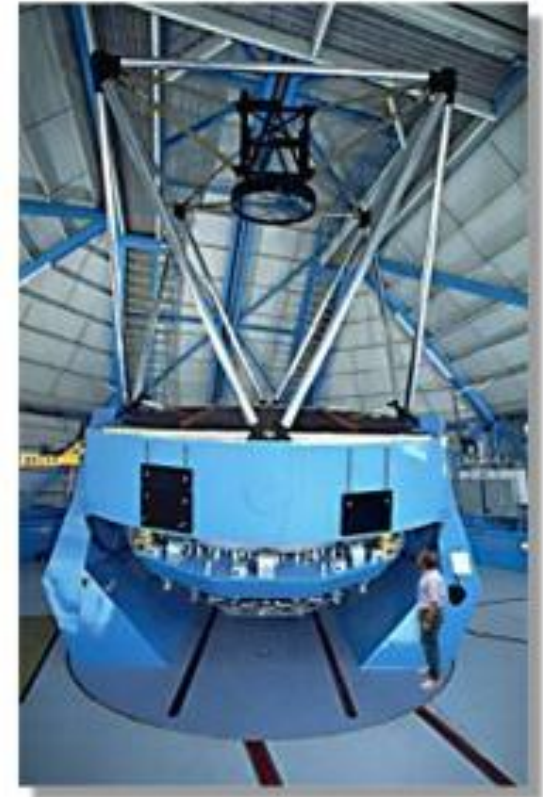
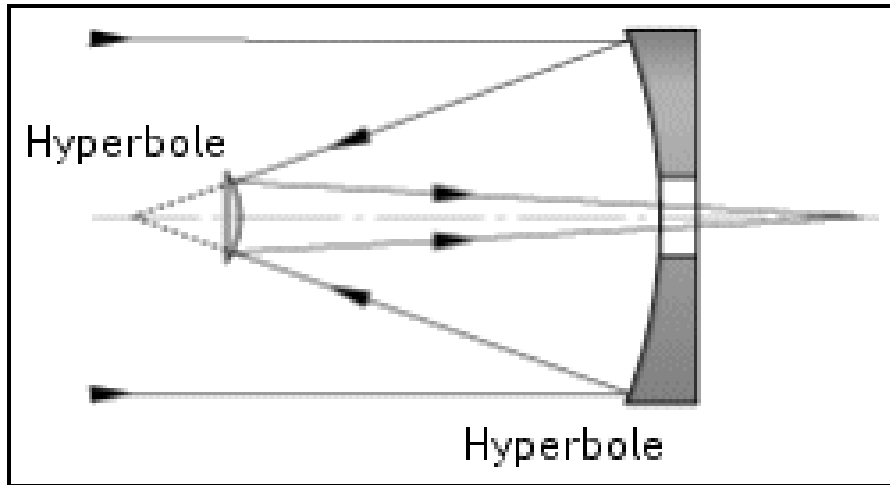


Cassegrain (d)

Le télescope de Cassegrain
(5.111d) utilise quant à lui un miroir secondaire hyperboloïdal convexe afin d'accroître la longueur focale effective de l'instrument

Tout se passe en effet comme si le

Télescope Ritchey-Chrétien



WIYN Telescope

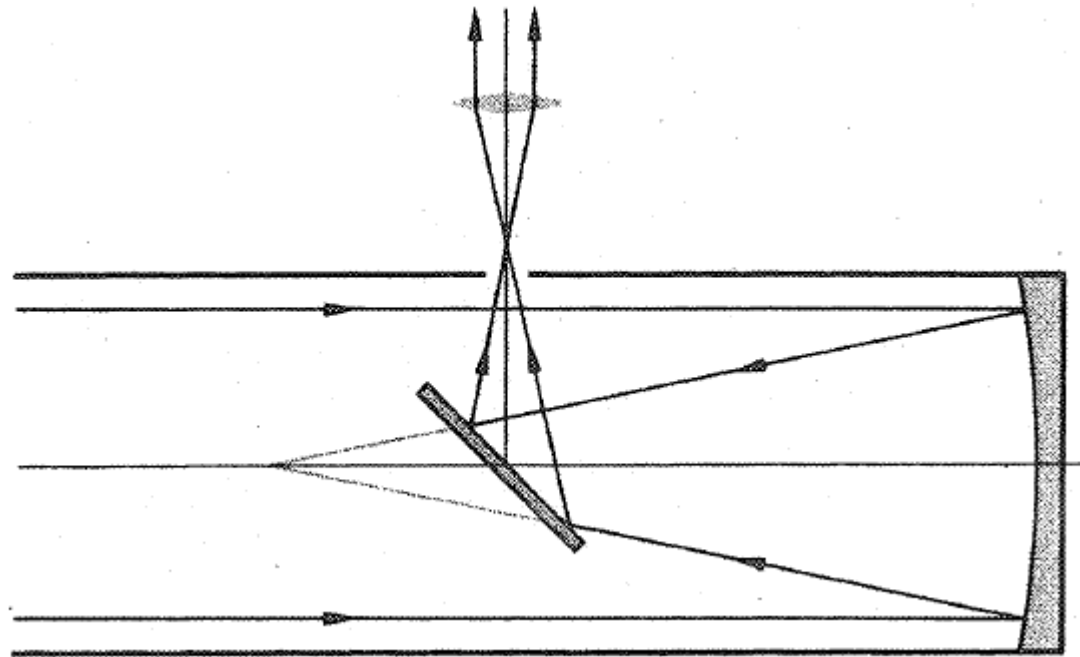
Le **télescope Ritchey-Chrétien** est un télescope de type Cassegrain particulier, conçu pour éliminer l'aberration optique appelée coma. Ce type de télescope fournit donc un champ d'observation relativement large comparé à une conception plus conventionnelle.

Dans le télescope Ritchey-Chrétien, le miroir primaire et le miroir secondaire sont **hyperboliques**.



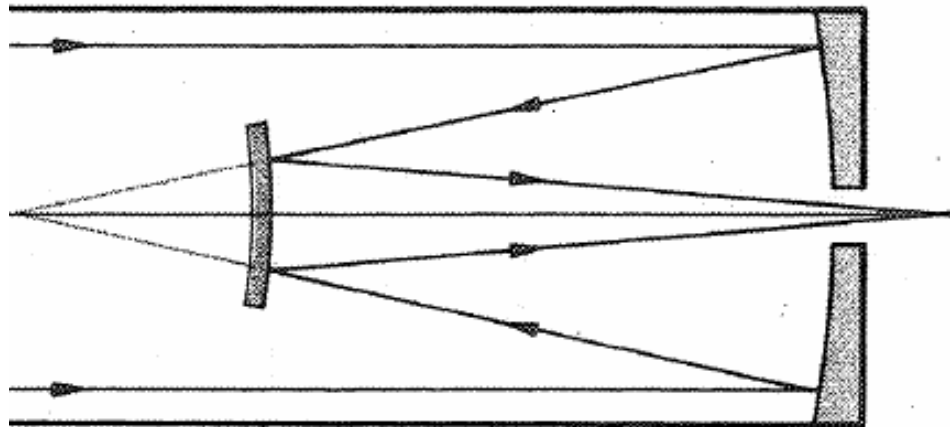
Exercice

- Un télescope de Newton est constitué d'un miroir concave de diamètre 10 cm, focale 40 cm, d'un petit miroir plan placé 30 cm devant le primaire.
- Où se trouve le foyer (plan de l'image d'un objet à l'infini ?)
- Quelle forme et taille minimale doit avoir le miroir de renvoi ?
- Si on a un oculaire (lentille mince) de focale 10 cm, où sera-t-il placé ?



Exercice

- Un télescope type Cassegrain rudimentaire est constitué de deux miroirs distants de 0.37 m:
 - Primaire (M1) que nous considérerons sphérique avec rayon de courbure $R_1 = 1$ m, diamètre = 0.25 m
 - Secondaire (M2) $R_2 = -0.35$ m
- Où se trouve le foyer (plan de l'image d'un objet à l'infini) ?
- Quelle est la focale du télescope ?



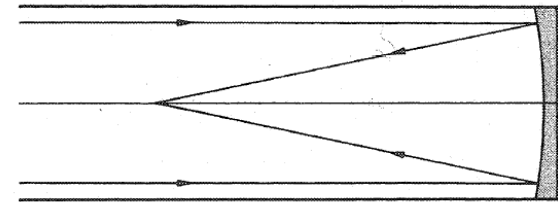
Champ de vision et aberrations

Le télescope simple à un seul miroir primaire paraboloidal (figure) fut construit pour fonctionner avec des rayons entrants suivant son axe optique.

Mais il y a toujours des objets intéressants dans le champ ailleurs que le long de cette direction précise.

Lorsqu'un pinceau de rayons parallèles dirigés hors de l'axe est réfléchi par le paraboloïde, les rayons ne se croisent pas tous au même point.

L'image d'un point hors de l'axe lointain (par exemple, une étoile) est une tache désaxée asymétrique en raison de l'effet combiné des aberrations de coma et d'astigmatisme.



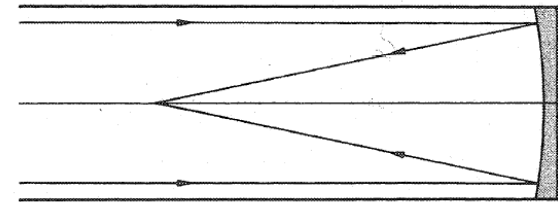
Foyer primaire (a)

Plus l'objet est désaxé, plus l'image devient d'une qualité inacceptable.

Ce phénomène est lié spécialement à la contribution de la coma et il peut être corrigé en limitant le champ à une valeur acceptable.

Mais même pour un système très peu ouvert de $f/10$, celle-ci ne correspond qu'à un petit rayon angulaire de 9 minutes d'arc. Elle chute à un minuscule 1,4 minutes d'arc pour $f/4$.

De même, les configurations classiques à 2 miroirs ont des champs sévèrement limités par la coma.



Foyer primaire (a)

Télescopes aplanétiques

Le terme d'« **aplanétique** » désigne les systèmes optiques convenablement corrigés de l'aberration sphérique (p. 267) et de la coma. Il existe en fait des versions aplanétiques des télescopes de Cassegrain et de Gregory. Avec ses miroirs primaire et secondaire hyperboloïdaux, le télescope *Ritchey-Chrétien* constitue par exemple une version aplanétique du Cassegrain. De nos jours, cette configuration est devenue la plus courante pour les télescopes de plus de 2 mètres de diamètre.

Avec très peu ou aucune coma, le champ d'un Ritchey-Chrétien reste limité par l'astigmatisme. Ainsi, un instrument à $f/10$ dispose d'un rayon angulaire acceptable de 18 minutes d'arc, deux fois plus que pour un télescope paraboloidal équivalent. Comparé au Gregory aplanétique, le Ritchey-Chrétien possède un secondaire plus petit, qui obstrue donc moins de lumière, pour une longueur plus petite. C'est pour ces diverses raisons que cette configuration est si populaire.

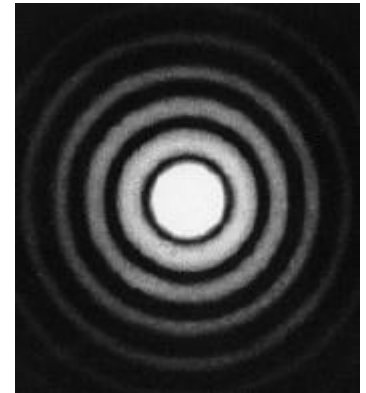
La limite de la diffraction

Quand la lumière d'une source ponctuelle éloignée est focalisée par une lentille ou un miroir, l'image formée sur un écran placé au plan focal est un disque circulaire entouré de plusieurs cercles secondaires de moins en moins intenses; ce n'est pas un point.

Les pourtours de la lentille ou du miroir jouent le rôle d'une fente.

La figure de diffraction produite par une ouverture circulaire (lentilles, miroir, œil humain) est symétrique autour du centre de la figure.

Il se produit une tache lumineuse circulaire, appelée **tache (ou disque) d'Airy** entourée d'un système d'anneaux concentriques d'intensité de plus en plus faible.



L'**angle** du premier anneau sombre, qui donc pratiquement définit le diamètre du spot central est donné par

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

On peut montrer qu'une ouverture circulaire de diamètre D suivie par une lentille ou un miroir de distance focale f engendre une figure de diffraction sur un écran placé au plan focal avec une tache d'Airy de rayon r_a .

Comme les angles sont petits, on peut approximer le demi angle d'ouverture θ en radians par

$$\theta \approx \sin \theta = r_a / f$$

et donc

$$r_a = 1.22 \frac{f \lambda}{D}$$

Pouvoir de résolution

- Le **pouvoir de résolution** est la capacité d'un système optique à révéler les détails, il gagne en finesse avec le diamètre de l'objectif. Le pouvoir de résolution mesure le plus petit **angle** séparant deux points que l'on parvient à voir comme distincts l'un de l'autre, soit environ 1 minute d'arc pour l'œil humain.
- Ainsi l'expression

$$r_a = 1.22 \frac{f \lambda}{D}$$

définit la **limite de diffraction du télescope**.

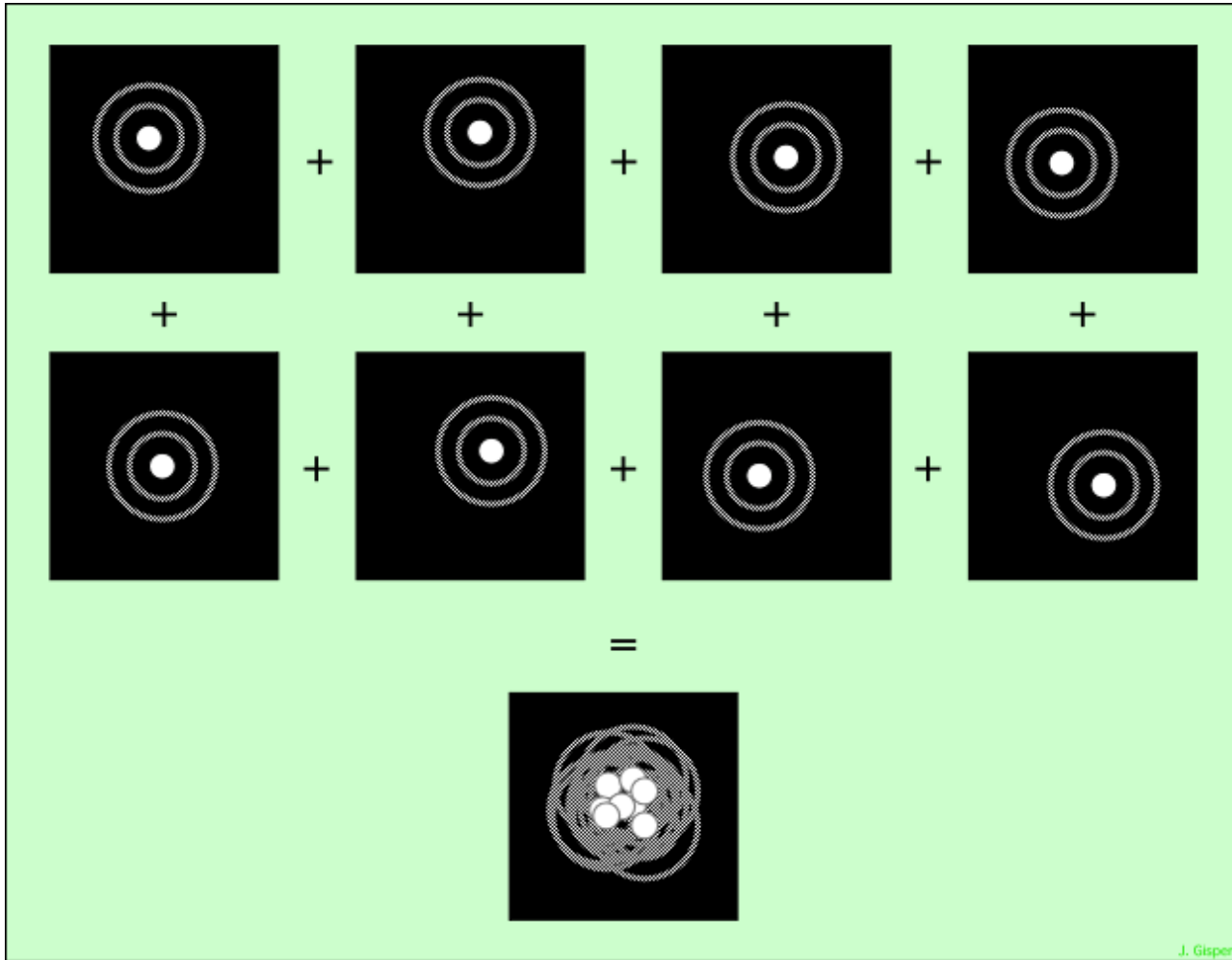
Par exemple, un télescope de 114 mm de diamètre a un pouvoir séparateur d'environ 1", un télescope de 200 mm a un pouvoir séparateur de 0,6".

- Toutefois, cette limite ne tient pas compte d'effets divers, tels que les turbulences atmosphériques, la stabilité de l'instrument et la qualité de l'objectif qui **empêchent** généralement d'atteindre la limite théorique de résolution.



Le seeing

- La lumière qui nous arrive des étoiles traverse l'atmosphère de la Terre avant de parvenir sur le miroir. Or l'atmosphère n'est pas parfaite optiquement, et son indice de réfraction varie au gré de la turbulence de l'air traversée.
- Ses défauts **limitent le pouvoir séparateur** d'un télescope, quel que soit son diamètre, à celui d'un instrument d'amateur de 30 cm de diamètre. Le pouvoir séparateur réel est de l'ordre de 1" d'arc seulement (et au mieux 0,4" dans des conditions exceptionnelles).
- Cet effet imposé par l'atmosphère se nomme le **seeing**.
- Cet effet est représenté par le **paramètre de Fried r_0** . En termes simples, r_0 est le diamètre d'un faisceau de rayons issus d'une source à l'infini, qui traversent ensemble les couches atmosphériques et arrivent, toujours bien parallèles et en phase au télescope.
- r_0 est aussi fonction de la longueur d'onde λ avec r_0 proportionnel à $\lambda^{6/5}$.
- Dans le visible r_0 varie de 10 cm à 30 cm pour les meilleurs sites.



Largeur à mi-hauteur (*FWHM*)

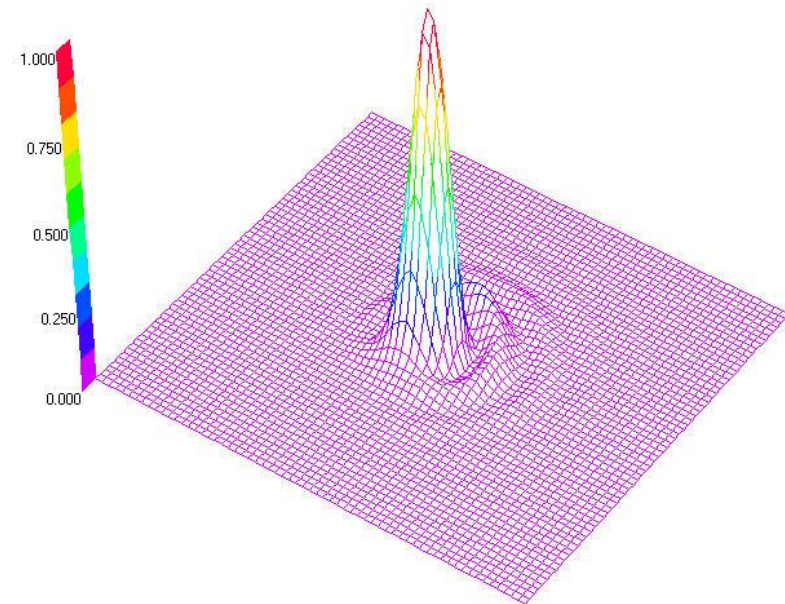
- Cela signifie aussi que les images de deux étoiles séparées d'un angle inférieur à 1 seconde d'arc ne forment qu'une tache indiscernable.
- Pour évaluer le diamètre de la tache dans ce cas on utilise la **largeur à mi-hauteur** (*FWHM*, *full width half maximum*) qui est donné par

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}$$

- Dès que le diamètre du télescope est plus grand que r_0 , la *seeing* domine largement la limite en diffraction et le **pouvoir de résolution effectif** est donné par cette relation.

Fonction d'étalement du point *PSF, point spread function*

- En général l'image d'un objet ponctuel est donnée par la fonction de transfert de la chaîne de détection : diffraction, aberrations, seeing,...
- Cette fonction de transfert, dans ce cas précis, s'appelle **fonction d'étalement du point**, soit FEP en français ou ***PSF*** en anglais (***point spread function***).
- Connaître ou estimer la fonction d'étalement du point est une étape indispensable pour le traitement d'image.



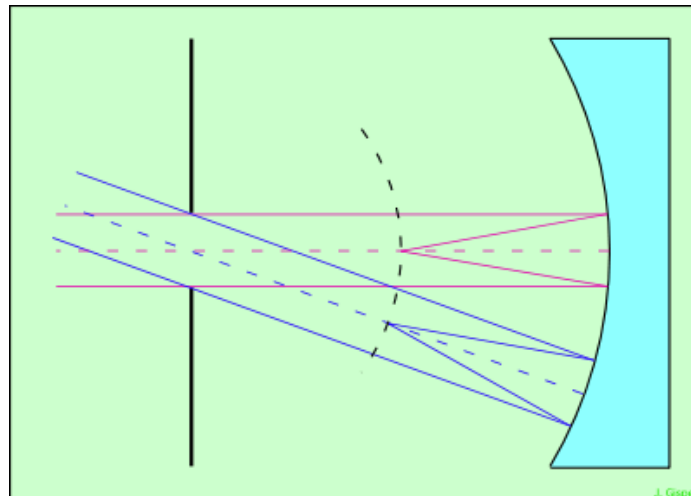
Télescopes catadioptriques

Un système catadioptrique comporte à la fois des miroirs et des lentilles.

Un **télescope Schmidt** est un type de télescope construit de sorte à garantir un important champ de vue tout en limitant les aberrations optiques.

Il utilise un **miroir sphérique**.

Pour limiter les aberrations, on sait qu'on ne peut pas utiliser les rayons loin de l'axe. Ainsi un diaphragme placé **devant** le miroir, supprime ces rayons.



Télescope de Schmidt

On sait aussi que le foyer d'un miroir sphérique se trouve à mi-chemin du centre de courbure. Comme les différents faisceaux ont chacun son axe, les différents foyers se trouvent sur un cercle de même centre que le miroir, et de rayon moitié. Par conséquent, les images se formeront sur une surface sphérique.

Pour rétablir la situation, il faut modifier le trajet de ces différents rayons. Ceci se fait par interposition d'une **lame transparente**, d'épaisseur **variable**. On la nomme *lame de Schmidt*.

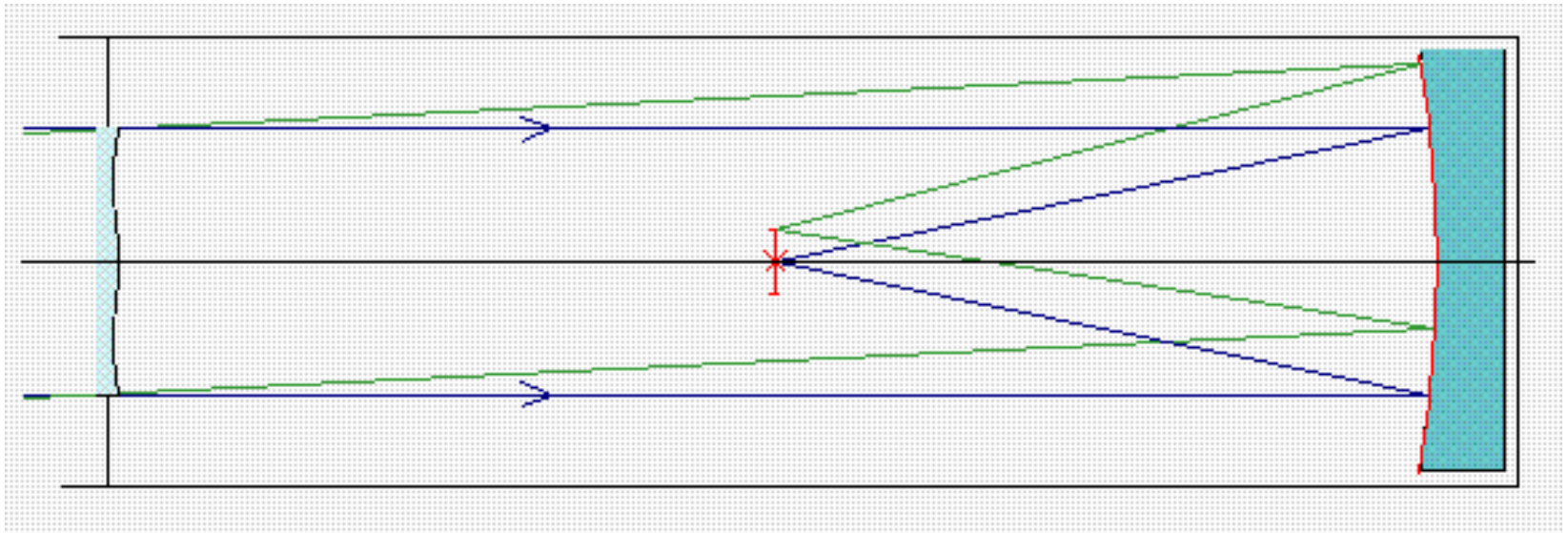


Schéma d'un télescope de Schmidt : on remarque le diaphragme et la lame d'épaisseur variable.

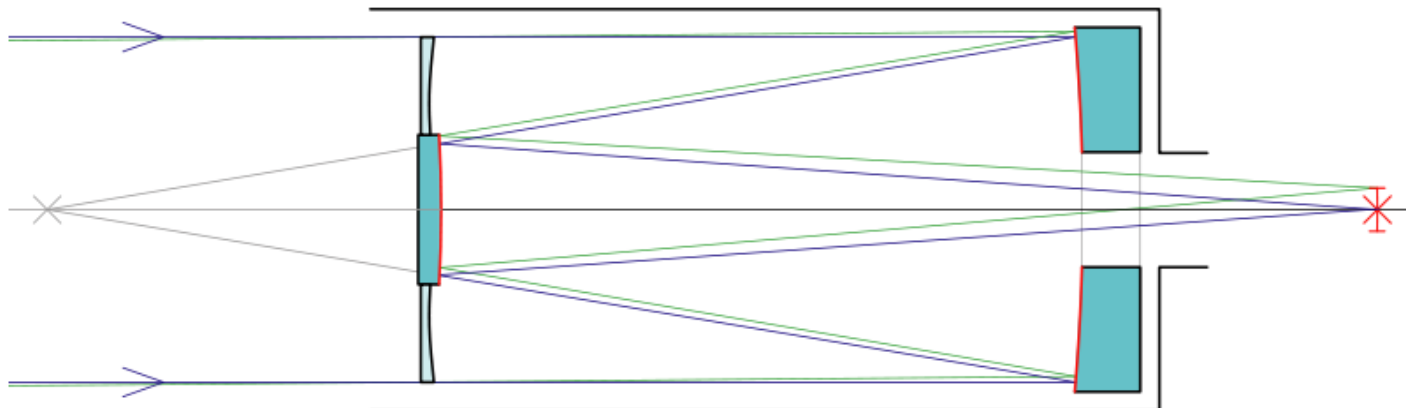
Télescope de Schmidt-Cassegrain

Le télescope Schmidt-Cassegrain est un dispositif optique de type catadioptrique, composé de deux miroirs, un miroir primaire concave et sphérique et un miroir secondaire convexe hyperbolique, ainsi que d'une lentille appelée lame de Schmidt.

Il s'agit d'une évolution du dispositif réflecteur proposé en 1672 par Laurent Cassegrain, développée en s'appuyant sur la chambre de Schmidt développée par Bernhard Schmidt en 1931.

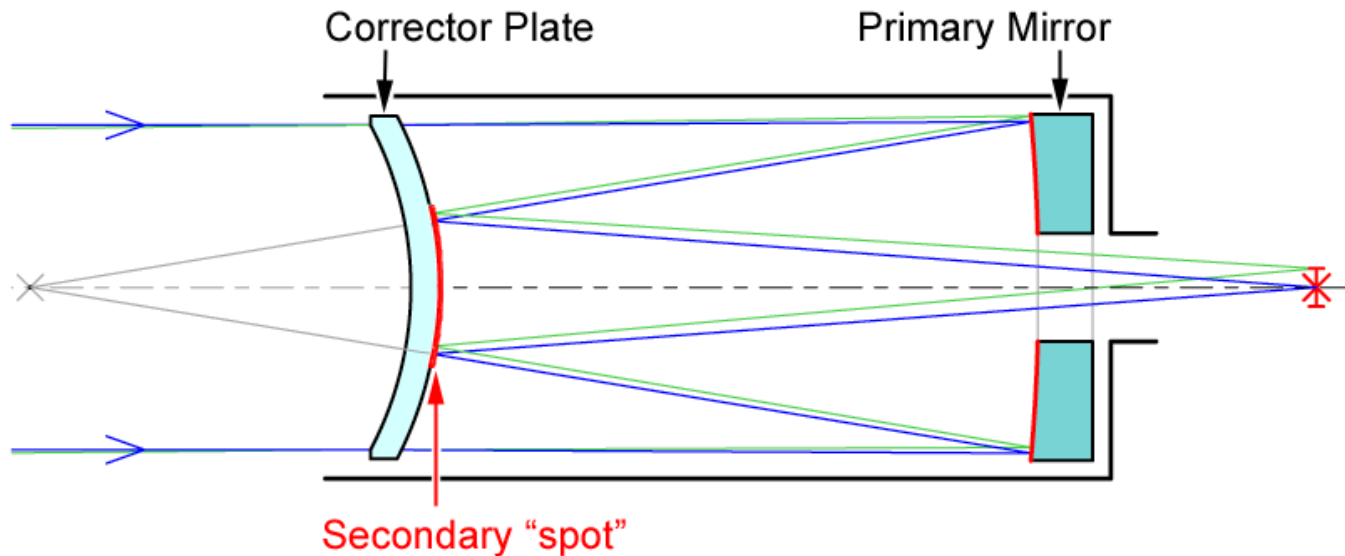
De conception proche du télescope de type Cassegrain, le télescope Schmidt-Cassegrain présente toutefois quelques particularités notables :

- le miroir primaire parabolique sur le télescope de Cassegrain devient un miroir sphérique, plus simple et moins coûteux à fabriquer ;
- pour corriger les aberrations sphériques engendrées par le miroir primaire, une lame de Schmidt est placée en entrée du télescope.



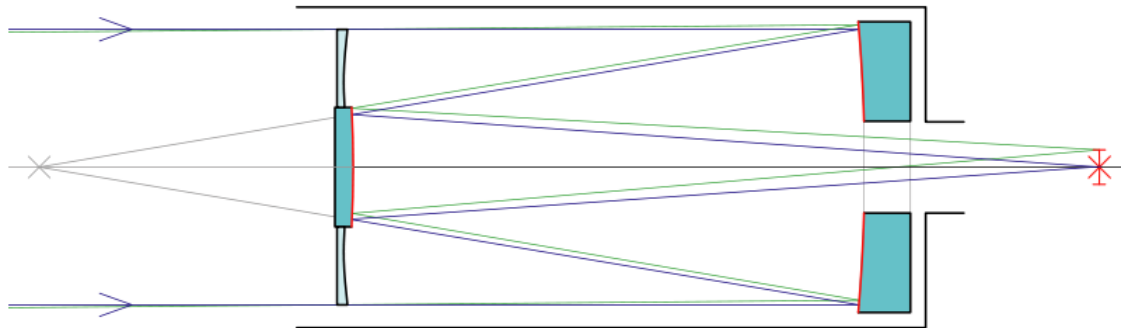
Télescope de Maksutov

- En lieu et place de la lame de Schmidt, on a un simple ménisque sphérique: c'est une lentille limitée par deux surfaces sphériques concentriques.
- La lumière traverse le ménisque, se réfléchit sur le miroir sphérique, repart vers le ménisque. Là, un miroir secondaire sphérique renvoie la lumière pour permettre l'observation.
- Le miroir sphérique secondaire peut avoir la même courbure que le ménisque.
- Aussi, il suffit d'aluminiser le centre du ménisque pour réaliser le miroir secondaire.
- Ainsi, l'ensemble des deux miroirs et du ménisque nécessite de tailler au total trois surfaces sphériques. C'est bien plus facile que la réalisation d'un Schmidt.



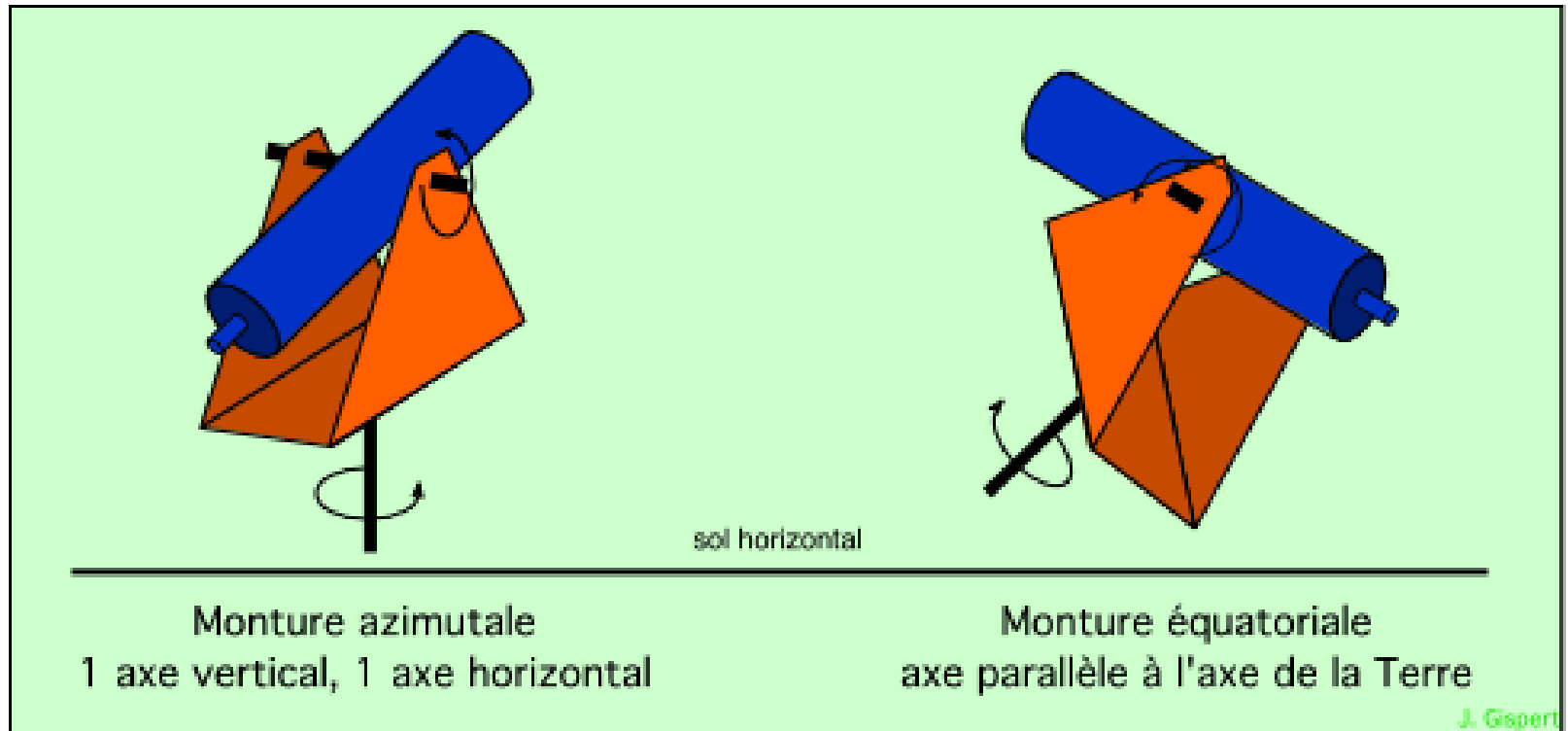
Télescope Meade (modèle commercial pour amateurs)

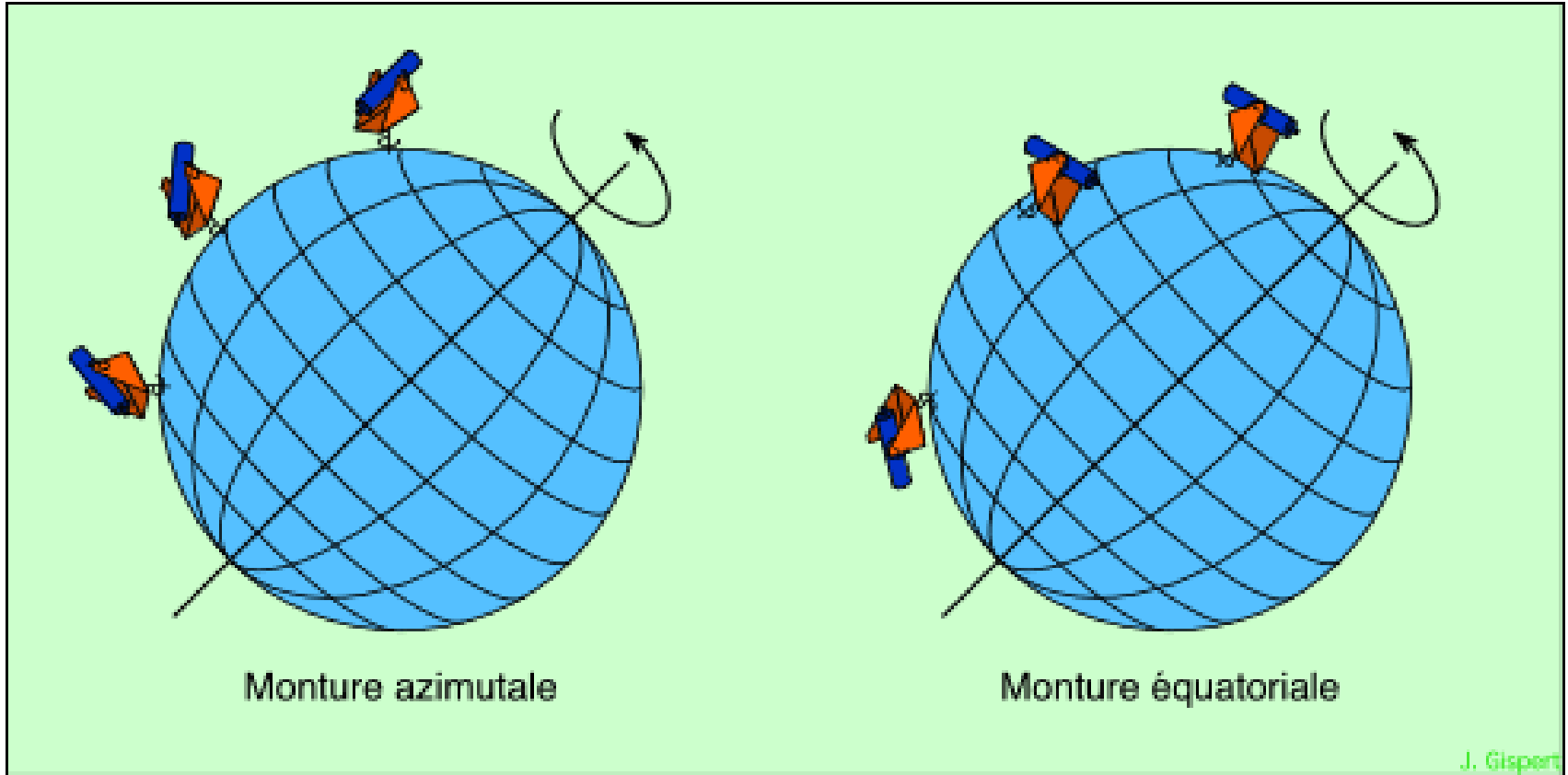
- Primaire sphérique
- Secondaire hyperbolique
- Lame correctrice



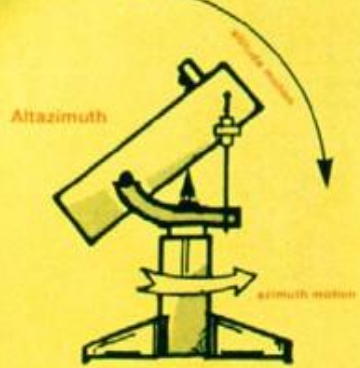


Les montures

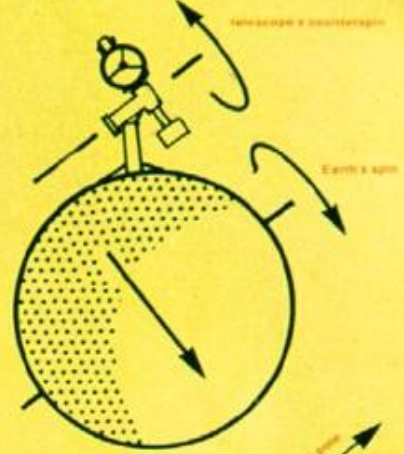




Types of Telescope Mountings



Altazimuth



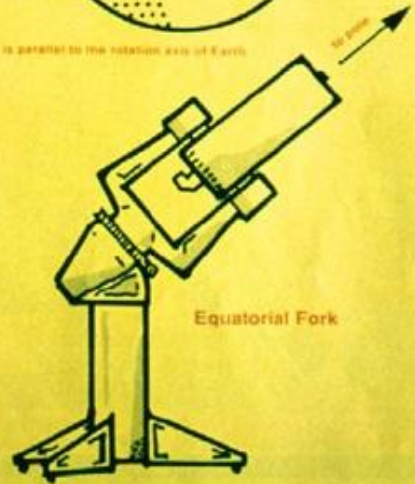
telescope's counter-rotation

Earth's spin

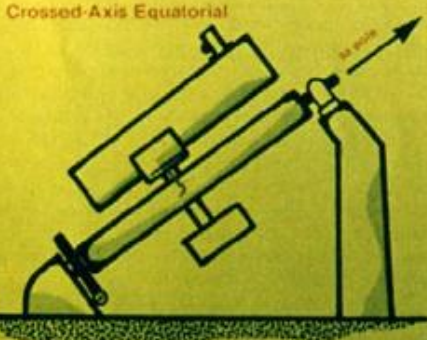
An equatorial's polar axis is parallel to the rotation axis of Earth.



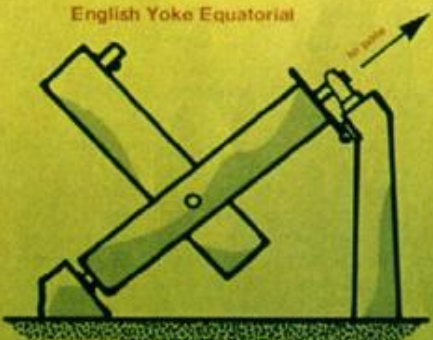
German Equatorial



Equatorial Fork

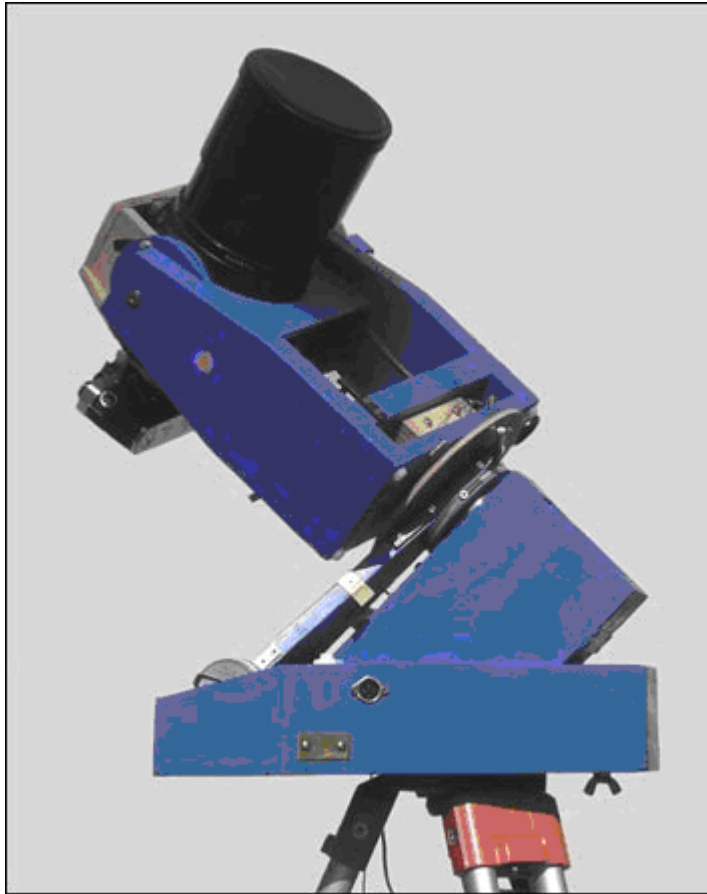


Crossed-Axis Equatorial



English Yoke Equatorial

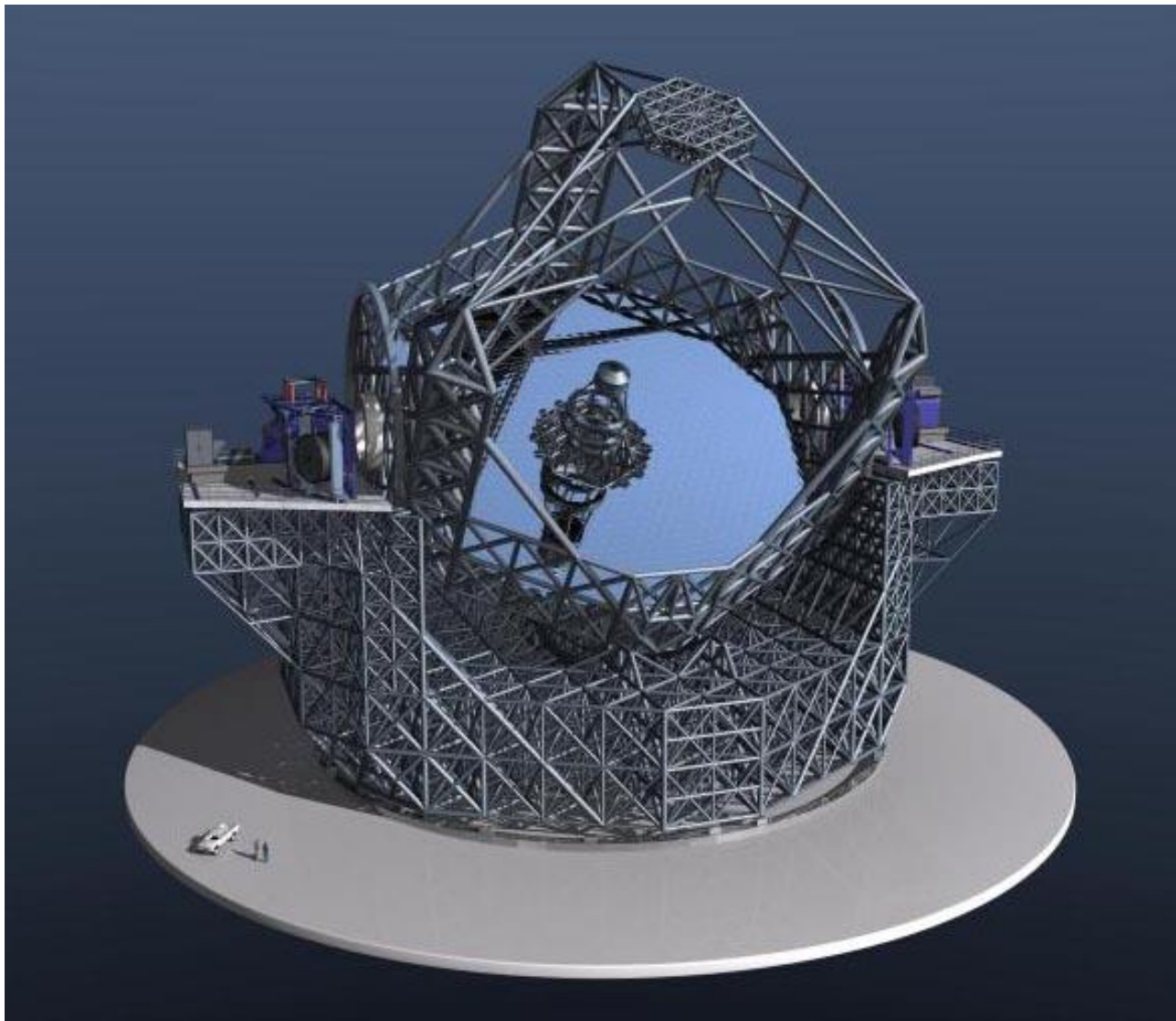
Montures équatoriales



Montures alt-az (altitude – azimuth)

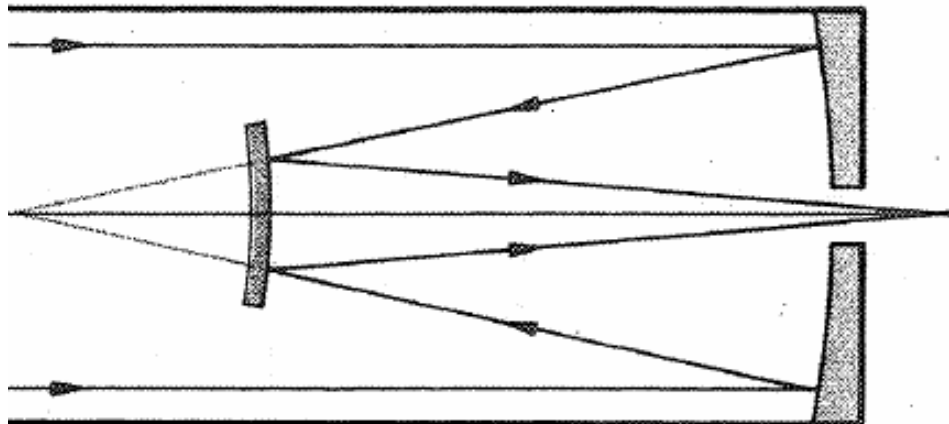


Le futur: E-ELT (D = ~45 m)



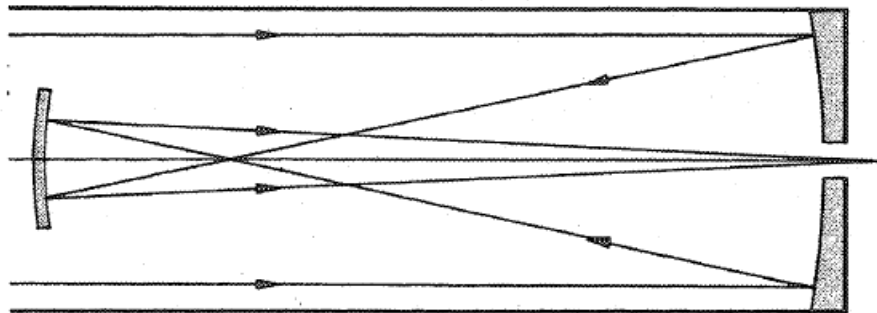
Exercice

- Un télescope rudimentaire est constitué de deux miroirs sphériques distants de 0.75 m:
 - Primaire (M1) rayon de courbure $R_1 = 2$ m, diamètre = 0.5 m
 - Secondaire (M2) $R_2 = -0.7$ m
- Où se trouve le foyer (plan de l'image d'un objet à l'infini), supposé placé derrière le primaire ?
- Si on veut observer des objets (points à l'infini) dans l'axe:
 - Quel est le diamètre requis pour le secondaire ?
 - Quelle est la taille nécessaire pour l'ouverture centrale dans le primaire ?
- Et si on désire un champ de vision de 1° (0.01745 radian), quels seront le diamètre minimum du M2 et celui de l'ouverture dans M1 ?



Exercice – travail personnel

- Un télescope (quasi-)grégorien est constitué de
 - Primaire sphérique (M1) avec rayon de courbure $R_1 = 4$ m, diamètre = 0.4 m
 - Secondaire (M2) sphérique concave $R_2 = 0.69$ m, situé à 2.4 m du primaire
- Où est le foyer du télescope ?
- Pour observer des objets (points à l'infini) dans l'axe, quel est le diamètre requis pour le secondaire ?
- Et si on désire un champ de vision de 0.01 radian, quels seront le diamètre minimum du M2 et celui de l'ouverture dans M1 ?



Simulation avec WinLens

Reprenons l'exercice déjà fait pour un télescope rudimentaire:

- Deux miroirs sphériques distants de 75 cm:
- Primaire (M1) rayon de courbure $R1 = 200$ cm, diamètre = 50 cm
- Secondaire (M2) $R2 = -70$ cm, diamètre 10 cm
- Paramètres généraux
 - Objet à l'infini
 - Champ de l'objet: 0.5 deg
 - Diaphragme de diamètre 50 cm -> rayon=25
- Faire le calcul paraxial
 - Observer le dessin du système et jouer avec les divers paramètres
 - Observer les aberrations transverses, chromatiques, **spot diagram**, etc.
- Transformer les miroirs de sphérique à parabolique, respectivement hyperbolique.
 - Observer le **spot diagram**, etc. ...

Travail personnel

- Lire le chapitre « Télescopes » du polycopié.
- Noter d'éventuelles questions, à poser la prochaine fois.

Conventions de signe pour les miroirs

- La focale f est **positive** pour un miroir concave, **négative** pour un miroir convexe.
- p est positif si l'objet est réel, négatif s'il est virtuel.
- p' est positif si l'image est réelle, négatif si elle est virtuelle.
- R , le rayon de courbure est généralement considéré positif si le miroir est concave, et négatif s'il est convexe.
(mais cette dernière convention varie selon les ouvrages !)