



TEMA 7.- SISTEMAS TELESCÓPICOS

- **Introducción.**
- **La condición afocal.**
- **Anteojo Astronómico.**
 - **Aumento visual. Campo angular. Diafragma de campo y retículos. Profundidad de enfoque. Oculares dobles. Sistema inversor. Luminosidad. Poder separador.**
- **Anteojo de Galileo.**
 - **Campo angular. Profundidad de enfoque. Luminosidad. Poder separador. Ventajas e inconvenientes del Anteojo de Galileo.**
- **Telescopios reflectores.**
 - **Propiedades de los Telescopios reflectores. Telescopio de Newton. Telescopio de Cassegrain.**
- **Denominación comercial y ejemplos.**



SISTEMAS TELESCÓPICOS

7.1.- Introducción

Telescopios: Instrumentos ópticos subjetivos para la observación de objetos lejanos. Están compuestos, básicamente, por dos elementos:

- Objetivo: Elemento convergente.
- Ocular: Convergente o divergente.

Características generales:

- Son sistemas **afocales** : Dado un objeto situado en el infinito, proporcionan una imagen situada también en el infinito.
- Presentan al ojo una imagen aumentada de objetos extensos.
- Para la observación de objetos puntuales son instrumentos muy luminosos.



7.1.- Introducción

TIPOS DE TELESCOPIOS:

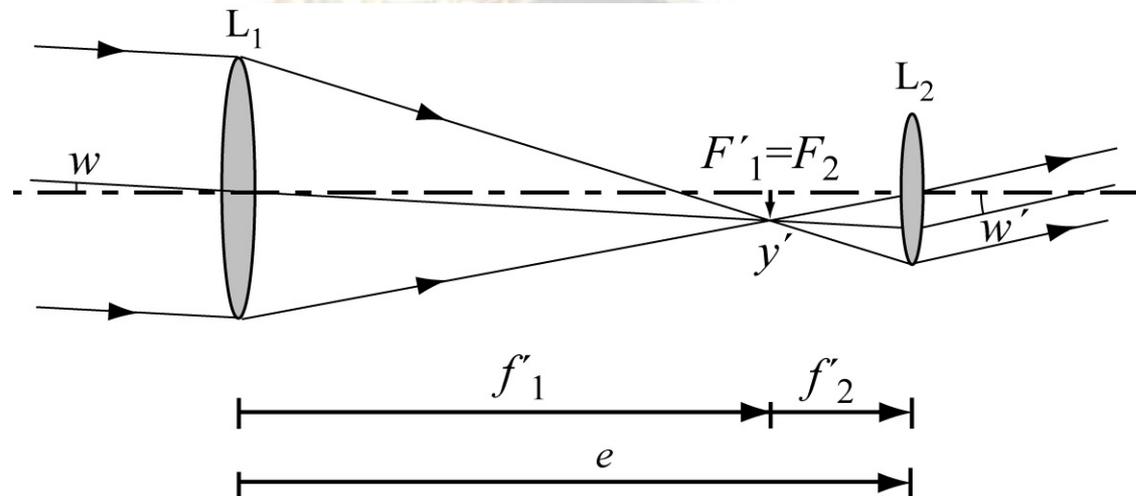
- **TELESCOPIOS REFRACTORES** (o Anteosjos): El Objetivo está formado por una lente o acoplamiento de lentes.
 - Anteojo Astronómico o de Kepler
 - Anteojo de Galileo

- **TELESCOPIOS REFLECTORES**: El Objetivo es un espejo o acoplamiento de espejos.
 - Telescopio de Newton
 - Telescopio de Cassegrain



7.2.- La condición afocal

- Todos los Telescopios son **Sistemas afocales** : Transforman un haz colimado incidente en un haz emergente también colimado pero con una inclinación mayor.
- Sistema afocal más simple: está formado por el acoplamiento de dos lentes convergentes, de forma que el foco imagen de la primera coincide con el foco objeto de la segunda:



7.2.- La condición afocal

- Los Sistemas afocales carecen de puntos cardinales y, por tanto, para su estudio no puede utilizarse las ecuaciones de conjugación Gauss o de Newton.
- Pueden analizarse de modo muy simple adaptando las ecuaciones de conjugación de Gauss generalizadas.

Ecuaciones de conjugación
de Gauss generalizadas

$$-\frac{n}{x_o} + \frac{n'}{x_o'} \beta_P^2 = \frac{n'}{f'} \beta_P$$

$$\beta_0 = \frac{n x_o'}{n' x_o} \frac{1}{\beta_P}$$

Ecuaciones de conjugación
de Gauss generalizadas
para Sistemas afocales

$$x_o' = x_o \beta_P^2$$

$$\beta_0 = \frac{x_o'}{x_o} \frac{1}{\beta_P} = \beta_P$$

$$n = n'$$

$$f' = \infty$$

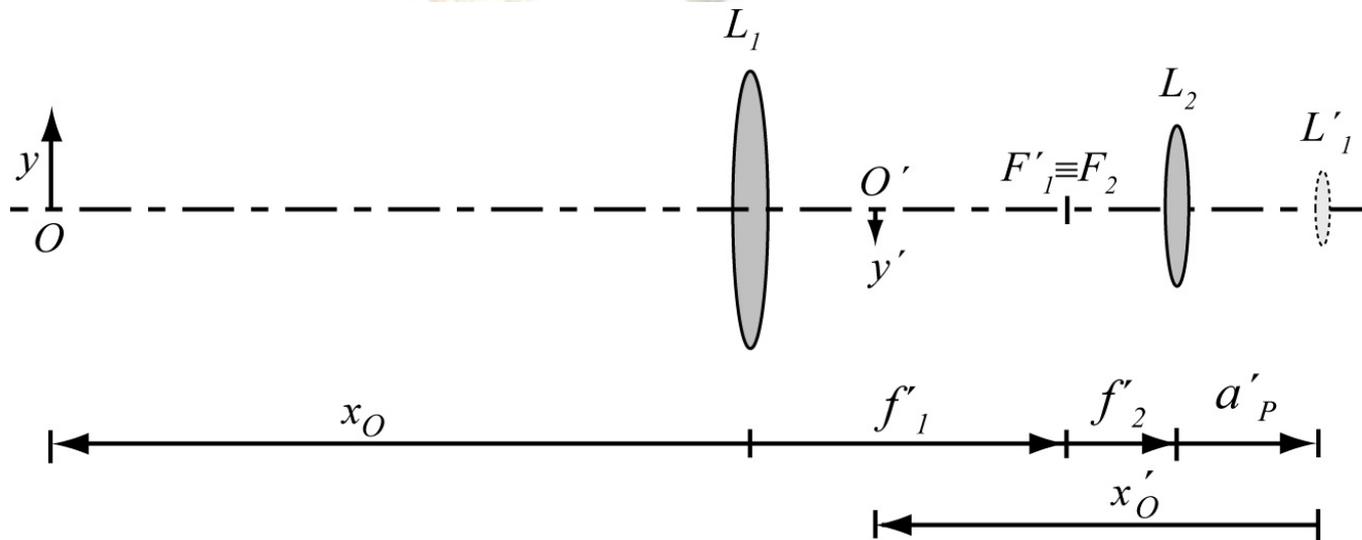
Ecuaciones de correspondencia para los Sistemas afocales

$$x'_0 = x_0 \beta_P^2$$

$$\beta_0 = \frac{x'_0}{x_0} \frac{1}{\beta_P} = \beta_P$$

■ En los Sistemas telescópicos, el ojo del observador se debe situar, al igual que en el Microscopio, de modo que su Pupila de Entrada coincida con la Pupila de Salida del instrumento y, por ello, es conveniente tomar como orígenes para las distancias axiales:

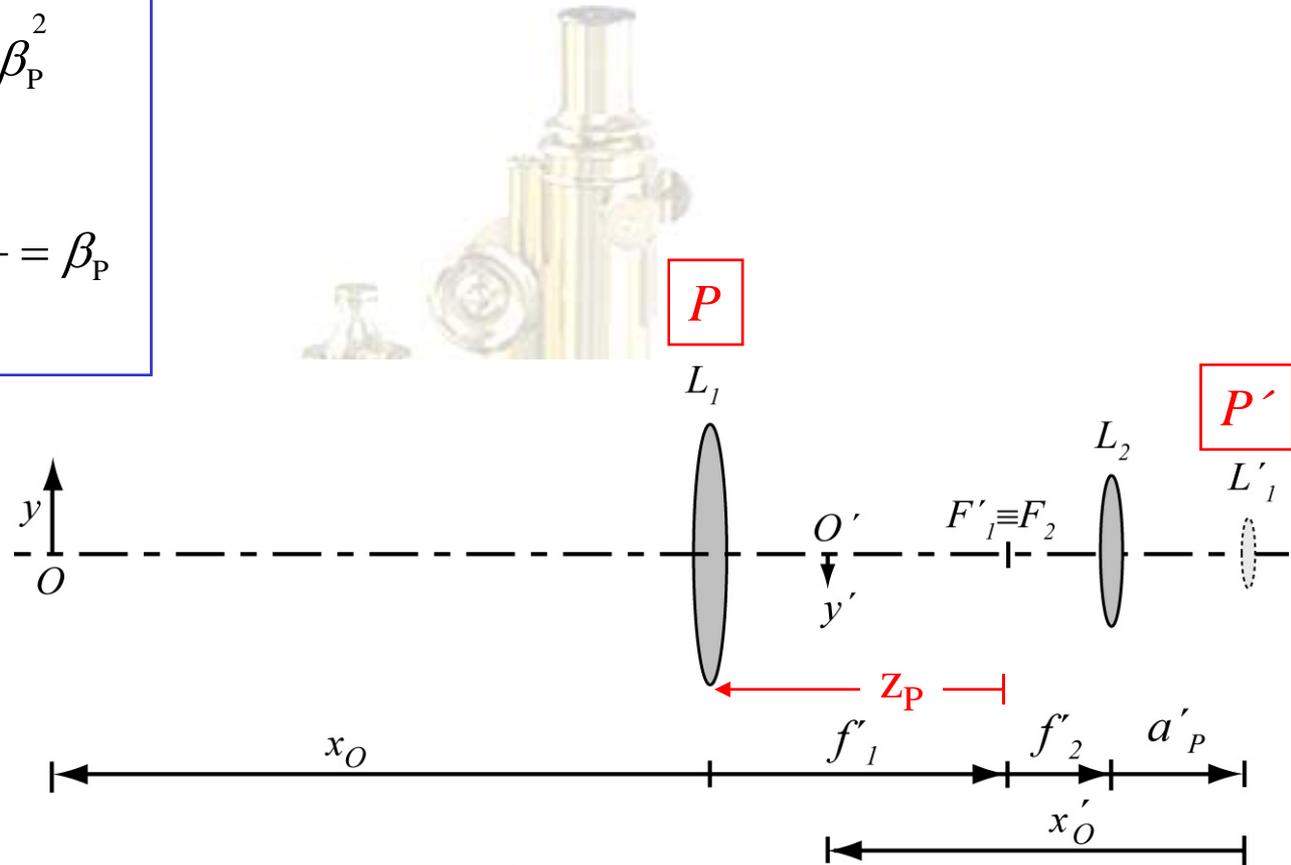
- L_1 : Objetivo (PE) en el espacio objeto.
- L'_1 : Conjugado del Objetivo (PS) en el espacio imagen.



Ecuaciones de correspondencia para los Sistemas afocales

$$x'_0 = x_0 \beta_P^2$$

$$\beta_0 = \frac{x'_0}{x_0} \frac{1}{\beta_P} = \beta_P$$



$$z_p z'_p = -f_2'^2$$

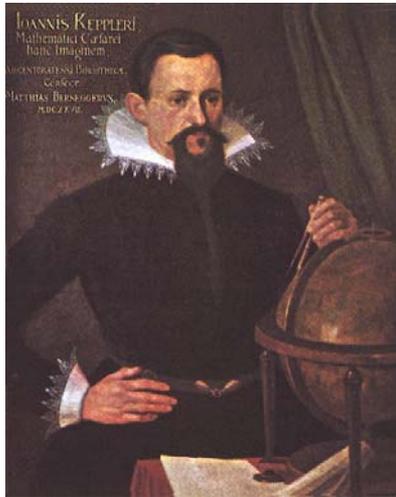
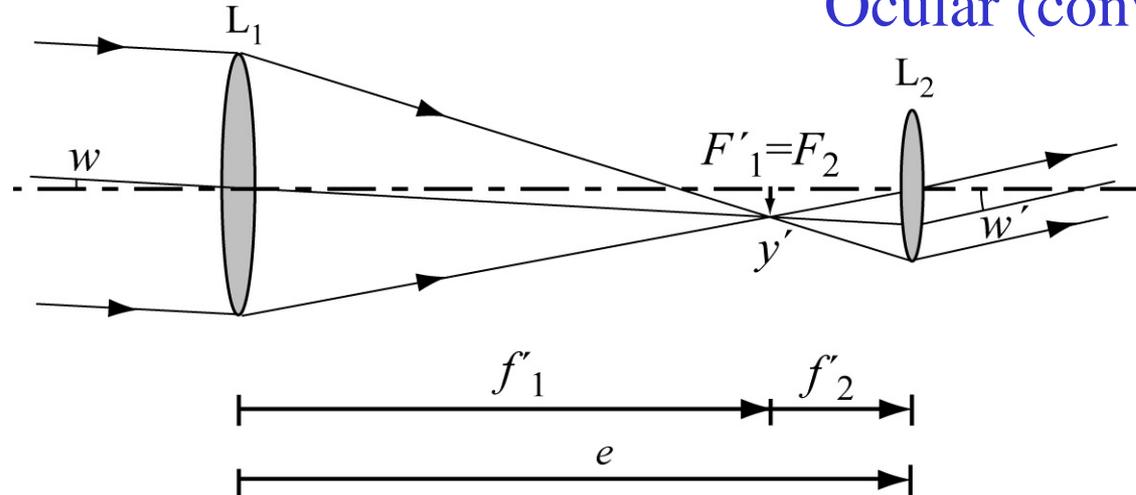
$$\beta_p = -\frac{z'_p}{f_2'} = \frac{f_2'}{z_p}$$

$$\beta_P = -\frac{f_2'}{f_1'} = \beta_0$$

7.3.- Anteojo Astronómico (o de Kepler)

Objetivo (convergente)

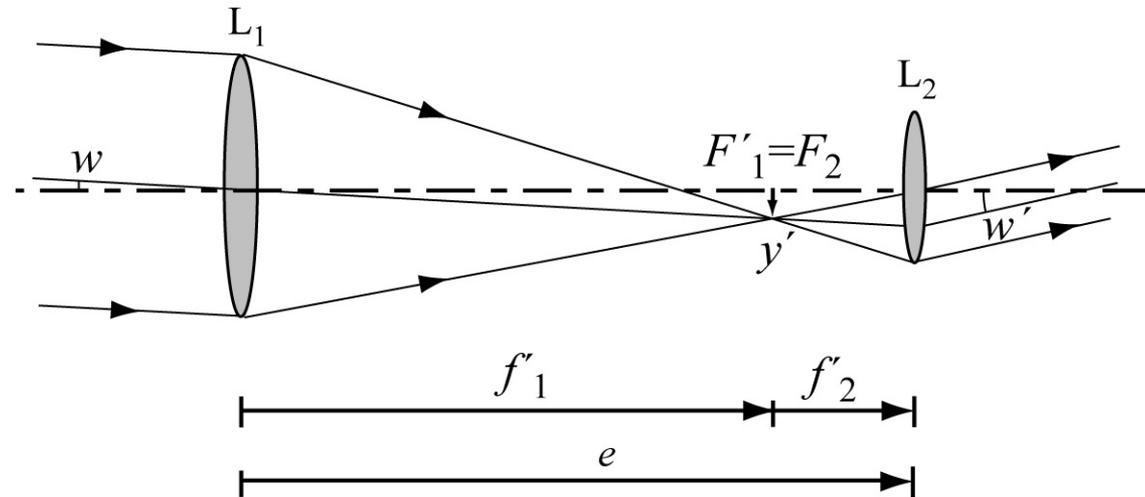
Ocular (convergente)



Johannes Kepler



7.3.- Anteojo Astronómico



7.3.1.- Aumento visual

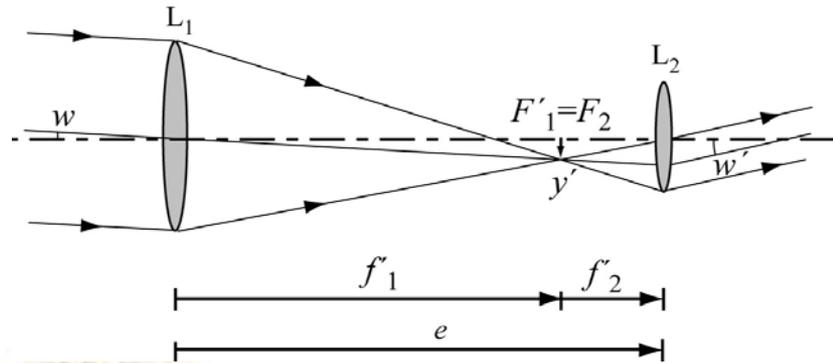
Se define el Aumento visual del Anteojo Astronómico como el cociente entre el tamaño angular aparente, w' , de la imagen y el tamaño angular, w , del objeto cuando es observado directamente.

$$\Gamma_K = \frac{w'}{w} \approx \frac{\tan w'}{\tan w}$$

$$\Gamma_K = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}} = \frac{1}{\beta_P}$$

7.3.1.- Aumento visual

$$\Gamma_K = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}} = \frac{1}{\beta_P}$$



- El Aumento visual es negativo:
 - No es importante en la observación astronómica.
 - El Anteojo Astronómico no sirve para la observación terrestre.
- Para obtener valores altos del aumento visual es necesario que $f'_{ob} \square f'_{oc}$

• Características de los Objetivos:

f'_{ob} varía entre unos decímetros y varios metros

Apertura Relativa: $AR = \frac{\phi_{ob}}{f'_{ob}}$ varía entre $\frac{1}{10}$ y $\frac{1}{20}$

• Características de los Oculares:

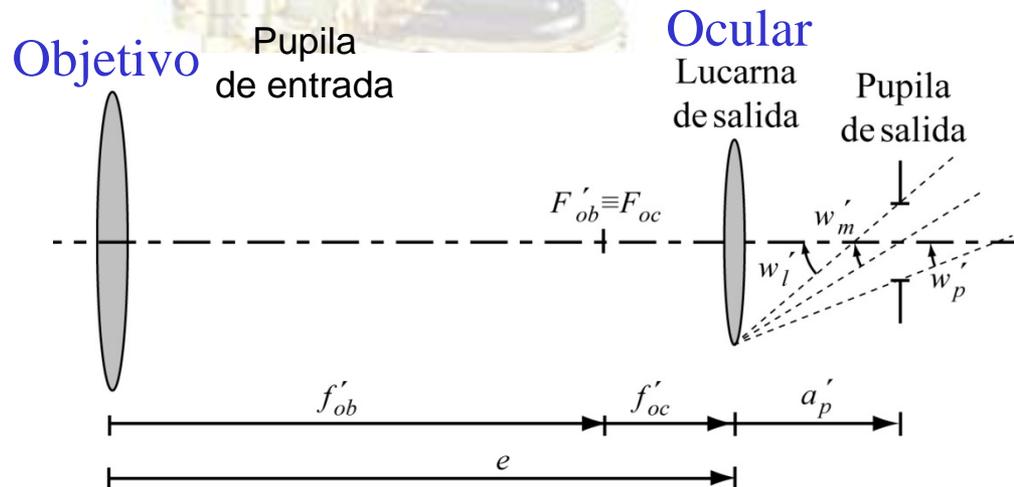
f'_{oc} varía entre 100mm y 10mm $\rightarrow \Gamma_{oc} (2.5 \square 25)$

7.3.2.- Campo angular

- El Campo visual del Anteojo Astronómico es angular ya que el plano objeto está situado en el infinito.

Cálculo del Campo de iluminación media en el espacio óptico imagen:

- El ocular y la pupila del ojo están en el espacio imagen.
- Hay que calcular la posición del conjugado del objetivo en el espacio imagen.
- La imagen final proporcionada por el Anteojo está en el infinito.
- En los Sistemas telescópicos la montura del objetivo actúa como Diafragma de Apertura (y Pupila de Entrada) y, por tanto, su conjugado en el espacio imagen es la Pupila de Salida.



7.3.2.- Campo angular

Posición y tamaño de la Pupila de Salida del Anteojo Astronómico

$$-\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a'_p} = \frac{1}{f'_{oc}}$$

$$a_p = -(f'_{ob} + f'_{oc}) = -e$$



$$a'_p$$

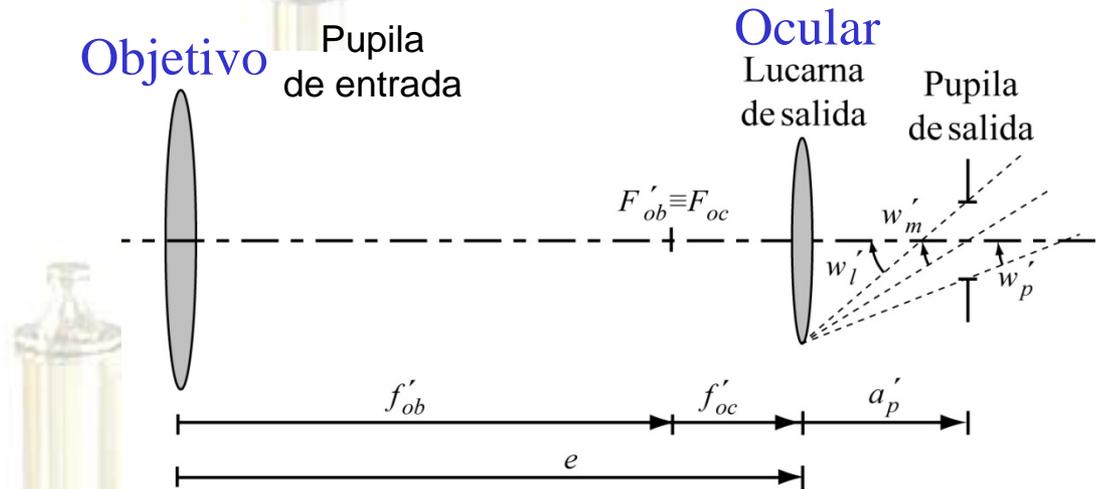
$$= -\frac{e}{\Gamma_K}$$

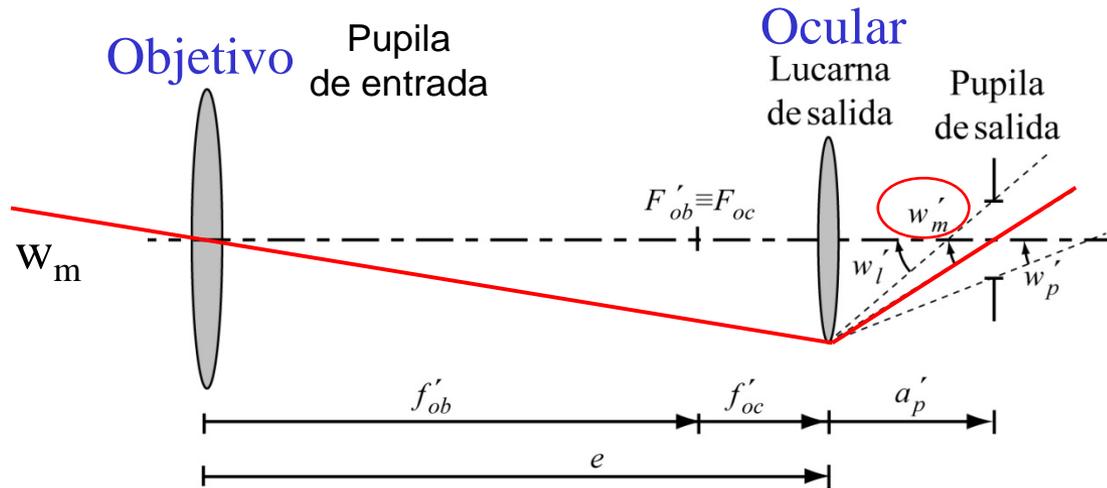
Emergencia pupilar

$$\phi_{PS} = |\beta_p| \phi_{ob} = \frac{\phi_{ob}}{|\Gamma_K|}$$

Diámetro de la Pupila de Salida

Para una observación óptima la Pupila del ojo ha de situarse sobre la Pupila de Salida del Anteojo





Cálculo del Campo de iluminación media en el espacio óptico imagen

El semicampo imagen de iluminación media es el ángulo subtendido por la montura del Ocular desde el centro de la Pupila del ojo

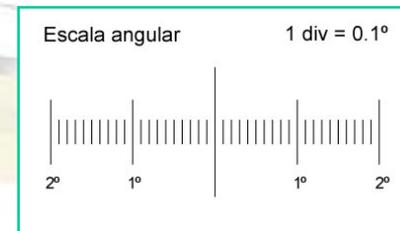
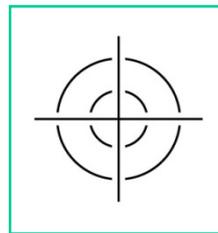
$$\tan w'_m = \frac{\phi_{oc}}{2a'_p}$$

Campo de iluminación media en el espacio óptico objeto (Campo visual)

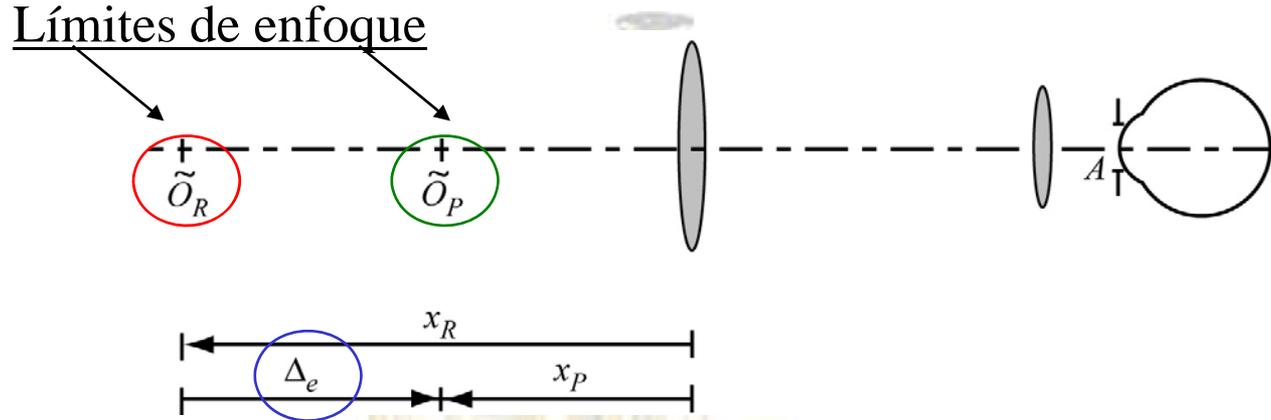
$$\tan w_m = \frac{\phi_{oc}}{2e}$$

7.3.3.-Diafragma de campo y retículos

- El Anteojo Astronómico tiene la ventaja de proporcionar una imagen intermedia real.
- Sobre el plano de la imagen intermedia pueden situarse, para mejorar la calidad de la observación, los siguientes elementos :
 - **Diafragma de campo:** Elemento opaco con una abertura circular que permite limitar el campo de observación eliminando el viñeteado.
 - **Retículo:** Elemento transparente, con dibujo de líneas o escala.
 - Se observa nítidamente a la vez que el objeto.
 - Sirve para fijar la dirección del punto de mira o medir:
 - El tamaño angular del objeto.
 - La separación angular de dos objetos puntuales .



7.3.4.- Profundidad de enfoque $\left\{ \Delta_e = \overline{\tilde{O}_R \tilde{O}_P} \right\} \xrightarrow{\text{ANTEOJO}} \left\{ I.V.N. = \overline{O_R O_P} \right\}$



Aplicando las ecuaciones de conjugación para Sistemas afocales

$$x_R = r\Gamma_K^2$$

$$x_P = p\Gamma_K^2$$

$$\Delta_e = x_P - x_R = (p - r)\Gamma_K^2$$



$$\Delta_e = \overline{\tilde{O}_R \tilde{O}_P} = x_P - x_R = (p - r)\Gamma_K^2$$

OBSERVADOR EMÉTROPE

$r = -\infty \rightarrow \Delta_e \equiv \infty$ independientemente de la posición de \tilde{O}_P

OBSERVADOR HIPERMÉTROPE

$\left\{ \begin{array}{l} O_R \text{ es virtual} \rightarrow \tilde{O}_R \text{ es virtual} \\ O_P \text{ es real} \rightarrow \tilde{O}_P \text{ es real} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Campo axial:} \\ (\tilde{O}_R \square \infty) \text{ y, virtualmente, } (\infty \square \tilde{O}_P) \end{array} \right\}$

$\Delta_e = (p - r)\Gamma^2$ toma un valor finito y negativo

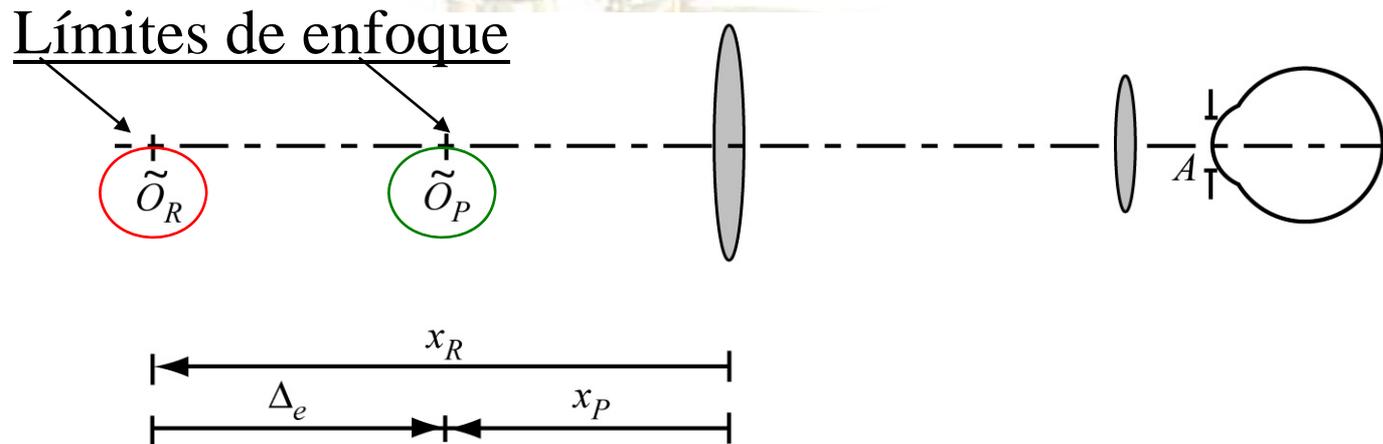


No describe fielmente las dimensiones del campo axial



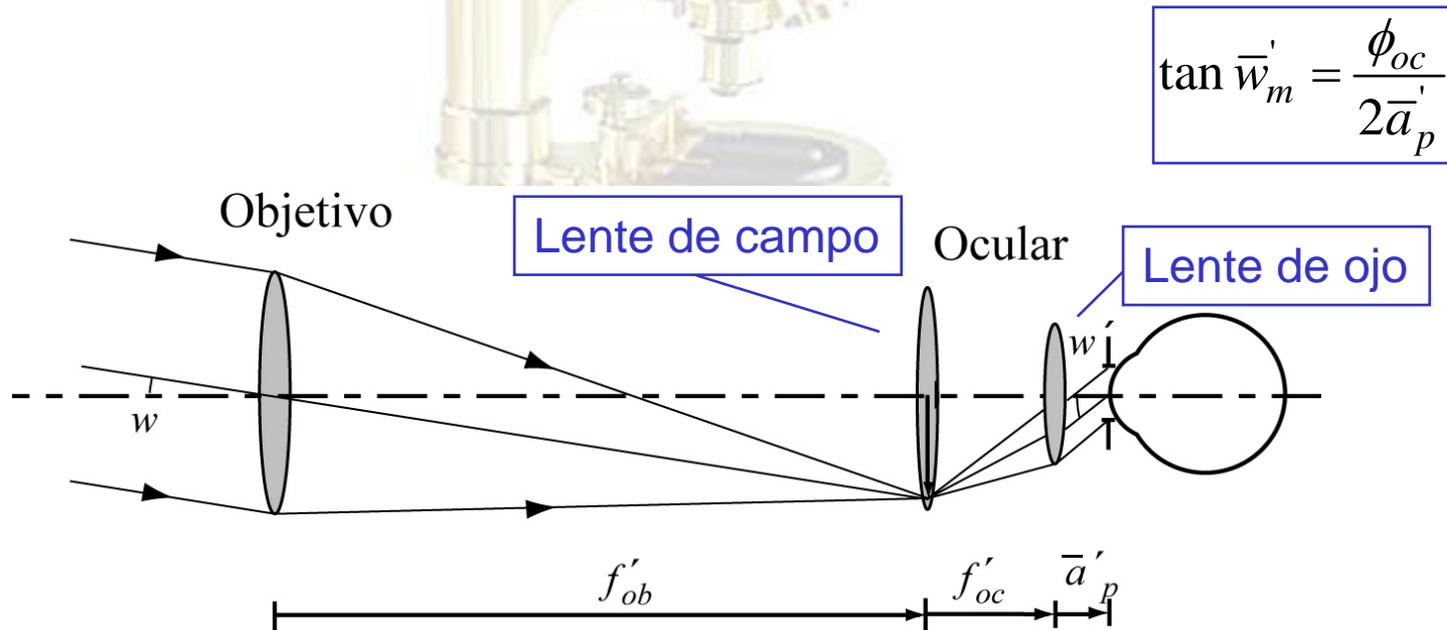
$$\Delta_e = \overline{\tilde{O}_R \tilde{O}_P} = x_P - x_R = (p - r)\Gamma_K^2$$

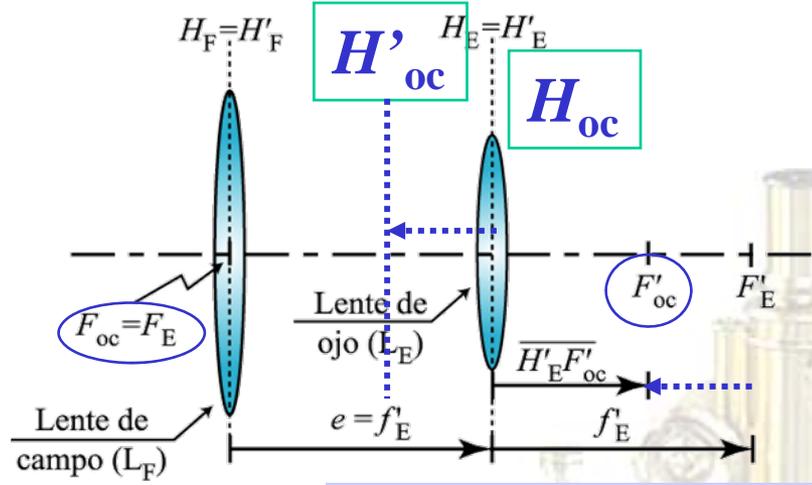
- En los Sistemas telescópicos la Profundidad de enfoque es un parámetro poco adecuado para representar la magnitud del campo axial.
- Lo realmente relevante son los valores de x_P y x_R , que indican las posiciones de los *Límites de enfoque*



7.3.5.- Oculares dobles. Lente de Campo

- Para aumentar el Campo visual de los Sistemas telescópicos y minimizar la influencia del viñeteado, se utilizan Oculares dobles.
- Al igual que en el Microscopio, la configuración más simple consiste en insertar una *Lente de campo* en el plano de la imagen intermedia que produce los siguientes efectos:
 - El Aumento visual del Anteojo no varía
 - El diámetro de la Pupila de Salida no cambia
 - La Emergencia pupilar disminuye → El Campo visual aumenta

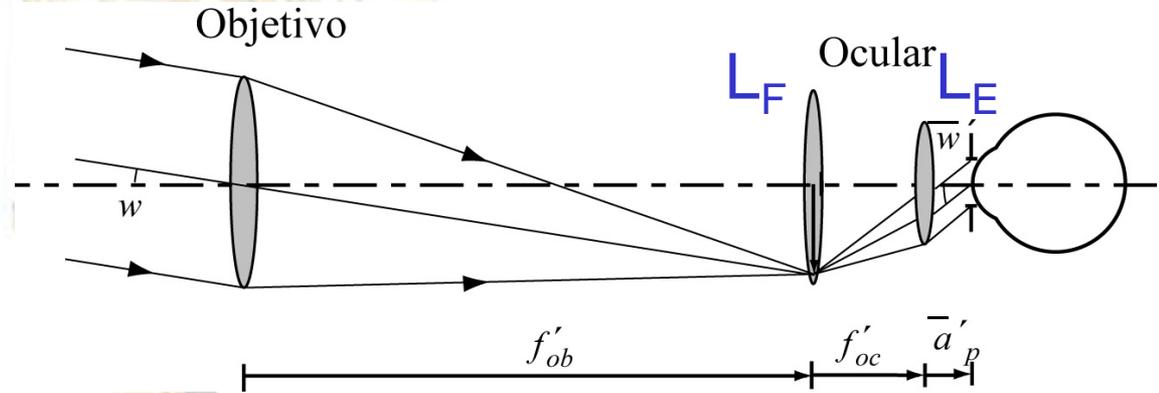




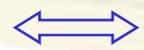
$$\left. \begin{aligned} f'_{oc} &= f'_E \\ \overline{H'_F F'_{oc}} &= 0 \\ \overline{H'_E F'_{oc}} &= f'_E - \frac{f'^2_E}{f'_F} \end{aligned} \right\}$$

El Campo aumenta al utilizar oculares compuestos

$$\tan \bar{w}'_m = -\frac{\phi_E}{2\bar{a}'_p}$$



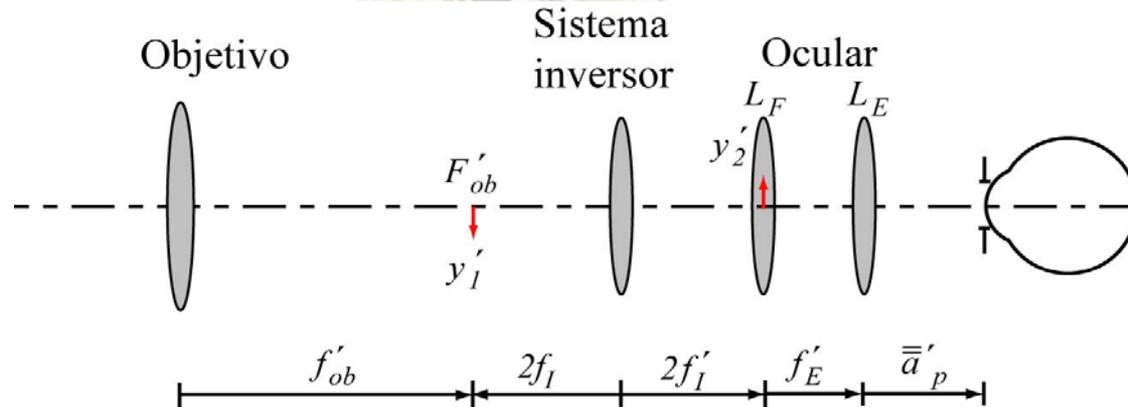
$$\tan \bar{w}'_m = -\frac{\phi_E}{2\bar{a}'_p} = \frac{\phi_E}{2 \left(\frac{e}{\Gamma_K} + \frac{f'^2_E}{f'_F} \right)}$$



$$\tan \bar{w}_m = \frac{\tan \bar{w}'_m}{\Gamma_K} = \frac{\phi_E}{2 \left(e - \frac{f'_{ob} f'_E}{f'_F} \right)}$$

7.3.7.- Sistema Inversor

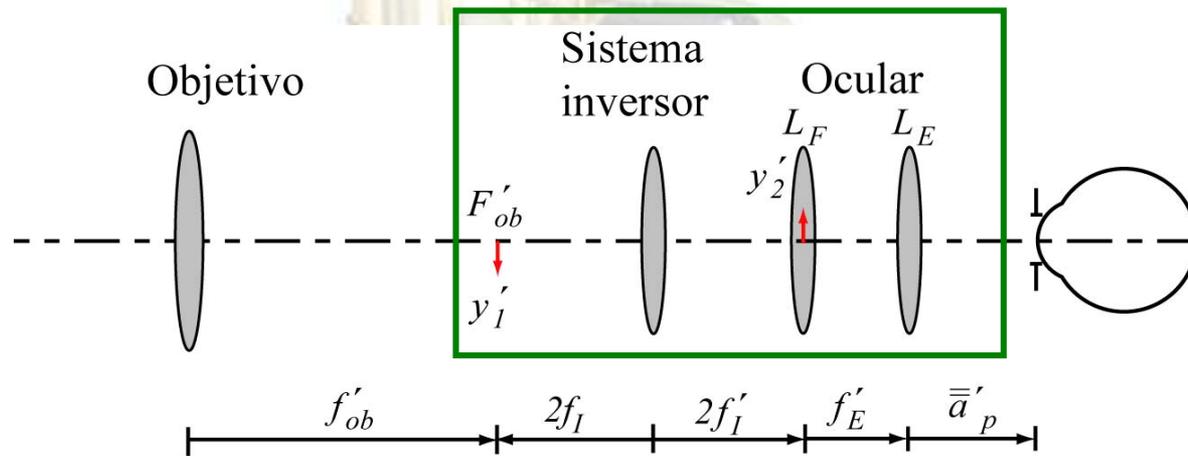
- El Anteojo Astronómico proporciona una imagen invertida de los objetos observados. Sin embargo, para la observación de objetos situados en la superficie terrestre se necesita que la imagen final esté derecha.
- Una de las soluciones para lograr que la imagen final esté derecha consiste en añadir un *Sistema Inversor*:
 - Sistema convergente, situado entre el Objetivo y el ocular, que produce una inversión de la imagen intermedia.
 - El Sistema Inversor más sencillo es una *lente convergente en configuración 4f*.
 - Al Sistema Inversor se le llama también *Vehículo* ya que, adicionalmente, transporta la imagen intermedia a otro plano.



Sistema Inversor

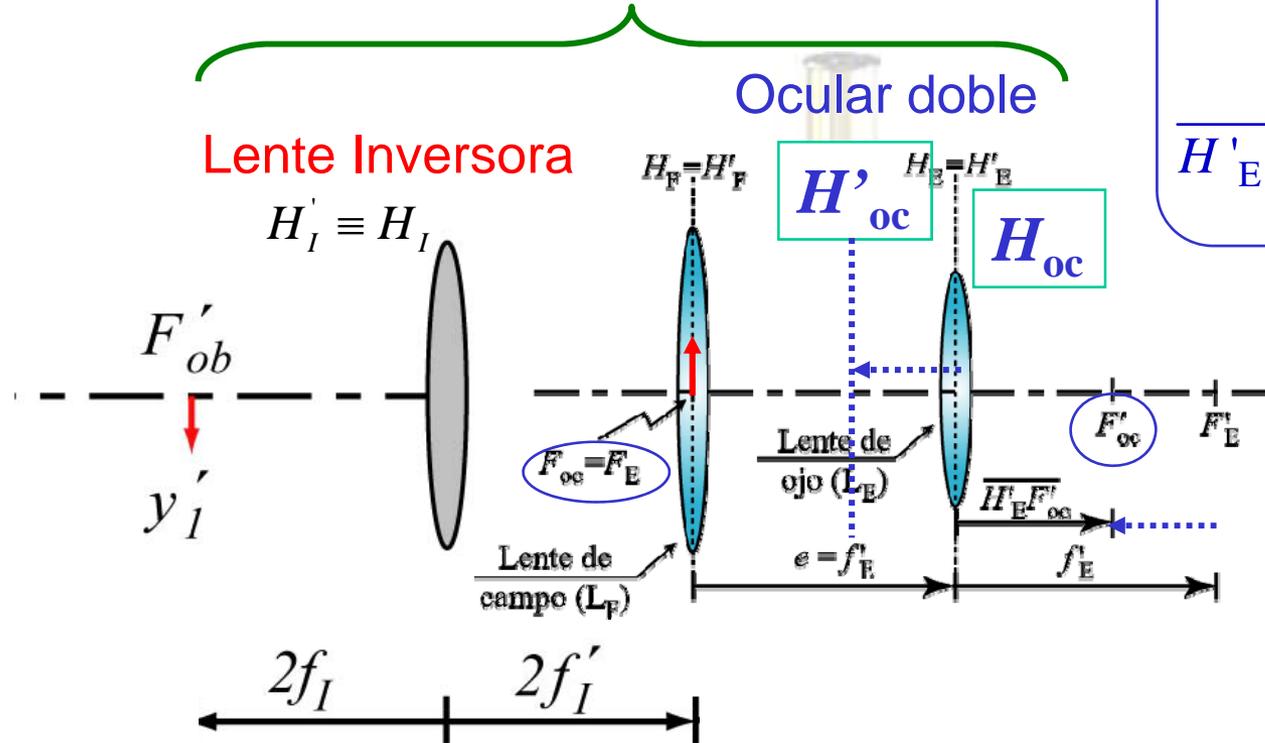
- A los Anteos que incorporan un Sistema Inversor se les denomina *Anteos Terrestres*.
- La utilización de un *Sistema Inversor* afecta a:
 - Aumento visual.
 - Pupila de Salida.
 - Campo visual.

El estudio del Anteojo Terrestre se simplifica al considerar el instrumento como el acoplamiento del Objetivo y un “*Ocular triple*” constituido por el Sistema Inversor y el Ocular doble





"Ocular" triple



$$f'_{oc} = f'_E$$

$$\overline{H_F F_{oc}} = 0$$

$$\overline{H'_E F'_{oc}} = f'_E - \frac{f'^2_E}{f'_F}$$

Distancia focal imagen del "Ocular" triple

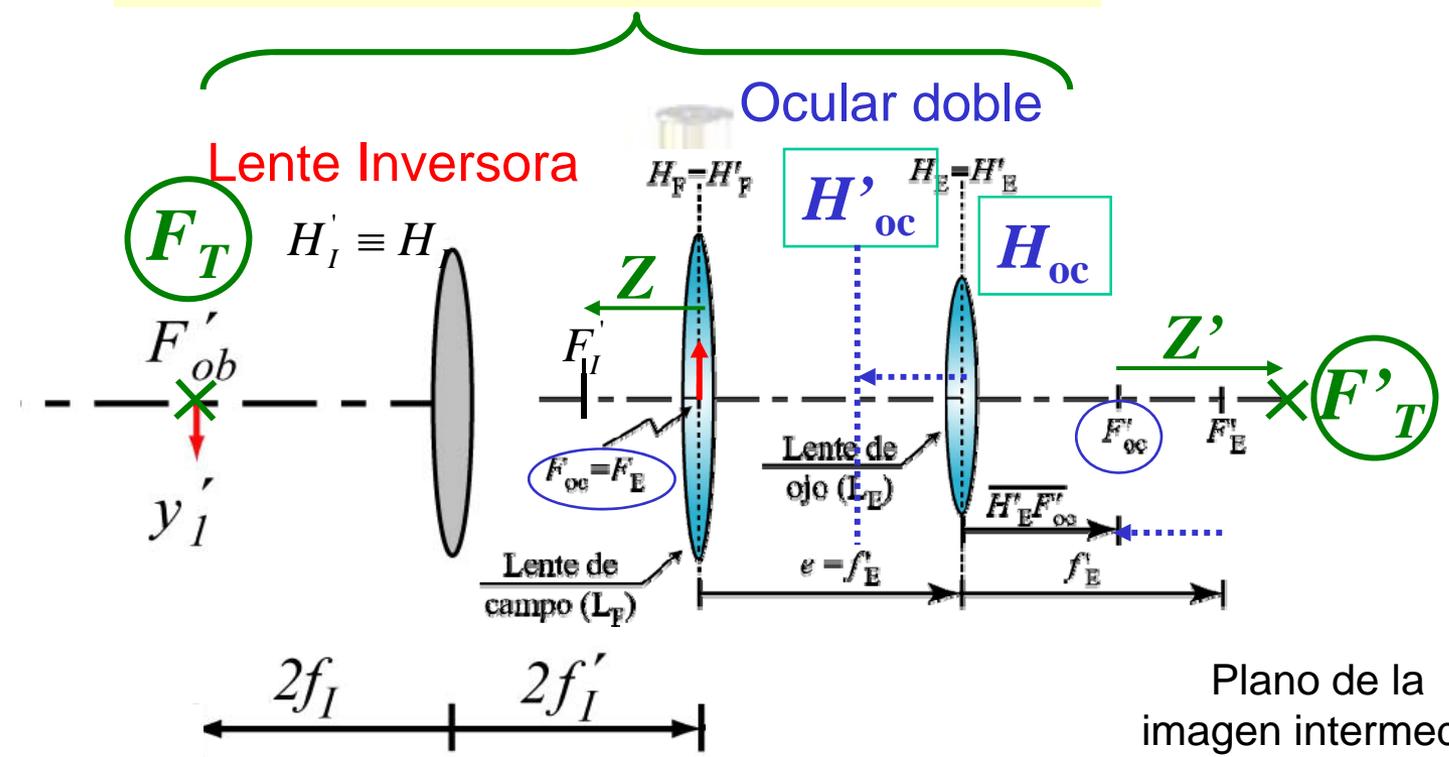
$$f'_T = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \left\{ \begin{array}{l} f'_1 = f'_I \\ f'_2 = f'_E \\ e = 2f'_I + f'_E \end{array} \right.$$

$$f'_T = \frac{f'_I \cdot f'_E}{f'_I + f'_E - (2f'_I + f'_E)} = -f'_E$$

Posición de los Focos del "Ocular" triple



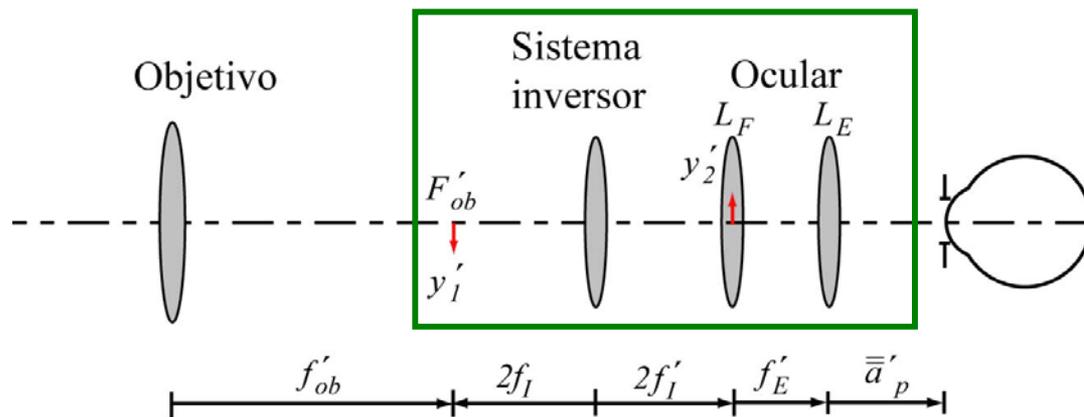
OPTICA INSTRUMENTAL
DIPL. EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



$F_T \xrightarrow{\text{"OCULAR"}} O \equiv \infty$ $F_T \xrightarrow{L_I} F'_{oc} \xrightarrow{L_F+L_E} O \equiv \infty$ $F_T \equiv F'_{ob} \equiv y'_1$
 $O \equiv \infty \xrightarrow{\text{"OCULAR"}} F'_T$ $O \equiv \infty \xrightarrow{L_I} F'_I \xrightarrow{L_F+L_E} F'_T$ $z' = \frac{f_E'^2}{f_I}$

Posición del Foco imagen respecto de la Lente de ojo

$$\overline{H'_E F'_T} = \overline{H'_E F'_{oc}} + \overline{F'_{oc} F'_T} = f'_E - \frac{f_E'^2}{f'_I} + \frac{f_E'^2}{f'_I}$$



$$f'_T = -f'_E$$

$$\overline{H'_E F'_T} = f'_E + \frac{f_E'^2}{f'_I} - \frac{f_E'^2}{f'_F}$$

- El Anteojo terrestre es un **Sistema afocal**.
- El **Aumento visual** es **positivo** y, por tanto, la imagen final está derecha.

$$\Gamma_t = -\frac{f'_{ob}}{-f'_E} = \frac{f'_{ob}}{f'_E} \equiv |\Gamma_K|$$

- Pupila de salida**

$$\bar{a}'_p = \bar{a}'_p + \frac{f_E'^2}{f'_I} = a'_p + \frac{f_E'^2}{f'_I} - \frac{f_E'^2}{f'_F}$$

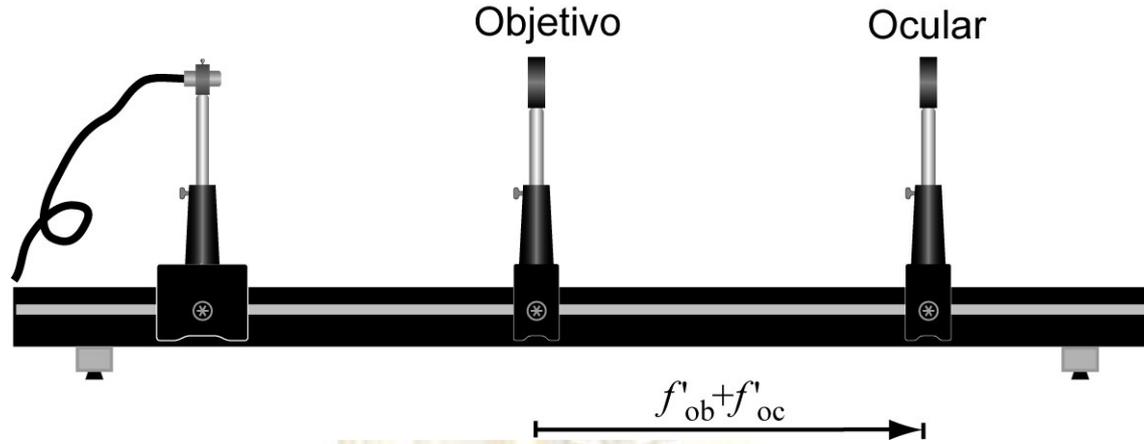
$$\phi_{PS} = \frac{\phi_{ob}}{|\Gamma_t|} = \frac{\phi_{ob}}{\Gamma_t} \rightarrow \text{No cambia}$$

- Campo angular**

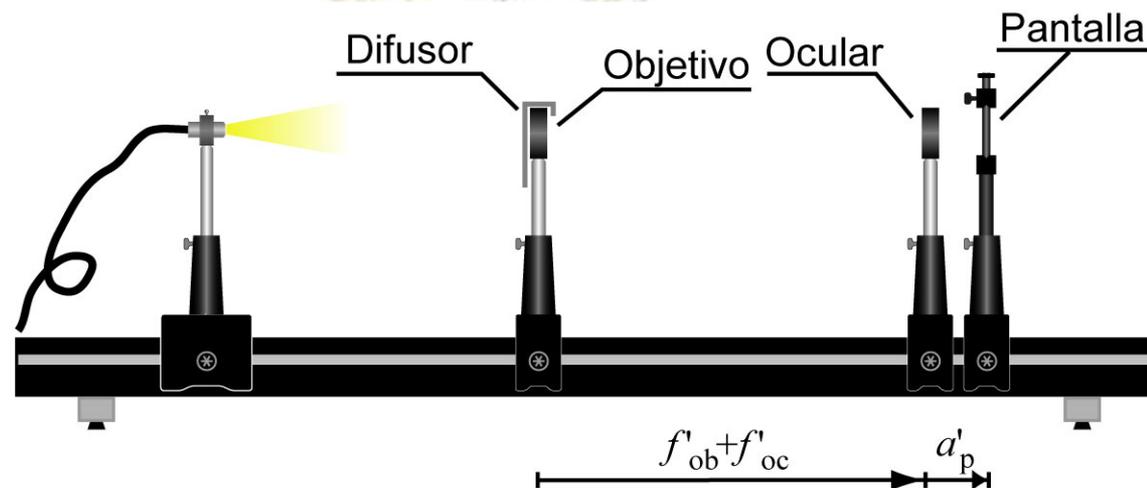
$$\tan \bar{w}'_m = \frac{\phi_E}{2\bar{a}'_p} =$$

$$\tan \bar{w}_m = \frac{\tan \bar{w}'_m}{\Gamma_t}$$

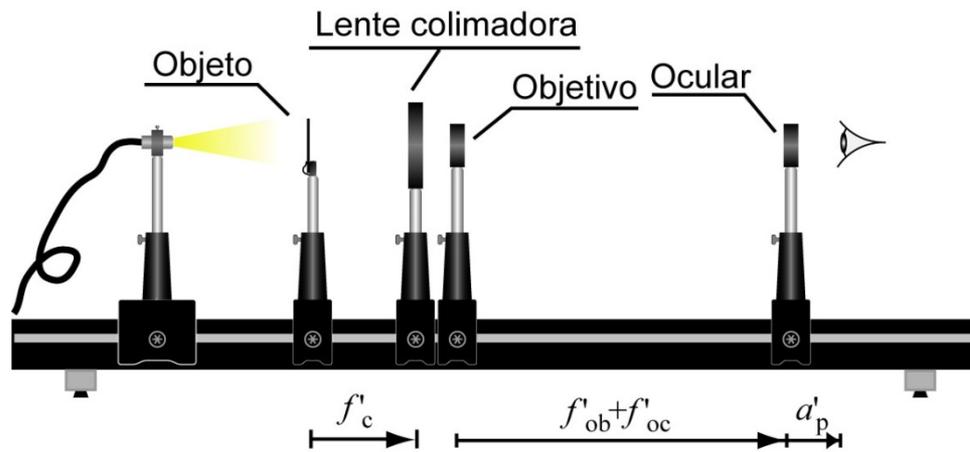
Práctica de laboratorio



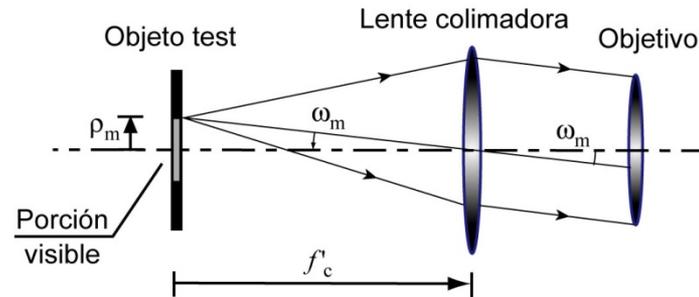
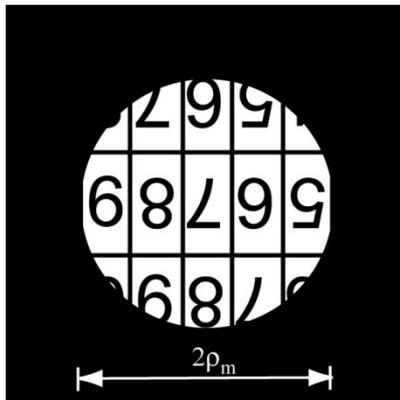
Construcción del Anteojo Astronómico (Anteojo de Kepler)



Determinación de la posición y tamaño de la Pupila de Salida



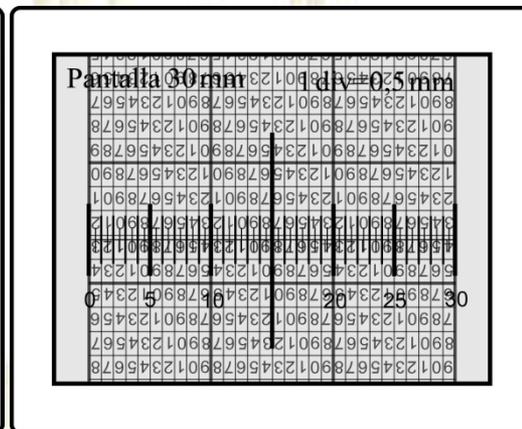
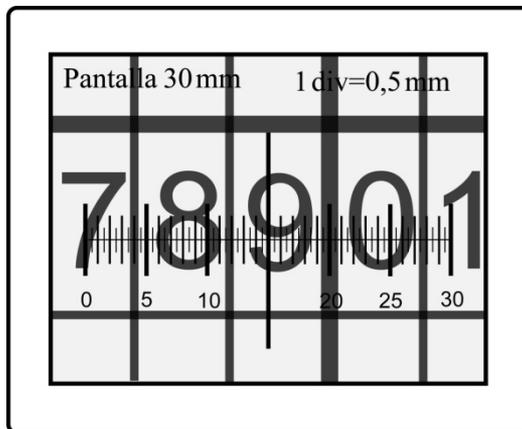
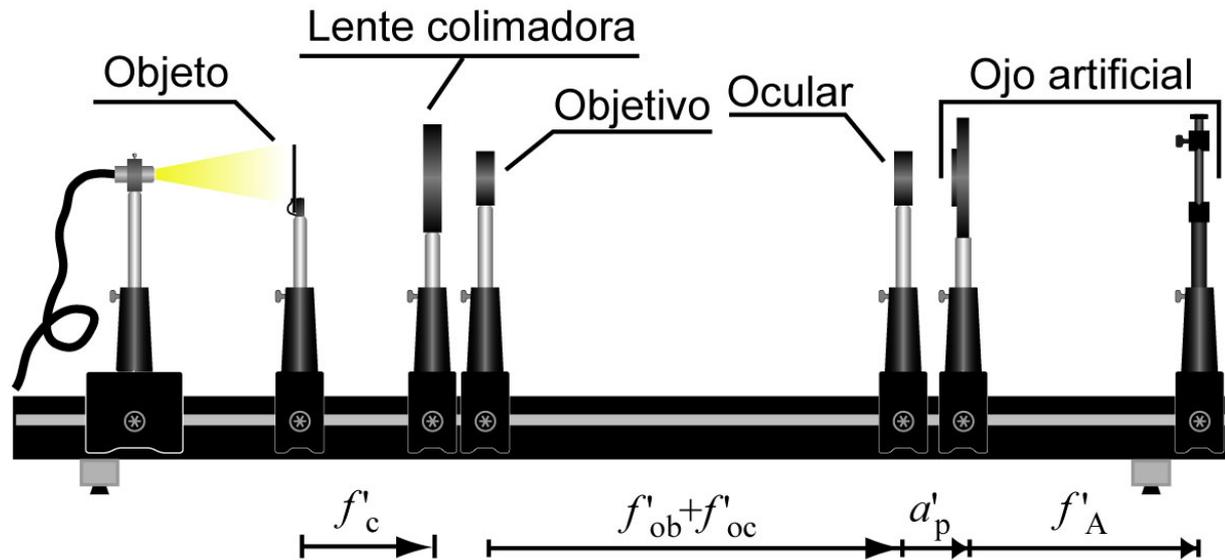
Determinación del campo angular objeto (campo visual)



$$\tan w_m = \frac{\rho_m}{f'_c}$$

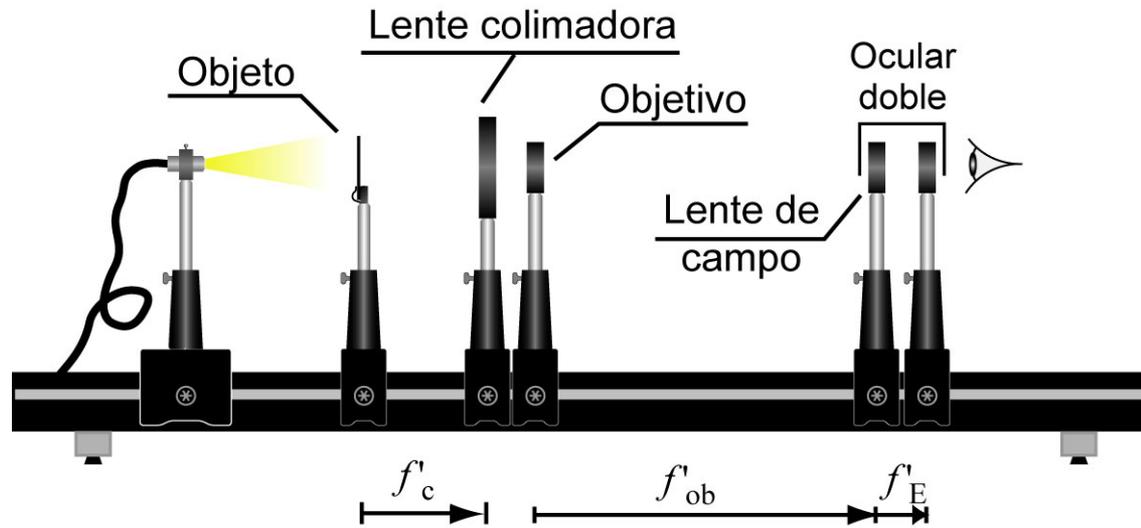
Determinación del tamaño angular de un objeto utilizando un Retículo





$$\Gamma = \frac{\tan w'}{\tan w_A} \left\{ \begin{array}{l} \tan w' = \frac{y_r'}{f'_A} \\ \tan w_A = \frac{y_A'}{f'_A} \end{array} \right.$$

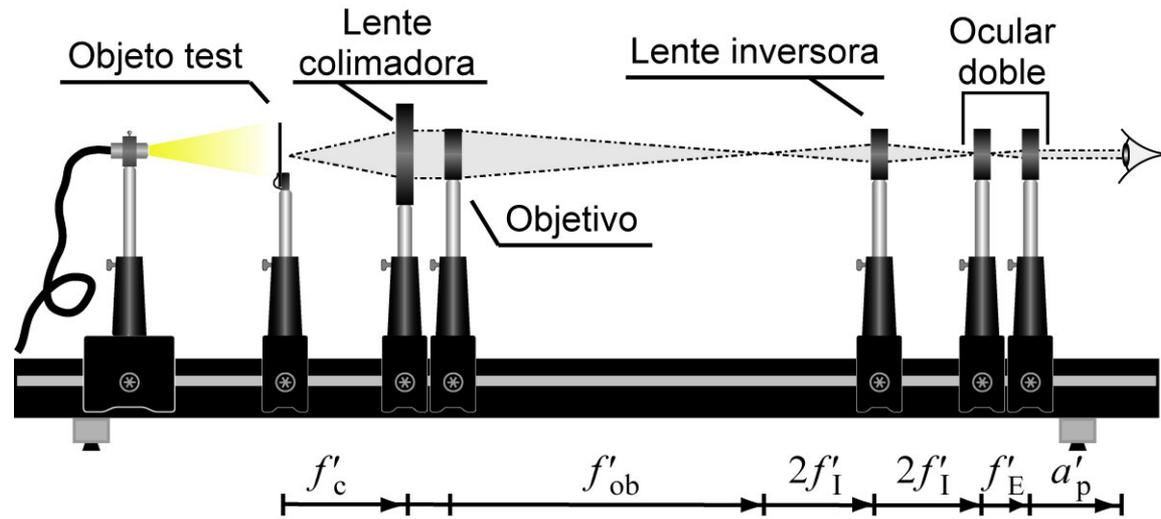
Medida del Aumento visual del Anteojo



Construcción de un Anteojo con Ocular doble.

Estudio de la influencia de la Lente de campo:

- Posición y tamaño de la Pupila de salida:
 - La emergencia pupilar disminuye.
 - El diámetro de la P.S. no cambia.
- Campo visual: Aumenta.
- Aumento visual: No varía.



Construcción de un Anteojo Terrestre con Ocular doble.

Estudio de la influencia de la Lente Inversora:

- Posición y tamaño de la Pupila de salida:
 - La emergencia pupilar aumenta.
 - El diámetro de la P.S. no cambia.
- Campo visual: Disminuye.
- Aumento visual: Es positivo.

EJERCICIOS

- Para un Sistema afocal formado por el acoplamiento de dos sistemas de focales f'_1 y f'_2 , demuestre que el valor del aumento lateral entre dos planos conjugados:
- Es una constante, es decir, no depende de la posición del objeto.
 - Viene dado por la expresión: $\beta = -\frac{f'_2}{f'_1}$
- Demuestre que en un Anteojo terrestre el campo visual viene dado por la expresión:

$$\tan \bar{w}_m = \frac{\phi_E}{2 \left(e + \frac{f'_{ob} f'_E}{f'_I} - \frac{f'_{ob} f'_E}{f'_F} \right)}$$

7.3.8.- Luminosidad

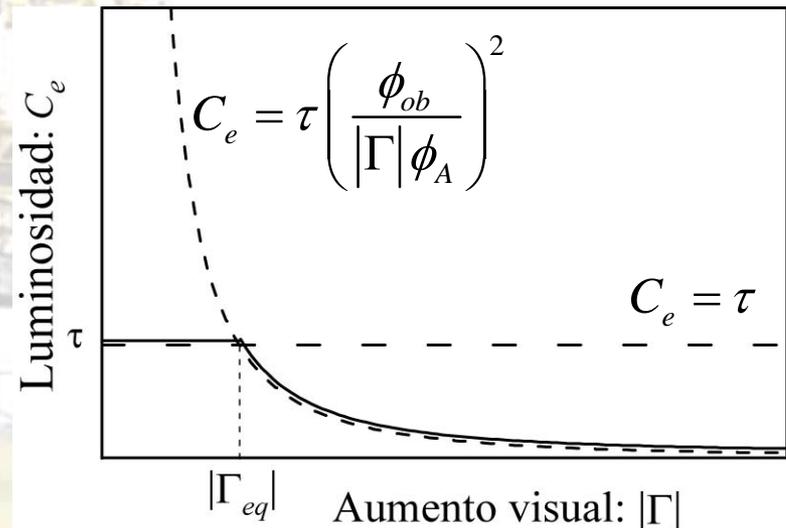
Para el caso de **objetos extensos**, se define la Luminosidad como el cociente entre la iluminación retiniana en visión a través del instrumento óptico, y la obtenida en visión directa.

$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A} = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 \quad \text{donde} \quad \phi_{PS}^{ef} = \min \left\{ \frac{\phi_{ob}}{|\Gamma|}, \phi_A \right\}$$

es el diámetro de la Pupila de Salida Efectiva del acoplamiento entre el Anteojo y la Pupila de Entrada del ojo del observador.

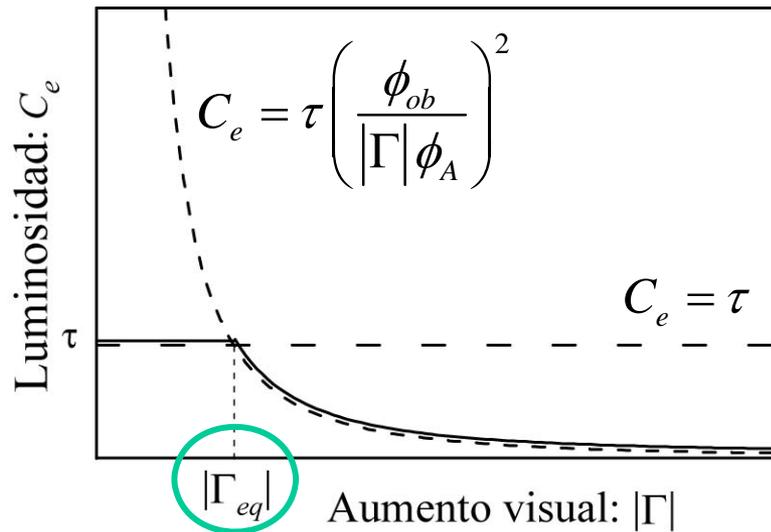
$$\begin{aligned} \phi_{PS}^{ef} = \phi_{PS} &\rightarrow C_e = \tau \left(\frac{\phi_{ob}}{|\Gamma| \phi_A} \right)^2 \\ \phi_{PS}^{ef} = \phi_A &\rightarrow C_e = \tau \end{aligned}$$

$$C_e = \min \left\{ \tau \left(\frac{\phi_{ob}}{|\Gamma| \phi_A} \right)^2, \tau \right\}$$



Variación de la Luminosidad en función del Aumento visual

Variación de la Luminosidad en función del Aumento visual



$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A} = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2$$

$$\phi_{PS}^{ef} = \min \left\{ \frac{\phi_{ob}}{|\Gamma|}, \phi_A \right\}$$

$$C_e = \min \left\{ \tau \left(\frac{\phi_{ob}}{|\Gamma| \phi_A} \right)^2, \tau \right\}$$

para $\frac{\phi_{ob}}{|\Gamma|} = \phi_A$

$$|\Gamma| = \frac{\phi_{ob}}{\phi_A} \equiv |\Gamma_{eq}|$$

Aumento equipupilar

$$\phi_{PS} = \phi_A$$

- Mayor valor del aumento visual que permite obtener una luminosidad máxima.
- Para obtener un valor alto del Aumento equipupilar es necesario que el diámetro del objetivo (ϕ_{ob}) sea grande.

Cuando el objeto observado está muy alejado y es puntual, o sus dimensiones tan reducidas que su imagen impresiona un único fotorreceptor, la luminosidad vale

$$C_p = \frac{\phi'_r}{\phi'_A} = \tau \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 \Gamma^2 = C_e \Gamma^2$$

En general:

$$\phi_{PE}^{ef} \square \phi_A \rightarrow$$

La Luminosidad del Anteojo, para el caso de objetos puntuales, es mucho mayor que la unidad

$$\text{Ganancia en contraste: } G_c = \frac{C_p}{C_e} = \Gamma^2$$

$$C_p \square C_e \rightarrow$$

Las estrellas (objetos puntuales) se observan con un contraste muy elevado sobre el fondo celeste

Ejemplo

$$\left\{ \begin{array}{l} f'_{ob} = 500mm \\ f'_{oc} = 25mm \end{array} \right\} \rightarrow \Gamma = -20$$

$$e = 525mm$$

$$\phi_{ob} = 60mm \equiv \phi_{PE} \rightarrow \phi_{PS} = -\frac{60}{-20} = 3mm \equiv \phi_{PS}^{ef}$$

$$\phi_A = 4mm$$

$$\tau = 0,75$$

$$C_p = \tau \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 = (0.75) \left(\frac{60}{4} \right)^2 = 168.75$$

$$C_e = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 = (0.75) \left(\frac{3}{4} \right)^2 = 0.4218$$

$$C_p == C_e (20)^2 = 400C_e$$

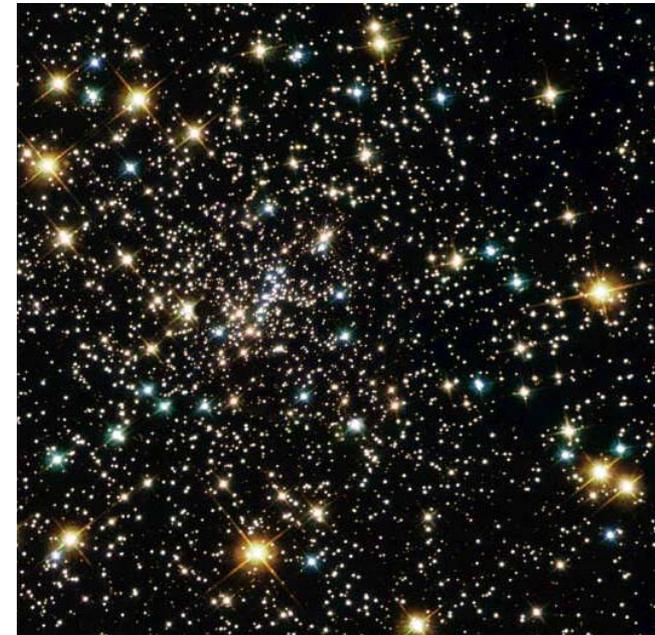
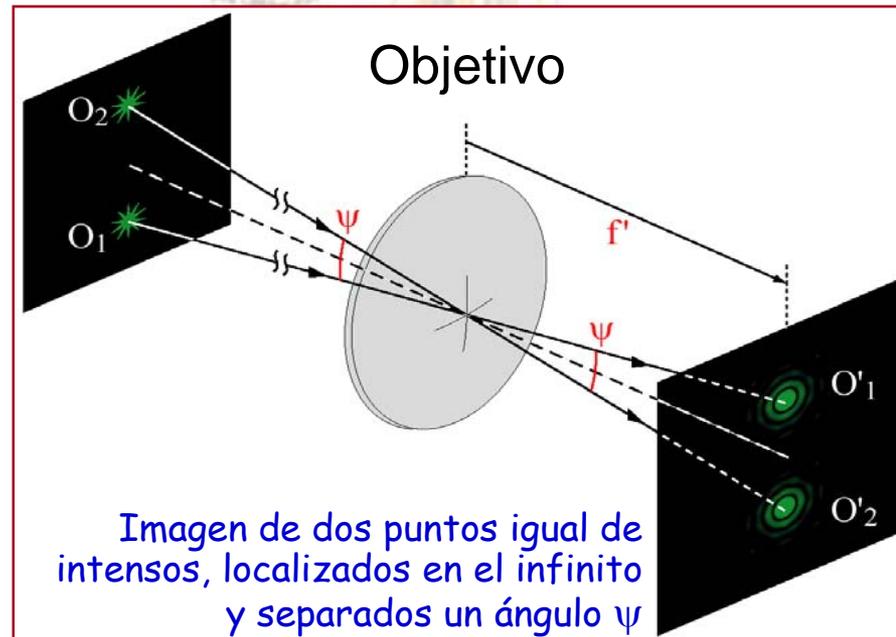


Imagen de un cúmulo de estrellas obtenida con el Telescopio espacial Hubble

7.3.9.- Poder Separador

Si nos centramos en la observación astronómica, el poder separador mide la capacidad del Anteojo para discernir las imágenes de dos estrellas cuya separación angular es pequeña.





Poder Separador

▪ Supuesto que las aberraciones han sido convenientemente corregidas, el poder separador está limitado por el fenómeno de la difracción y por la estructura discreta de la retina.

▪ A los efectos de la **difracción**, y asumiendo que la Pupila de Entrada efectiva del Anteojo es el Objetivo, el límite de resolución angular del acoplamiento entre el Anteojo y la pupila de Entrada del ojo vale :

$$\psi_{\text{dif}} = \frac{140''}{\phi_{PE}^{ef} (mm)} = \frac{140''}{\phi_{ob} (mm)}$$

▪ Con respecto a la influencia de la **estructura discreta de la retina**, recordemos que dos objetos puntuales son discernibles por el ojo, si sus imágenes a través del Instrumento están separadas un ángulo $\alpha_A \geq 80''$
Por tanto, el límite de resolución vale:

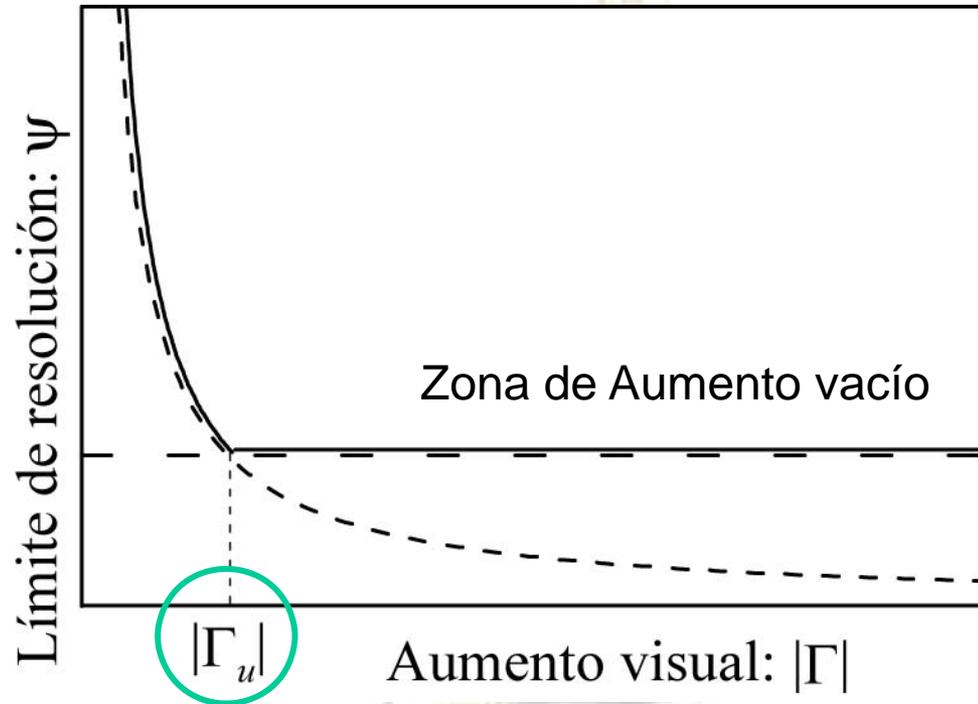
$$\psi_{\text{ret}} = \frac{\alpha_A}{|\Gamma|} = \frac{80''}{|\Gamma|}$$



Poder Separador

- Si consideramos conjuntamente ambos factores:

$$\psi_{\text{Anteojos}} = \max \left\{ \frac{140''}{\phi_{ob}}, \frac{80''}{|\Gamma|} \right\}$$



$$\psi_{\text{dif}} = \frac{140''}{\phi_{ob} (mm)}$$

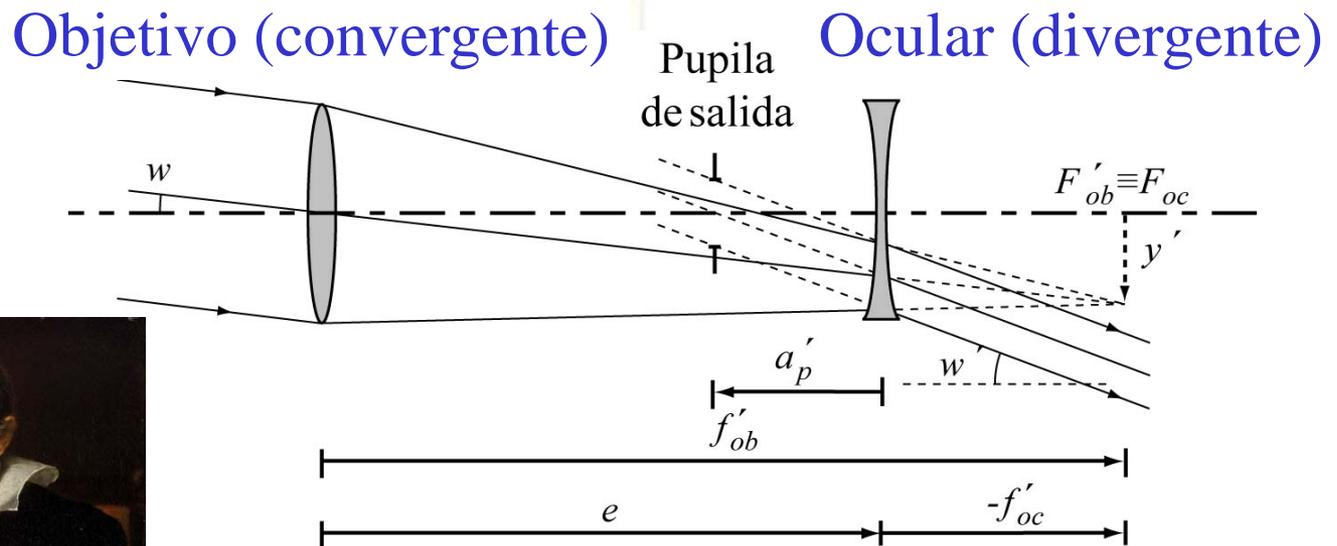
$$\psi_{\text{ret}} = \frac{80''}{|\Gamma|}$$

La intersección de las dos curvas define el *Aumento útil o superresolvente*:

$$|\Gamma_u| = \frac{4}{7} \phi_{ob} (mm)$$

7.4.- Anteojo de Galileo

- El Anteojo de Galileo es el Anteojo terrestre de diseño más antiguo y presenta una solución diferente a la del Sistema Inversor para conseguir una imagen final derecha.
- Está formado por un Objetivo convergente y un Ocular divergente acoplados de modo afocal.



Galileo Galilei

Aumento visual

$$\Gamma_G = \frac{w'}{w} \approx \frac{\tan w'}{\tan w}$$

$$\Gamma_G = -\frac{f'_{ob}}{f'_{oc}}$$

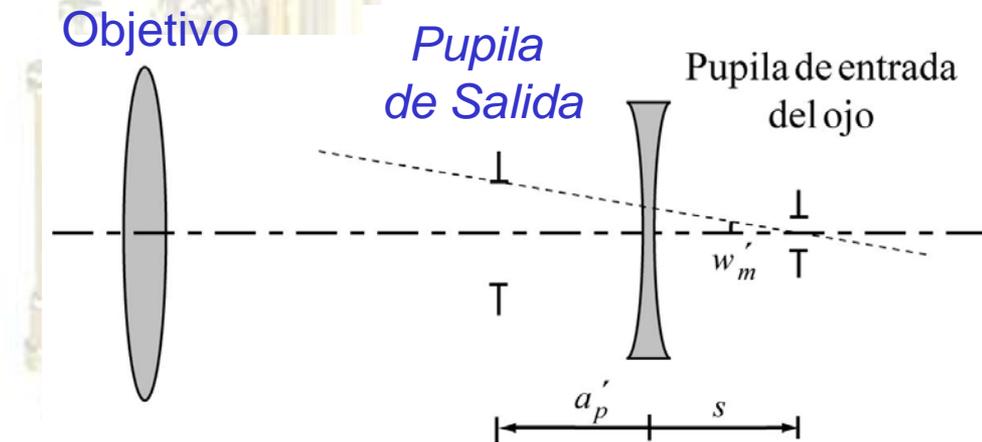
Γ_G es positivo

Posición y tamaño de la Pupila de Salida

$$\phi_{ob} \equiv \phi_{PE} \xrightarrow{\text{Ocular}} \phi_{PS}$$

$$a'_p = -\frac{e}{\Gamma_G} \rightarrow a'_p < 0$$

$$\phi_{PS} = \frac{\phi_{ob}}{\Gamma_G}$$



La Pupila de Salida del Anteojo es virtual

No es posible situar la Pupila del ojo sobre ella

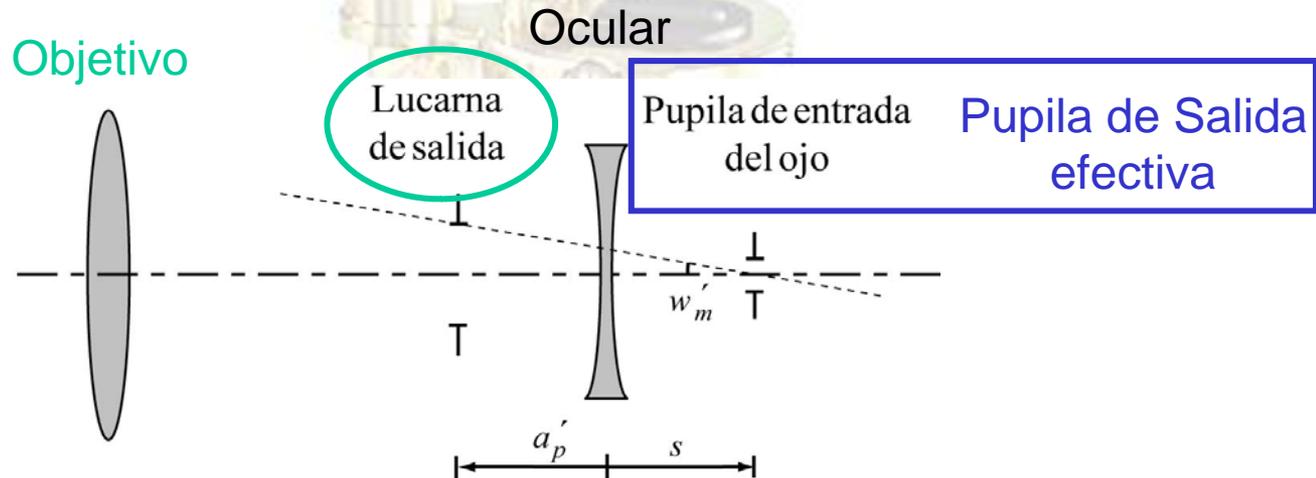
La imagen intermedia es virtual y, por tanto, no es posible utilizar elementos como una Lente de campo, un diafragma o un retículo

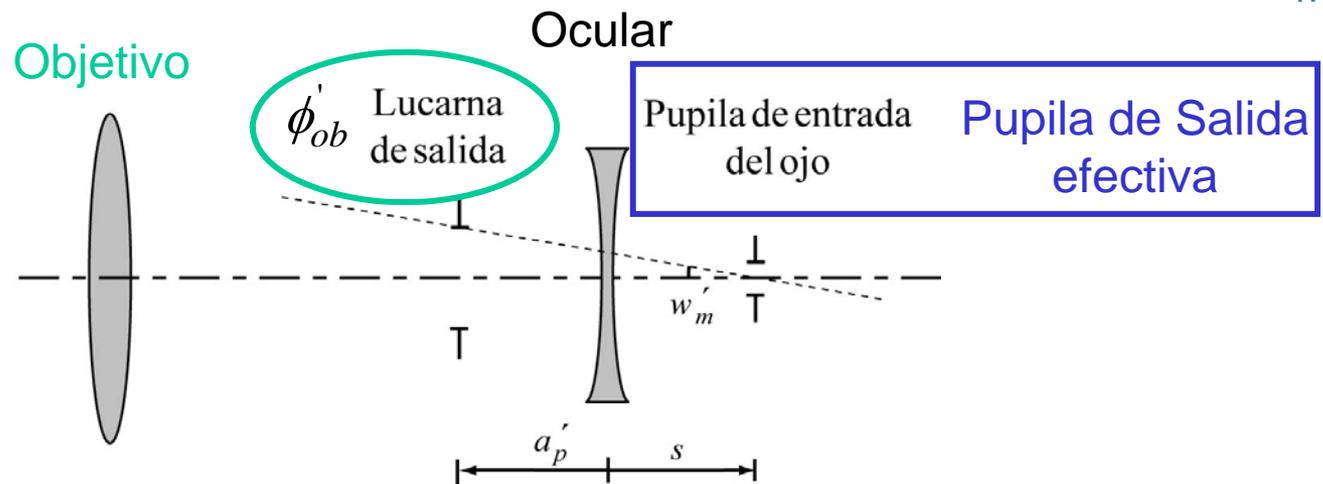
Campo visual

- No es posible situar la Pupila de entrada del ojo sobre la Pupila de Salida del Anteojo.

- Generalmente $\phi_A < \phi_{PS}$

- La Pupila de entrada del ojo actúa como Pupila de Salida efectiva del acoplamiento entre el Anteojo de Galileo y el ojo.
- La imagen del Objetivo actúa como Lucarna de Salida ya que el Ocular divergente se diseña para que no intervenga en la limitación de rayos.





Cálculo del Campo de iluminación media en el espacio óptico imagen

El semicampo imagen de iluminación media es el ángulo subtendido por la Lucarna de Salida desde el centro de la pupila del ojo

$$\tan w'_m = \frac{\phi'_{ob}}{2(s - a'_p)}$$

Campo de iluminación media en el espacio óptico objeto (Campo visual)

$$\tan w_m = \frac{\phi_{ob}}{2\Gamma_G^2 \left(s + \frac{e}{\Gamma_G} \right)}$$

Campo visual

$$\tan w_m = \frac{\phi_{ob}}{2\Gamma_G^2 \left(s + \frac{e}{\Gamma_G} \right)}$$

- El Campo visual es proporcional al diámetro del Objetivo y aumenta al acercar el ojo al Ocular.
- En el caso límite, ideal, de que la Pupila de Entrada del ojo se sitúe sobre el Ocular:

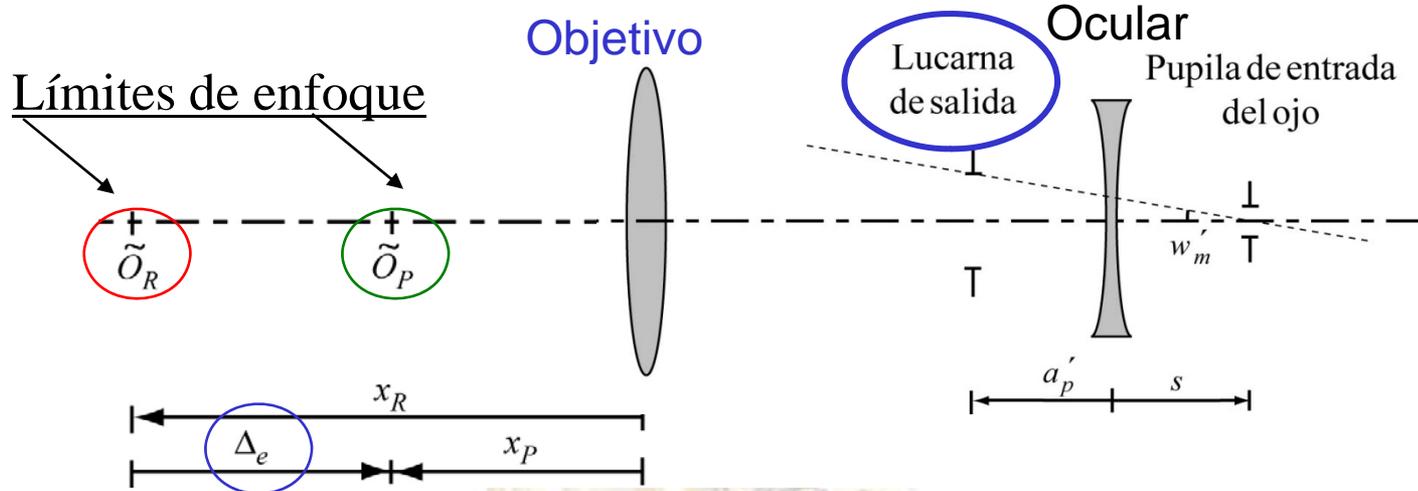
$$\tan w_m = \frac{\phi_{ob}}{2e\Gamma_G}$$

El campo visual es inversamente proporcional al aumento visual

- El Aumento del Anteojo de Galileo no puede tomar valores altos ya que se reduciría mucho el campo. Por ello:
- El Aumento no suele exceder del valor 6 y los valores más usuales son de 2.5 a 4.

La singular configuración de los diafragmas en el Anteojo de Galileo produce una observación del tipo “Ojo de cerradura”

Profundidad de enfoque $\left\{ \Delta_e = \overline{\tilde{O}_R \tilde{O}_P} \right\} \xrightarrow{\text{ANTEOJO}} \left\{ I.V.N. = \overline{O_R O_P} \right\}$



Al aplicar las ecuaciones de conjugación para Sistemas afocales tomando como orígenes de distancias el Objetivo y su homólogo en el espacio imagen

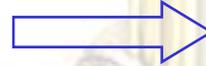
$$\left\{ \begin{array}{l} x_R = \Gamma_G^2 (s - a'_p + r) \\ x_P = \Gamma_G^2 (s - a'_p + p) \end{array} \right\} \quad \Delta_e = x_P - x_R = (p - r) \Gamma_G^2$$

- Las dimensiones del campo axial son las mismas que en el Anteojo Astronómico. Sin embargo:
- En el Anteojo de Galileo los Límites de enfoque dependen explícitamente de la posición del ojo del observador.

Luminosidad

- En la actualidad el anteojo de Galileo se utiliza únicamente para la observación terrestre, por lo cual analizaremos sólo el caso de **objetos extensos**

$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A} = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2$$



$$\phi_{PS}^{ef} = \phi_A \rightarrow C_e = \tau \approx 0.8$$

Considerando $\tau_L \approx 0.9$

El Anteojo de Galileo es un Instrumento óptico muy luminoso

Poder Separador

- La Pupila del ojo constituye la Pupila de Salida del sistema
- El Aumento visual toma siempre valores pequeños

El Anteojo de Galileo trabaja siempre por debajo del Aumento útil

La **estructura discreta de la retina** determina el Límite de resolución

$$\psi = \frac{\alpha_A}{\Gamma_G} = \frac{80''}{\Gamma_G}$$

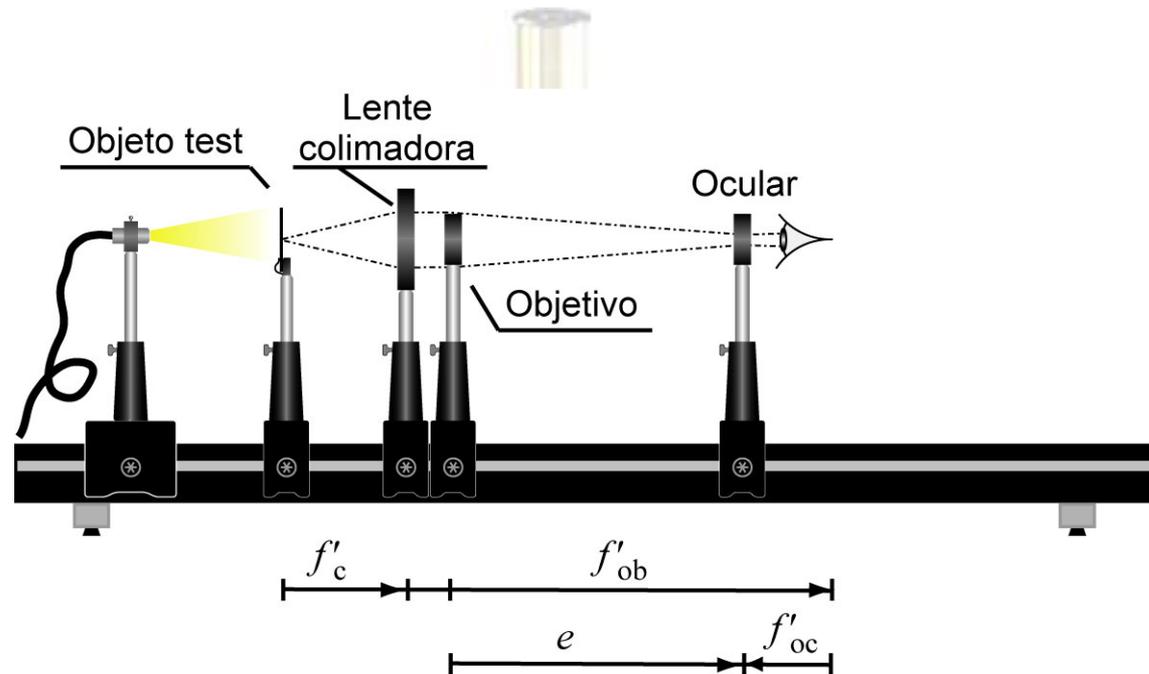
El Anteojo de Galileo tiene un Poder Separador muy débil

Ventajas e inconvenientes del Anteojo de Galileo

- Campo visual muy limitado.
- Visión tipo *ojo de cerradura*.
- Valores bajos del Aumento.
- Poder Separador muy débil.
- Imagen intermedia virtual.

- Instrumento muy luminoso.
- Muy sencillo y de dimensiones reducidas en comparación con otros Anteojos que incorporan un Sistema Inversor.
- Muy útil cuando se requieren Aumentos bajos o como complemento de otros Instrumentos (convertidores para Objetivos fotográficos, por ejemplo).

Práctica de laboratorio



Construcción de un Anteojo de Galileo.

Estudio de la influencia del Ocular divergente:

- La Pupila de salida es virtual:
- Campo visual: *Visión tipo ojo de cerradura.*
- Aumento visual: Es positivo.

7.5.- Telescopios reflectores

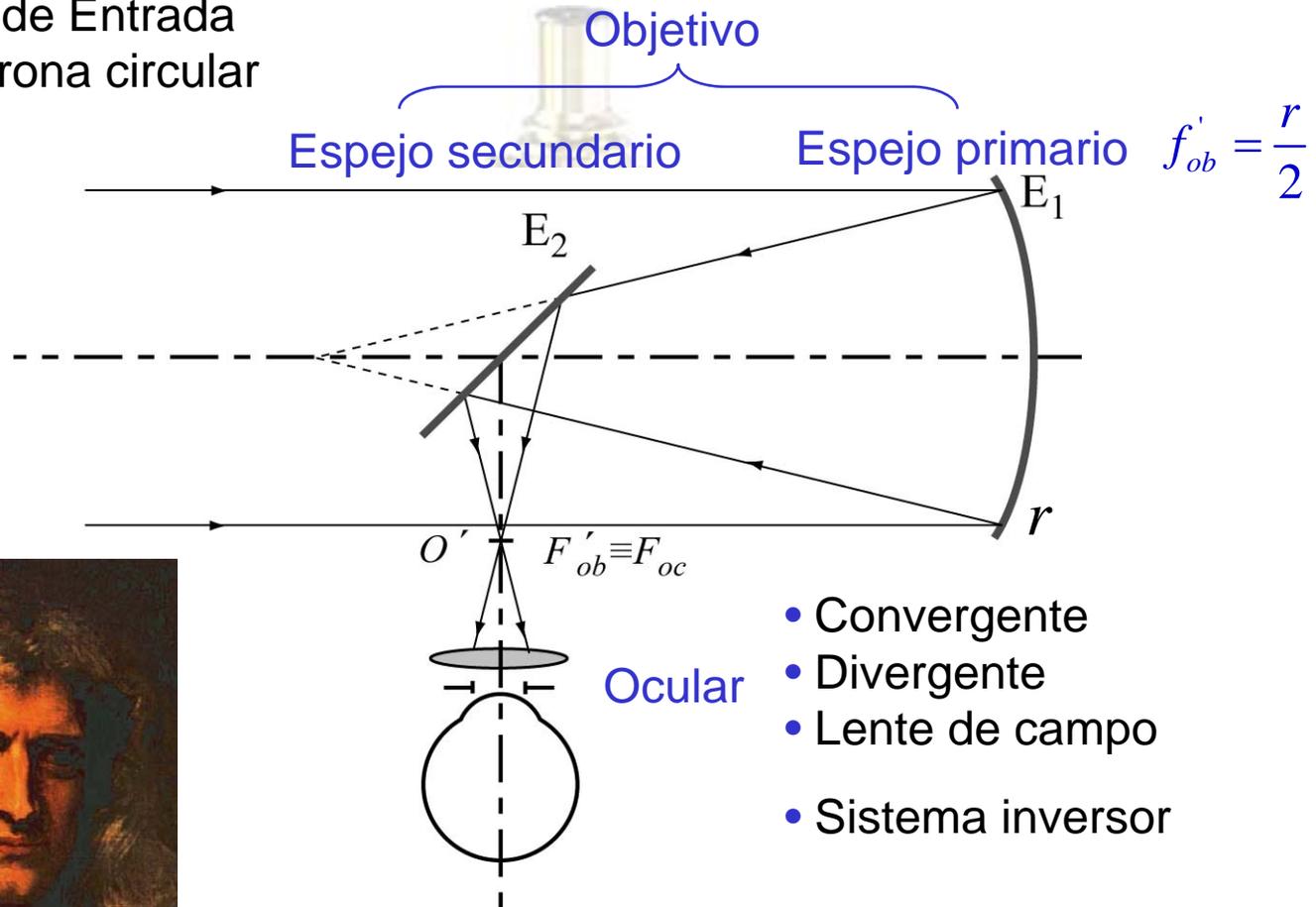
- Los Telescopios reflectores se utilizan fundamentalmente para la observación astronómica.
 - El Objetivo es un espejo o acoplamiento de espejos, con lo cual no presenta aberración cromática.
 - Pueden utilizarse espejos de gran diámetro aumentando así la Luminosidad y el Poder separador (con las limitaciones debidas a las variaciones del índice de refracción de la Atmósfera).
 - Un problema de diseño es la ubicación del Ocular para que no intercepte el haz incidente.
- Existen fundamentalmente dos tipos de Telescopios reflectores:
 - Telescopio de Newton.
 - Telescopio de Cassegrain.

Todas las fórmulas establecidas para el estudio del Anteojo Astronómico son aplicables a los Telescopios reflectores ya que la naturaleza del Objetivo (refractor o reflector) no influye.

Telescopio de Newton

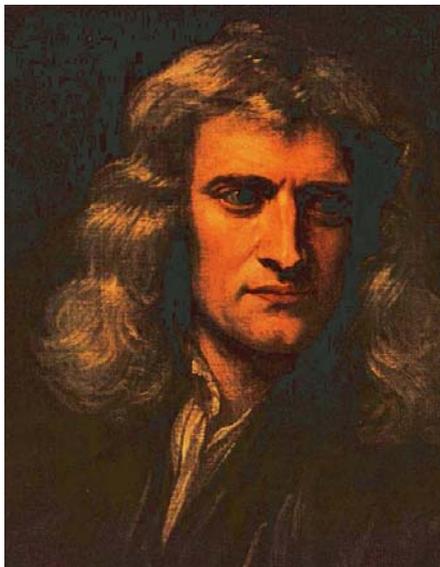
En la práctica el Espejo primario es paraboloïdal para minimizar las aberraciones

La Pupila de Entrada es una corona circular



- Convergente
- Divergente
- Lente de campo
- Sistema inversor

- Plano de imagen intermedia
 - Retículo
 - Diafragma



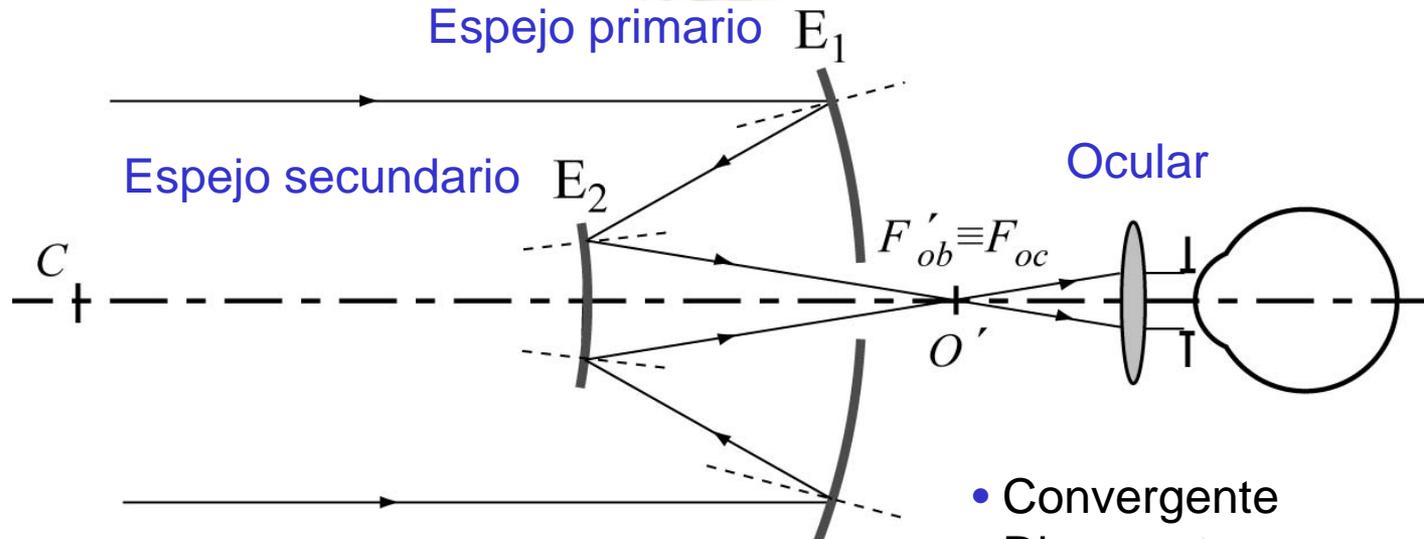
Isaac Newton

Telescopio de Cassegrain

La Pupila de Entrada es una corona circular

Objetivo ($E_1 + E_2$)
Espejo primario E_1

E_1 y E_2 son espejos esféricos concéntricos

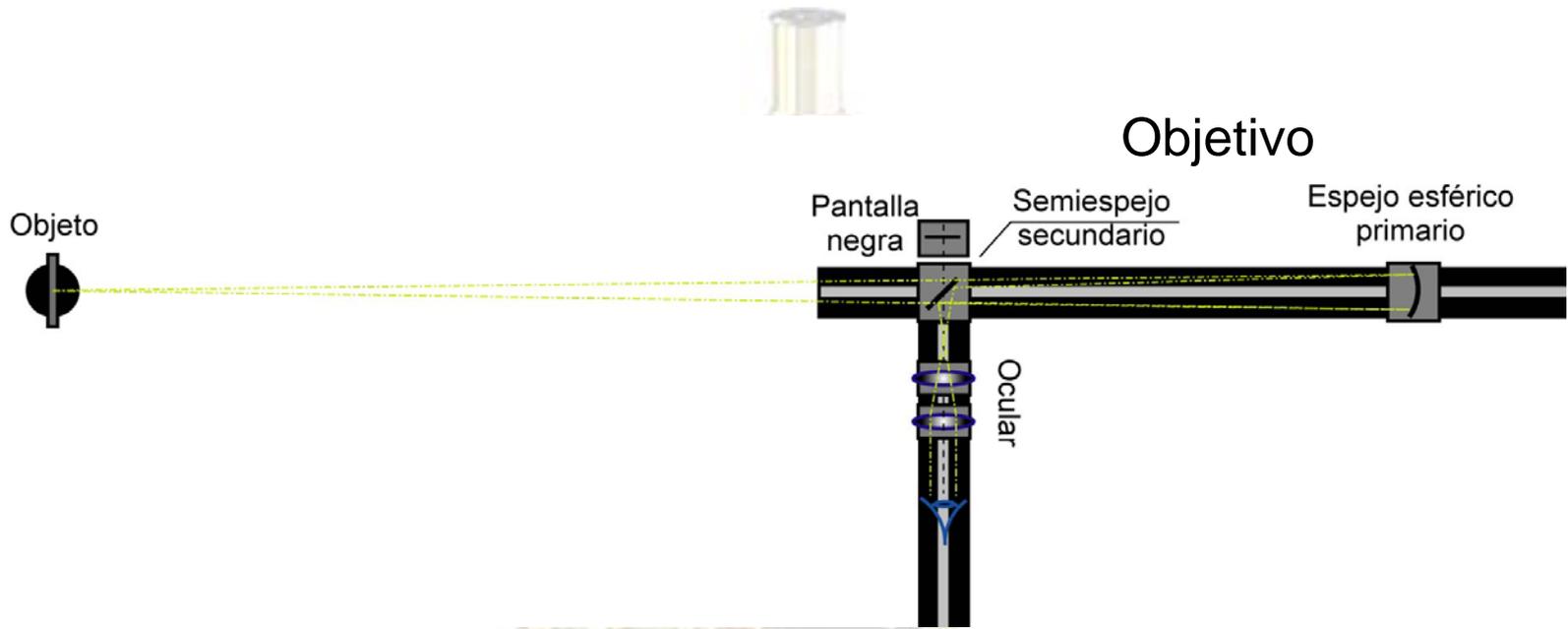


- Convergente
- Divergente
- Lente de campo
- Sistema inversor



- Plano de imagen intermedia
 - Retículo
 - Diafragma

Práctica de laboratorio



Construcción de un Telescopio reflector.

- Campo visual y Aumento.
- Lente de campo
- Retículo y diafragma
- Ocular divergente

Ejercicio

El Objetivo de un Telescopio es de distancia focal $f'_{ob} = 910\text{mm}$
y diámetro $\phi_{ob} = 114\text{mm}$

Se dispone de tres Oculares dobles de las siguientes características:

$$\text{Ocular (1)} \quad f'_{oc} = 25\text{mm} \quad w'_m = 45^\circ$$

$$\text{Ocular (2)} \quad f'_{oc} = 16\text{mm} \quad w'_m = 45^\circ$$

$$\text{Ocular (3)} \quad f'_{oc} = 9.5\text{mm} \quad w'_m = 45^\circ$$

Analice la Luminosidad (para objetos extensos), el Poder separador y el Campo visual del Telescopio con cada uno de los Oculares.

Nota: Considere que la Pupila del observador es de diámetro $\phi_A = 4\text{mm}$ y que $\tau = (0.95)^3$



Objetivo

$$f'_{ob} = 910 \text{ mm}$$

$$\phi_{ob} = 114 \text{ mm}$$

Ocular (1) $f'_{oc} = 25 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

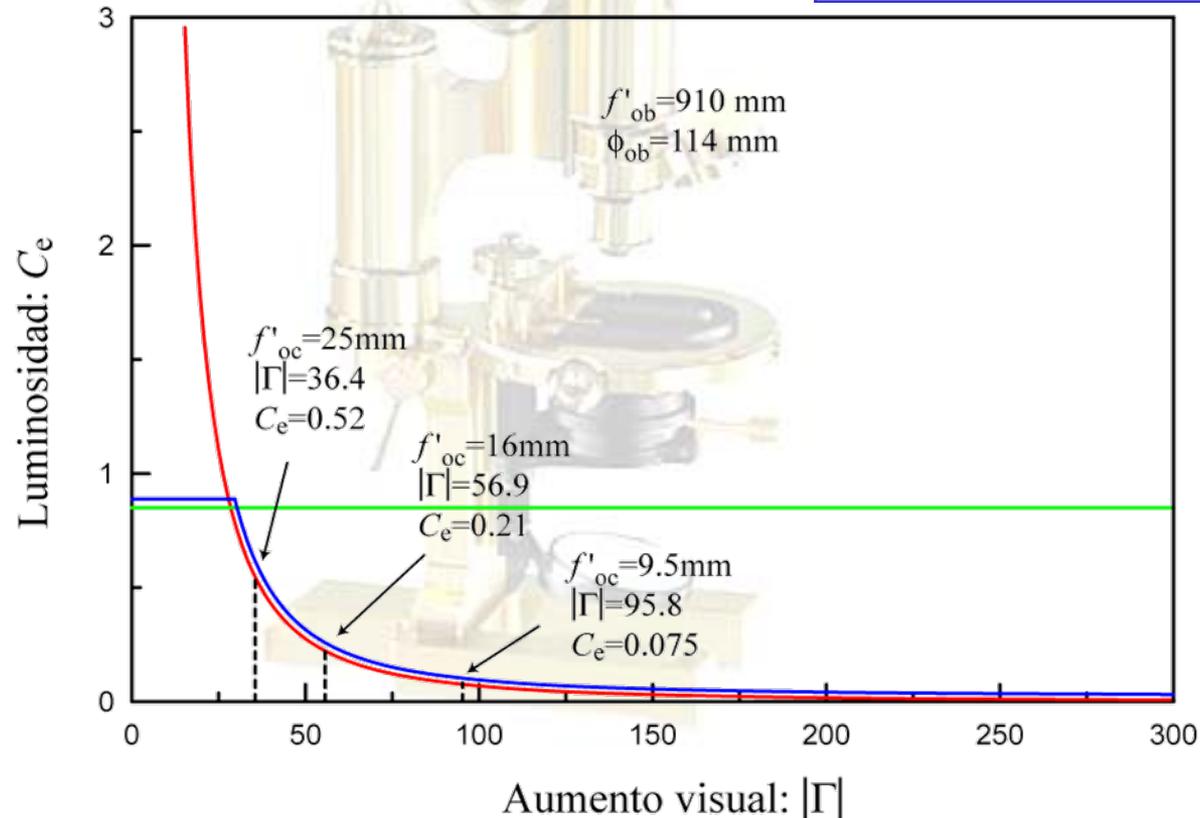
Ocular (2) $f'_{oc} = 16 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

Ocular (3) $f'_{oc} = 9.5 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

$$C_e = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2$$

$$\phi_{PS}^{ef} = \min \left\{ \frac{\phi_{ob}}{|\Gamma|}, \phi_A \right\}$$

$$C_e = \min \left\{ \tau \left(\frac{\phi_{ob}}{|\Gamma| \phi_A} \right)^2, \tau \right\}$$



Objetivo

$$f'_{ob} = 910 \text{ mm}$$

$$\phi_{ob} = 114 \text{ mm}$$

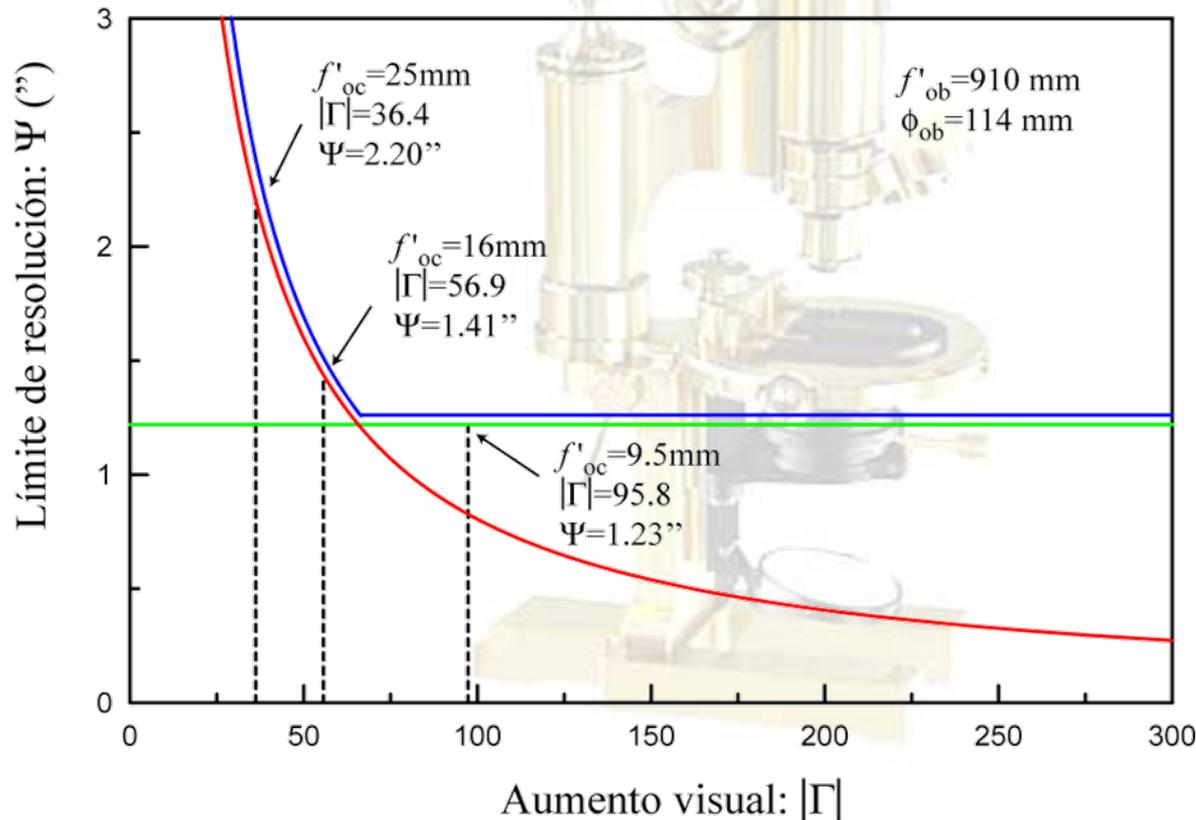
Ocular (1) $f'_{oc} = 25 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

Ocular (2) $f'_{oc} = 16 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

Ocular (3) $f'_{oc} = 9.5 \text{ mm}$ $w'_m = 45^\circ$

$$\psi_{\text{Anteajo}} = \text{máx} \{ \psi_{\text{dif}}, \psi_{\text{ret}} \} = \text{máx} \left\{ \frac{140''}{\phi_{ob}}, \frac{80''}{|\Gamma|} \right\}$$

Campo visual



$$(1) w_m = \frac{w'_m}{36.4} = 1.23^\circ$$

$$(2) w_m = \frac{w'_m}{56.9} = 0.79^\circ$$

$$(3) w_m = \frac{w'_m}{95.8} = 0.47^\circ$$

7.6.- Denominación comercial y ejemplos

Desde un punto de vista comercial los Anteojos se especifican de diferentes formas:

- Telescopios (refractores y reflectores):

$$m \times n \text{ o } m/n \text{ donde } m = f'_{ob} \text{ y } n = \phi_{ob}$$

- Prismáticos: $m \times n$ donde $m = |\Gamma|$ y $n = \phi_{ob}$

- Para los Oculares se emplea la misma notación que en los microscopios $\Gamma_{oc} = 250 / f'_{oc} (mm)$.

Sin embargo, se indica el valor de la distancia focal imagen, f'_{oc} , que resulta más útil para calcular el Aumento total.

- A veces se indica también el valor del campo angular.
- Conocer el diámetro del objetivo, ϕ_{ob} , es muy importante ya que influye en:
 - Luminosidad
 - Poder separador



Anteojo de Galileo, S XVI



Telescopio refractor de Lick, S XIX
 San Fransisco

$$\phi_{ob} = 910mm$$



Telescopio reflector 1400/150

$$f'_{ob} = 1400mm$$

$$\phi_{ob} = 150mm$$



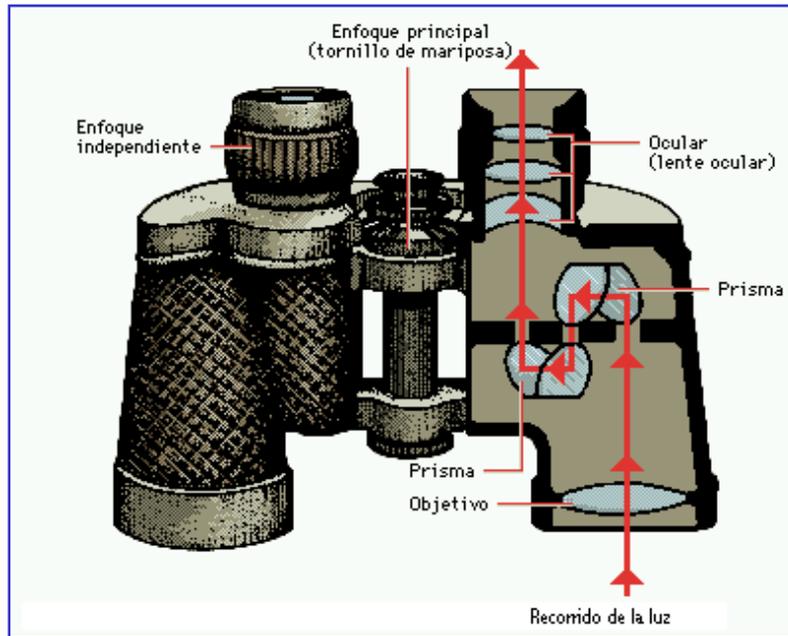
Anteojo terrestre 1200 x 90
Sistema inversor de prismas

$$f'_{ob} = 1200mm$$

$$\phi_{ob} = 90mm$$

PRISMÁTICOS

Anteojos terrestres en el que el Sistema Inversor está constituido por prismas



Prismático binocular 10 x 50

Esquema de un Prismático

$$\Gamma \times \phi_{ob}$$

Prismático monocular 45 x 90
Cámara digital incorporada

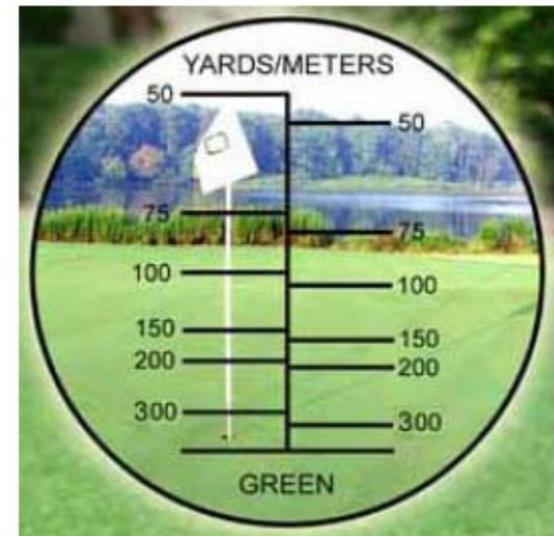




Prismático monocular 8 x 21

$$\Gamma = 8$$

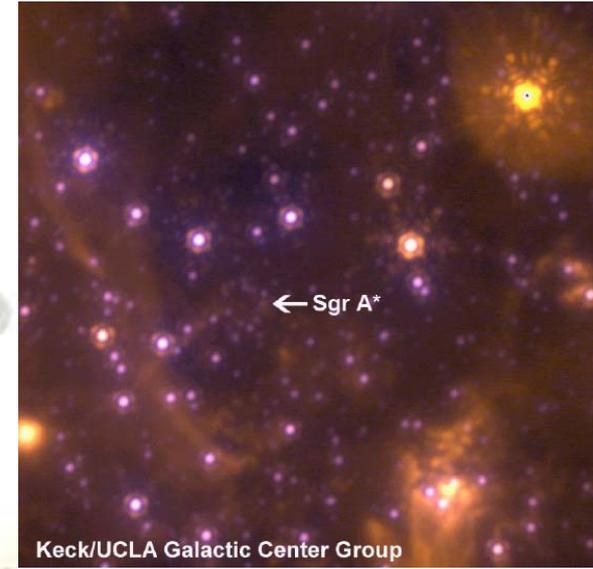
$$\phi_{ob} = 21mm$$



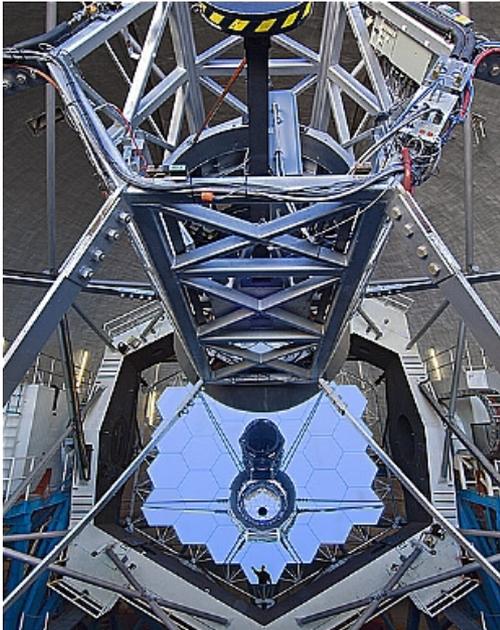
Retículo especial calibrado para medir distancias

Límites de enfoque: 122m a 1000m

Aplicación: Golf



Observatorio de Keck, Mauna Kea. Hawai



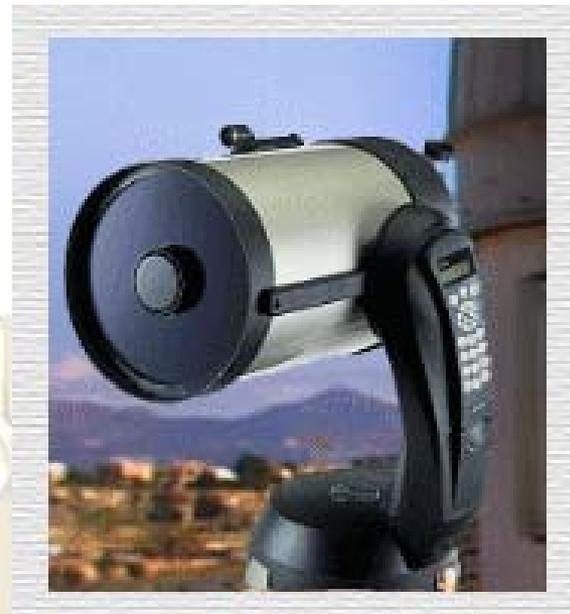


$$f'_{ob} = 4800mm$$

$$\phi_{ob} = 600mm$$



Telescopio ROBótico de Aras



Telescopio reflector. Campus de Burjassot

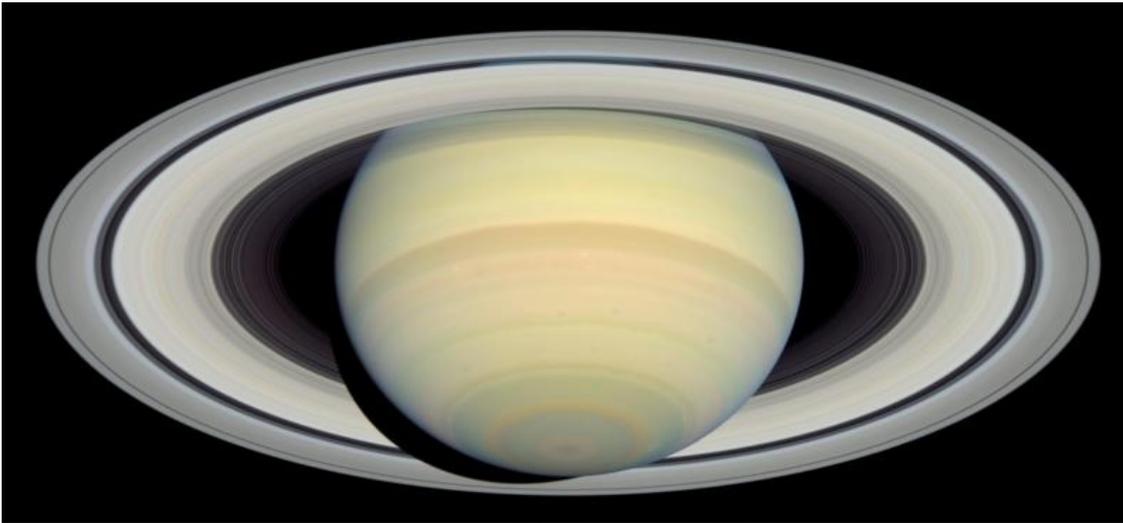
$$f'_{ob} = 2030mm$$

$$\phi_{ob} = 203mm$$



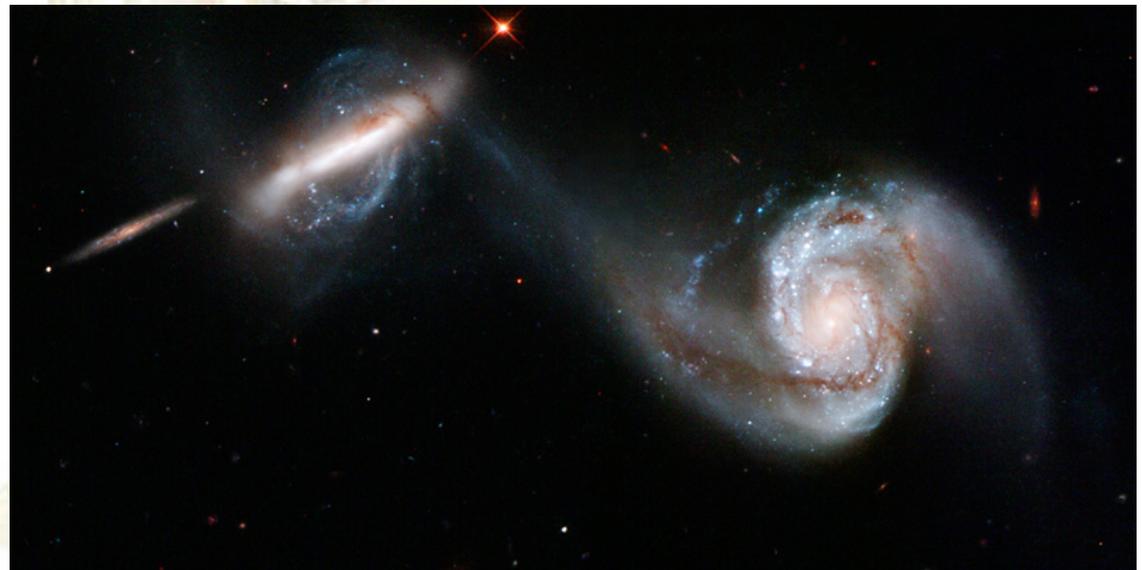


Telescopio espacial Hubble



Saturno

Interacción de
dos Galaxias



Imágenes obtenidas con el Telescopio espacial Hubble