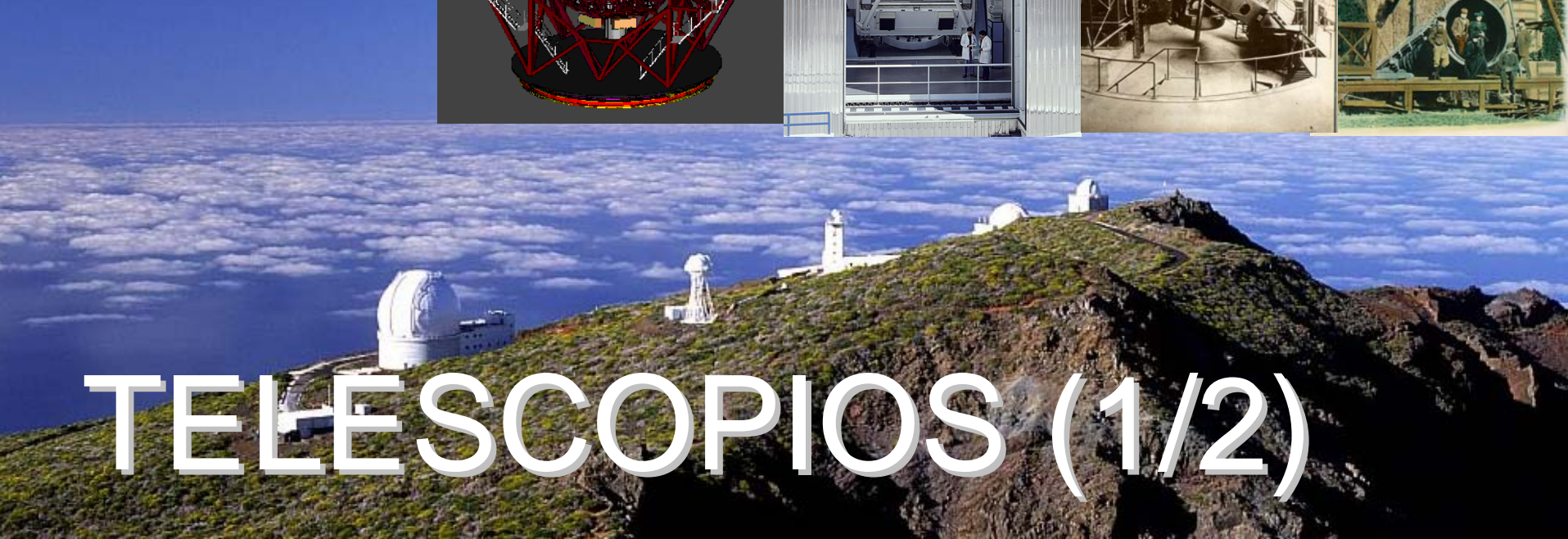
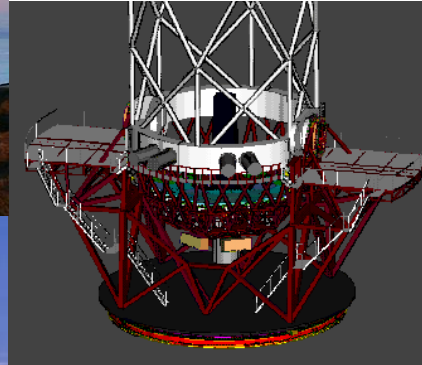
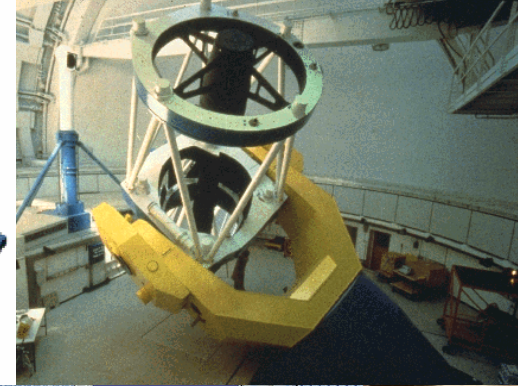
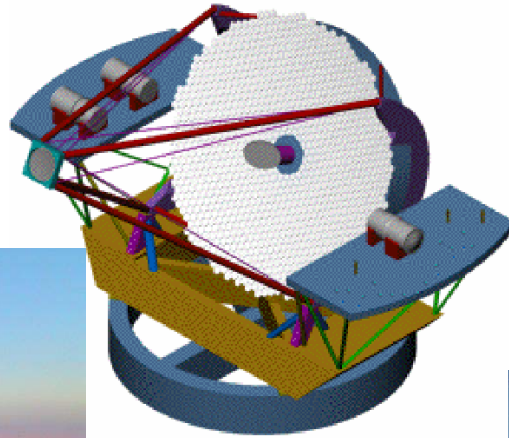


INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA – Máster Astrofísica



Universidad
Complutense
Madrid



TELESCOPIOS (1/2)

TELESCOPIOS ÓPTICOS

Primera parte

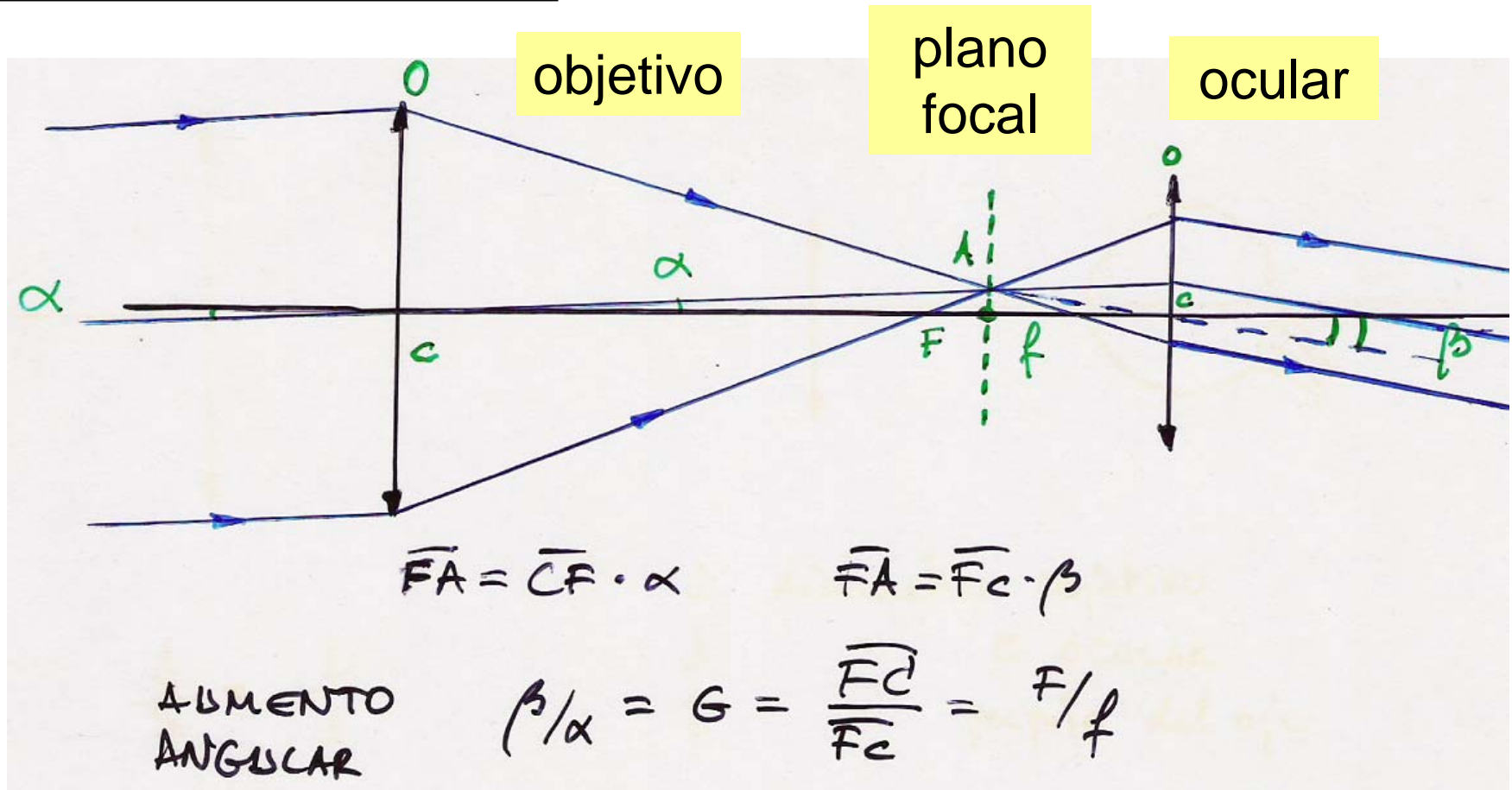
- Descripción esquemática de un telescopio.
- Escala de placa. Relación focal. Resolución. Aberraciones. Magnitud límite visual.
- Telescopios refractores.
- Telescopios reflectores. Cassegrain. Cámara Schmidt.
- Monturas y estructuras.
- Focos. Espejos

Segunda parte

- Protección de Telescopios
- Telescopios de gran objetivo.
- Espejos delgados. Óptica activa.
- Segmentación. Telescopios múltiples.
- Óptica adaptativa.
- Telescopios enormes.

ESQUEMA DE UN TELESCOPIO (I)

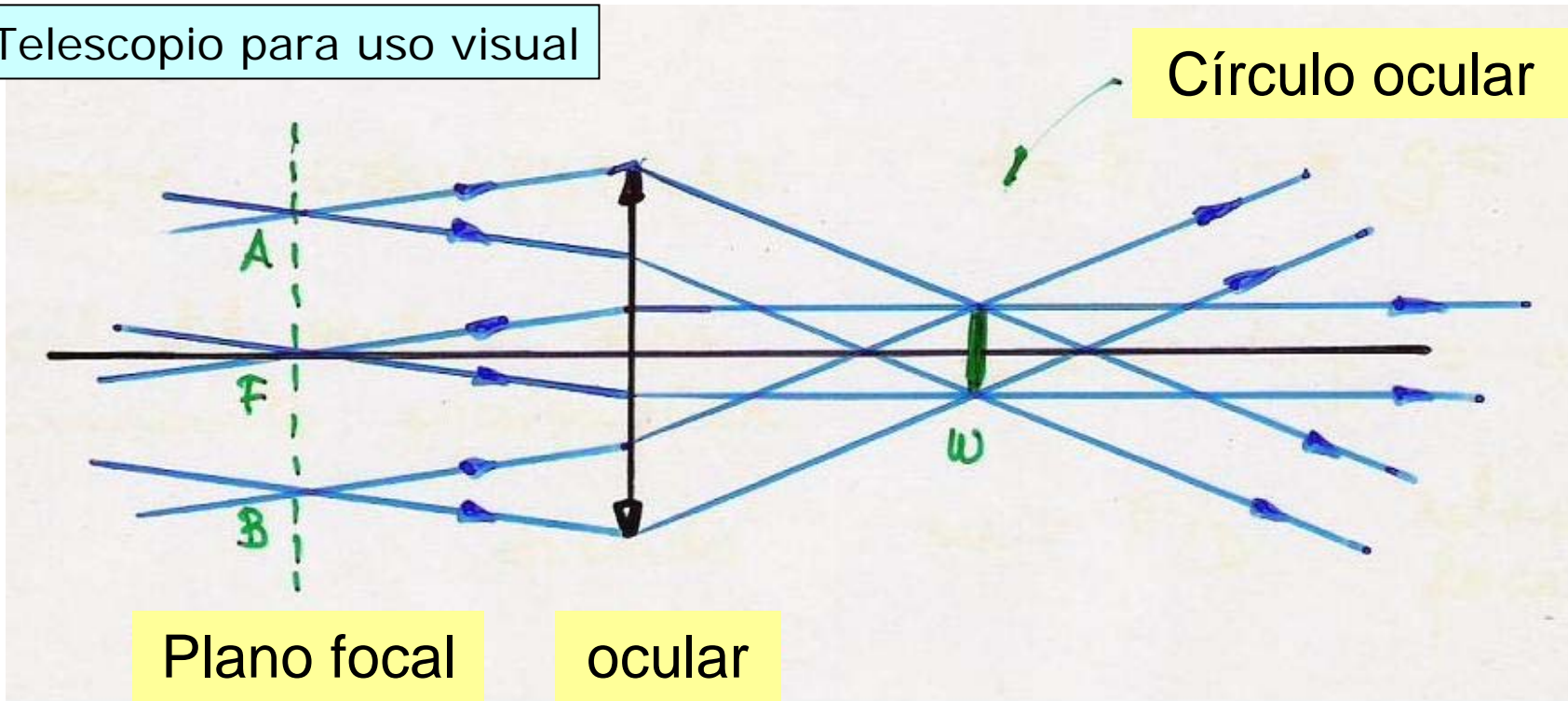
Telescopio para uso visual



El objetivo forma la imagen en el plano focal.
Allí se observa con detalle con ayuda de un ocular

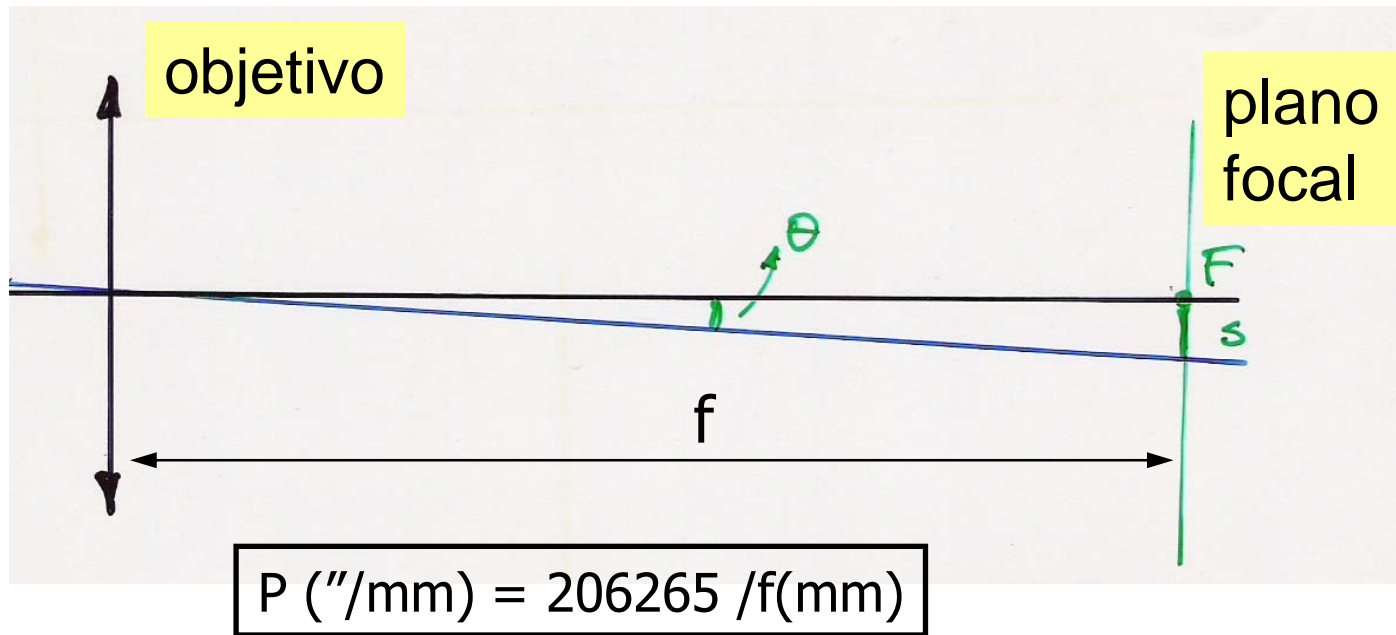
ESQUEMA DE UN TELESCOPIO (II)

Telescopio para uso visual



El círculo ocular es la imagen del objetivo dada por el ocular. Todos los rayos que transmite el instrumento pasan necesariamente por el objetivo y atraviesan el círculo ocular que es su imagen conjugada. En este sistema sencillo el objetivo es la Pupila de Entrada y el círculo ocular la Pupila de Salida

ESCALA DE PLACA



$$s = f \cdot \theta$$

$$\Delta\theta/\Delta s = 1 / f$$

La escala de placa indica el tamaño lineal que tendrán las imágenes que se forman en el plano focal o la distancia lineal entre ellas.

Ejemplo: Telescopio de $f=15 \text{ m}$
 $P = 206265 / 15000 = 13,8 \text{ "/mm}$

Las imágenes de dos objetos separados $2'$ en el cielo
 $\Delta x = 120 \text{ " } / 13,8 \text{ "/mm} = 8,7 \text{ mm}$

Campo en un detector de $2 \times 2 \text{ cm}$
 $20 \text{ mm } 13,8 \text{ "/mm} = 276 \text{ " } = 4' 36'' \quad (4' 36'' \times 4' 36'')$

RELACIÓN FOCAL

La relación focal es la razón entre la distancia focal del objetivo y su diámetro.

$$F = D/f$$

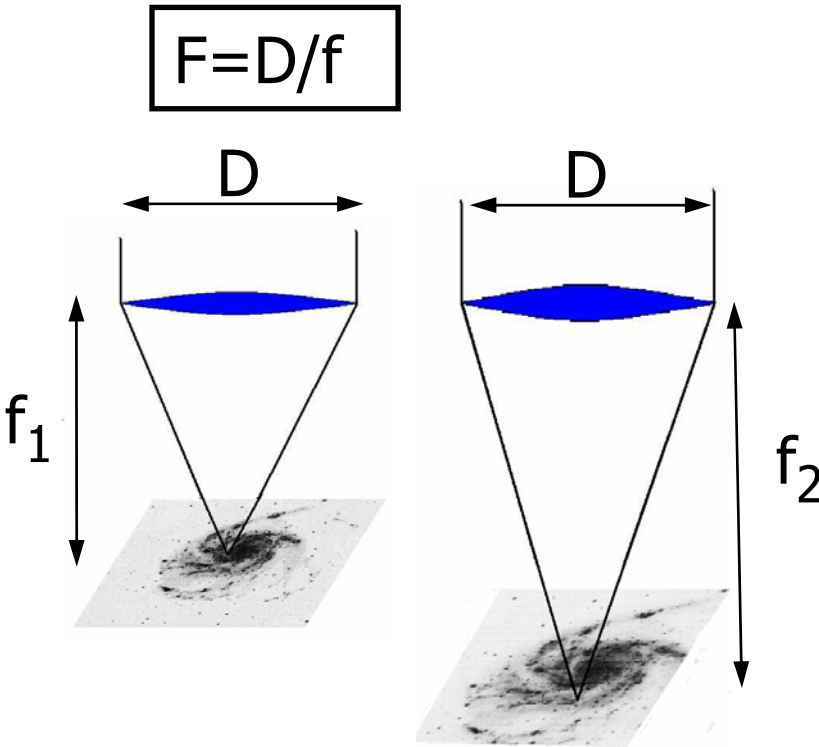
$$f = 4 D \rightarrow F = 4 \text{ ó } f/4$$

La cantidad de energía recogida es proporcional al área del objetivo. La energía se distribuye por todo el área de la imagen.

La densidad de flujo (energía/unidad área) en el plano de la imagen:

$$\text{Iluminación} = (D/f)^2$$

Por eso a F se le llama apertura relativa.



El telescopio de la izquierda tiene un número F mayor $F_1 > F_2$ y es por eso más luminoso.

Como $f_2 > f_1$ la escala de placa es mayor en el de la izquierda y el campo registrado en un detector de igual tamaño será mayor.

RESOLUCIÓN (I)

En la imagen de una estrella (objeto puntual) se puede apreciar un círculo luminoso (disco de Airy) rodeado de anillos (difracción de Fraunhofer).

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2$$



J_1 función de Bessel de primera clase primer orden

$a=D/2$ radio de la abertura

I_0 Intensidad máxima en el centro del patrón de difracción

$k=2\pi/\lambda$ número de onda

Las posiciones de los mínimos de intensidad

$$\theta_n = m_n \lambda / D$$

donde los factores numéricos m $m=1.22$ para $n=1$

$m=2.23$ $n=2$

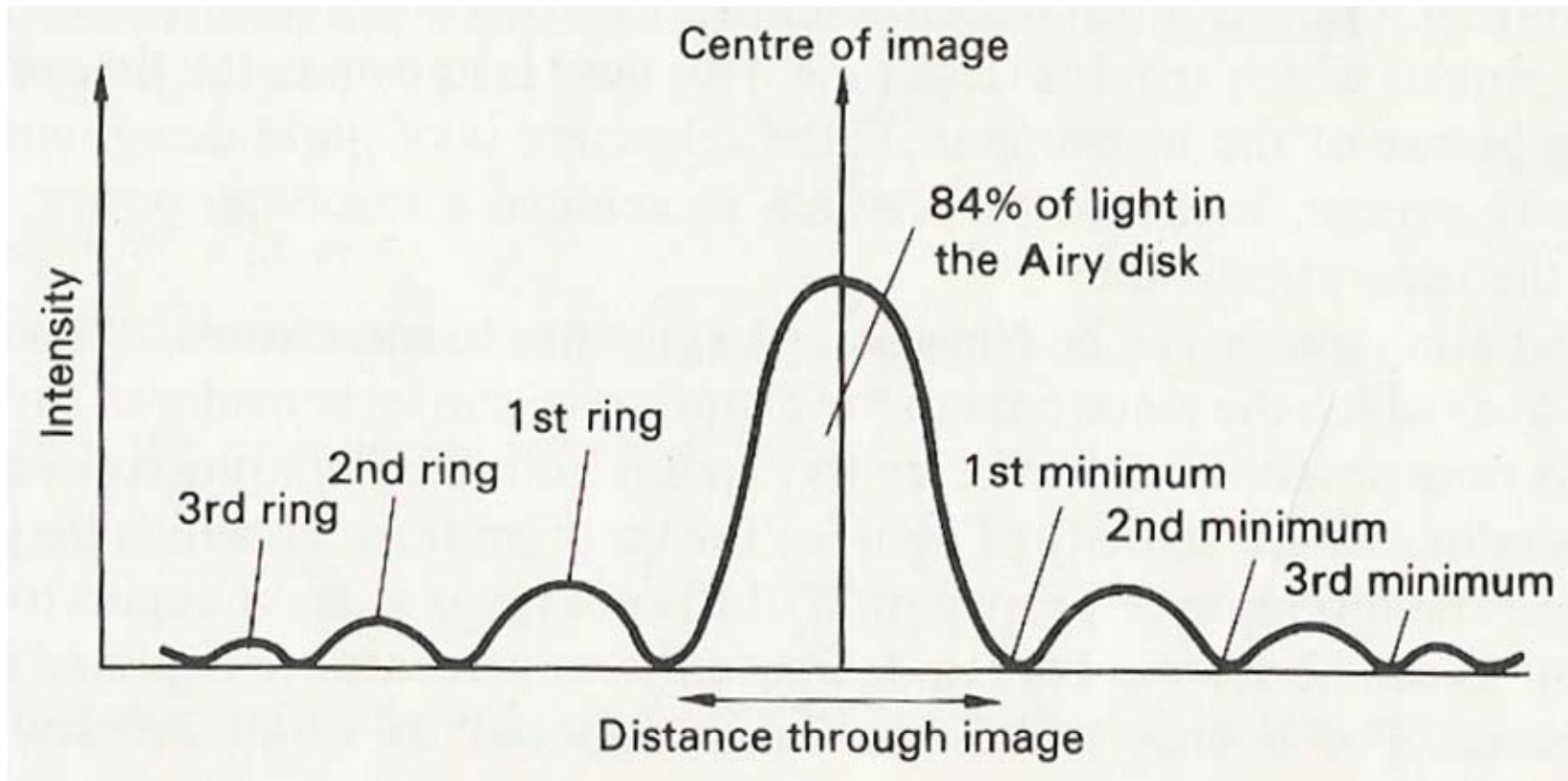
$m=3.24$ $n=3$

RESOLUCIÓN (II)

Tamaño del disco de Airy

(hasta el primer mínimo; contiene 84% de la luz)

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

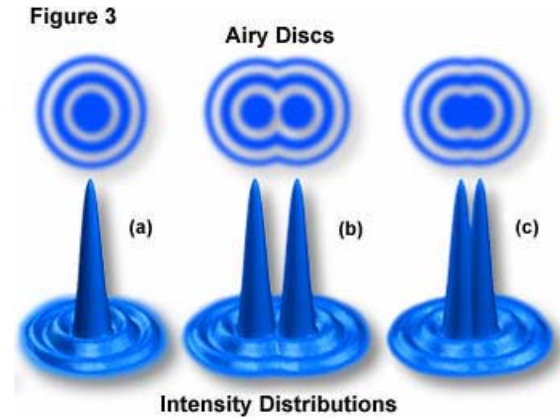


Roy & Clarke fig. 16.6

RESOLUCIÓN (III)

El poder de resolución de un telescopio mide su capacidad de resolver detalles en imágenes.

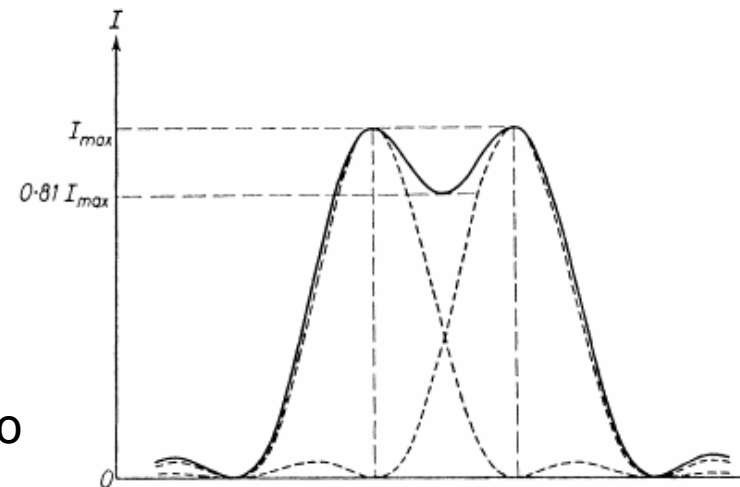
Si dos estrellas tienen el mismo brillo, la resolución del sistema puede ser determinado por la separación angular más pequeña entre esas fuentes que aun permita al sistema resolverlas.



Resolución (Rayleigh)

$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

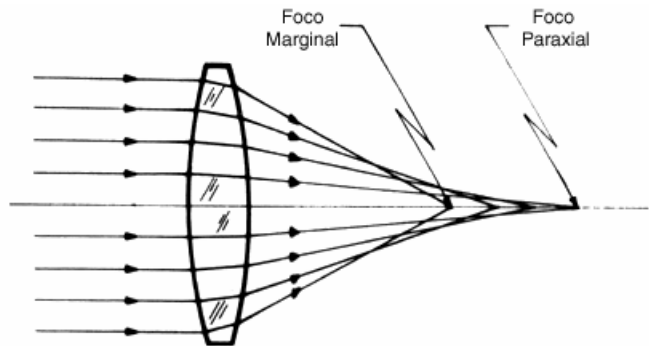
Criterio de Rayleigh: dos fuentes puntuales son precisamente resueltas si el máximo del patrón de difracción de un punto cae en el primer anillo oscuro del patrón de difracción del segundo punto.



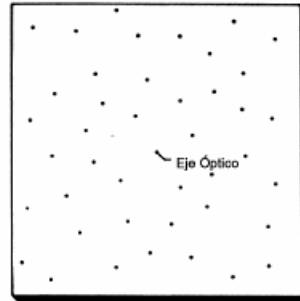
ABERRACIONES(1)

Las aberraciones de los telescopios deterioran la calidad de las imágenes.

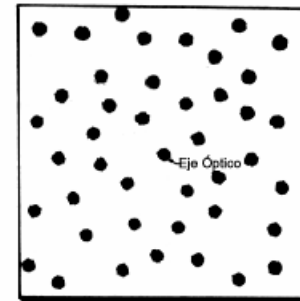
Aberración esférica.



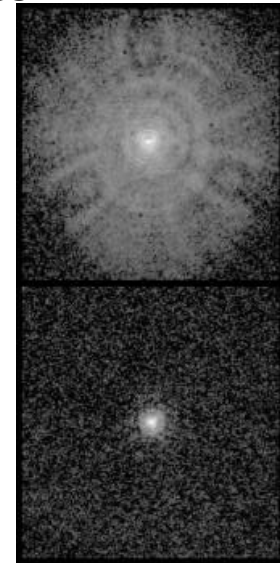
(a)



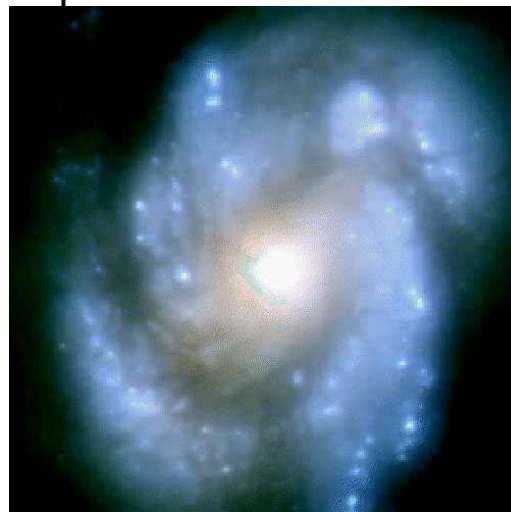
(a) IMAGENES PERFECTAS



(b) IMAGENES CON ABERRACIÓN DE ESFERICIDAD

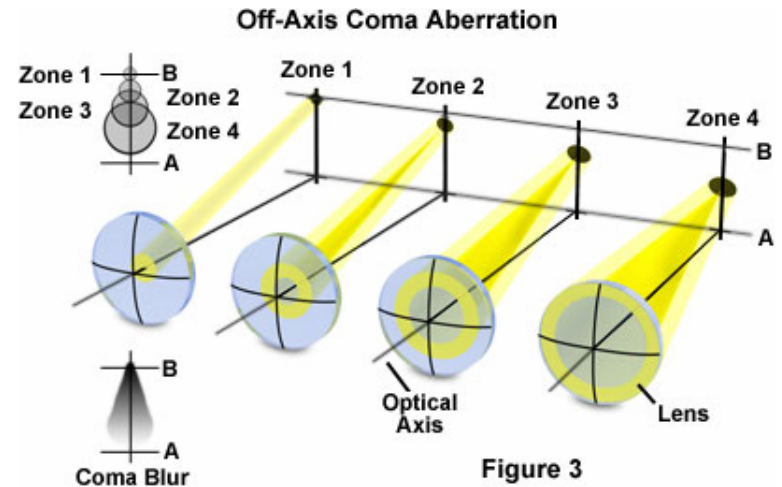
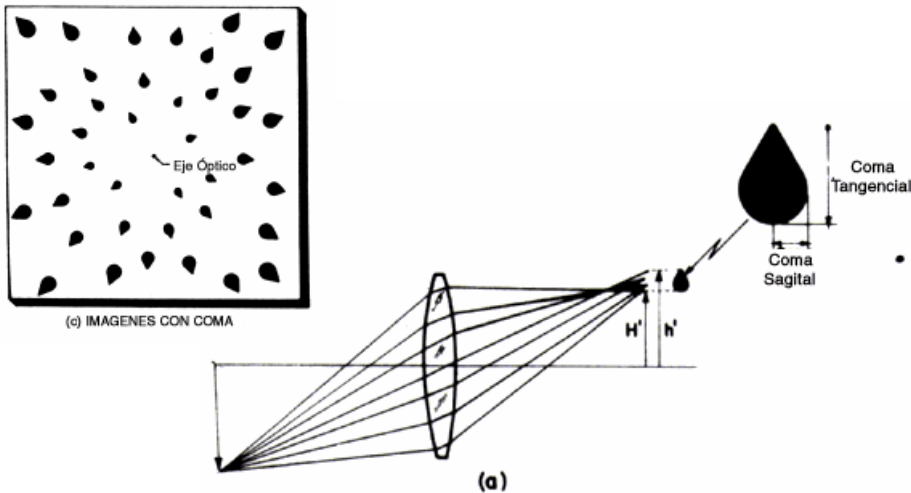


Imágenes de M100 antes y después de solucionar el problema de la aberración esférica del HST



ABERRACIONES (2)

Aberración de Coma.



Otras aberraciones:

- Astigmatismo.
- Curvatura de campo.
- Distorsión.
- Aberración cromática.

Véase

Telescopios y estrellas by Malacara & Malacara

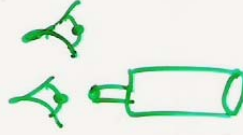
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/html/astronomia.html>

Observational Techniques by Jon Holtzman

<http://astronomy.nmsu.edu/holtz/a535/>

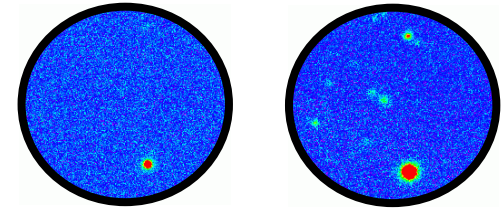
MAGNITUD LÍMITE VISUAL

SIMPLE VISTA
CON TELESCOPIO



B_e
 B_t

m_e
 m_t



$$B_t/B_e = D^2/d^2$$

$$\log_{10} B_t/B_e = -0.4 (m_t - m_e)$$

$$\log D^2/d^2 = -0.4 (m_t - m_e)$$

Conversión de irradiancias
a magnitudes (Pogson)

$$\Delta m = 2.5 \log (D/d)^2 = 5 \log D/d$$

Ganancia en magnitudes

Magnitud límite visual

$$m_{lim} = 6 + 5 \log D/d$$

ejemplo

$$D = 500 \text{ mm} \quad d = 8 \text{ mm}$$

$$m_{lim} = 6 + 5 \log D - 5 \log 8 = 1.485 + 5 \log D$$

$$m_{lim} = 15.0$$

9^m de ganancia.

Límite a
simple vista

TELESCOPIOS REFRACTORES (1)

El objetivo está formado por lentes.



Telescopio de Yerkes de 40" (~1 m)

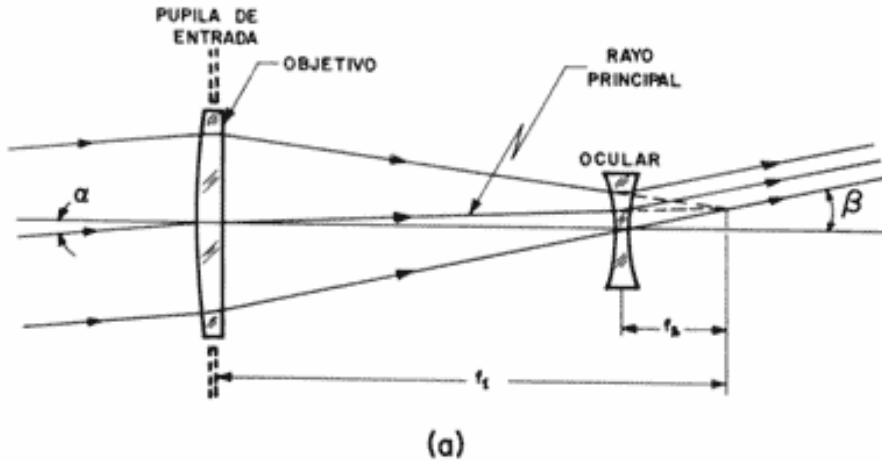


PRO: montado en un tubo, bajo mantenimiento.

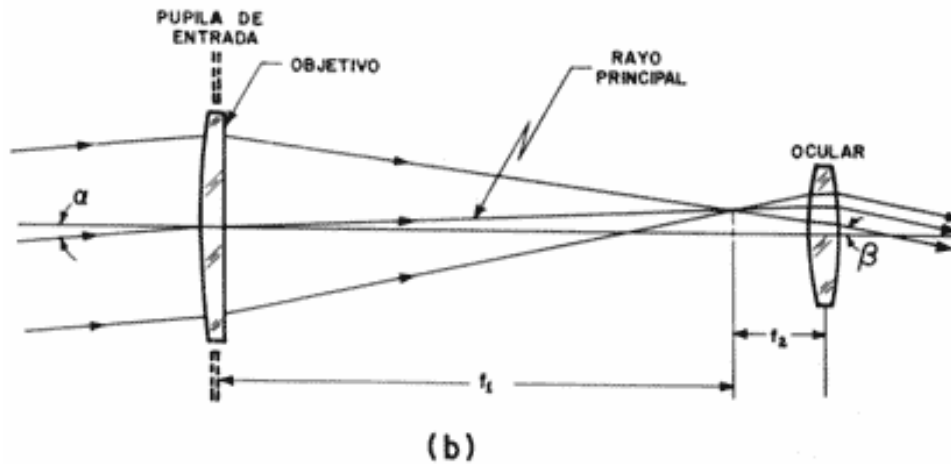
CONTRA:

Aberración cromática (tripletes acromáticos).
Problemas técnicos para construir y mantener
objetivos de gran tamaño.

TELESCOPIOS REFRACTORES (2)



Telescopio de Galileo
(Lippershey 1608)

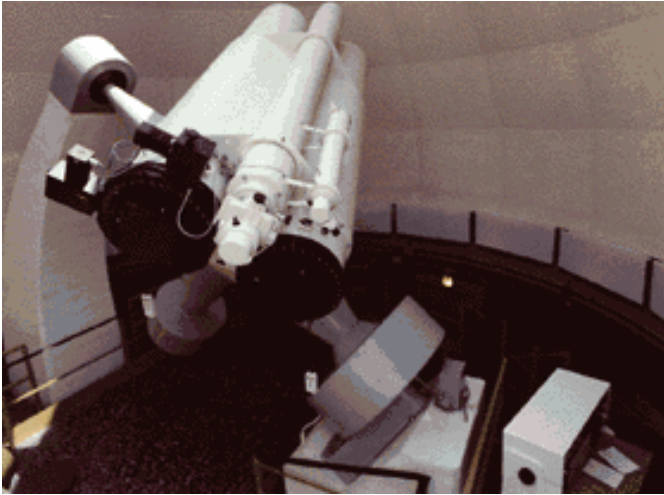


Telescopio de Kepler

Véase Ciencia para todos: Astronomía

<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/html/astronomia.html>

TELESCOPIOS REFRACTORES (3)



Astrógrafo doble (OAN, Yebes)
 $D=40\text{ cm}$ $f=200\text{ cm}$

Adecuado para la observación de objetos astronómicos con movimiento propio (asteroides y cometas).



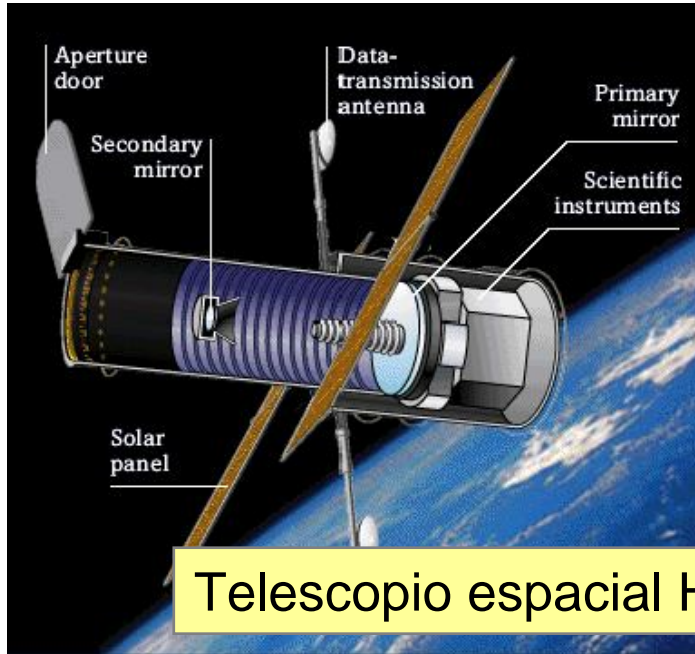
Lick Observatory
Carnegie Double Astrograph

20-inch refractors
Field of View 6×6 degree
17 x 17 inch photographic plate



TELESCOPIOS REFLECTORES

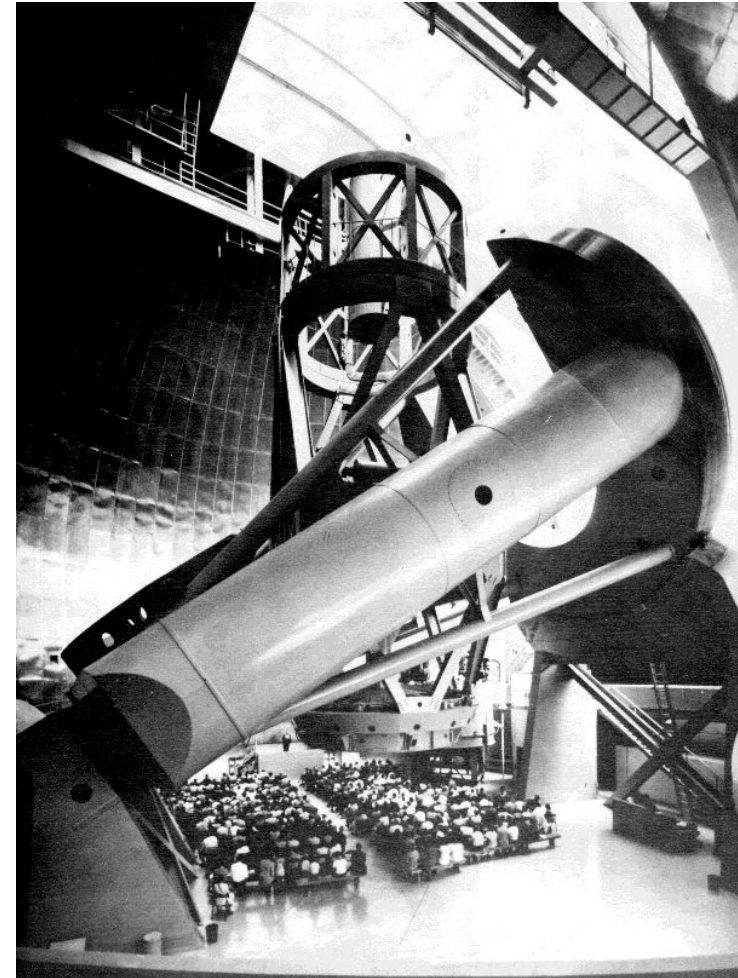
El objetivo es un espejo cóncavo.



Telescopio espacial Hubble

PRO: No tiene aberración cromática.
El objetivo está sujeto por detrás
y puede construirse más grande.

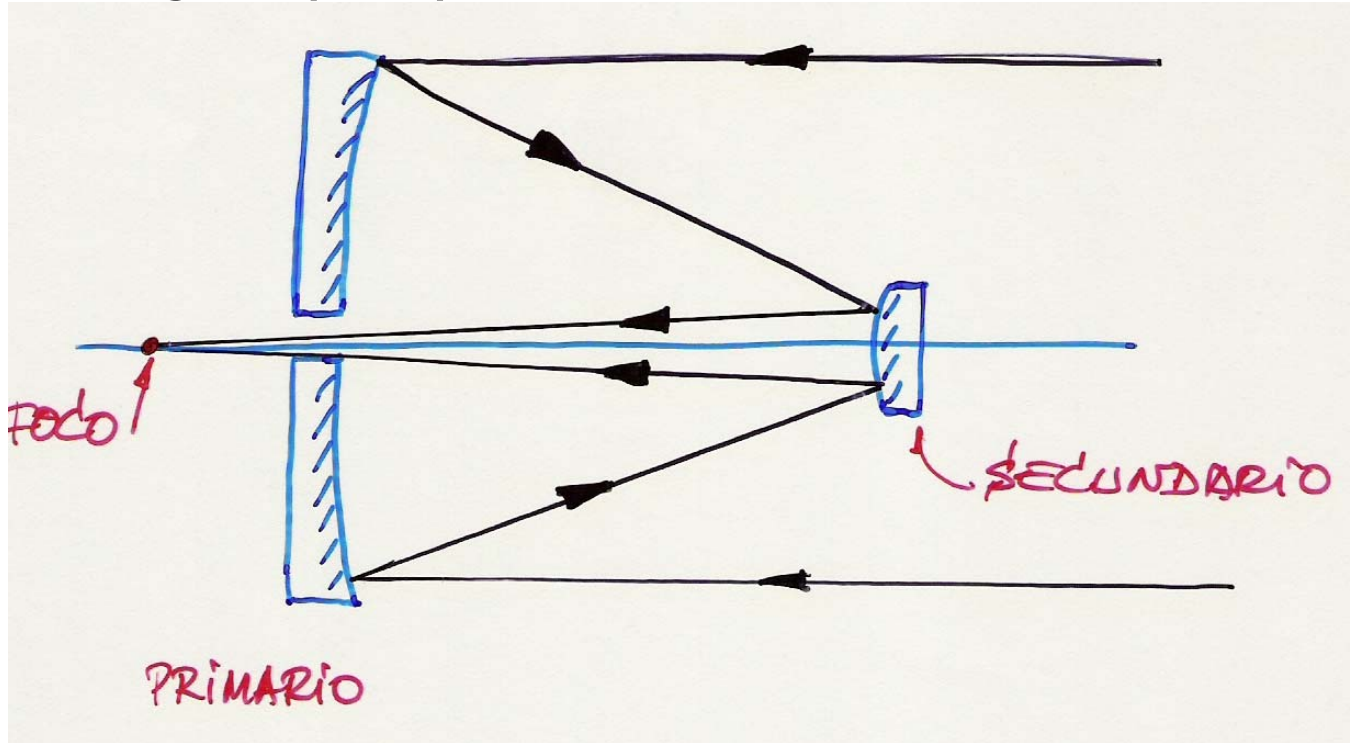
CONTRA:
Problemas de mantenimiento:
colimado, limpieza, aluminizado.



Inauguración en 1948
del Telescopio Hale (200")
de Mt. Palomar

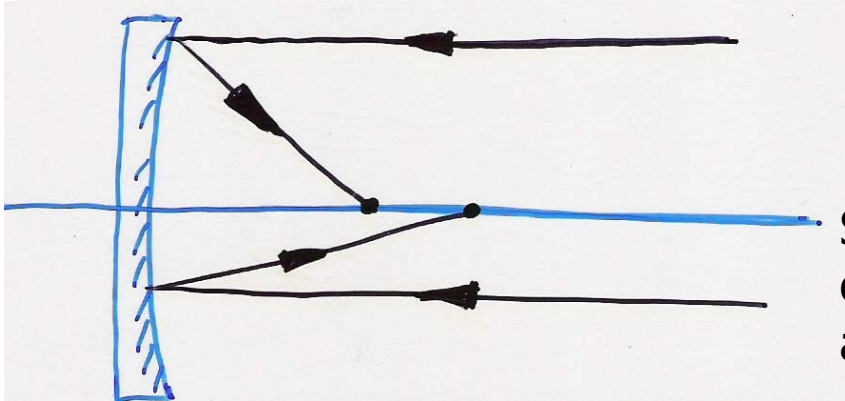
TELESCOPIO CASSEGRAIN (1)

Cassegrain (1672)



Primario
parabólico

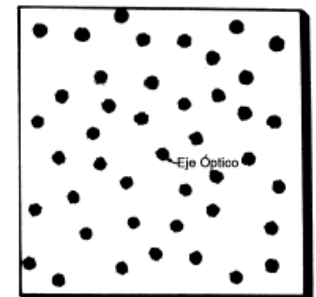
Secundario
hiperbólico



Si el primario fuera esférico,
el telescopio sufriría
aberración esférica



(a) IMAGENES PERFECTAS



(b) IMAGENES CON ABERRACIÓN DE ESFERICIDAD

TELESCOPIO CASSEGRAIN (2)

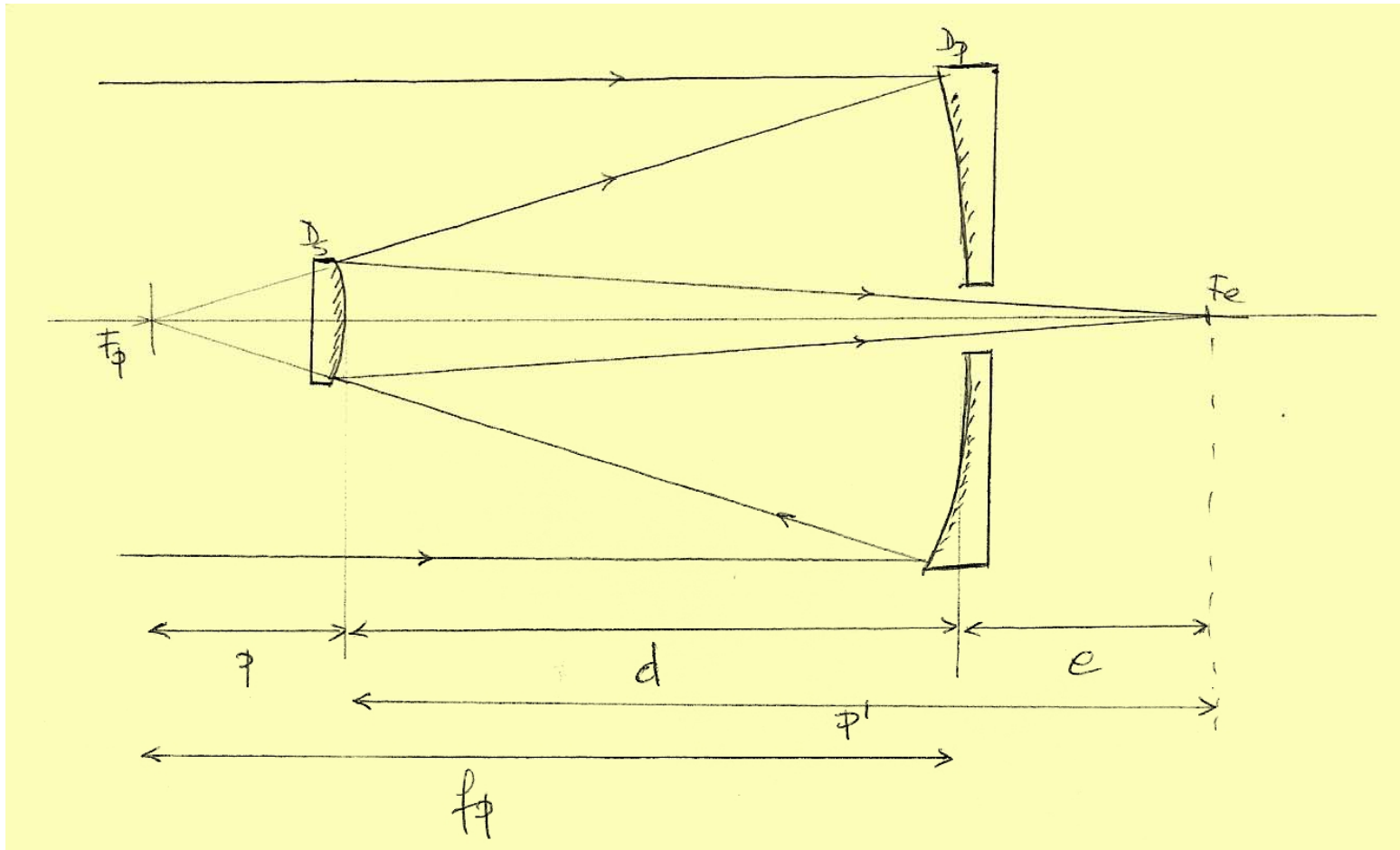
Diámetro

Radio de Curvatura

Focal

primario
secundario

D_p	R_p	$f_p = R_p/2$
D_s	$-R_s$	$f_s = -R_s/2$



TELESCOPIO CASSEGRAIN (3)

Focal
resultante

$$f_e = f_p \cdot \delta$$

Factor de amplificación

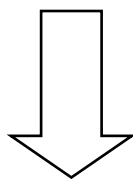
$$\varphi' = \delta \cdot \varphi$$

Relación focal
efectiva

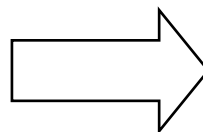
$$F_e = f_e / D_p$$

Relación focal
primario

$$F_p = f_p / D_p$$

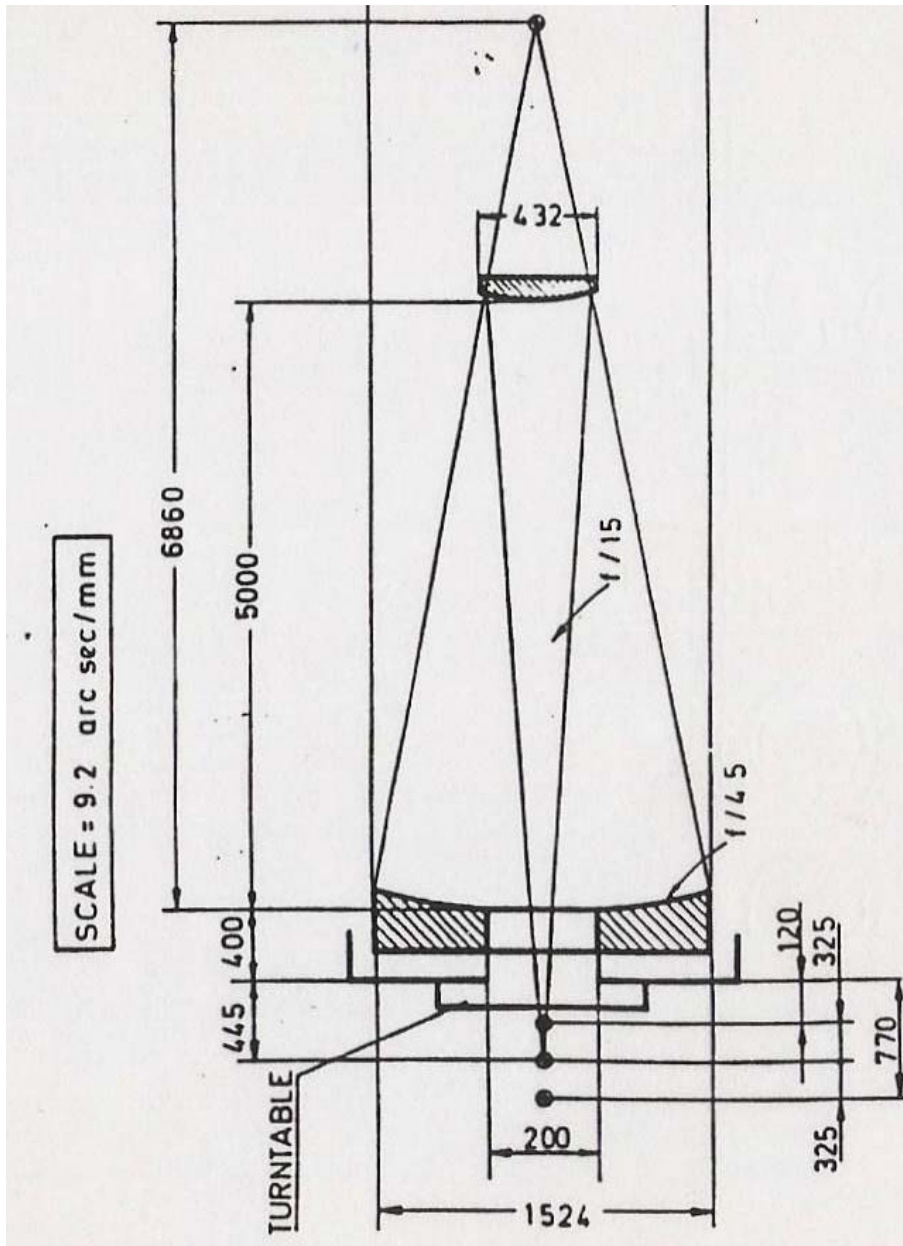


$$\delta = f_e / f_p = F_e / F_p$$



$$\begin{aligned} \phi &= \frac{f_p + e}{\delta + 1} \\ r_s &= \frac{-2\phi\delta}{\delta - 1} \\ D_s &= \frac{D_p \cdot \phi}{f_p} \end{aligned}$$

TELESCOPIO CASSEGRAIN (4)



ESO Telescopio 1.5 m

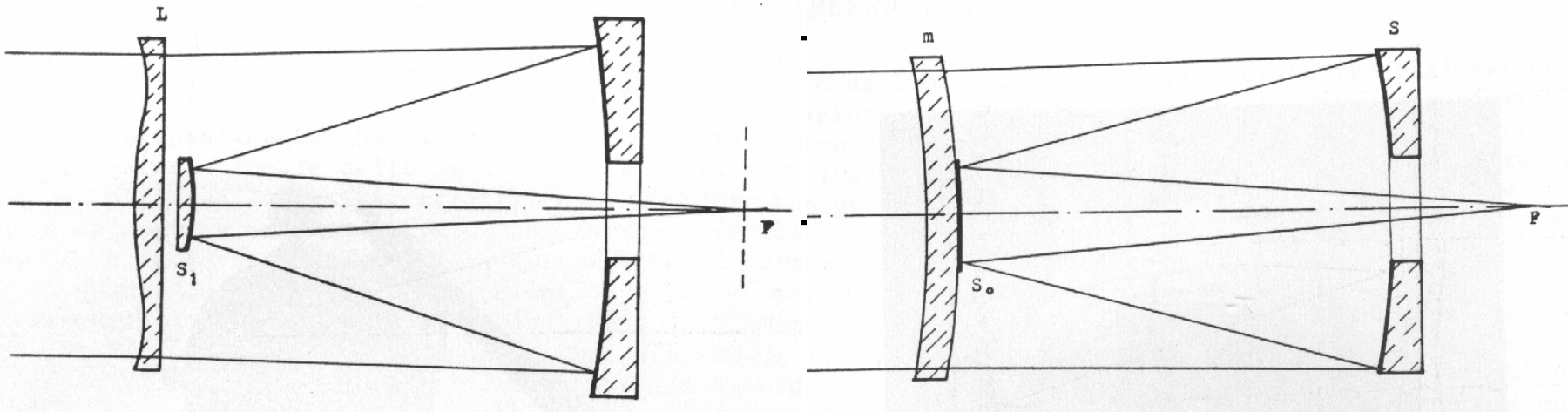
TELESCOPIO CASSEGRAIN (5)

El sistema Cassegrain clásico todavía presenta aberración esférica.

	Primario	Secundario
Cuasi-Cassegrain	esférico	sobrecorregido
Dall-Kirham	elíptico	esférico
Ritchey-Chrétien	hiperbólico (elimina coma)	hiperbólico (más que el clásico) (elimina aberración esférica)
Gregory	parabólico	elíptico (cóncavo)

Schmidt-Cassegrain.

Maksutov (simplificado)

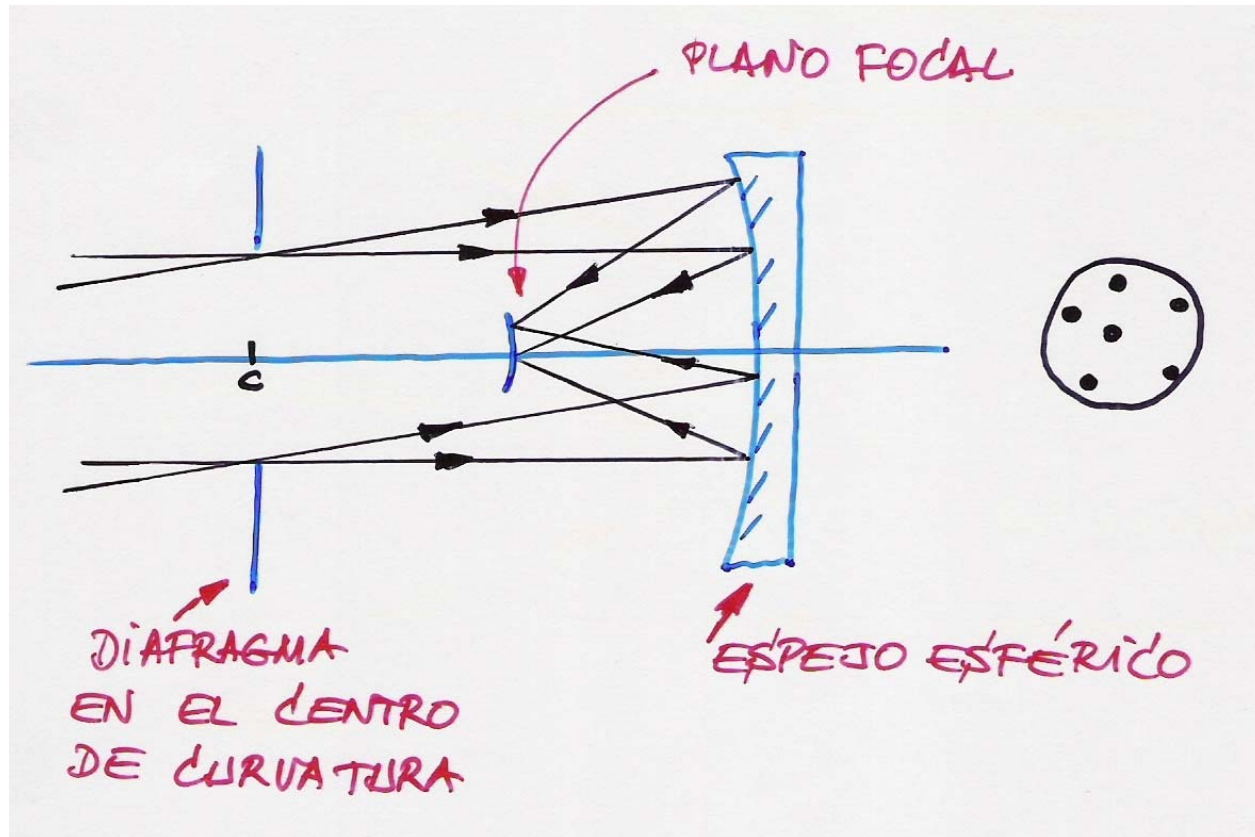


Son sistemas catadióptricos con una lámina correctora. (véase Cámara Schmidt)

CÁMARA SCHMIDT (1)

Bernard Schmidt (1931) 'Ein lichtstarkes komafreies Spiegelsystem'

Idea 1: Espejo esférico + diafragma en el centro de curvatura →
→ Imágenes buenas en todo el campo (no hay coma).



El alineamiento del centro de curvatura, foco y superficie del espejo es idéntica para cualquier ángulo → Misma aberración esférica en todo el campo.

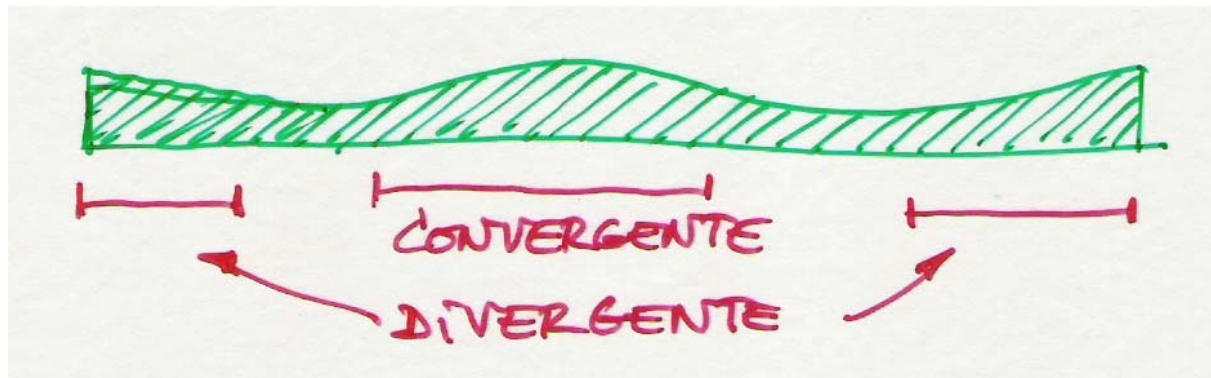
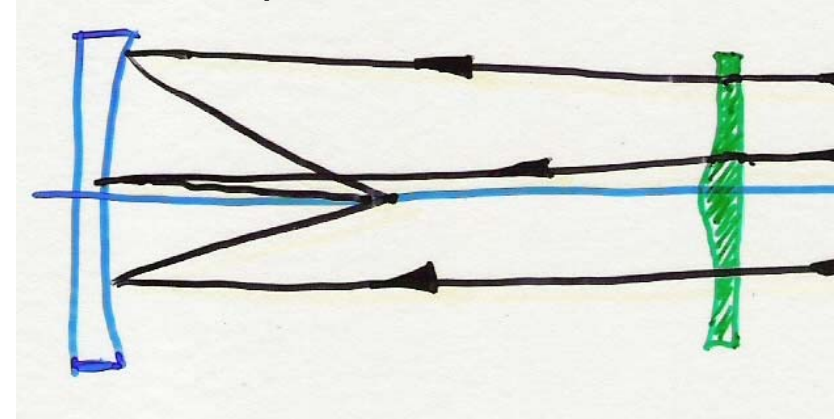
CÁMARA SCHMIDT (2)

Espejo esférico + diafragma en el centro de curvatura:

Libre de aberración cromática, coma, astigmatismo y distorsión.

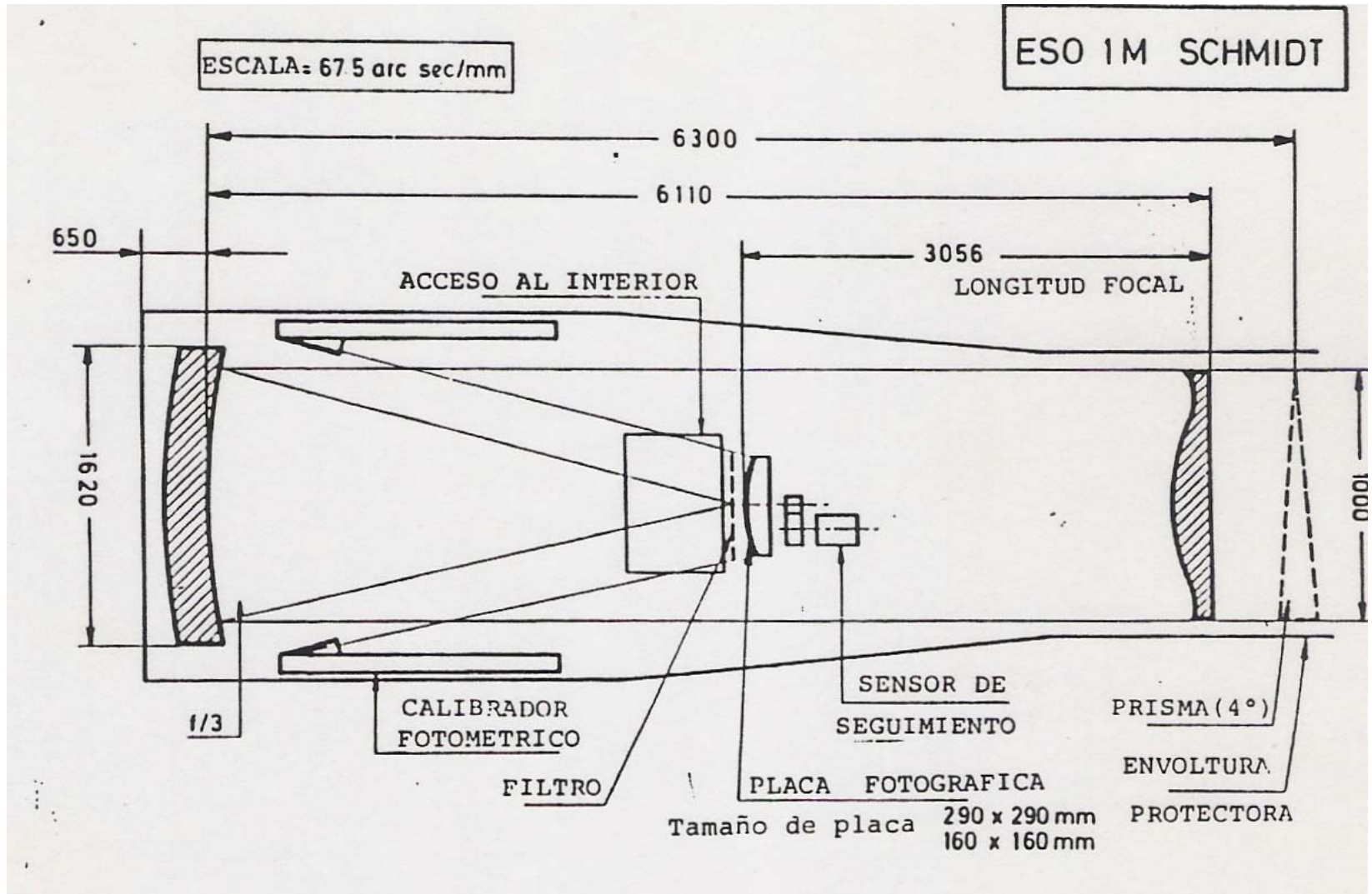
Tiene aberración esférica y curvatura de campo.

Idea 2: Lámina correctora
(en el centro de curvatura del espejo)
para evitar aberración esférica.
(i sin tener que parabolizar el primario !)



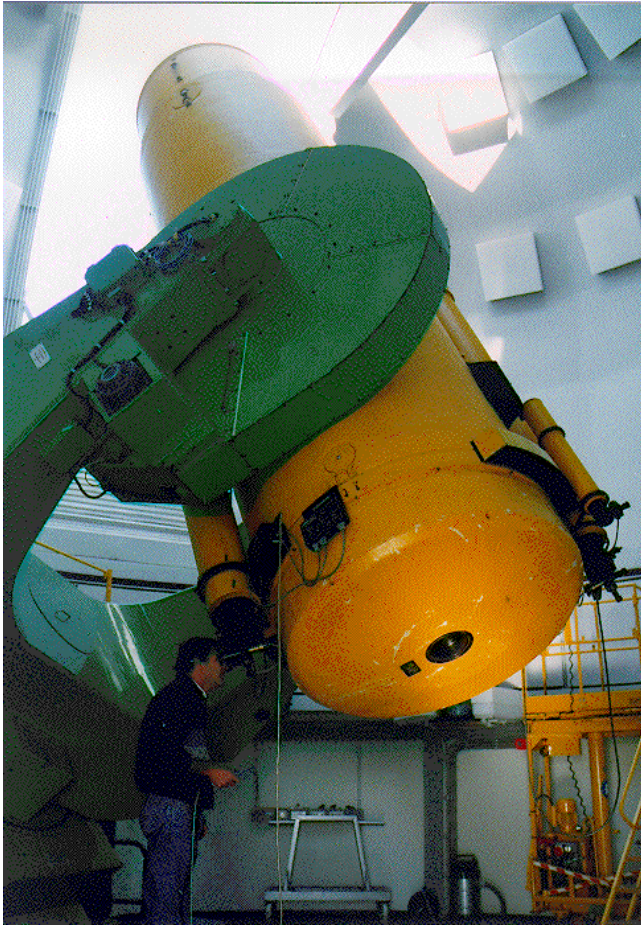
La lámina correctora aumenta la focal para haces lejanos al eje óptico (como una lente divergente) y la reduce para rayos próximos (lente convergente).

CÁMARA SCHMIDT (3)



El foco se encuentra en el interior del telescopio, en el foco primario.
El plano focal es curvo.

CÁMARA SCHMIDT (4)



Schmidt Calar Alto

Ventajas:

- Muy luminosa (F pequeño)
- Gran campo
- Ideal para exploraciones

Inconvenientes:

- Superficie focal curva
- Doble longitud del tubo
- Obstrucción parcial de los rayos
- Placa correctora introduce aberración cromática y algo de coma

	Placa (cm)	Espejo (cm)	f (m)	f/D	Campo	Placa (cm ²)
Palomar	120	180	3	2.5	7° x 7°	46 x 46
Calar Alto	80	120	2.4	3	5.5 x 5.5	24 x 24
ESO	100	162	3	3	5 x 5	30 x 30

ESTRUCTURAS (1)

- Sostiene y mantiene colimados los elementos ópticos.
- Permiten el acoplamiento de los sistemas de análisis y detección.
- No deben existir vibraciones, ni permitir que llegue luz difusa.
- Se deben compensar las dilataciones térmicas.



TUBULAR

preferida de refractores y Cámara Schmidt.

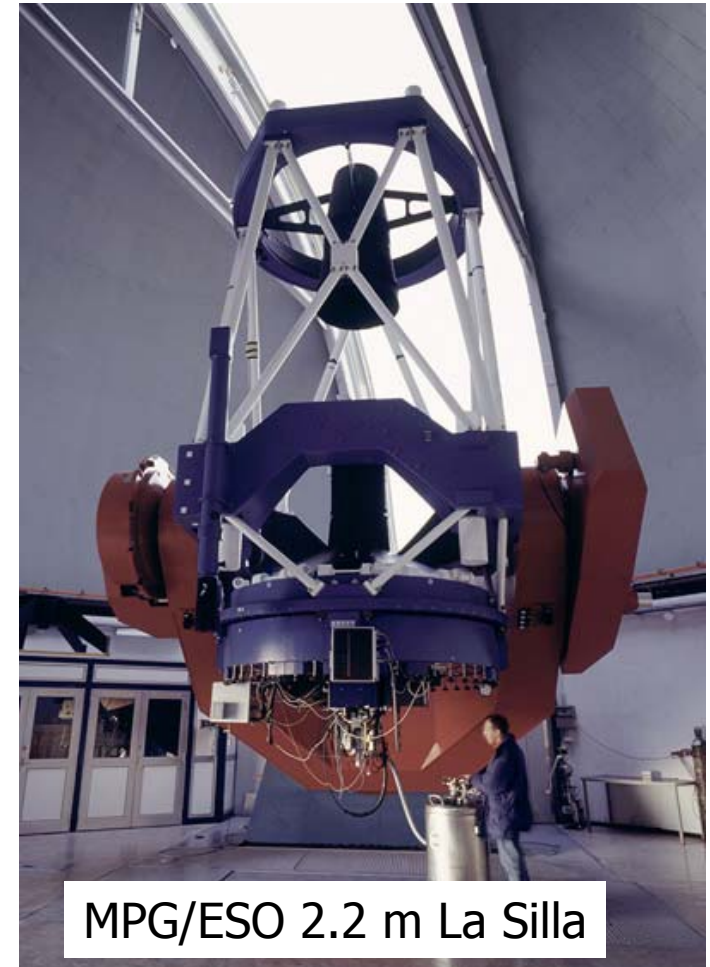
Excesivo peso, pero impide por completo la luz difusa.

ESTRUCTURAS (2)

SERRURIER para reflectores de gran tamaño.

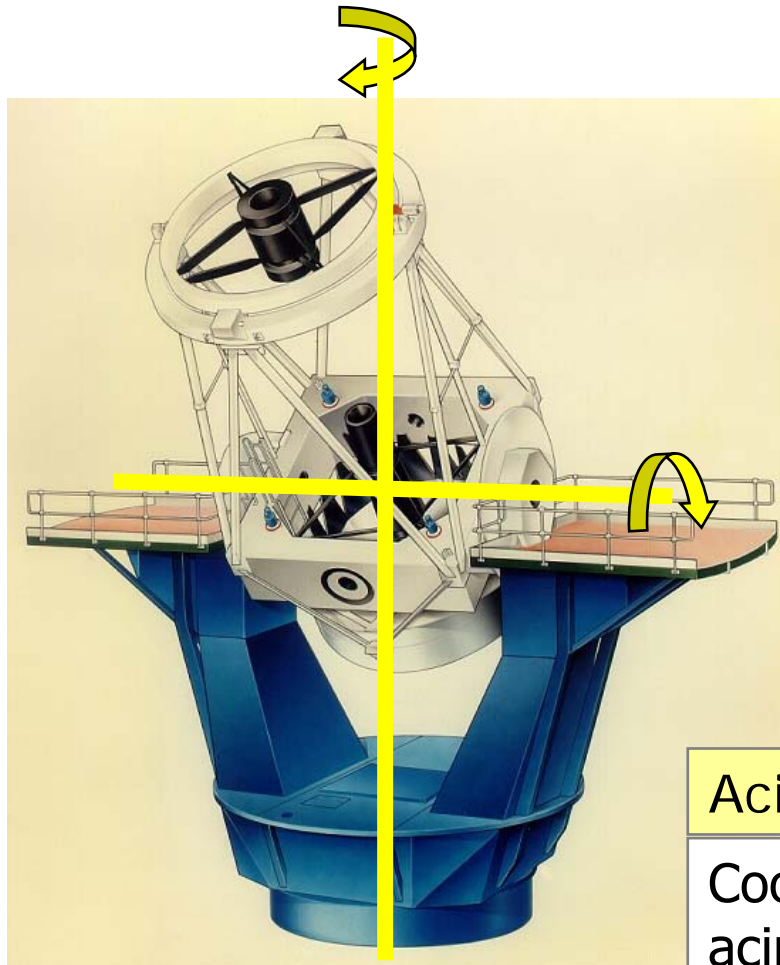
Celdas (primario y secundario) de anillas y barras cruzadas.
Centro de gravedad cerca del primario; ahí se acopla a la montura.

Diafragmas troncocónicos o cilíndricos (Baffles)
solucionan los problemas de luz parásita



MONTURAS

Permiten a los telescopios apuntar y seguir a los objetos celestes en su movimiento diurno.

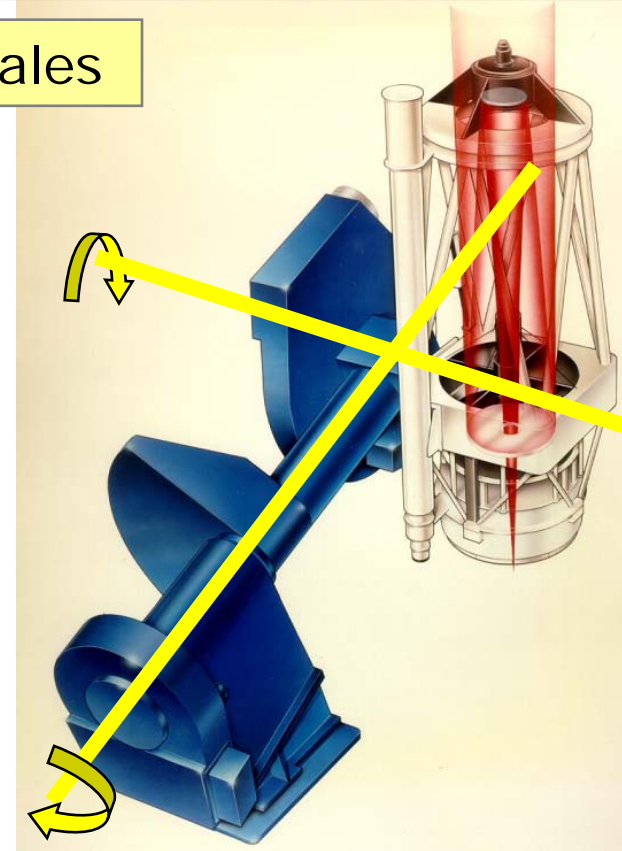


Acimutales

Coordenadas horizontales:
acimut y altura.

Coordenadas ecuatoriales:
Eje polar y eje de declinación

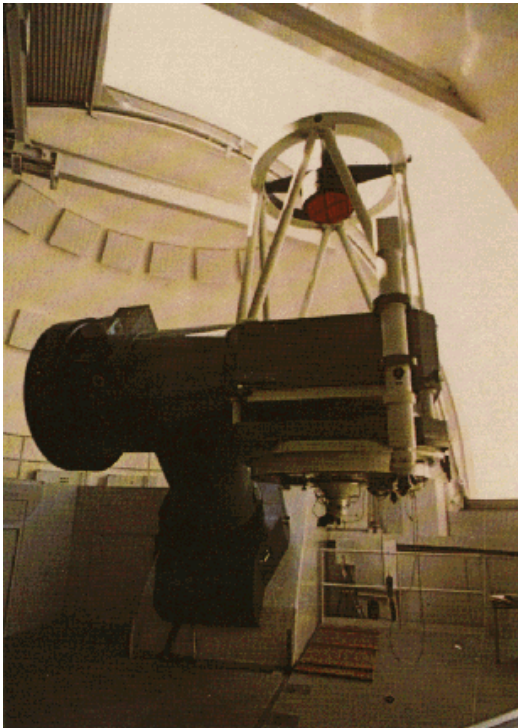
Ecuatoriales



MONTURAS ECUATORIALES

- Una vez apuntado, el seguimiento se realiza moviendo sólo el eje polar a velocidad cte.
- Hay que ponerlos en estación: alinear el eje polar.
- Las tensiones que soportan los ejes varían según dónde apunte.
- No presentan rotación de campo en el plano focal.

Monturas asimétricas

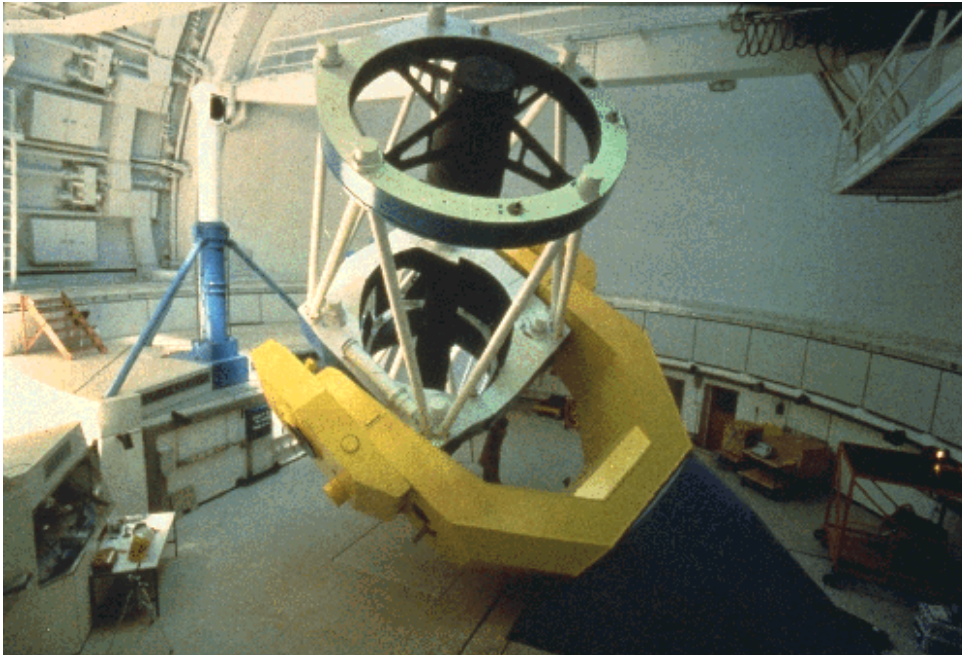


Montura inglesa
(English mount)

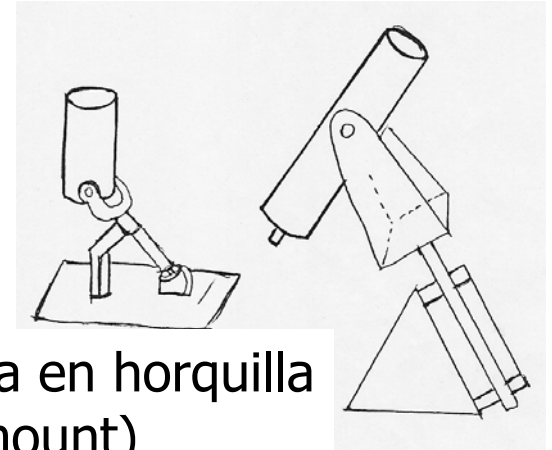
Montura alemana
(German mount)



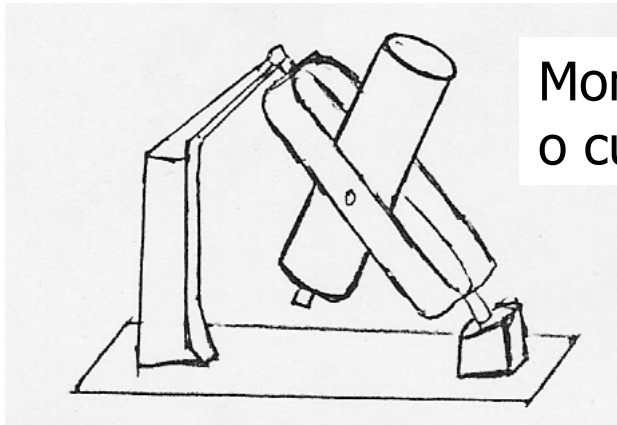
MONTURAS ECUATORIALES SIMÉTRICAS



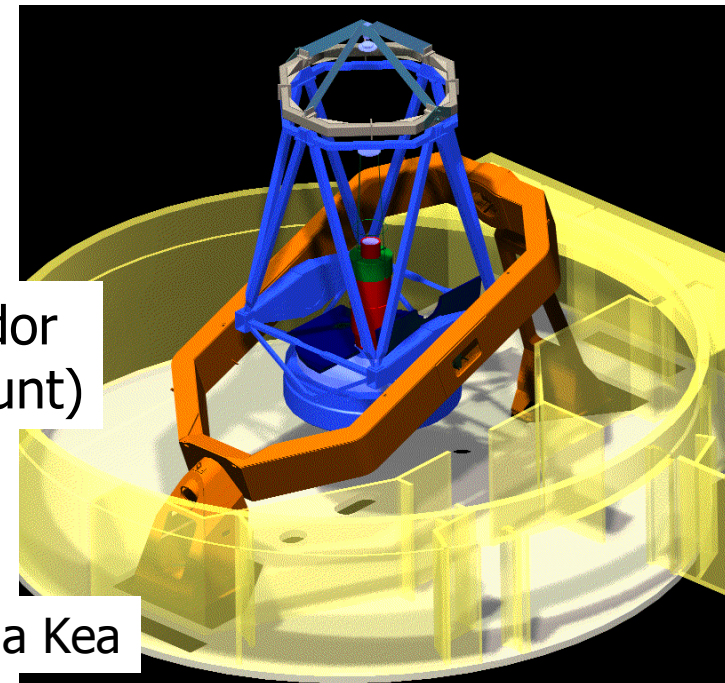
2.2m Calar Alto



Montura en horquilla
(Fork mount)



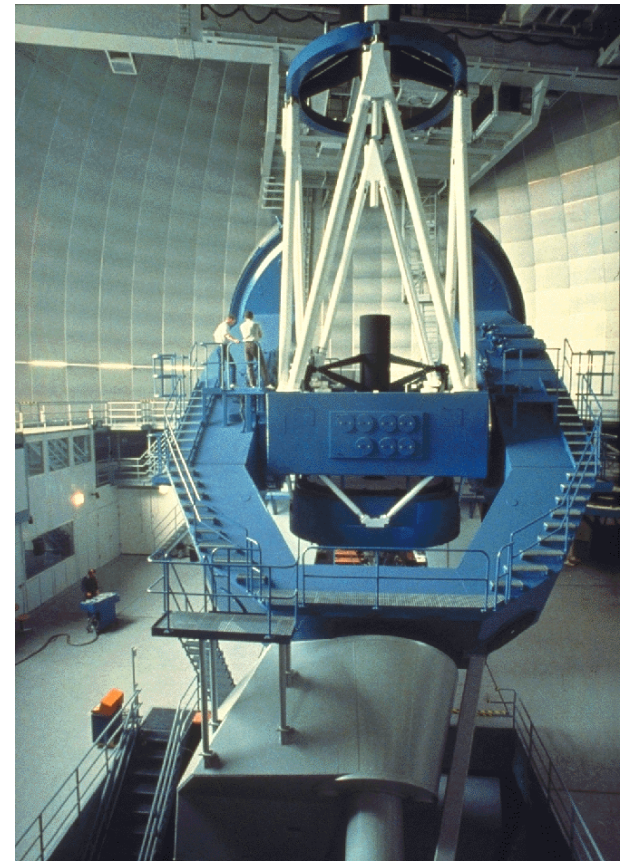
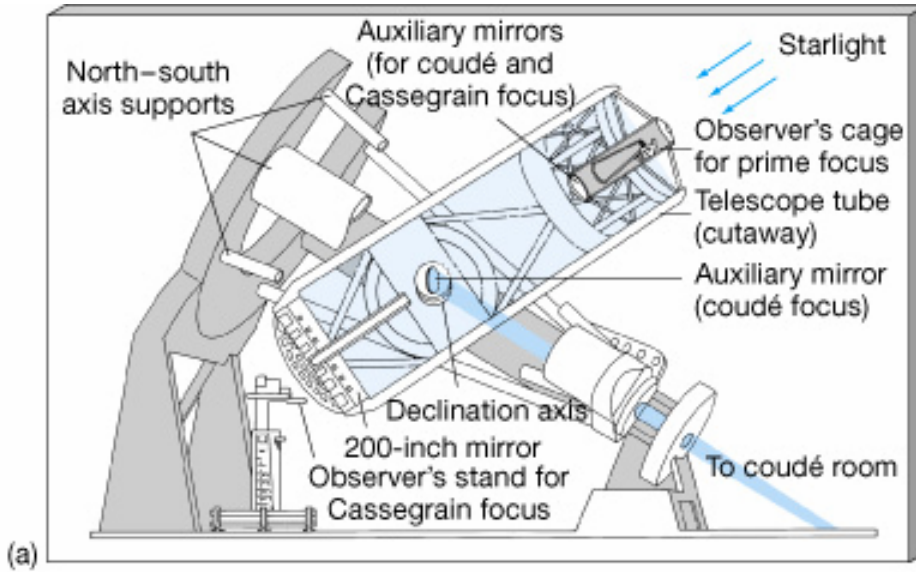
Montura inglesa de bastidor
o cuna (English Yoke mount)



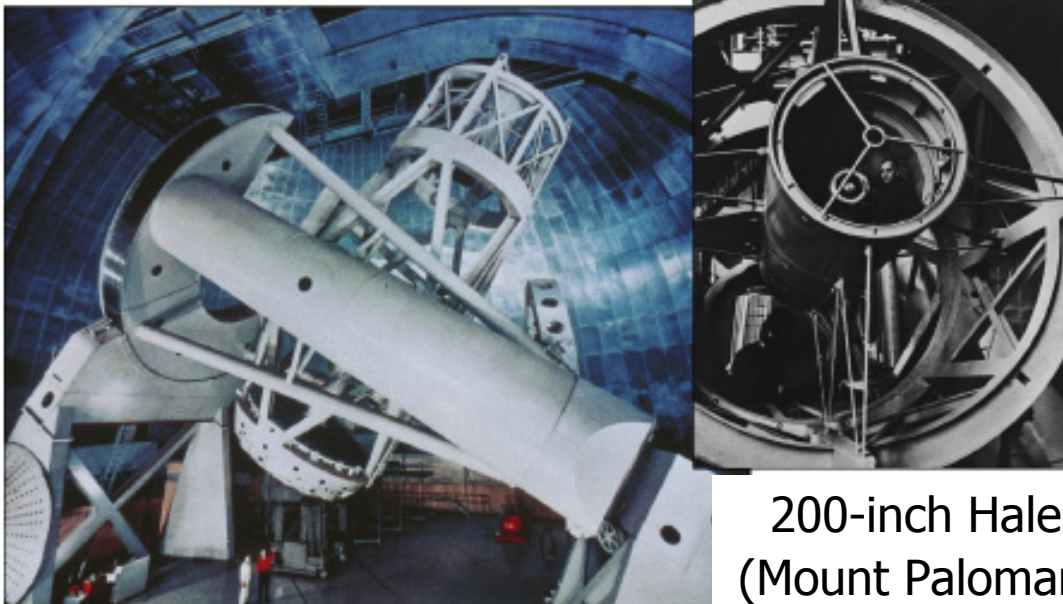
UKIRT Mauna Kea

MONTURAS ECUATORIALES SIMÉTRICAS

Montura en herradura
(Horseshoe mount)



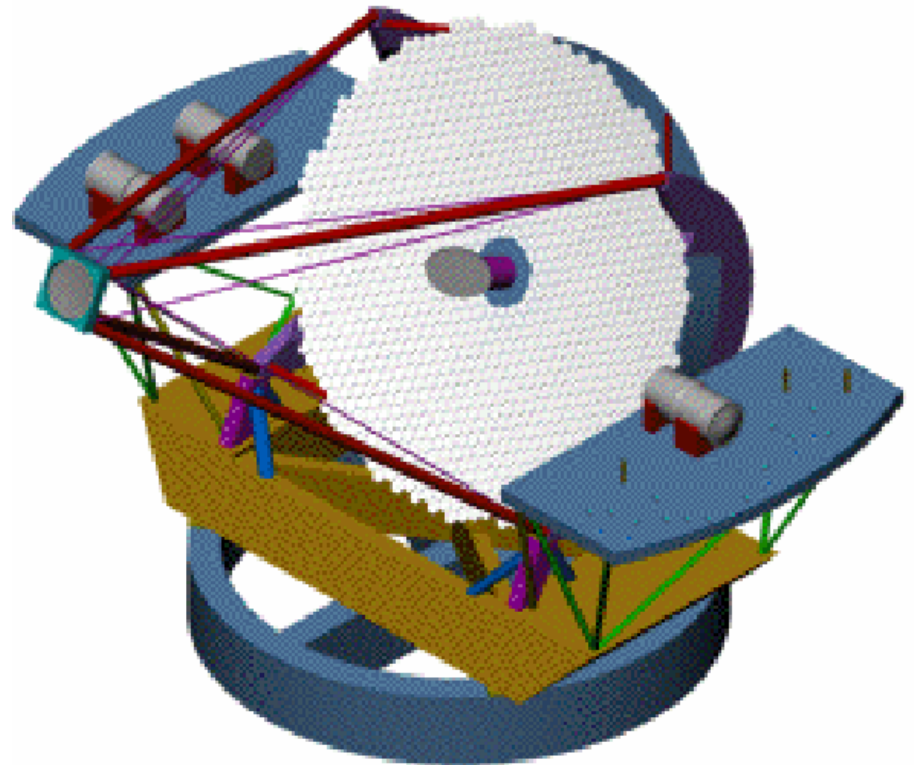
3.5m Calar Alto



200-inch Hale
(Mount Palomar)

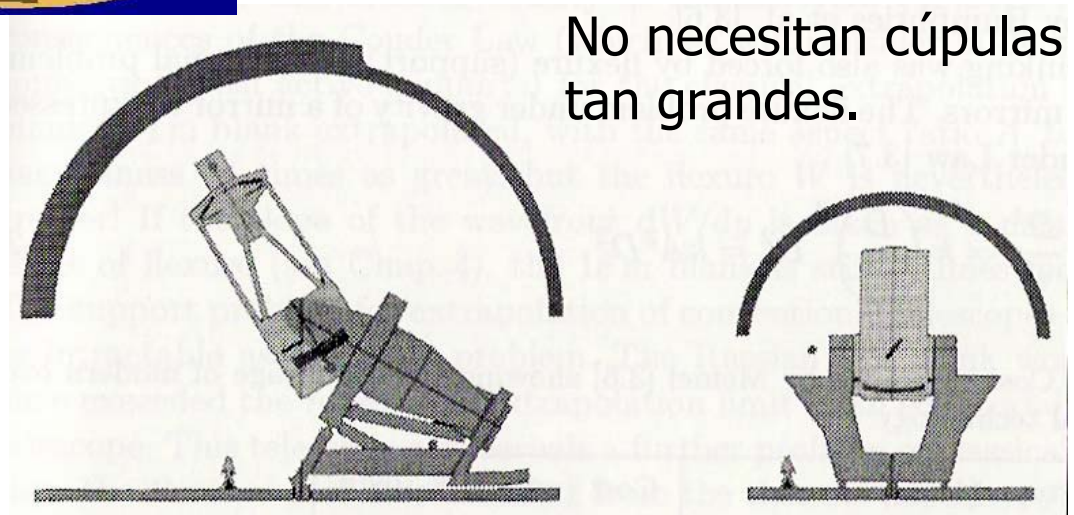
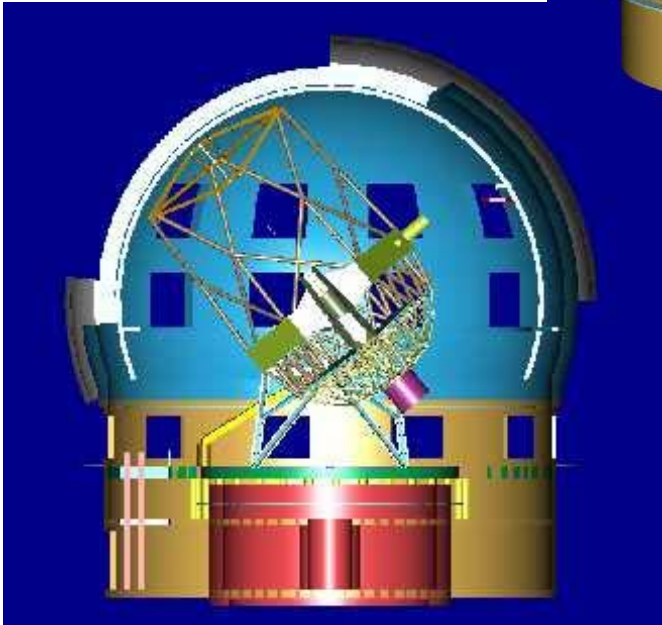
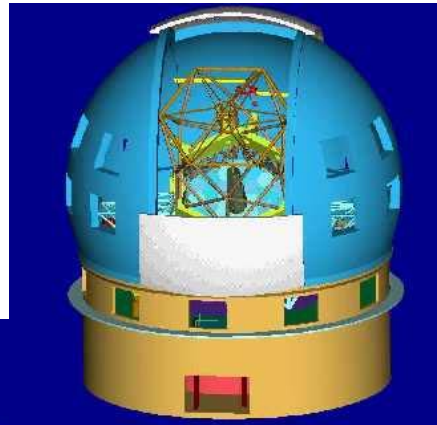
MONTURAS ACIMUTALES (1)

- El seguimiento se realiza moviendo los dos ejes a la vez.
- Las tensiones que soportan los ejes son ctes.
- Pueden cargar estructuras de telescopios enormes.



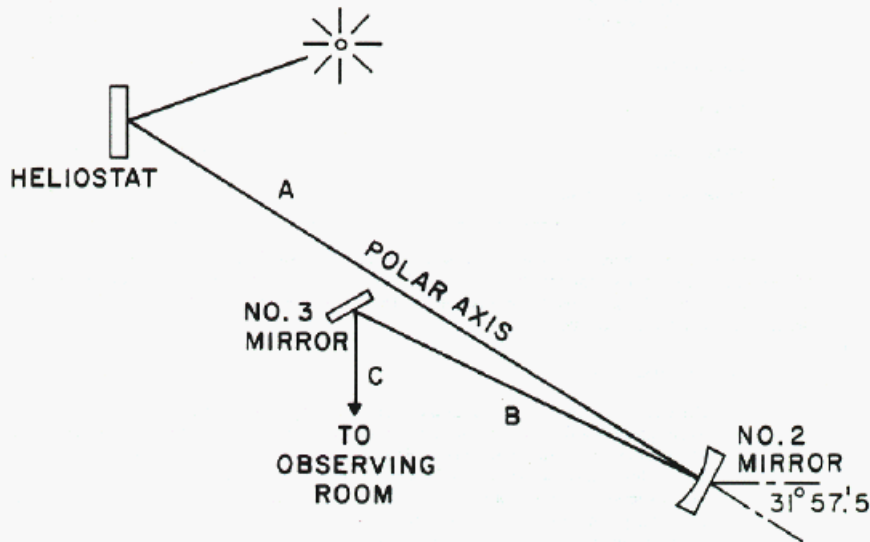
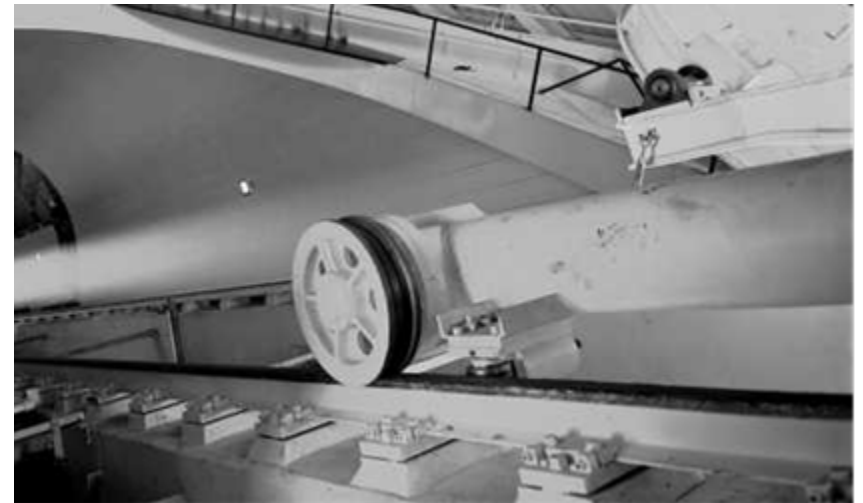
MONTURAS ACIMUTALES (2)

- Necesitan corregir la rotación de campo en el plano focal.



MONTURAS ESPECIALES (1)

Heliostatos - Celostatos



McMath-Pierce solar telescope 1.61 m f/54
National Solar Observatory/Kitt Peak

<http://nsokp.nso.edu/mp/>

MONTURAS ESPECIALES (2)

El círculo meridiano o telescopio de tránsitos, sólo permite observar las estrellas a su paso por el meridiano. Se empleaba para astrometría midiendo el instante de culminación y la distancia cenital.



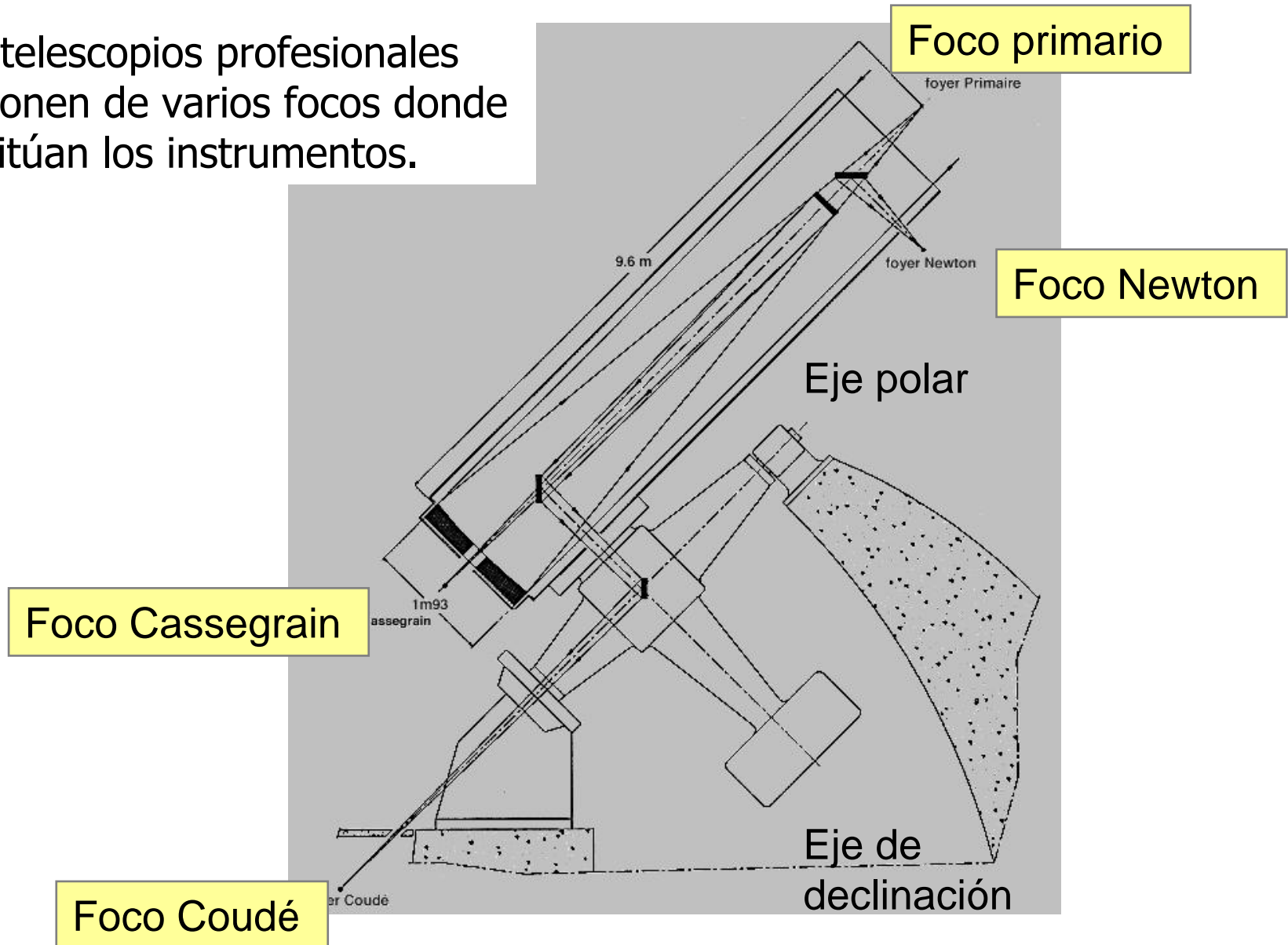
The Carlsberg Meridian Telescope
Observatorio del Roque de los Muchachos
<http://www.ast.cam.ac.uk/~dwe/SRF/camc.html>



Grubb-Parsons Meridian Circle
Observatorio Carlos U. Cesco (Argentina)

FOCOS DE TELESCOPIOS (1)

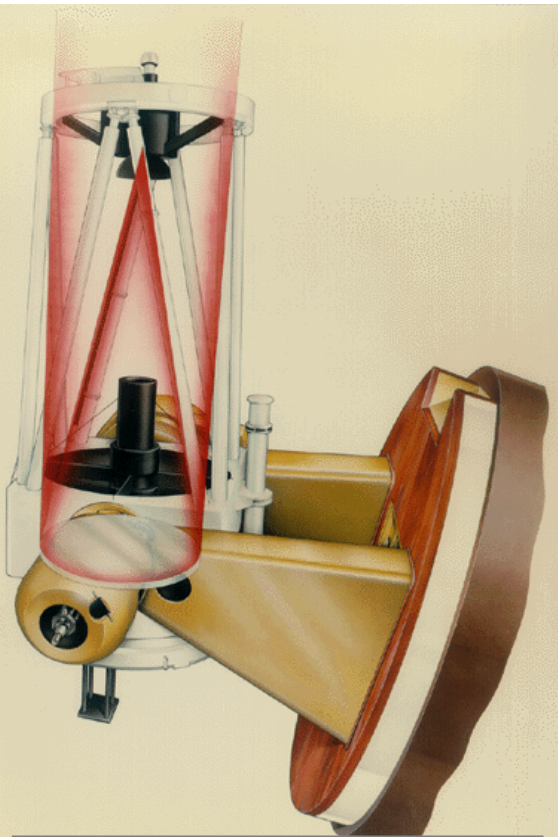
Los telescopios profesionales disponen de varios focos donde se sitúan los instrumentos.



FOCOS DE TELESCOPIOS (2)

Foco primario

Es el foco del objetivo.
No hay más espejos en el camino
En él se suelen colocar cámaras de gran campo.



INT 2.5m La Palma

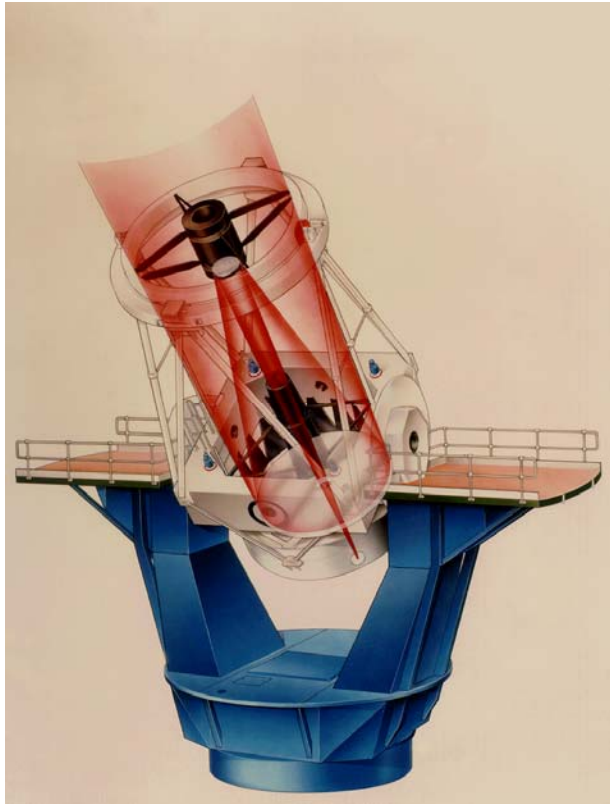


Cámara nIR CIRSI en el foco primario del WHT

FOCOS DE TELESCOPIOS (3)

Foco Cassegrain

Antes del foco primario se sitúa un espejo convexo que alarga la focal. El espejo primario está perforado para permitir el paso de la luz. El foco se sitúa detrás del espejo primario.



WHT 4.2m La Palma

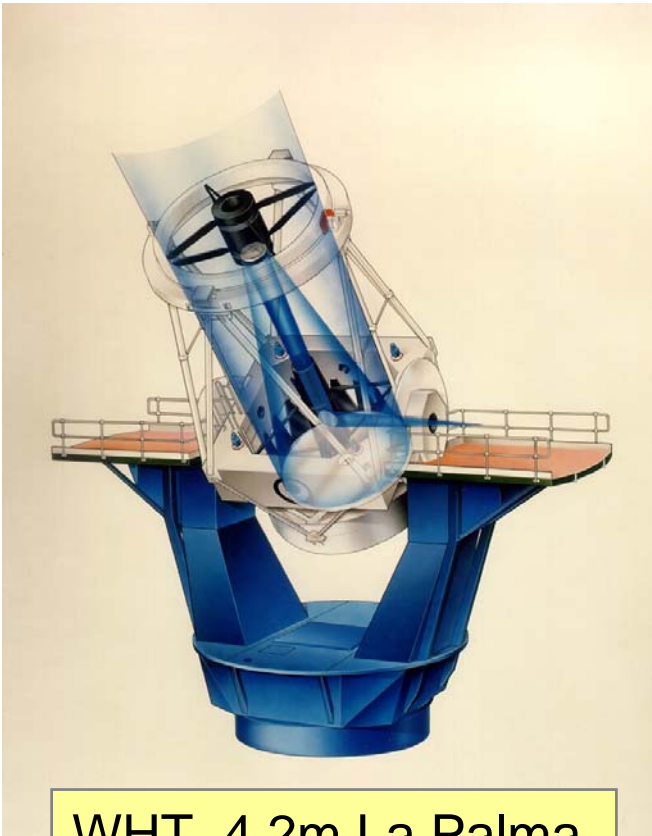


Espectrógrafo ISIS en el foco cassegrain del WHT

FOCOS DE TELESCOPIOS (4)

Foco Nasmyth

Además del secundario se coloca un terciario en la intersección del eje óptico con el eje de altura (monturas acimutales). Se pueden colocar instrumentos pesados en las plataformas Nasmyth.



WHT 4.2m La Palma



Utrech Echelle Spectrograph (UES)
en una de las plataformas Nasmyth del WHT

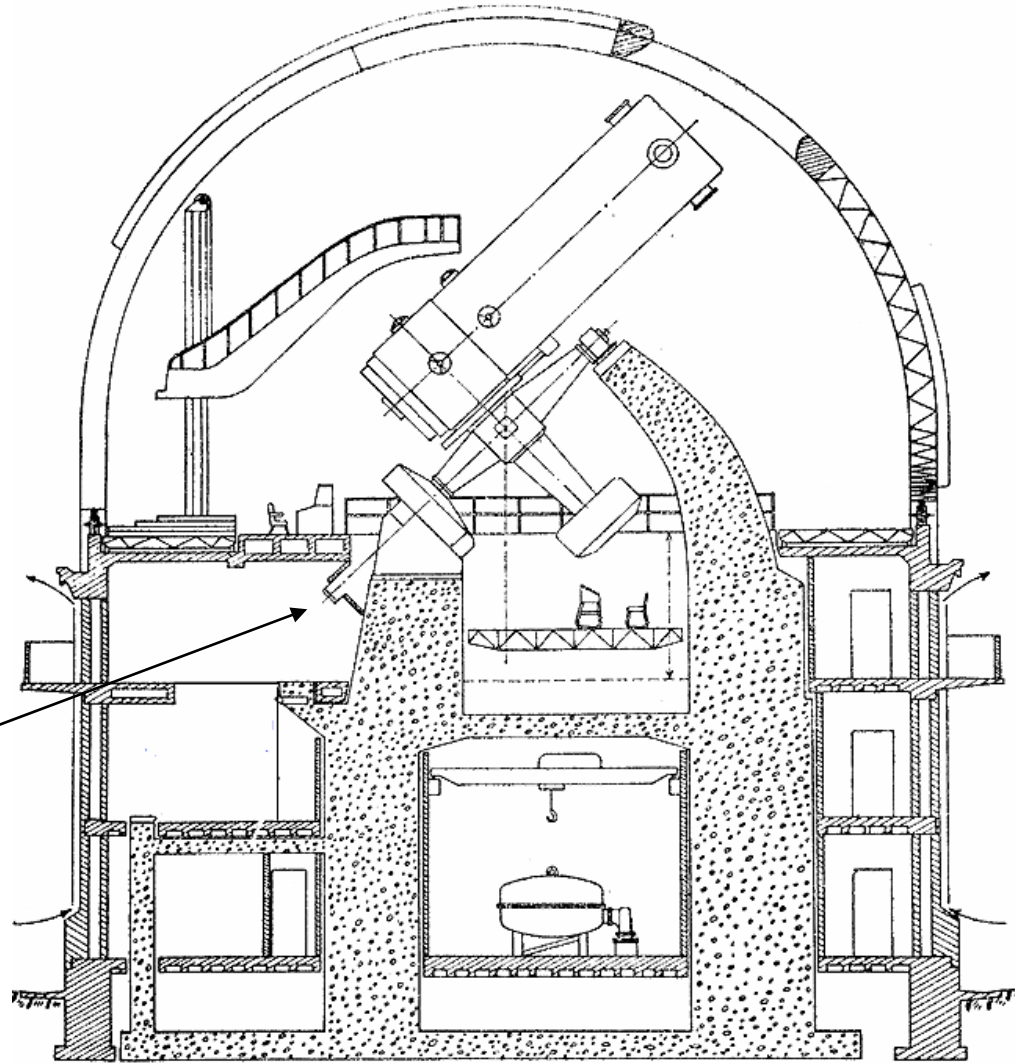
FOCOS DE TELESCOPIOS (5)

Foco coudé

Además del secundario se coloca un terciario en la intersección del eje óptico con el eje de declinación (monturas ecuatoriales) y un cuaternario en la intersección del eje de declinación con el eje polar.

Foco coudé

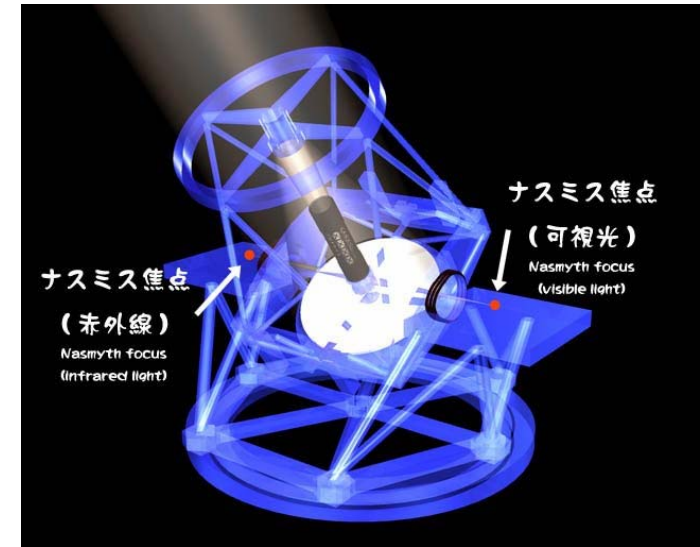
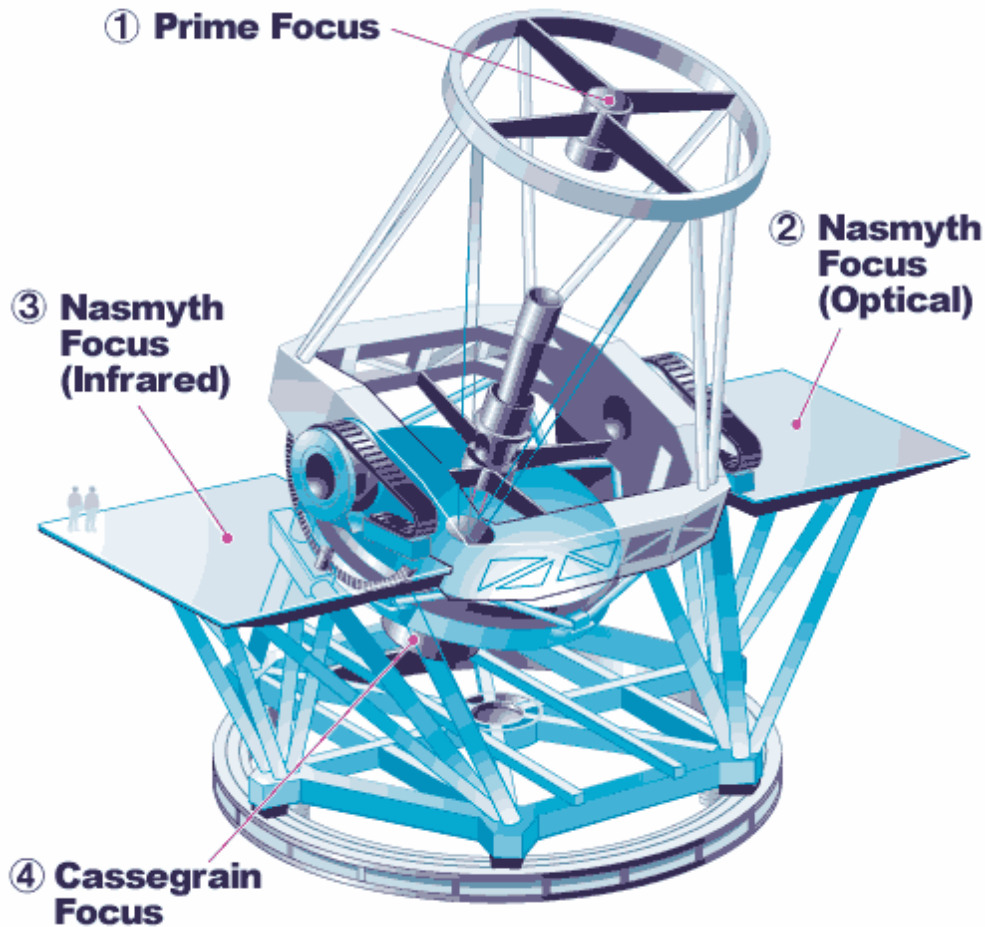
El foco está fijo, en la sala coudé, y se colocan en él espectrógrafos de alta resolución.



Esquema del 193cm de Haute Provence

FOCOS DE TELESCOPIOS (6)

Focos en Subaru 8.2 m



<http://www.naoj.org/Introduction/telescope.html>

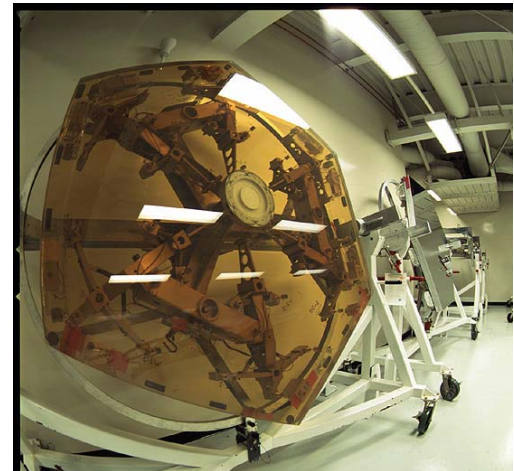
ESPEJOS (1)

Los espejos se fabrican en materiales de bajo coeficiente térmico.
(ULE *ultra low expansion substrate material*)

Materiales ULE

Silicio fundido # Corning 7971 ULE (92.5% SiO₂ + 7.5% TiO₂)
Se pueden fabricar en trozos que se pegan fundiéndolos.
Ej: Subaru 8.2m

ZERODUR Cristal cerámico (Schott)
Ej: Keck, VLT etc



Visita: Mirror blank materials by James R. Graham (UCB)

<http://grus.berkeley.edu/~jrg/MATERIALS/>

ESPEJOS (2)

Borosilicato

- PYREX (Corning) y Duran 50 (Schott)
- necesitan control térmico
- posibilidad de reducir peso



Ej: 8.4m LBT (Large Binocular Telescope)
(Honeycomb en Hornos rotantes)

Carburo de silicio (silicon carbide SiC)

- Rígido pero liviano.
- Alta conductividad y baja expansión térmica
- Especial para telescopios espaciales

Ej: espejo del telescopio Herschel
tiene 3mm de espesor.



Espejo de 3.5m HERSCHEL
en la cámara de aluminizado

REFLECTIVIDAD DE LOS ESPEJOS (I)

Los espejos se recubren para que reflejen la luz eficientemente.

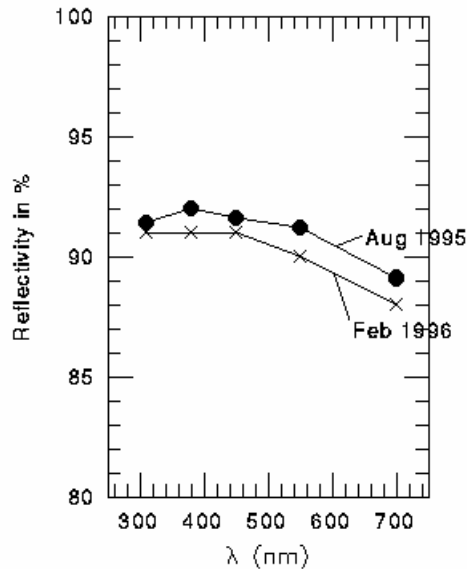
1660-1860: Bronce (CuSn) pulido ($R < 70\%$)

1860-1935: Plata (Ag) depositada químicamente ($R > 90\%$).

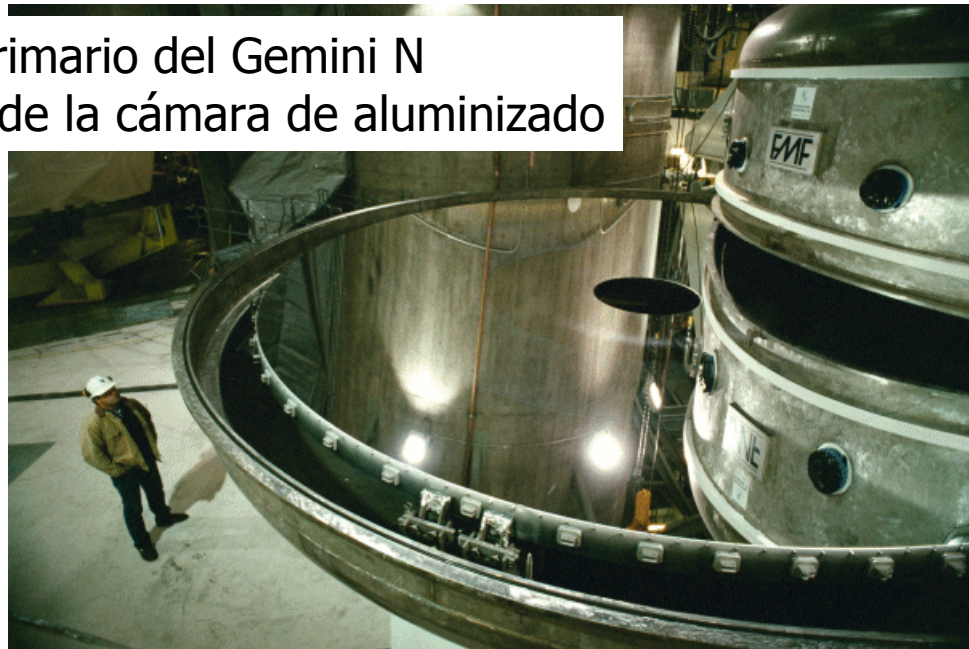
1935-2000: Aluminio (AL) depositado por evaporación en vacío.

Capa fina (200 nm) depositada sobre sustrato muy limpio.
(10 g de Al para espejo de 8 m)

Recubrimiento para protección: SiO , SiO_2 , Al_2O_3

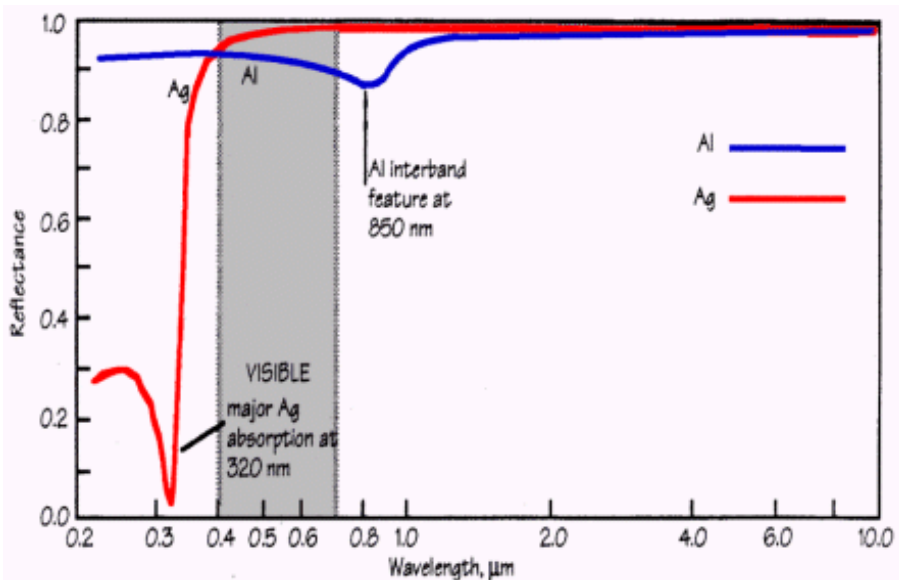


Espejo primario del Gemini N
saliendo de la cámara de aluminizado



REFLECTIVIDAD DE LOS ESPEJOS (II)

- El recubrimiento de plata es más eficiente en el infrarrojo.
- Además reduce la emisión térmica del espejo considerablemente lo que es muy útil en observaciones IR.



Reflectividad comparada de Al y Ag



Espejo de Gemini Sur con recubrimiento de Ag

El espejo de Gemini usa recubrimiento de plata [Nota de prensa](#)