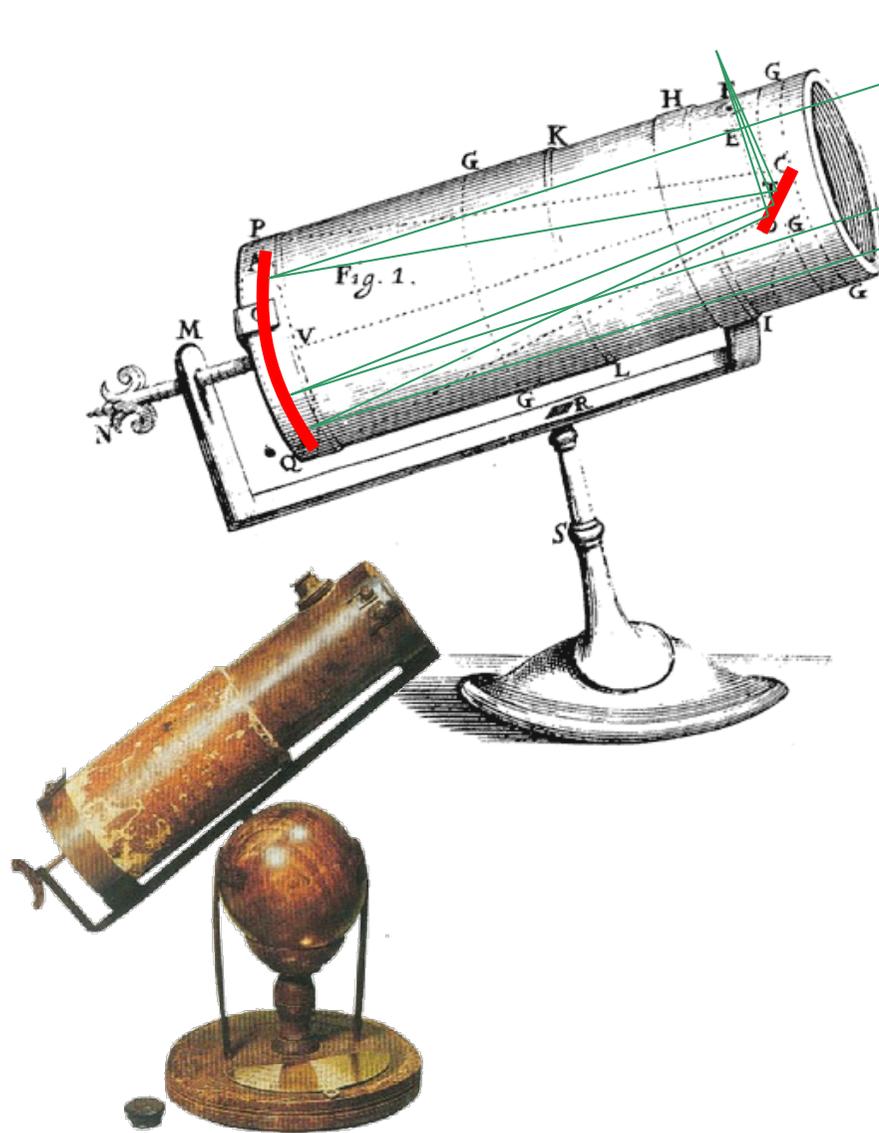


# Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
-  - **systemes optiques** (réfracteurs, **réflecteurs**)
- montures
- optique active
- optique adaptative
- instrumentation focale
  - les détecteurs pour le domaine visible
    - photométrie
    - imagerie
    - spectroscopie
- caractéristiques d'un système d'observation
- Les météorites  
pour l'exploration des corps du système solaire (J. Lasue)

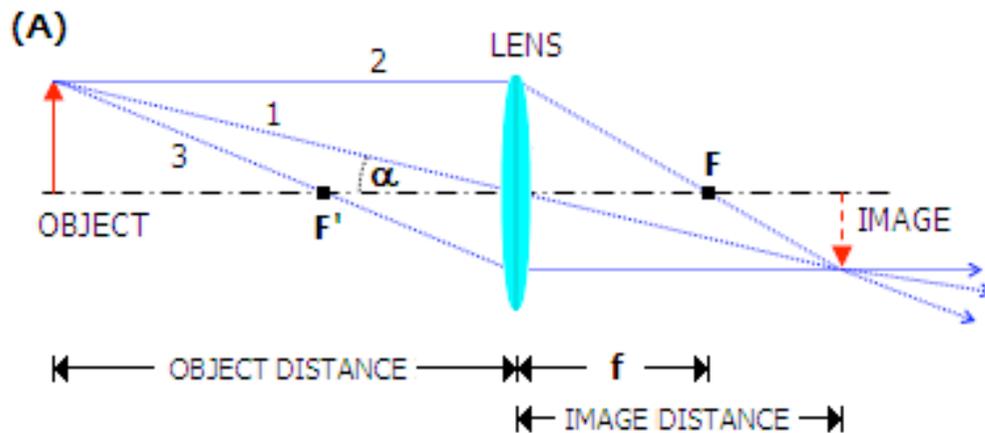
# Newton's telescope



This new instrument is composed of two Metallin lum's, the one Concave, (instead of an Object-glass) the other Plain; and also of a small plano-convex Eye-Glass.

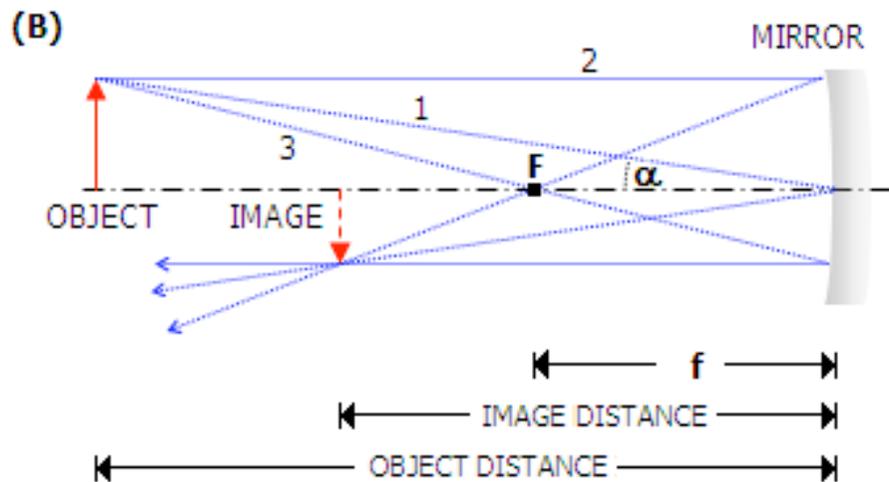
By Figure I. of Tab. I. the structure of it may be easily imagined; viz. That the Tube of this Telescope is open at the end which respects the object; that the other end is close, where the said Concave is laid, and that near the open end there is a flat oval speculum, made as small as may be, the less to obstruct the entrance of the rays of Light, and inclined towards the upper part of the Tube, where is a little hole furnish't with the said Eye-glass. So that the rays coming from the object, do first fall on the Concave placed at the bottome of the Tube; and are thence reflected toward the other end of it, where they meet with the flat speculum, obliquity posited, by the reflection of which they are directed to the little plano-convex Glass, and so to the spectators Eye, who looking downwards sees the Object, which the Telescope is turned to.

# lentilles vs. miroirs



## lentille

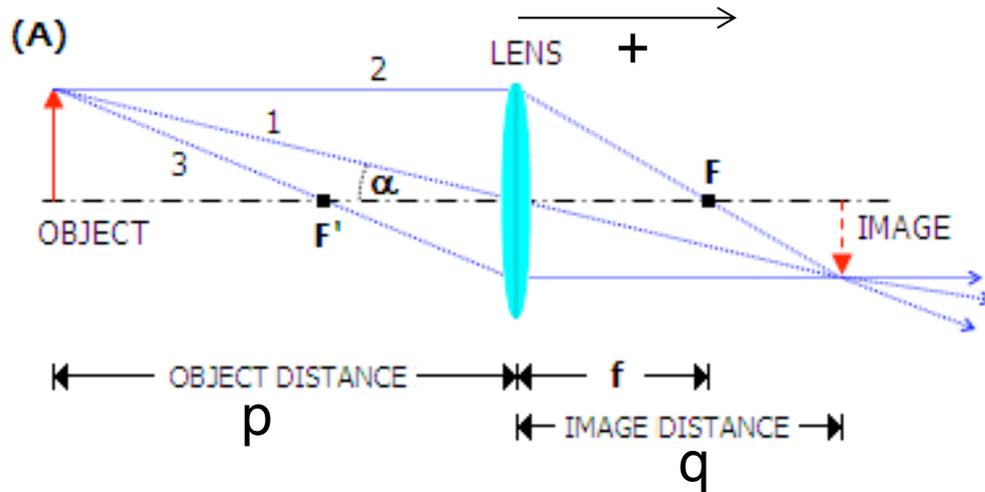
- polissage des deux faces
- lumière doit traverser le verre (dispersion  $\rightarrow$  aberration)
- montage par le bord uniquement



## miroir

- polissage d'une seule face
- lumière interagit avec la surface
- montage sur l'arrière  $\Rightarrow$  plus large

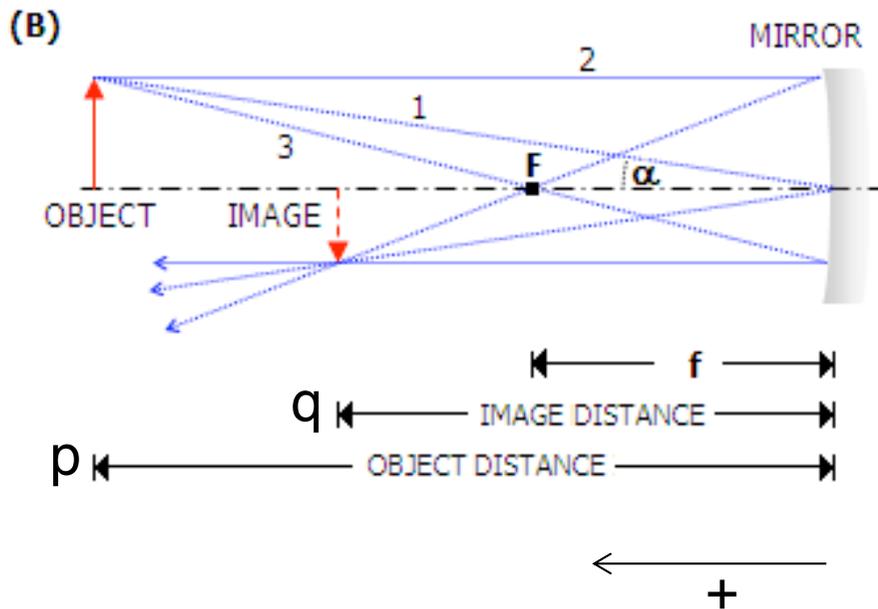
# lentilles vs. miroirs



## Lentilles minces

$$\frac{1}{q} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$$

$$m = -q/p$$



## Miroirs

$p$  et  $q$  sont positifs pour des grandeurs réelles, négatifs pour des grandeurs virtuelles;

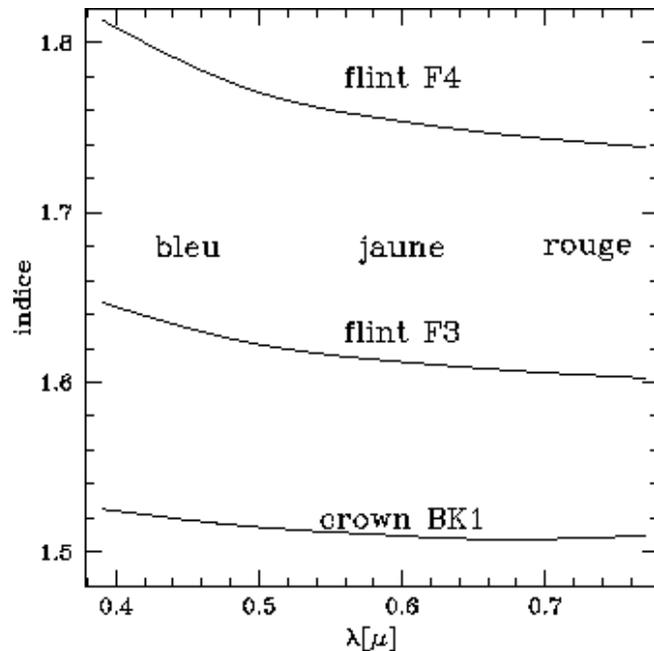
$f$  est positif pour un miroir concave (creusé), négatif pour un miroir convexe (bombé).

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

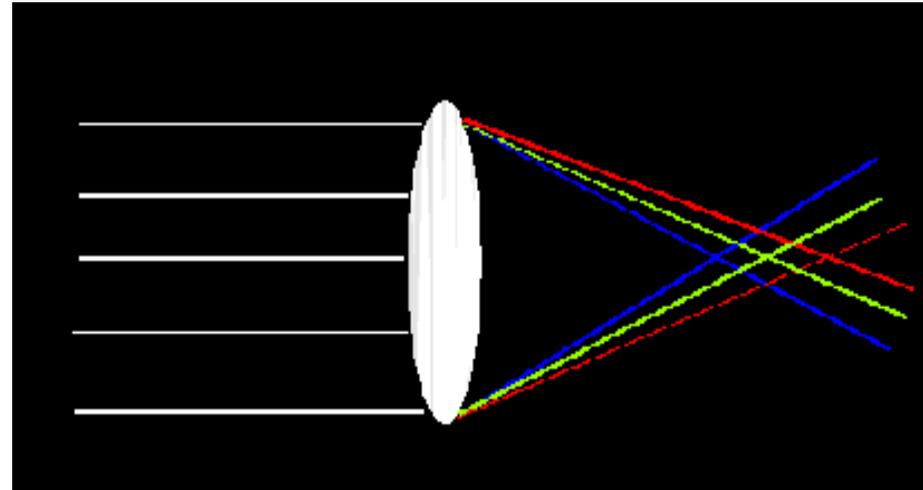
Grandissement  $m = q/p$

# lentilles - miroirs

Désavantages des réfracteurs: Aberration chromatique



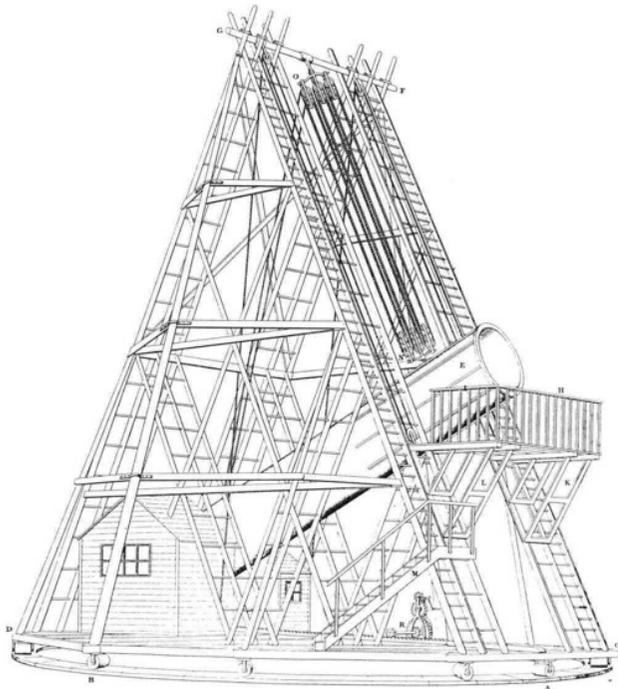
Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  ( $\mu$ m)



Une bonne partie des aberrations chromatiques (et autres) peut être corrigée par l'association de lentilles

Cependant il est impossible de fabriquer des lentilles d'une qualité optique parfaite et mécaniquement stables avec des diamètres  $> 1$  m.

# Les Télescopes au XIX ème siècle



vers 1800 William Herschel

D= 1,2 m F = 12, 2 m

miroir en bronze



1845, Lord Rosse

D = 1,8 m F = 16,6 m

miroir en bronze

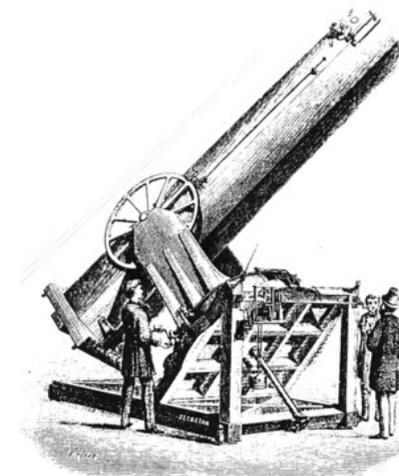
1862, Léon Foucault

D = 80 cm F = 4,8 m

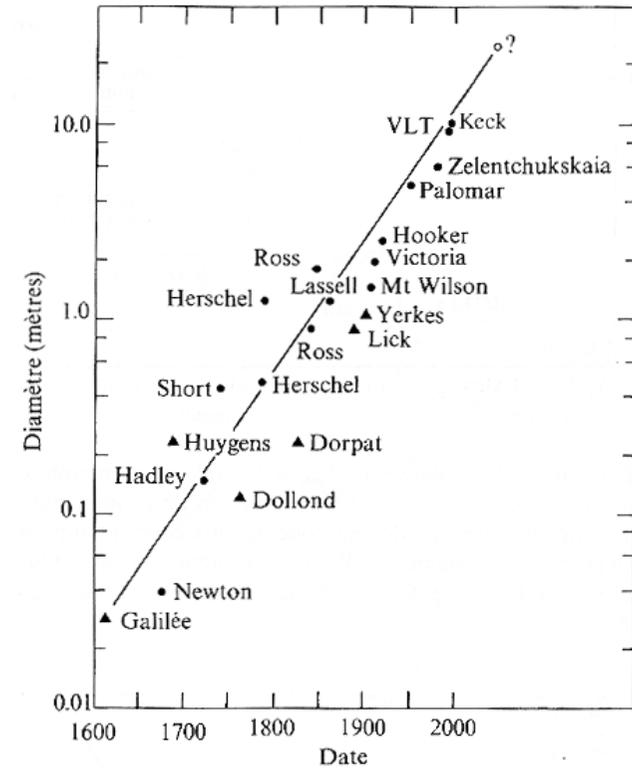
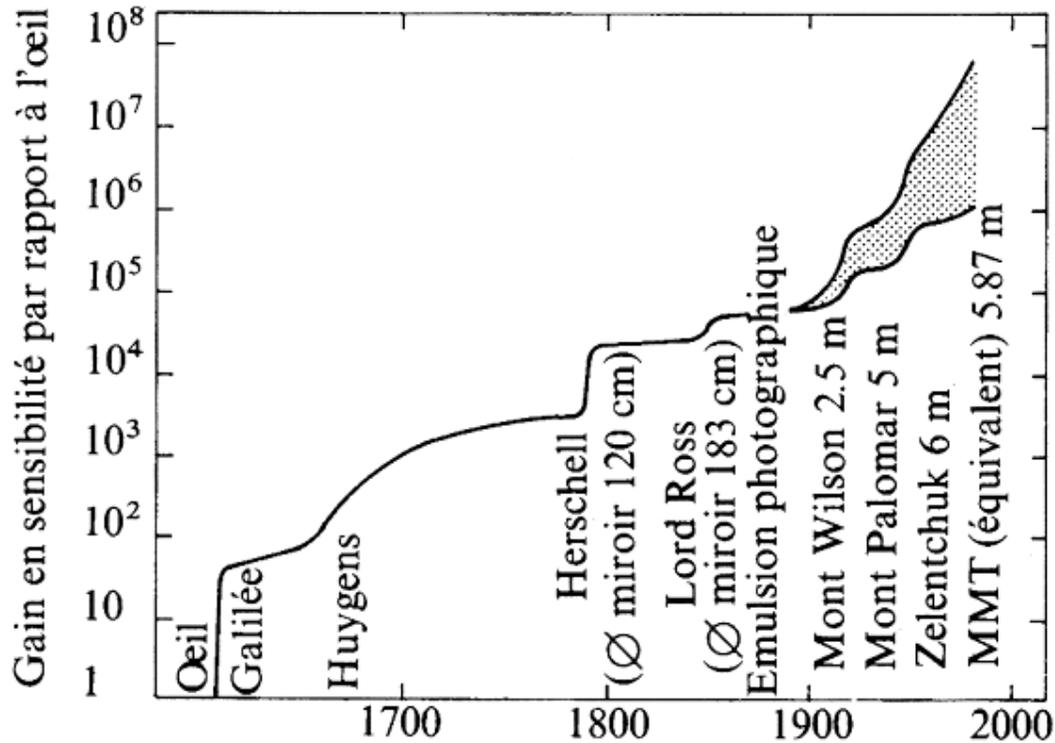
miroir en verre argenté

Observatoire de Marseille

Premier télescope "moderne"

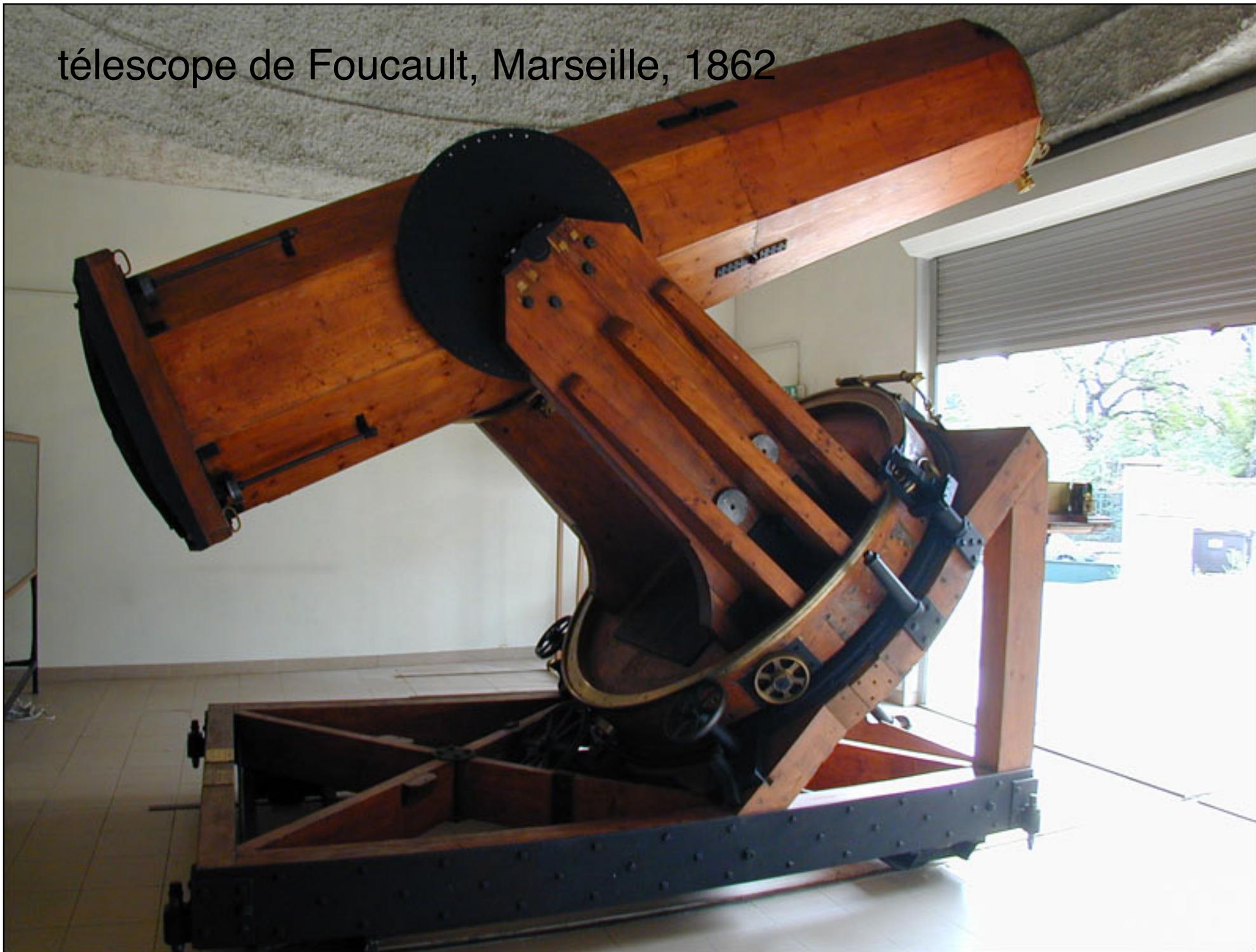


# progrès en sensibilité des télescopes optiques



progrès en sensibilité et évolution des diamètres des télescopes optiques

télescope de Foucault, Marseille, 1862



# Miroirs : Formes

miroir primaire :                   - surface sphérique  
  - coniques de révolution

Chaque surface possède 2 foyers conjugués - le rayon lumineux partant d'un foyer arrive à son foyer conjugué.

Surface parabolique - décrite par la courbe  $y^2 = 4Fx$

Le foyer proche de la surface est conjugué à l'infini - pas de champ  
la seule surface stigmatique : image ponctuelle d'un objet à l'infini dans l'axe.

Surface sphérique - décrite par la courbe  $y^2 + x^2 = (2F)^2$

Les deux foyers conjugués sont confondus au centre de la sphère.  
non stigmatique, mais proche pour les optiques peu ouvertes (rapport  $F/D \gg 1$ ) -> parabole

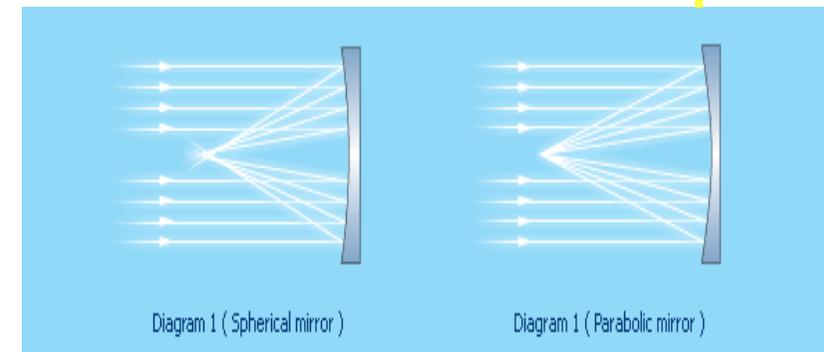
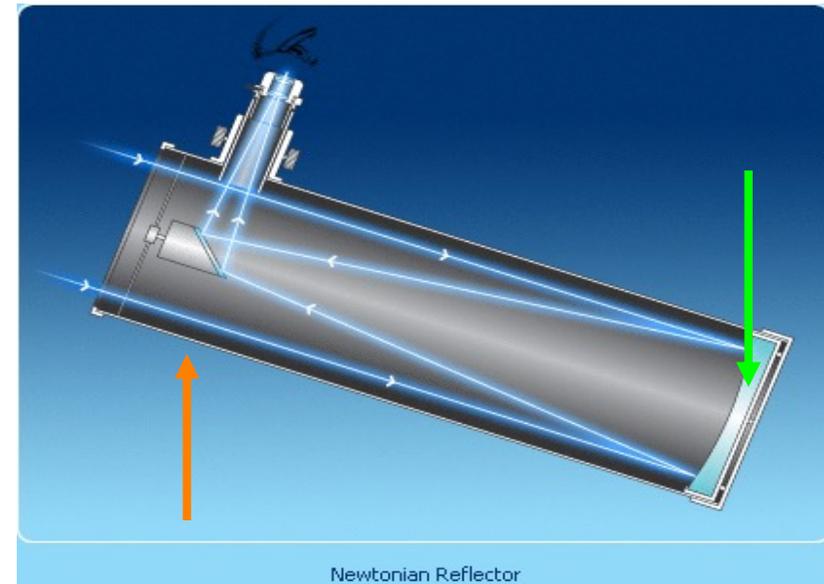
# Telescope de Newton (1672)

Miroir primaire sphérique

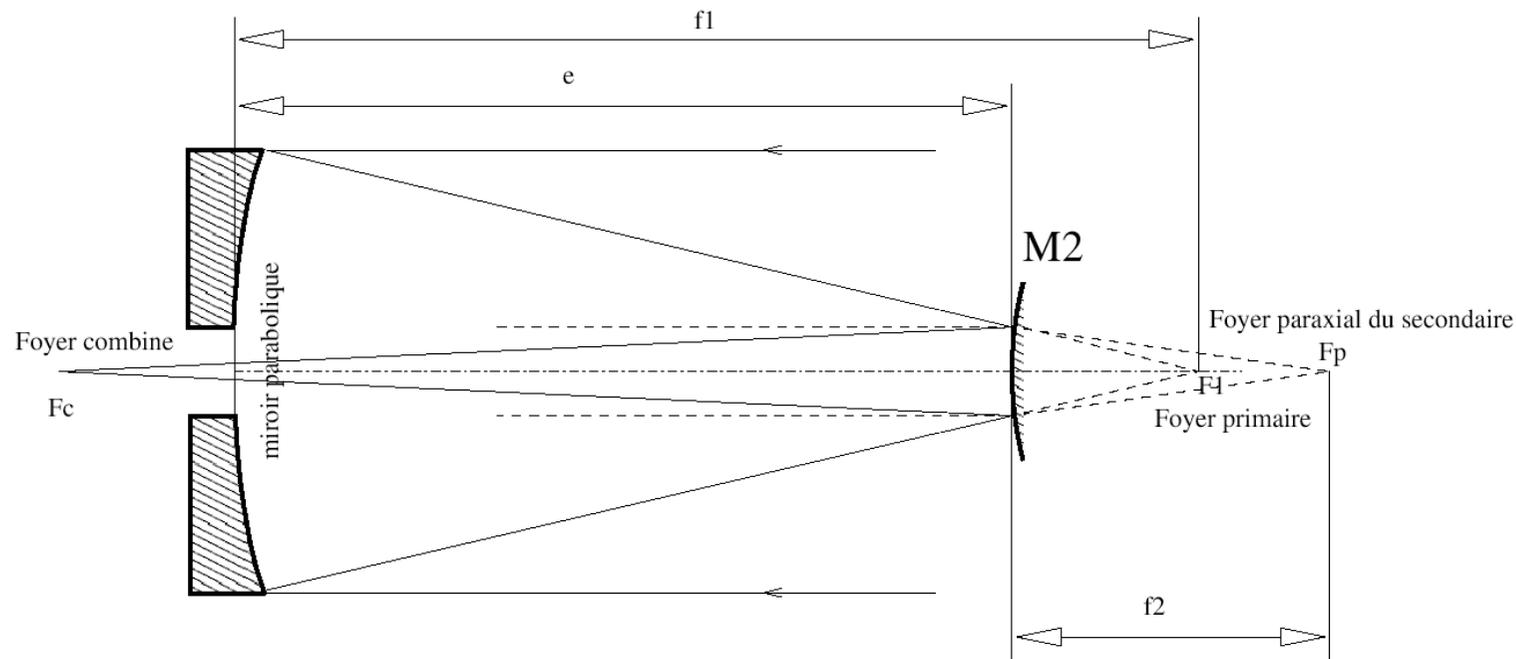
Miroir secondaire plan

*pas d'aberration chromatique*  
mais toujours de  
*l'aberration sphérique*

En 1721 John Hadley remplace le  
miroir sphérique avec un miroir  
parabolique ce qui élimine  
*l'aberration sphérique*



# Telescope Cassegrain (XVII<sup>e</sup>siècle)



- M1 Miroir primaire parabolique
- M2 Miroir secondaire hyperbolique
- F1 Foyers primaires du paraboloïde et un des foyers de l'hyperboloïde
- Fc Foyer combiné, confondu avec l'autre foyer de l'hyperboloïde
- f2 Distance focale paraxiale du secondaire (pour le rayon proche de l'axe)

allonge la focale effective de l'instrument, tout en lui gardant des dimensions compactes.  
très bon sur l'axe, mais ne supprime pas la coma, elle le réduit par le recours  
au  $F/D \gg 1$  au détriment de la grandeur du champ accessible et au prix de l'échelle focale

# Telescope Chrétien - Ritchey

combinaison aplanétique (deux miroirs hyperboliques M1 concave, M2 convexe)

=> ajuster les deux miroirs ensemble dans un but d'obtenir des paramètres voulus de la combinaison (ouverture, focale, champ) => conséquences importante sur le performances et fonctionnalités du télescope :

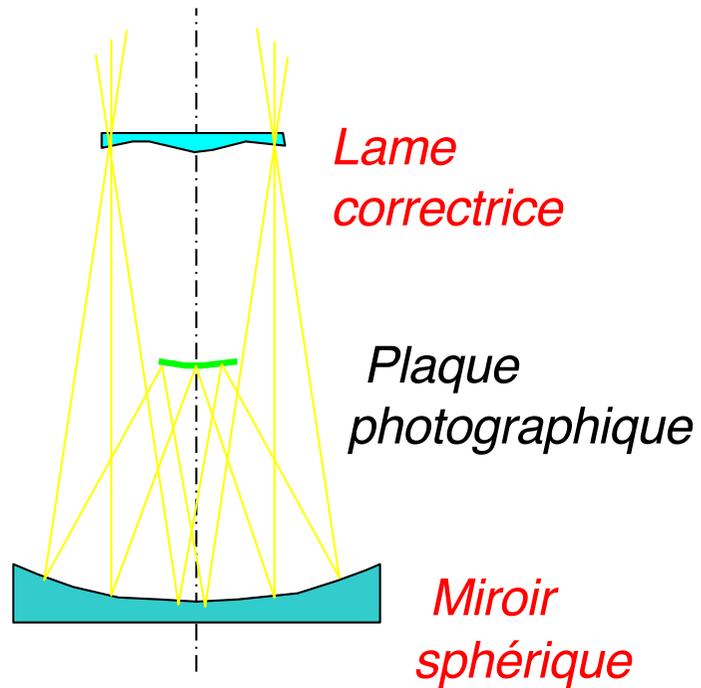
- aucun des miroirs n'a un foyer réel
- tests que par des moyens indirects
- foyer primaire n'existe plus
- image sur l'axe est légèrement dégradée
- toute erreur de surface dans un des miroirs est amplifiée par l'autre -
- alignement et stabilité mécanique du télescope sont difficile à atteindre.



aujourd'hui - calcul numérique (facilement accessible).

# Telescope de Schmidt-Cassegrain

1932 Bernard Schmidt



*Lame correctrice:  $D = 1,22\text{ m}$*

*Miroir:  $D = 2\text{ m}$*

*$F/D = 2,4$*

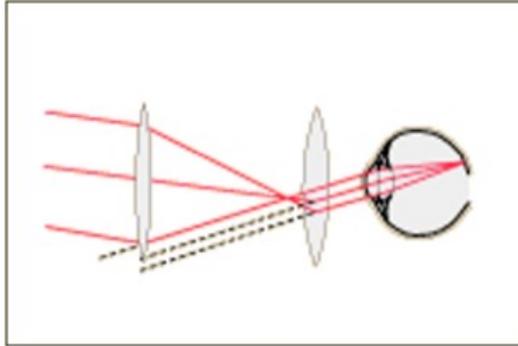
*Champ =  $6,5 \times 6,5^\circ$*

*échelle:  $67,14''/\text{mm}$*

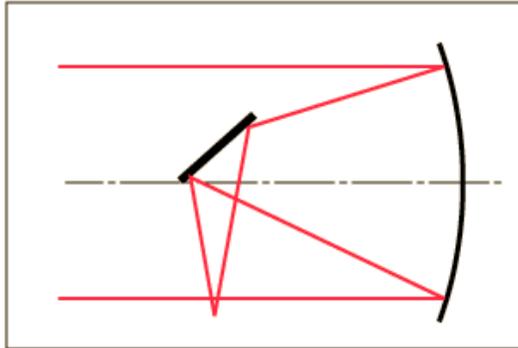


**1948 : télescope de Schmidt du Mont Palomar**  
**=> Photographie Astronomique à Grand Champ**

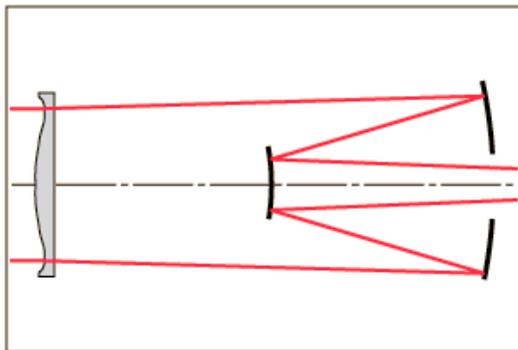
# familles de telescopes



systemes dioptriques - lentilles

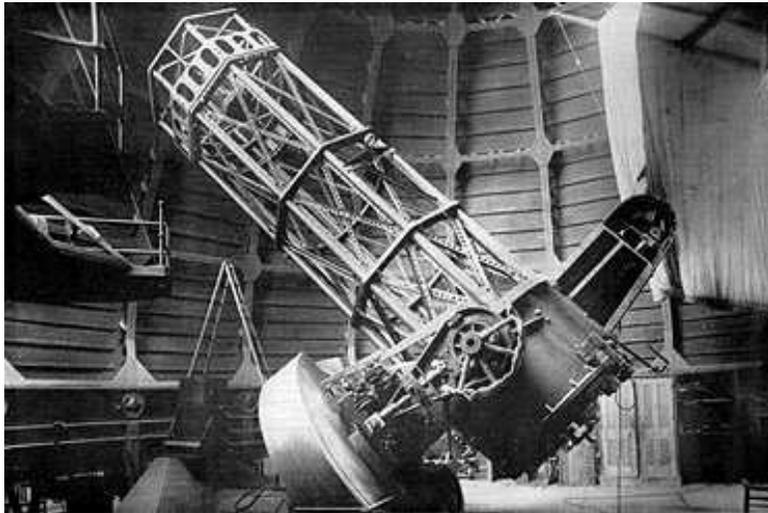


systemes catoptriques - miroirs



systemes catadioptriques - lentilles et miroirs

# Les grands Télescopes 1900 - 1950



## Observatoire du Mont Wilson

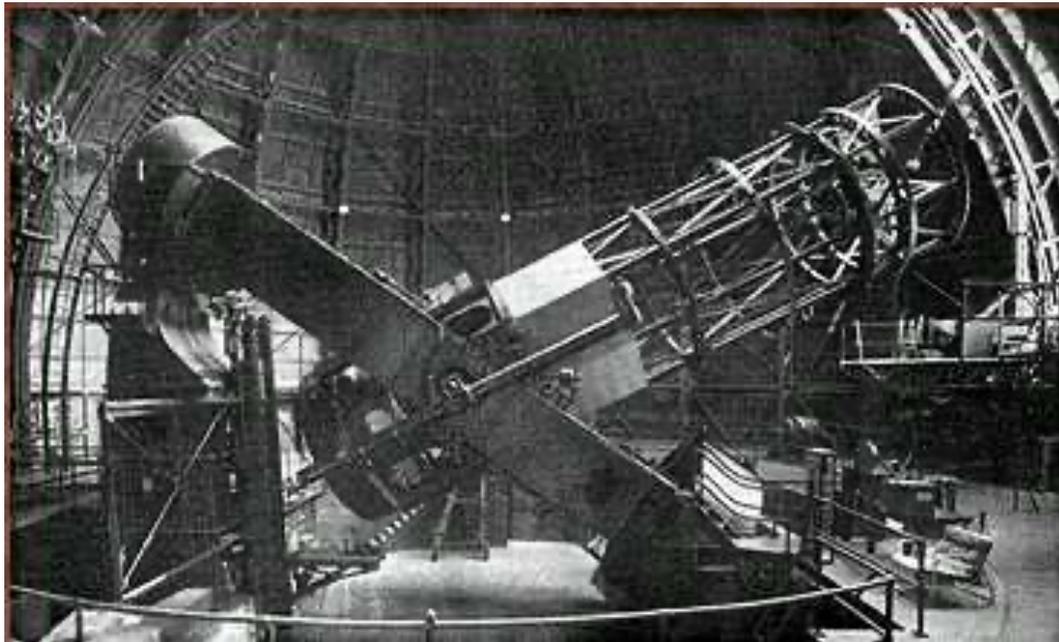
(Californie, E-U)

**1905**

Miroir en verre épais  $D = 1,5$  m

Foyer Cassegrain  $F = 7,6$  m

Foyer coudé



**1917**

Miroir épais en verre  $D = 2,57$  m

Foyer Cassegrain,  $F = 12,9$  m

# Les grands Télescopes 1900 - 1950



**1948**      **Observatoire du Mont Palomar (Californie)**

Miroir épais alvéolé en pirex  $D = 5$  m

Foyer primaire,  $F = 16,5$

Foyer Cassegrain

Foyer coudé

## Miroir : cahier des charges

- 1) La lumière doit être réfléchi de manière efficace – sur une large bande spectrale
- 2) La réflexion requiert une surface lisse (Lord Rosse : "true surface")
- 3) La focalisation demande une surface bien définie sur toute la surface du miroir (Lord Rosse : "accurate general figure ")
- 4) La surface réfléchissante doit être aussi grand que possible
- 5) La forme du miroir doit être stable quel que soit l'inclination du miroir
- 6) La forme du miroir doit être stable sous des conditions environnementales variés – en particulier des variations de température.

## Miroir : reflectivité

L'efficacité d'un télescope dépend de sa capacité de collecter la lumière

L'efficacité est proportionnelle à la réflectivité  $R$  des miroirs

Dans un telescope avec plusieurs miroirs ( $R$ ), la reflectivité du système est

$$R_{\text{tot}} = R^N, \quad \text{avec le } N \text{ le nombre totale de surfaces.}$$

p.e. pour un telescope Cassegrain, utilisé dans le foyer Nasmyth

$$N=3, R=85\% \quad \Rightarrow \quad R_{\text{tot}} = 61\%$$

1660-1860: Speculum (alliage CuSn) - surface polie = surface reflechissante

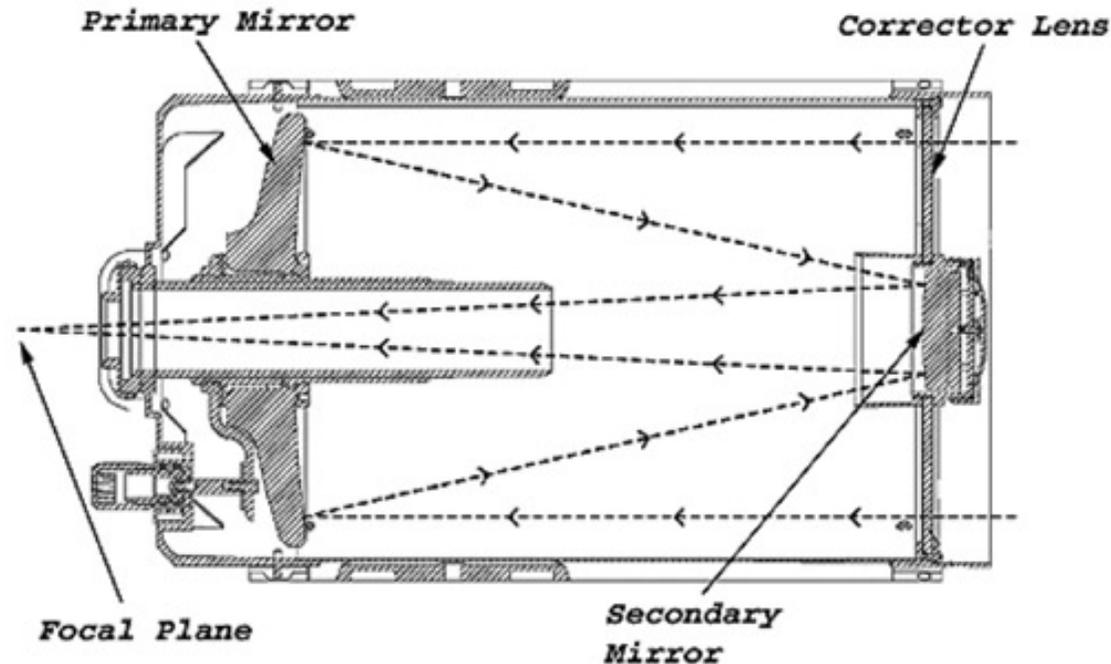
$$R \approx 66\% \text{ ternit rapidement} \Rightarrow 60\%$$

1860-1935: Argenture - Ag déposé chimiquement sur verre poli

$$R > 90\% \text{ (ternit qq peu)}$$

# Miroir : reflectivité

exemple : un telescope Schmidt-Cassegrain



the corrector lens transmits 92% of the light, and the primary and secondary each reflect 89% of the light, then total system transmission is

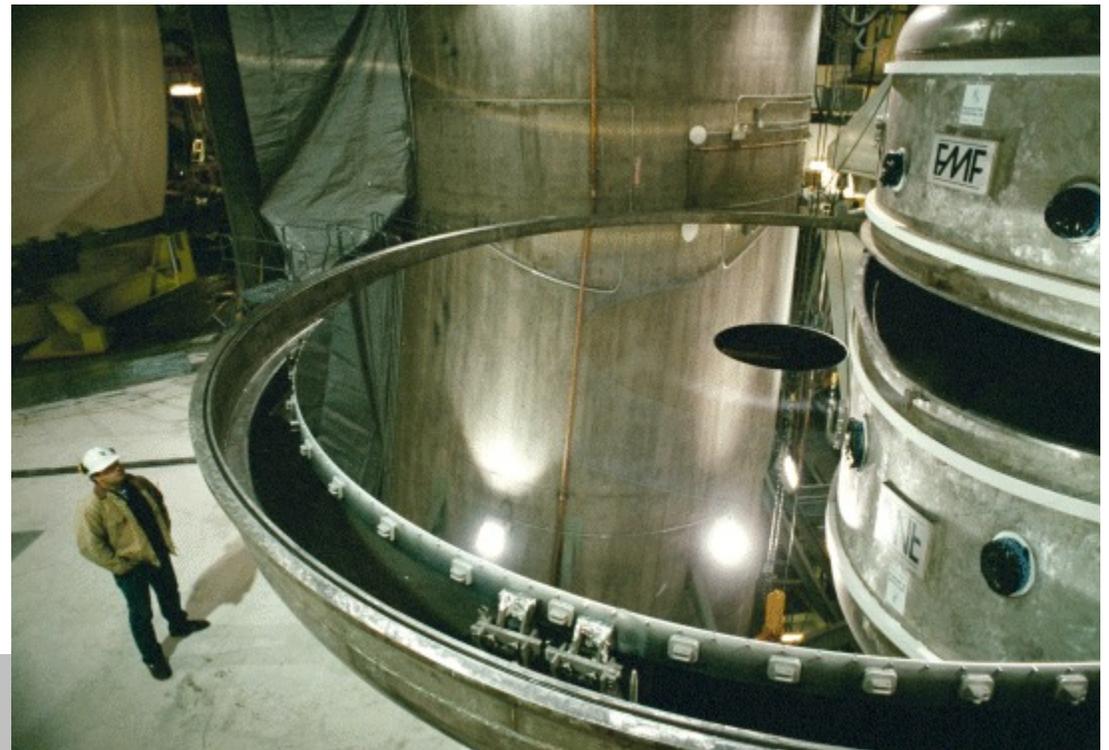
$$R_{\text{tot}} = 0.92 \cdot 0.89 \cdot 0.89 = 0.73, \text{ or } 73\%.$$

## Miroir : reflectivité

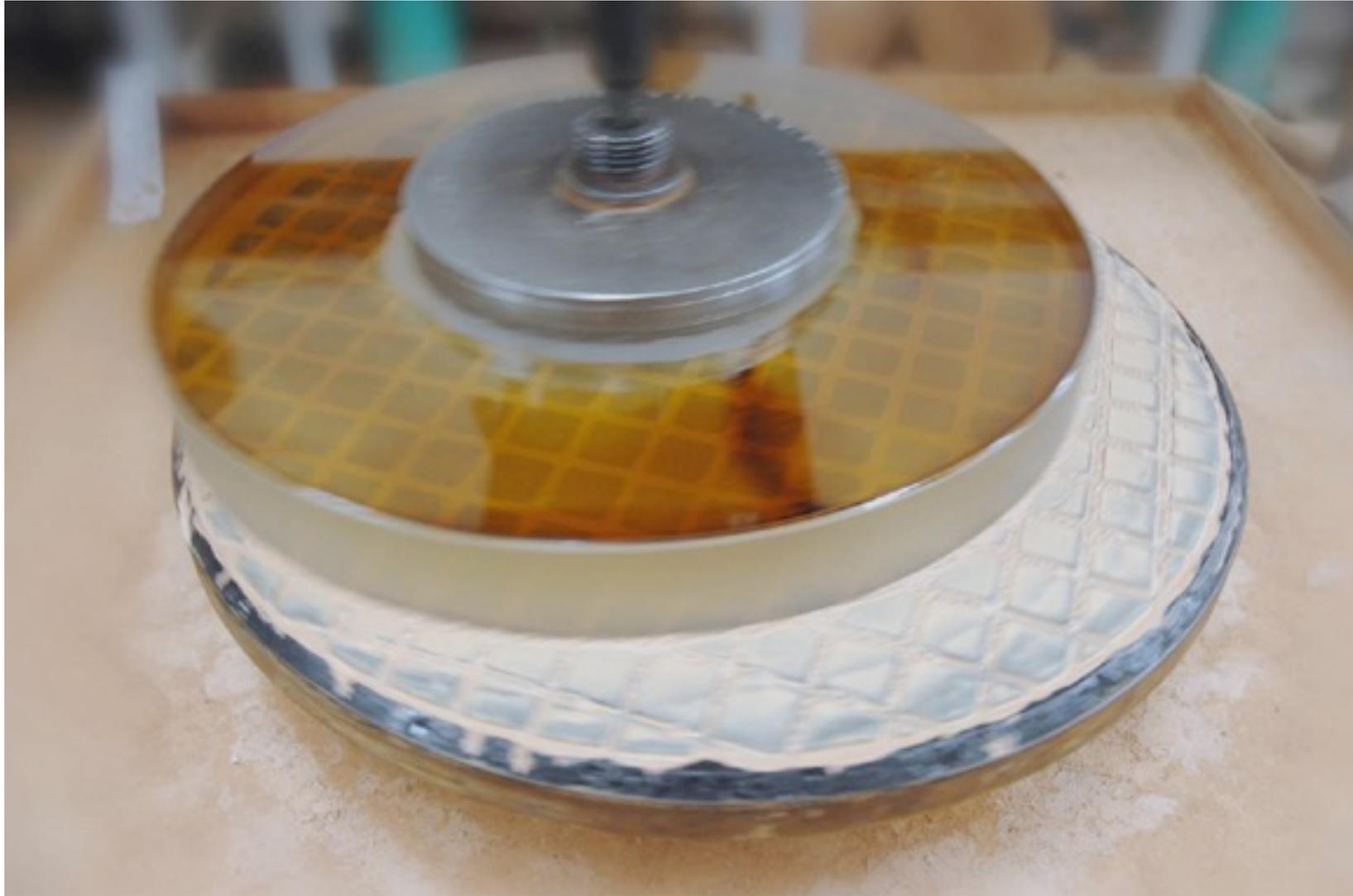
1935-2000:  
aluminisation des miroirs

Le miroir est placé dans une  
enceinte à vide ( $P \approx 10^{-6}$ );

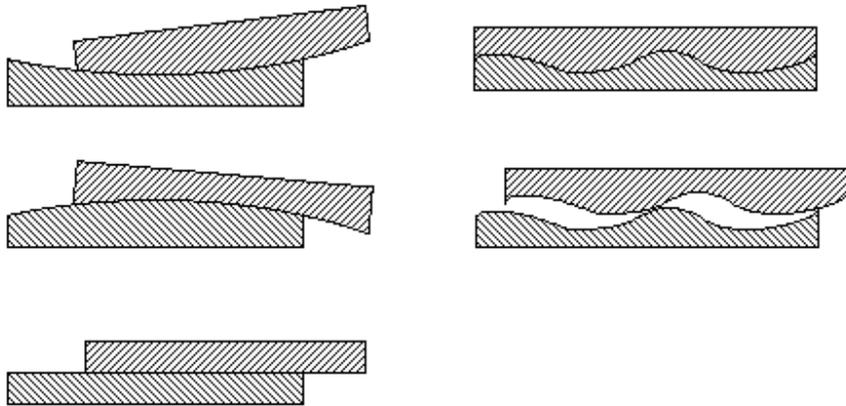
Des bobines couvertes d'une  
mince couche d'aluminium sont  
ensuite placées devant le miroir  
et chauffées à 2 000 degrés C -  
la vapeur formée se condense à  
la surface du miroir sous l'aspect  
d'une couche brillante, de  $\sim 200$   
nm d'épaisseur



# LA TAILLE D'UN MIROIR

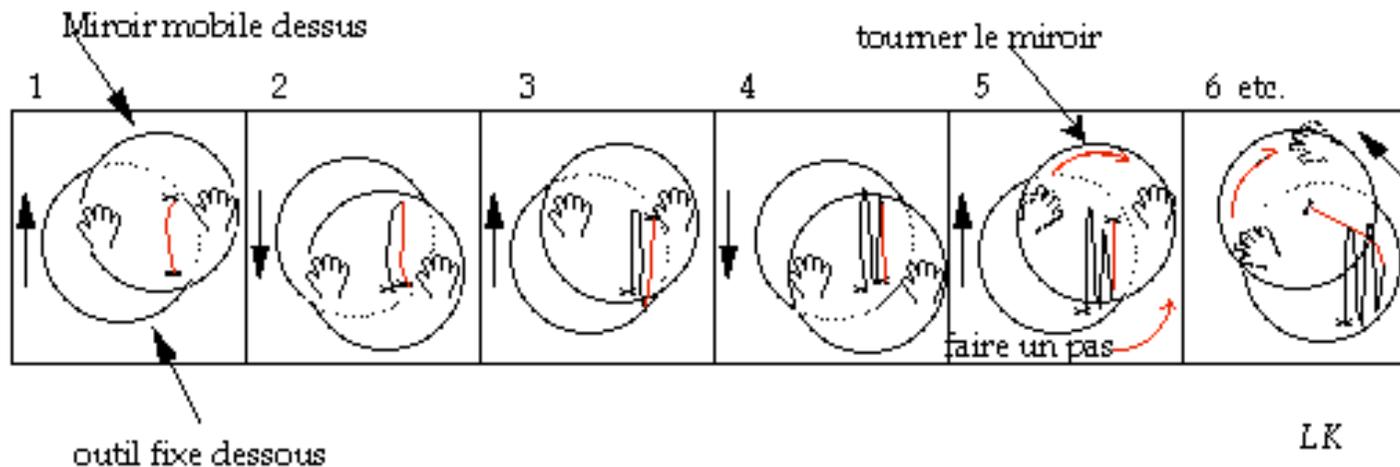


# LA TAILLE D'UN MIROIR



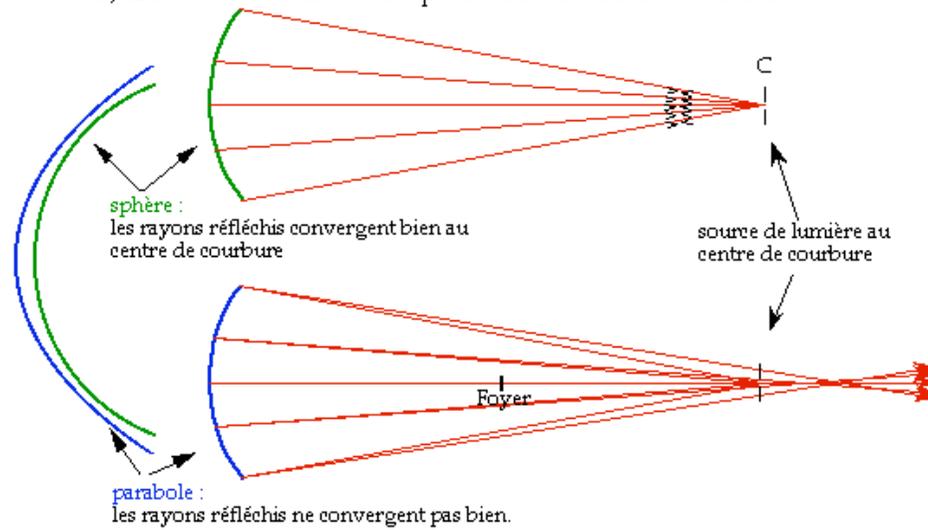
Seuls des surfaces planes et sphériques s'adaptent dans n'importe quelle position

## Courses d'ébauchage

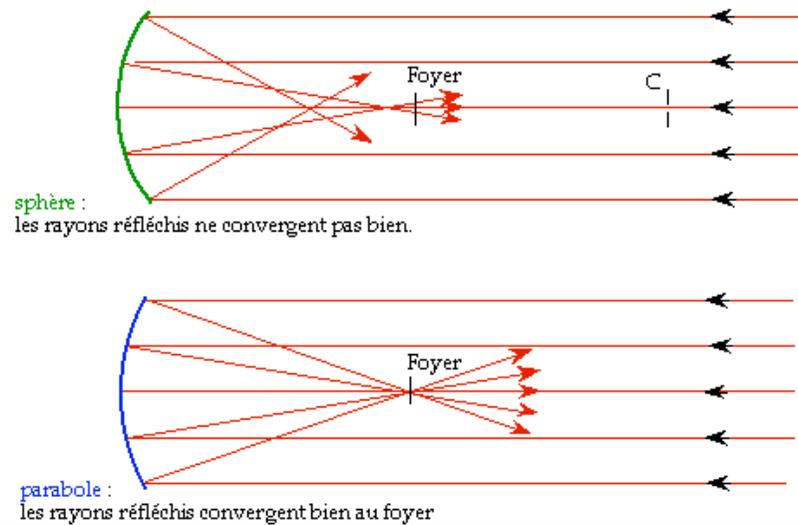


# LA PARABOLISATION

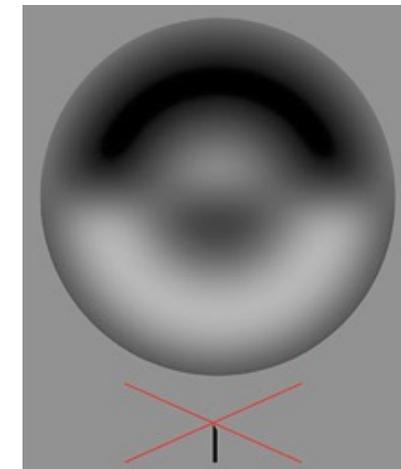
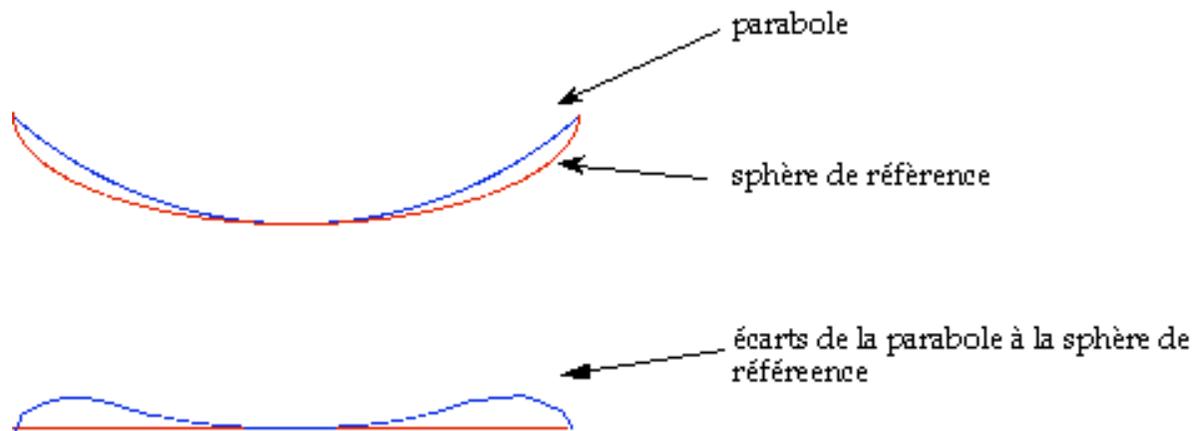
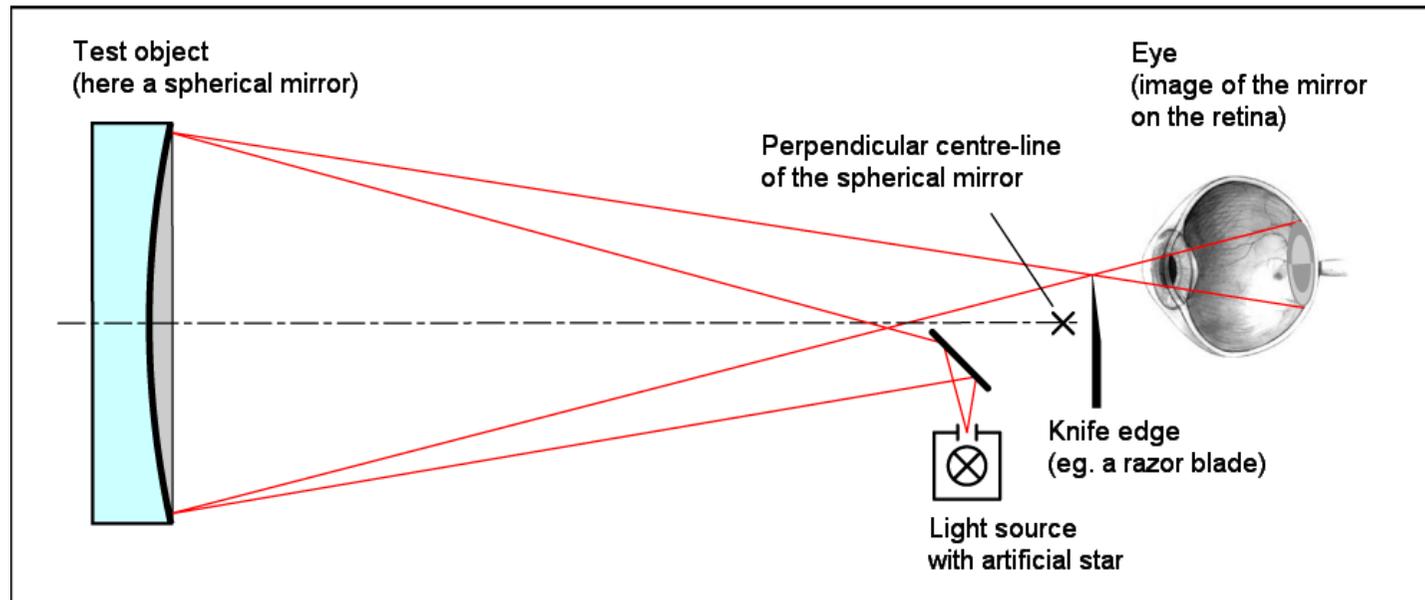
a) Lumière venant d'un point au centre de courbure



b) lumière venant de l'infini



# appareil de Foucault



# Aberrations

## Aberrations intrinseques

ils sont dues aux

- surfaces des coniques
- verre
- erreurs de fabrication

## Aberrations induites

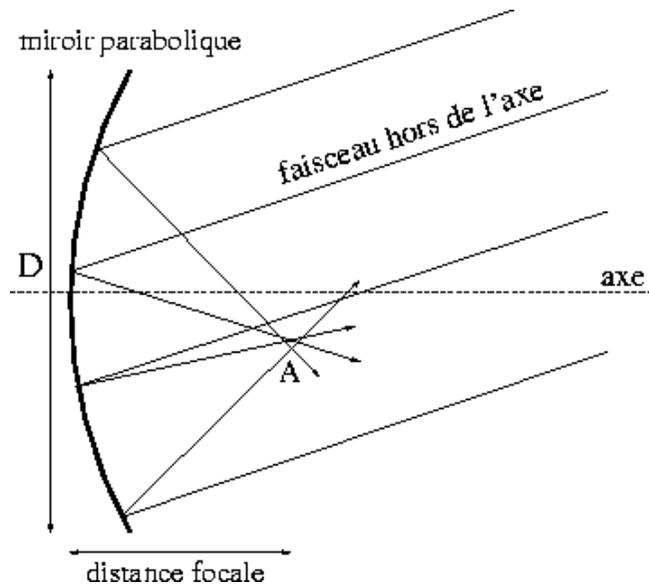
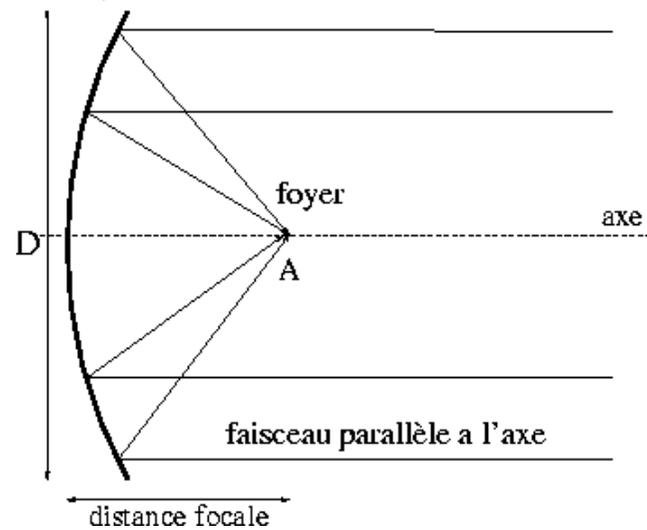
Ils sont provoqués par les

- les erreurs l'alignement
- deformations de surface forcées
- variations thermiques
- gravité et montage inadapté
- courrants d'air / turbulence.

# Stigmatisme et coma

$$y^2 = 4Fx$$

miroir parabolique

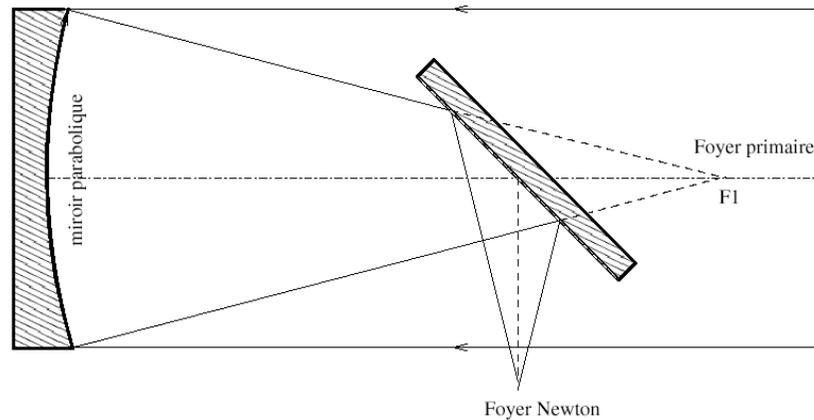


Conceptuellement, le télescope astronomique transforme l'onde plane

Bien que stigmatique sur l'axe optique, le paraboloïde ne l'est plus dès que l'on s'écarte => coma

**Stigmatisme** : Propriété d'un système optique qui associe un seul point image à un seul point source

# coma



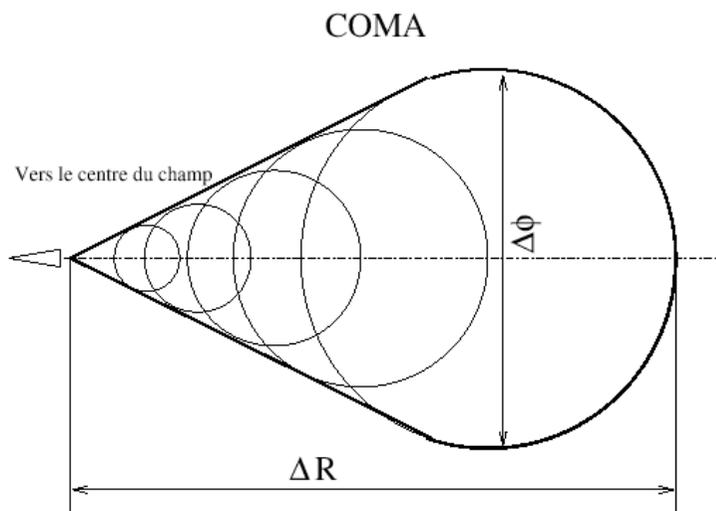
télescope de Newton

(paraboloïde supprime l'aberration de la sphéricité - propre à un miroir sphérique),

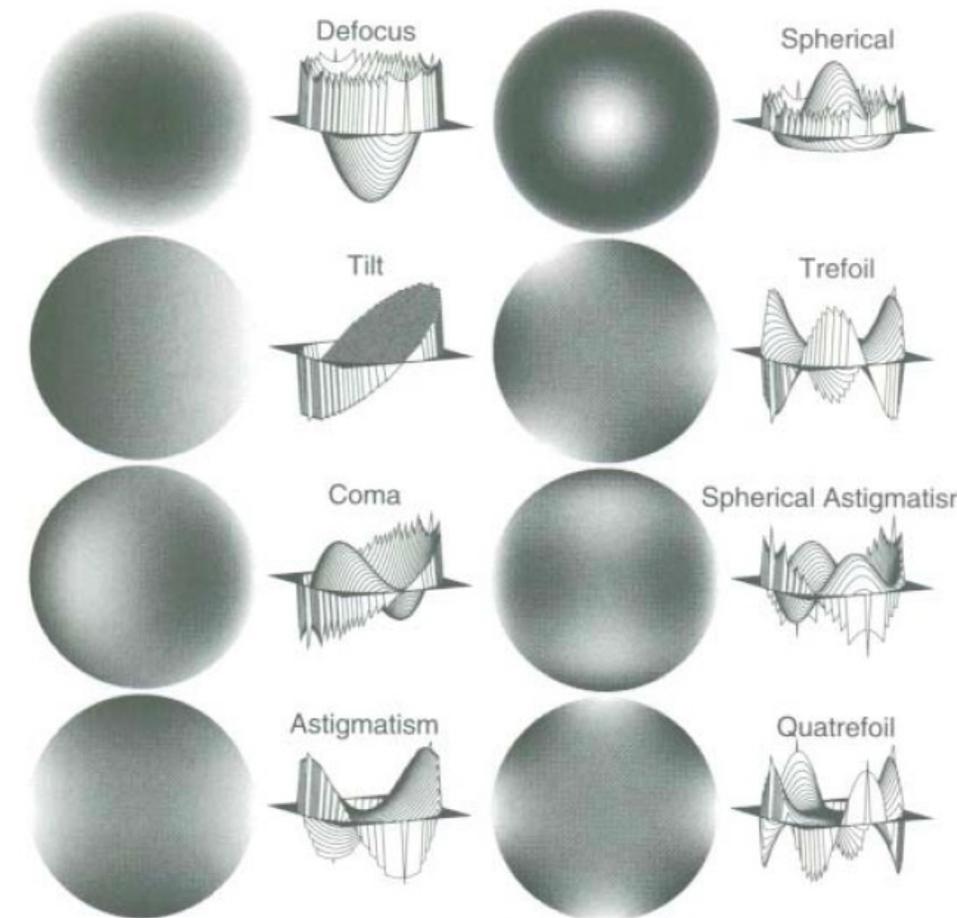
l'aberration la plus forte : coma

En première approximation, l'image d'un point est déformée proportionnellement à :

- l'angle incident  $\theta$  par rapport à l'axe optique
- carré de l'ouverture numérique du télescope  $\omega = D/2F$



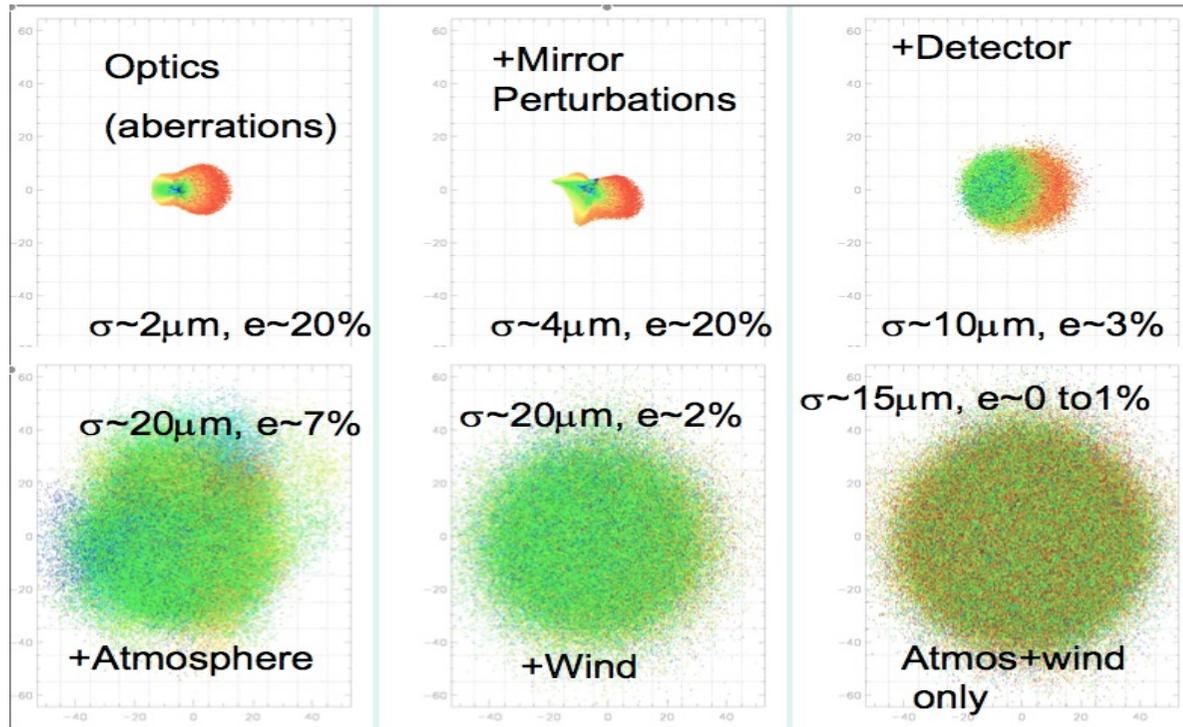
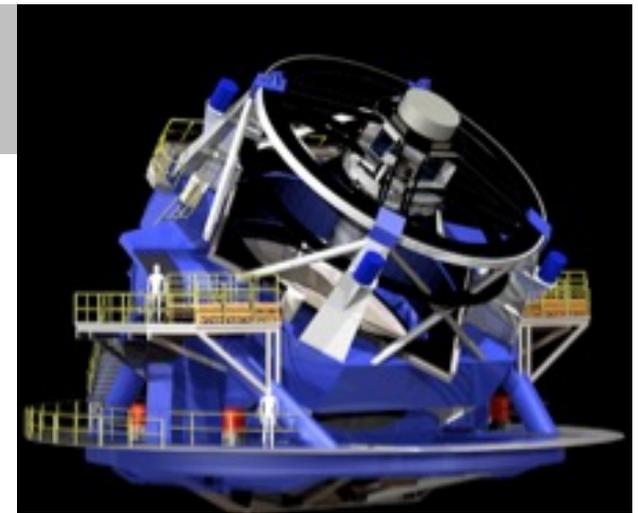
# Aberrations - representations analytiques



Wavefront	Seidel	Form	Name
Aberration	Aberration		
Coefficient	Coefficient		
$W_{200}$		$x_0^2$	Piston
$W_{111}$		$x_0 \rho \cos \theta$	Tilt
$W_{020}$		$\rho^2$	Focus
$W_{040}$	$S_I/8$	$\rho^4$	Spherical
$W_{131}$	$S_{II}/2$	$x_0 \rho^3 \cos \theta$	Coma
$W_{222}$	$S_{III}/2$	$x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta$	Astigmatism
$W_{220}$	$(S_{III} + S_{IV})/4$	$x_0^2 \rho^2$	Field curvature
$W_{311}$	$S_V/2$	$x_0^3 \rho \cos \theta$	Distortion

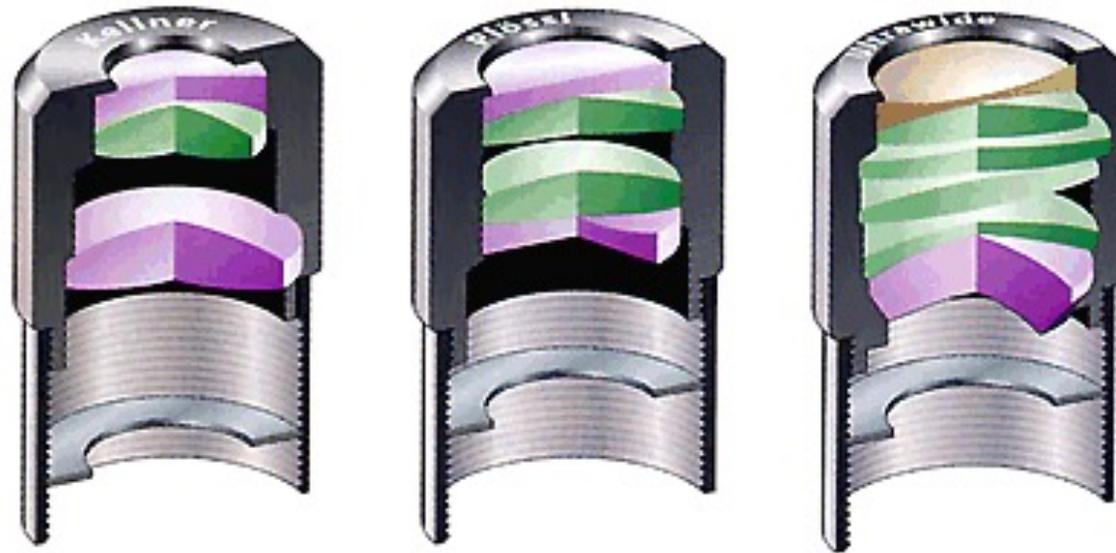
Voir : <http://www.telescope-optics.net/aberrations.htm>

# Point Spread Function (PSF)



Simulated PSF for LSST telescope

# Les Oculaires



Vue en coupe de différents types d'oculaires. Kellner, le Plössl, et l'ultra grand champ.

champ apparent : angle de vue apparent à travers l'oculaire (limité par la focale de l'oculaire et par la taille du diaphragme de champ placé dans son plan focal)

champ réel (dépend du grossissement et du champ apparent)  
p.e. oculaire de 10 mm de focale et  $50^\circ$  champ apparent ds  
telescope d'une focale de 1000 mm.

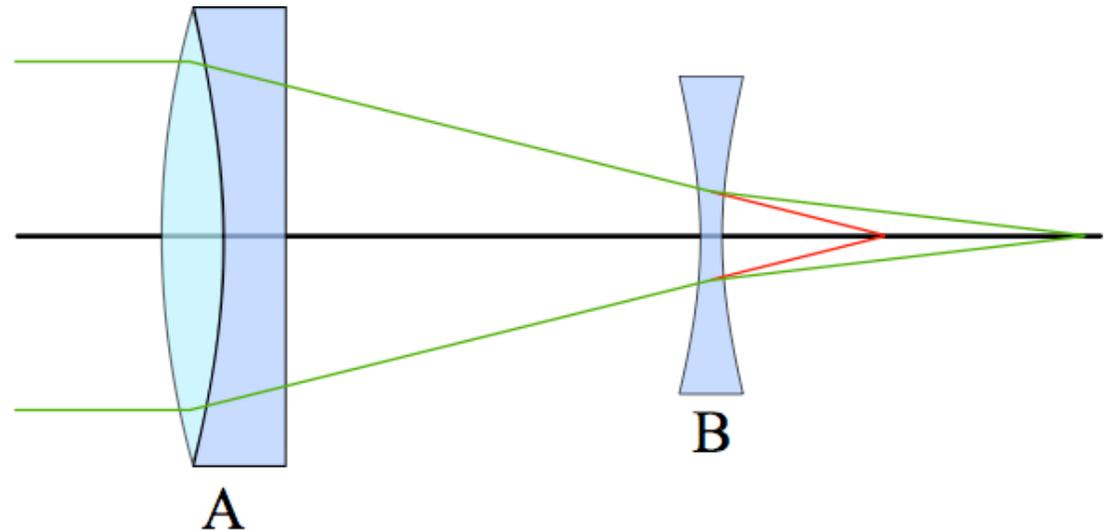
Grossissement : 100 x

champ réel :  $50^\circ / 100 = 0.5^\circ$

# lentille de Barlow

lentille divergente  
permettant d'augmenter la  
distance focale d'un  
instrument

+ grossissement  
- perte de la luminosité



# Télescopes : définitions / caractéristiques

- D le diamètre de l'ouverture (aperture) de son système optique
- S la surface utile  $\sim D^2$
- $\Delta\theta$  la résolution  $\sim \lambda/D$
- f la distance focale
- $\Phi$  le champ utile  $\sim 1/f$
- f/# le rapport focal  $f/D$  (ou l'ouverture du faisceau  $\omega = D/2f$ )
- P l'échelle focale  $\Delta\theta/\Delta x$
- Q la qualité optique

# Télescopes, définitions : rapport focal

$$f/\# = f/D$$

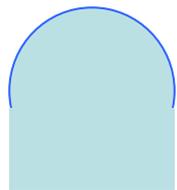
donne la "grosseur" du cône de lumière qui va au détecteur.

un télescope de 2000 mm de focale et de 200 mm de diamètre présente un rapport focal  $f/D = 10$  ou  $f/10$ .

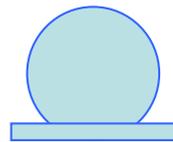
plus ce cône est ouvert (plus  $f/\#$  est petit)  
plus il y a de la lumière sur le détecteur (argot - plus le miroir est "rapide")

eg. un télescope ouvert à  $f/4$  demande 4 fois moins d'exposition qu'au rapport  $f/8$

répercussions : train optique, structure, système de contrôle, instruments, dôme ....



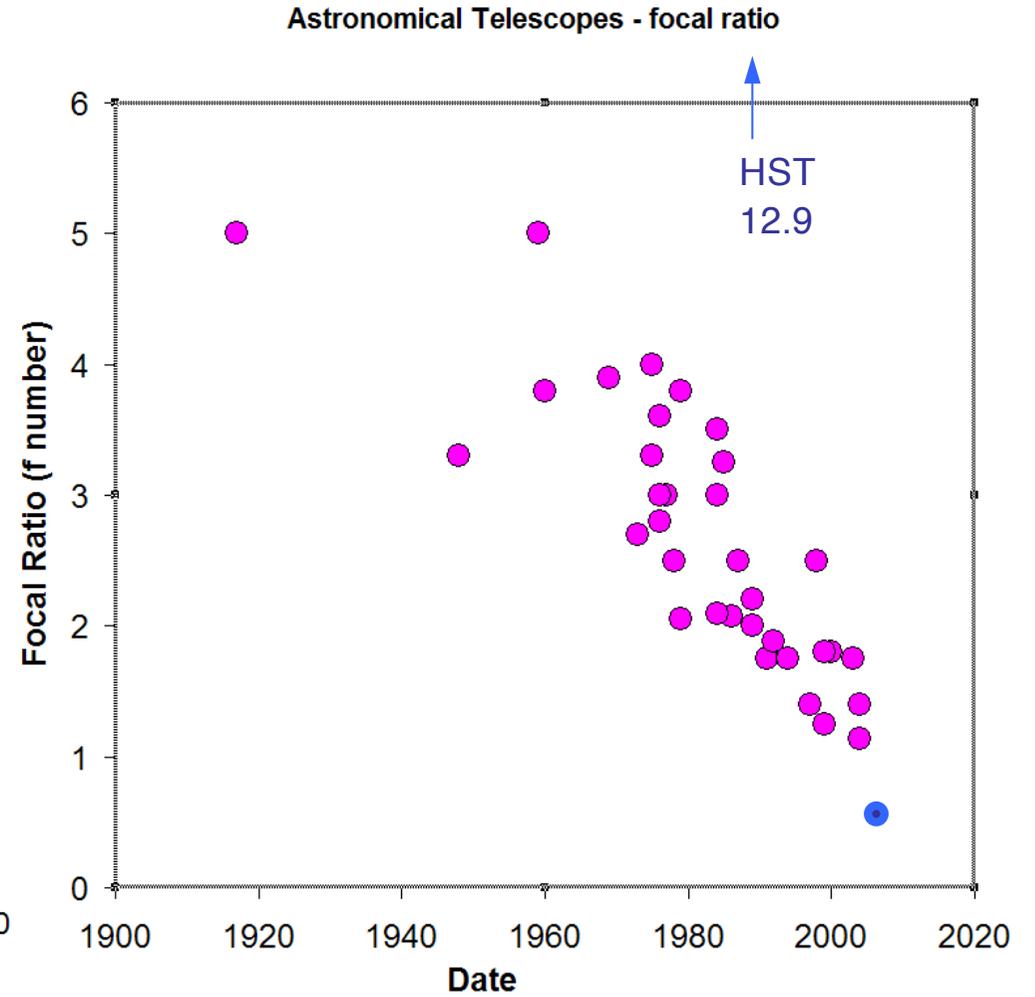
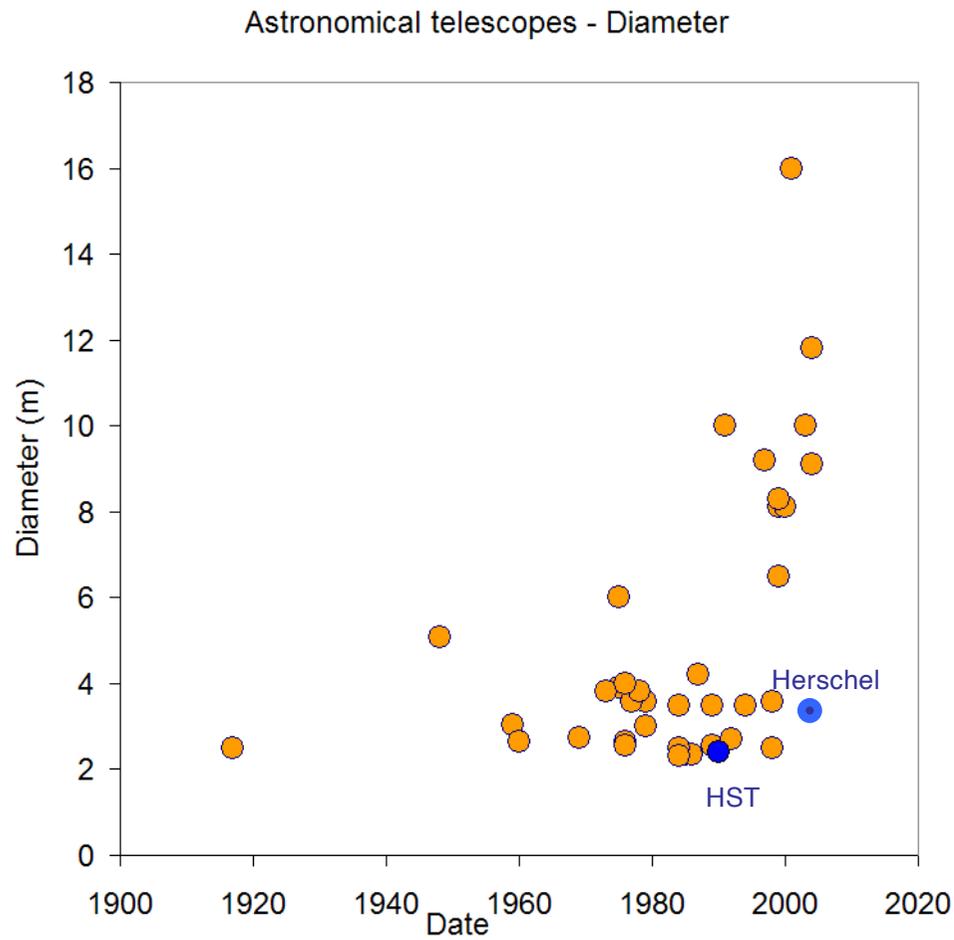
Palomar Hale  
200" (5.1m)



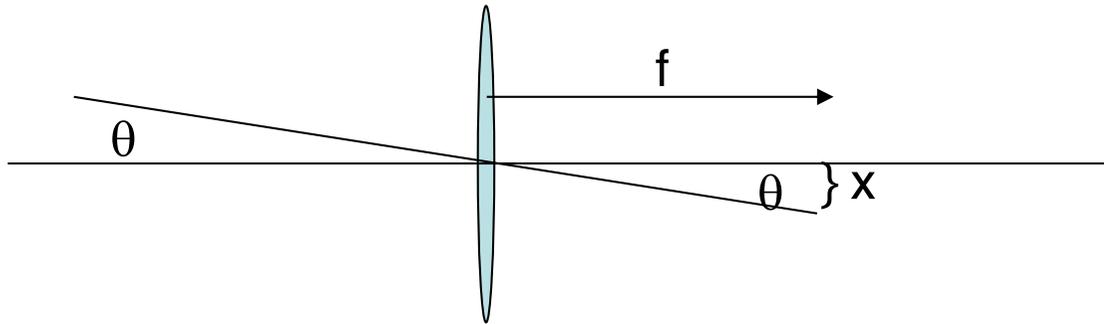
Keck  
10m

Focal ratio =  $f/d$

# Télescopes, définitions : diamètre / rapport focal



## Télescopes, définitions : échelle focale



$$x = \theta f$$

p.e. 200' Hale telescope au Palomar  $f = 16.7 \text{ m}$   
 $x = 1''/(206265''/\text{rad}) 16.7 \text{ m} = 0.08 \text{ mm}$

$$\Rightarrow P = \Delta\theta/\Delta x = 12''/\text{mm}$$

$$P = \Delta\theta/\Delta x = 206/f(\text{m}) [''/\text{mm}]$$