

Capítulo 5 Anteojos y telescopios

Se debe hacer hincapié en que, para el ojo, las imágenes retinianas son proporcionales al diámetro aparente (angular) de los objetos observados.

Para poder examinar los detalles de un objeto alejado al que no nos podemos acercar, se utilizan instrumentos que dan del objeto, de diámetro aparente ω , una imagen de diámetro aparente ω' bastante superior a ω . Esta imagen, que hace el papel de objeto para el ojo, da una imagen retiniana M veces más grande, de manera que

$$\frac{\omega'}{\omega} = M$$

El objeto visto a través del instrumento parece M veces más grande que a ojo desnudo.

A este tipo de instrumentos, destinados a la observación directa de los objetos lejanos, se les denomina telescopios. En la práctica, también se les llama también anteojos, y se reserva el nombre de telescopios a los sistemas que usan objetivos de reflexión.

5.1 Anteojo astronómico I

5.1.1 Generalidades

1. Principio. Descripción esquemática

El anteojo astronómico es un instrumento compuesto por dos sistemas ópticos convergentes: el objetivo y el ocular.

El objetivo da una imagen real, invertida y de dimensiones mucho más pequeñas que el objeto lejano que se observa, pero a una distancia accesible en su plano focal imagen. Esta imagen es vista a través de un ocular el cual aumenta sus dimensiones aparentes que son, por tanto, mucho más grandes que las correspondientes al objeto.

Si el objeto está en el infinito, el plano focal imagen del objetivo debe coincidir con el plano focal objeto del ocular y tenemos, entonces, un sistema afocal.

El sistema óptico objetivo tiene una gran distancia focal, generalmente de diversos metros (puede llegar a tener hasta 20 m).

El ocular puede ser una simple lente (ocular de Kepler) o más usualmente puede tratarse de un ocular compuesto (por ejemplo el ocular de Ramsdem) de algunos centímetros de distancia focal (potencia de 25 a 100 dioptrías y aumento visual de 6 a 25).

Los dos sistemas tienen el mismo eje óptico y están montados sobre un gran tubo que tiene el mismo diámetro del objetivo. El tubo del ocular es móvil respecto al objetivo (Fig. 5.1). En el plano focal imagen del objetivo se suele colocar un diafragma y un retículo.

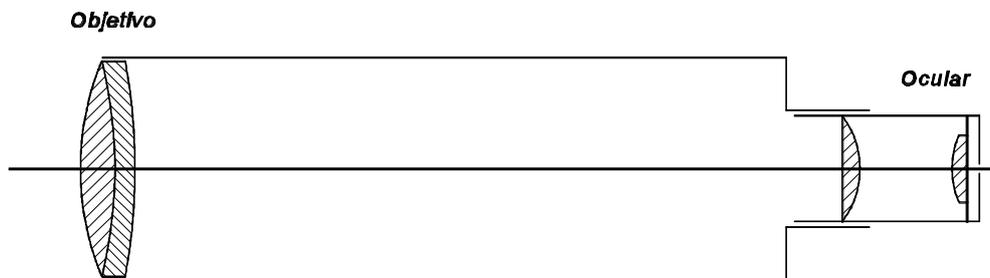


Fig. 5.1

2. Construcción de las imágenes. Marcha de rayos

Si consideramos un objeto situado en el infinito, su imagen a través del objetivo (y') se formará en la focal imagen del objetivo (F'_{obj}), que generalmente coincide con la focal objeto del ocular (F_{oc}) (Fig. 5.2).

De esta manera, los rayos salen paralelos del ocular y el observador emétrope no tiene necesidad de acomodar.

El objeto subtende un ángulo ω desde el objetivo del antejo, que es la inclinación máxima de los rayos que entran. La imagen intermedia (y') es vista por el observador bajo un ángulo ω' , que es la máxima inclinación con que salen los rayos del antejo.

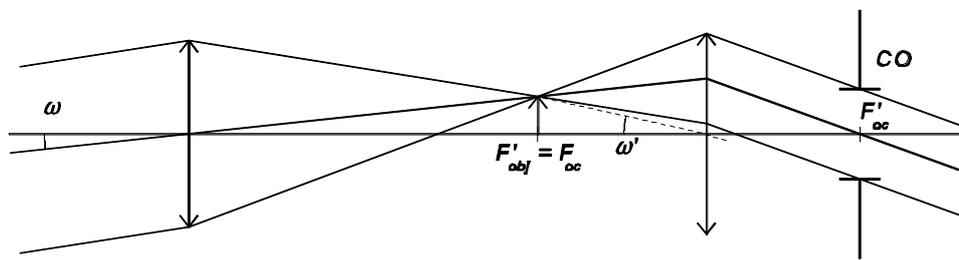


Fig. 5.2

3. Enfoque

La imagen del objetivo tiene una posición fija (en el plano focal del objetivo) y sobre ella se enfoca el ocular.

Imaginemos, por ejemplo, que después de haber sacado al máximo el ocular, éste se va acercando al objetivo. En un principio, la imagen final y' es real ya que y' se encuentra antes que F_2 , y podrá caer dentro del intervalo de acomodación de un hipermetrope. Después, cuando y' llega a F_2 (foco objeto del ocular) la imagen final estará en el infinito de manera que, para un emétrope, pueda ser vista sin acomodación. Finalmente, cuando quede detrás de F_2 , la imagen final se encontrará delante del ojo y podrá ser vista por un miope o por cualquier otro ojo que acomode. A partir de ahora se supondrá que se trabaja siempre con un ojo emétrope mirando al infinito, con lo que se relaja así su acomodación. Dicho de otra manera, se supondrá el caso en que el antejo sea afocal, que es el más habitual.

4. Círculo ocular. Posición del ojo

Se llama círculo ocular (círculo de Ramsdem) a la imagen del objetivo a través del ocular. Se colocará el ojo en este punto (círculo ocular) ya que todos los rayos que llegan al antejo pasan necesariamente por él. El diámetro del círculo ocular acostumbra a ser inferior o, como máximo, igual a la pupila del ojo.

Se debe hacer notar que, al igual que en el objetivo fotográfico, las pupilas del objetivo están en los planos principales del objetivo. Con ello se puede conocer la posición y las dimensiones del círculo ocular (Fig. 5.3).

Para conocer la posición del círculo ocular, utilizaremos la fórmula de Newton:

$$z_p z'_p = -f_{oc}^2$$

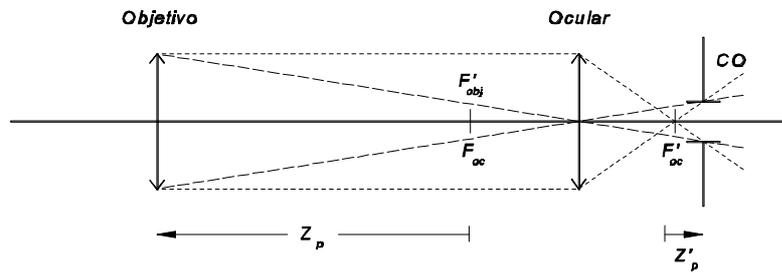


Fig. 5.3

si el sistema es afocal, $z_p = -f'_{obj}$, entonces si sustituimos en 5.1 obtendremos:

$$-f'_{obj} z_p = -f'^2_{oc} \rightarrow z'_p = \frac{f'^2_{oc}}{f'_{obj}} \quad (5.2)$$

Si tomamos, por ejemplo, $f'_{obj} = 1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$, $f'_{oc} = 50 \text{ mm}$, obtendremos:

$$z'_p = \frac{50^2}{1000} = 2,5 \text{ mm}$$

El círculo ocular está en este caso a 2,5 mm de F'_{oc} . En muchos casos, la diferencia entre los valores de f'_{oc} y f'_{obj} es todavía más grande que en el ejemplo dado y, por tanto, z'_p es menor. Es por esto que cuando el anteojo es suficientemente grande, se considera que el círculo ocular está situado en el plano focal del ocular.

Se llama emergencia de pupila (a'_p) a la distancia que hay desde la última lente del ocular hasta el ojo. Para calcular la emergencia de pupila aplicamos la fórmula de Descartes, y buscamos la imagen del objetivo a través del ocular:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad \text{con } a = f'_{obj} + f'_{oc}; \quad f' = f'_{oc}; \quad a' = a'_p$$

y obtenemos:

$$a'_{p'} = \frac{f'_{obj} + f'_{oc}}{-M}$$

5.1.2 Aumento

1. Definición y cálculo

Se ha visto que el aumento es una magnitud del antejo que se mide por la relación M entre el ángulo ω' , bajo el cual se ve la imagen del objeto con el instrumento, y el ángulo ω , bajo el cual se ve el objeto a ojo desnudo. Esta también es la relación de dimensiones de las imágenes retinianas.

Del simple examen de la figura 5.2 y de la definición de la potencia P_2 del ocular, se deducen las igualdades siguientes:

$$\omega' = \frac{y'}{-f'_{oc}} = y' P_{oc}$$

Con lo que,

$$\omega' = -\omega f'_{obj} P_{oc}$$

y, por tanto, el aumento será:

$$M = \frac{\omega'}{\omega} = -f'_{obj} P_{oc} \quad (5.4)$$

El aumento visual del antejo M es igual al producto de la distancia focal del objetivo (dada en metros) por la potencia del ocular (dada en dioptrías).

Se debe remarcar que, prácticamente en todos los casos, P_2 es igual a la potencia intrínseca del ocular. Así, casi siempre en todos los casos,

$$M \approx \frac{-f'_{obj}}{f'_{oc}} \quad (5.5)$$

Es la fórmula fundamental del aumento visual del antejo astronómico. Se incluye el signo menos porque ω y ω' tienen diferente signo, se indica así que la imagen final es invertida, aunque en la práctica solo se considera el valor absoluto del aumento.

2. Relación del aumento con el radio del círculo ocular

Consideremos un rayo que pasa por el centro del objetivo y su conjugado, que pasa necesariamente por el centro del círculo ocular. ω y ω' son los ángulos que forman, respectivamente, con el eje (Fig. 5.2).

Aplicando a la pupila S_1 y al círculo ocular S'_1 la fórmula de Lagrange-Helmholtz, se obtiene

$$D_{oc} \omega' = D_{obj} \omega$$

Por la cual cosa, excepto el signo,

$$M = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{D_{obj}}{D_{oc}} = \frac{D_{PE}}{D_{PS}} \quad (5.6)$$

Por tanto,

$$D_{PS} = \frac{D_{PE}}{M}$$

3. Medida del aumento

Se pueden utilizar diversos métodos:

1. Se mide f'_{obj} y f'_{oc} y se calcula el cociente:

$$M = \frac{f'_{obj}}{f'_{oc}}$$

Generalmente, f'_{obj} es conocido y P_{oc} o $M = P_{oc} / 4$ está inscrito sobre el ocular.

2. Se calcula la relación:

$$\frac{D_{PE}}{D_{PS}}$$

Para hacerlo, se mide la parte interior de la montura del objetivo y se mide la dimensión de la imagen correspondiente en el plano del círculo ocular.

3. Se puede utilizar una cámara clara, cosa que permite ver simultáneamente una mira alejada y su imagen a través del antejo.

Si y es el tamaño de la mira objeto, y' es el tamaño de la mira dada por el instrumento, M veces más grande que la mira objeto. La cámara clara permite superponer sobre la retina la imagen retiniana y' proporcionada por el instrumento, y la imagen retiniana y que se ve sin instrumento, de manera que basta con contar cuantas veces está contenido y en y' .

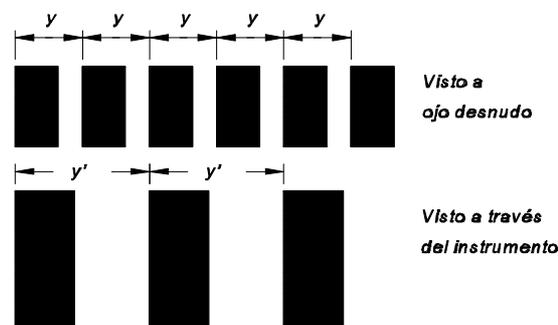


Fig. 5.4

Para hacer una medida rápida, se puede mirar la graduación directamente con un ojo y a través del antejo con el otro ojo, y proceder como con la cámara clara.

4. Designación de los anteojos

Para facilitar la elección de un tipo determinado de antejo, se designa mediante dos números separados por un aspa. El primer número representa el aumento y el segundo, el diámetro de la pupila de entrada en milímetros. Así, un antejo 6 x 30 indica que el aumento es de 6 y que la pupila de entrada tiene un diámetro de 30 mm. Al dividir entre sí ambos valores se obtiene un diámetro de pupila de salida de 5 mm.

5. Aumento visual para objetos próximos

Si el antejo está enfocado a un objeto cercano, varía el aumento con que se ve el mismo. Se supone que el objeto está situado a una distancia E del ojo, y a L del plano focal objeto del objetivo. El ocular se deberá desplazar alejándose del objetivo para mantener la imagen intermedia sobre F'_{oc} . Si el ángulo bajo el cual se ve el objeto a ojo desnudo es ω'' , y con telescopio es ω' , con la figura 5.5 se calcula el aumento según:

Recordemos que

$$M_{\infty} = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} \rightarrow \tan \omega' = M \tan \omega$$

Entonces

$$M_{cercano} = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega''} = \frac{M_{\infty} \tan \omega}{\tan \omega''} = \frac{M_{\infty} \frac{y}{L}}{\frac{y}{E}} = M_{\infty} \frac{E}{L} \quad (5.8)$$

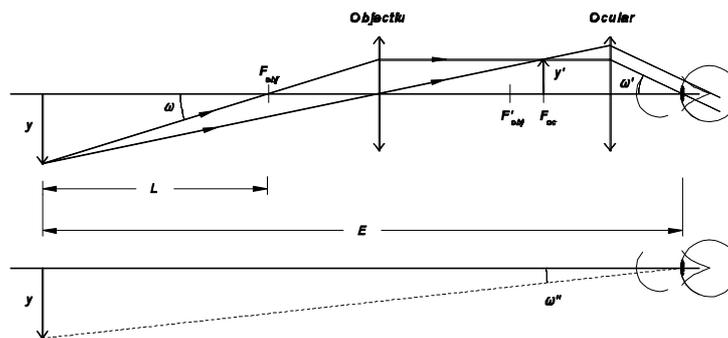


Fig. 5.5

Así, el aumento es mayor cuando el objeto se acerca al anteojo y se enfoca la imagen alejando el ocular del objetivo. Cuando se desplaza el ocular también se deben mover las lentes colectoras, retículos o diafragmas de campo que existan sobre su plano focal, para que vuelvan a coincidir con la imagen intermedia.

5.1.3 Campo

1. Definición geométrica

- Se llama campo a la parte del espacio en que todos los puntos son visibles a través del instrumento.

Es evidente que un punto es visible si los rayos que provienen de él son los que dan rayos conjugados emergentes que entran en el ojo. Todos los rayos emergentes, en efecto, pasan necesariamente por el interior del círculo ocular, ya que éste, por construcción, es siempre la pupila de salida del instrumento.

La imagen intermedia se forma en el foco objeto del ocular y se observa a través de éste. El observador ve todo lo que hay en el plano focal objeto del ocular, pero hay una limitación en la extensión del objeto que se quiere ver a causa de las dimensiones del ocular. Si la imagen intermedia es muy extensa, los rayos que llegan a los extremos de ésta no entrarán al ocular, y por tanto no llegarán al ojo, de manera que no se verá una parte del objeto.

Consideremos un haz cilíndrico que entra al objetivo con una inclinación ω_p (Fig. 5.6). Su haz conjugado entra completamente al ocular y, por lo tanto, toda la luz que entra al instrumento sale (salvo pérdidas por reflexión y absorción). En este caso no hay viñeteado y el campo que se ve es el campo de iluminación llena.

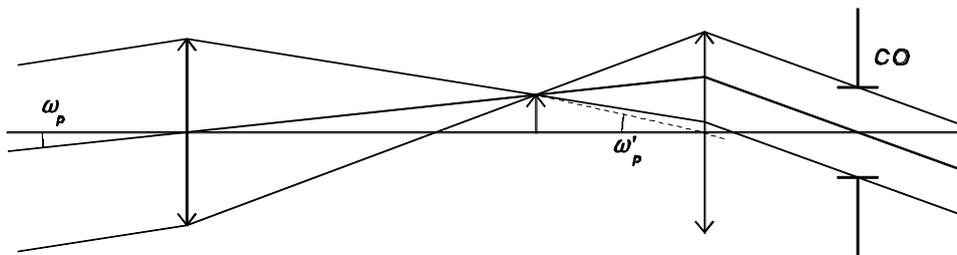


Fig. 5.6

Si la inclinación del haz cilíndrico es superior, su eje conjugado ya no entra completamente en el ocular. En este caso no toda la luz que entra en el objetivo sale, de manera que la imagen que observamos está menos iluminada en los bordes. Este efecto se llama viñeteado.

La figura 5.7 nos muestra el caso del campo de iluminación medio en que la inclinación del haz es de ω_m y entra en el ocular la mitad del haz conjugado.

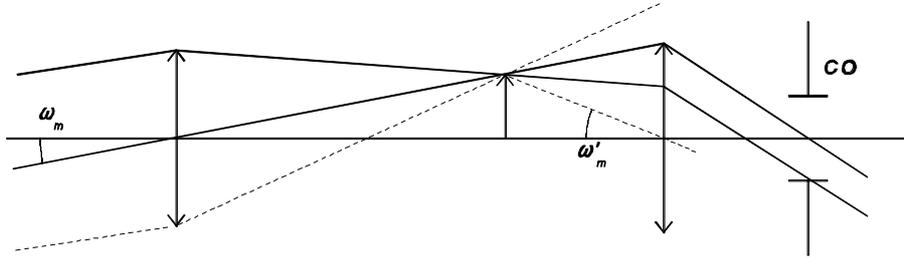


Fig. 5.7

En la figura 5.8 tenemos el caso del campo de iluminación límite. Si el haz entrase con una inclinación superior a ω_l , el haz conjugado no entraría en el ocular.

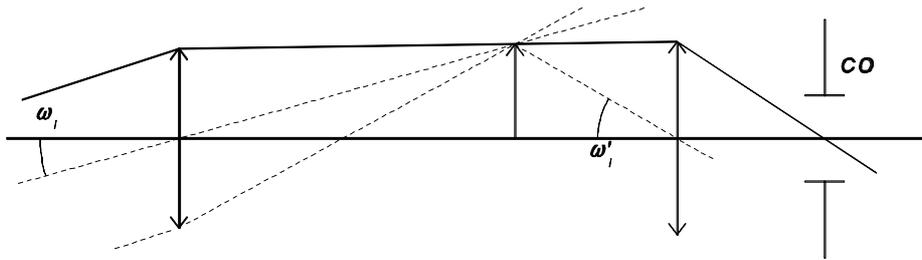


Fig. 5.8

Con tal que no haya viñeteado, generalmente se coloca un diafragma donde se forma la imagen intermedia. Este diafragma actuará de diafragma de campo (Fig. 5.9).

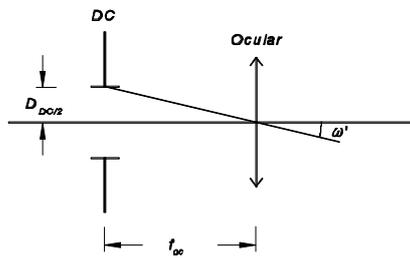


Fig. 5.9

2. Campo y aumento

A la hora de definir el aumento visual (M) habíamos visto que

$$M = \frac{\omega'}{\omega} \rightarrow \omega' = M \omega$$

Esta relación es igualmente cierta para cualquier ángulo de entrada al anteojo y al semiángulo conjugado de salida del anteojo.

Dicho de otra manera, ω_p , ω_m o ω_l es un valor particular de ω y ω'_p , ω'_m , ω'_l , el valor correspondiente de ω' .

De manera que hay un campo angular imagen de plena luminosidad,

$$\omega'_p = \omega_p M$$

un campo angular imagen medio,

$$\omega'_m = \omega_m M$$

y un campo angular imagen límite,

$$\omega'_l = \omega_l M$$

3. Papel determinante del campo ocular. Conclusión

Se ha visto anteriormente que el ocular sólo daba buenas imágenes si las imágenes estaban en el interior de su campo angular imagen de nitidez o campo aparente de nitidez ω' .

Por tanto, es evidente que el campo geométrico que se toma, ω_p , ω_m , ω_l , debe ser inferior o igual a ω' . Como

$$\omega = \frac{\omega'}{M}$$

Para un M fijo se llega al mayor posible de los ω tomando ω'_p o ω'_m igual a ω' .

Así se aprovechan las cualidades ópticas del ocular. Esto es lo que hacen los constructores. De manera que, si por ejemplo $M = 500$ y $T' = 30E$ (ocular de Ramsdem), se tiene $2T = 30E/500 = 3,6'$.

Se debe notar que el campo 2ω es muy pequeño. Es por esto que los grandes telescopios están provistos de un antejo buscador con un aumento más pequeño y un campo más grande, el cual tiene un eje paralelo al eje del gran antejo que permite llevar el objeto dentro del campo de observación de este último. En efecto, basta con llevar el objeto al centro del campo del antejo buscador, cosa que es muy fácil ya que el campo es suficientemente grande. Por tanto, es la calidad del ocular la que determina el campo. Además, los constructores sitúan un diafragma llamado diafragma de campo, cuyo radio es el campo lineal objeto que corresponde al campo aparente de nitidez, en el plano focal objeto del ocular, si este es positivo, o en el plano focal objeto de la lente de ojo, si es negativo.

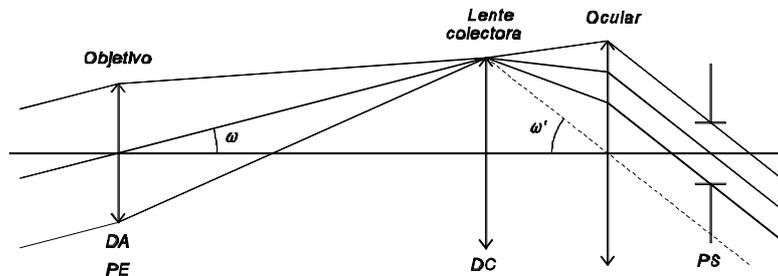


Fig. 5.10

Después se determina la razón de apertura de la lente de campo de manera que el campo objeto correspondiente sea el campo de iluminación plena. Así se suprime el campo del contorno. Falta remarcar, además, que al ser pequeña la razón de apertura de la lente de campo en relación a su distancia al objetivo, los tres campos se confunden en la práctica siendo el campo del contorno despreciable y los radios del diafragma y de la lente de campo prácticamente iguales.

Además del diafragma de campo, se suele colocar sobre la imagen intermedia una lente colectora.

En la figura 5.10 se observa que el ocular debe tener una gran dimensión para recoger todos los haces inclinados y esto, juntamente con su focal más corta y la mayor inclinación de los rayos, hace que sea un sistema óptico muy difícil de corregir de aberraciones y excesivamente voluminoso.

Por esta razón, se suele colocar una lente positiva sobre la imagen intermedia que hace converger los haces de rayos y permite un ocular de campo más pequeño. Esta lente se llama colectora, o de campo.

La lente colectora no afecta al aumento del anteojo, ya que se mantiene el valor del ángulo ω' porque no modifica el tamaño de la imagen intermedia. Tampoco modifica la relación entre los diámetros de las pupilas de entrada y de salida, ya que no varía la dirección de los rayos que inciden al objetivo paralelos al eje.

La posición de la pupila de salida es modificada por la lente colectora, que hace que se acerque al ocular con lo que se acorta la emergencia de pupila. Para hallar la nueva posición de la pupila de salida se puede hacer la marcha paraxial de la PE a través de la lente colectora y del ocular. Si f'_L es la focal de lente colectora, aplicando la fórmula de Descartes sucesivamente, se obtiene:

$$a'_{PC} = a'_p - \frac{f'^2_{oc}}{f'_L} \quad (5.10)$$

donde a'_p es la emergencia de pupila sin lente colectora. Se deduce que lentes colectoras convergentes acercan la PS al ocular y que lentes colectoras divergentes la alejan. Esto es útil para los visores de armas de caza en los que existe un retroceso al disparar.

5.1.4 Formatos de objetivos y oculares más usuales

Al diseñar un telescopio, se trabaja por separado con el objetivo y el ocular, gracias a la existencia de una imagen intermedia que nos lo permite. Hay una gran diferencia entre el cálculo de uno y otro, ya que en el objetivo los haces de campo entran con poca inclinación y llenan todo su diámetro, y en el ocular recorren una pequeña zona fuera del eje con gran inclinación.

1. Objetivos

El diseño es normalmente muy sencillo, pero la construcción tiene que ser muy cuidadosa, ya que cualquier falta de homogeneidad afecta toda la imagen.

Como el campo es muy pequeño, varía de $3,5^\circ$ a 7° , es suficiente corregir la cromática longitudinal, la esférica y la condición del seno con un doblete pegado con la primera lente de vidrio crown, por ser más resistente (Fig. 5.11 (a)).

Cuando el diámetro es muy grande no se pueden utilizar superficies pegadas a causa de la diferente expansión térmica de los vidrios crown y flint, que produciría una ruptura. Entonces, se deja una pequeña

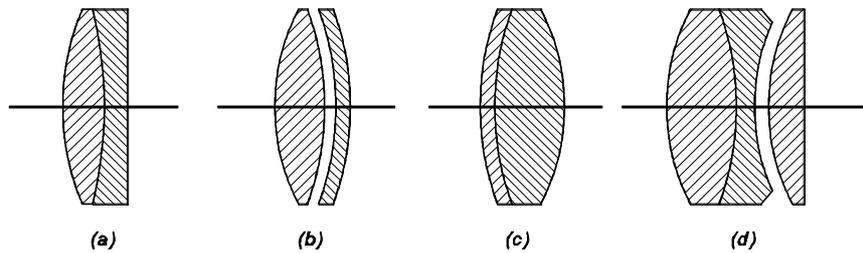


Fig. 5.11

separación entre las dos lentes, y también se puede hacer con la intención de disponer de un parámetro más para corregir las aberraciones (Fig. 5.11 (b)). Se llama objetivo de Fraunhofer.

El uso de dobletes con el flint delante (Fig. 5.11 (c)) no es recomendable, porque este vidrio es más blando y frágil, aunque se consigue una mejor esférica zonal.

Si se desea un objetivo apocromático, se deben utilizar tres tipos de vidrios de un formato parecido al objetivo de Cooke (Fig. 5.11 (d)) que no permite aperturas superiores a $f/15$.

Si se quieren aperturas o campos más grandes, o una mejor corrección de aberraciones, se utilizarán objetivos fotográficos del tipo Petzval, triplete o Tessar.

2. Oculares

Ya hemos visto en el capítulo de los oculares diferentes diseños que se pueden aplicar a los anteojos.

5.2 Anteojo astronómico II. Telescopios

5.2.1 Poder de resolución

1. Planteamiento del problema

Para caracterizar la aptitud del ojo para reconocer los detalles de un objeto, se recurre, igual que para el microscopio, al concepto de poder de resolución, ya definido anteriormente.

Si se admite que el instrumento es perfectamente astigmático (cosa que significa que las aberraciones están suficientemente corregidas), entonces sólo la difracción disminuye la calidad de la imagen. La única

condición a tener en cuenta para que la mira objeto sea resuelta por el ojo a través del instrumento es que $Q'_D \leq Q'_u$, siendo Q'_D el paso angular de la imagen de la mira resuelta por el instrumento y Q'_u el límite angular de la resolución del ojo sin ningún instrumento. La pupila de entrada del ojo es su propia pupila si ésta es más pequeña que la pupila natural del ojo (cosa que sucede generalmente).

Recordemos que Q'_u viene dado por la curva de Arnulf y que, en concreto si D_u es el diámetro de la pupila del ojo, entonces:

$$Q'_u = 1' \text{ si } D_u \leq 2 \text{ mm (visión nítida)}$$

$$Q'_u = 4' \text{ si } D_u = 0,5 \text{ mm (visión cómoda)}$$

Se debe recordar finalmente que la pupila del ojo tiene un diámetro siempre superior a 2 mm, y que el círculo ocular (CO) tiene un diámetro D_{PS} dado por la relación

$$D_{PS} = \frac{D_{PE}}{M}$$

2. Aumento útil

En el caso en que el ángulo de resolución del ojo Q'_u y el ángulo de resolución debido a la difracción Q'_D sean iguales, se aprovechan al máximo las características del instrumento. Cuando estemos en este caso se dice que el instrumento trabaja con un aumento útil, (M_u), que equivale a trabajar con $D_{PS} = 2 \text{ mm}$. En consecuencia, $M_u = D_{PE}/2$ y se tiene:

$$1. \text{ si } M < M_u \rightarrow D_{PS} > 2 \text{ mm}$$

$$2. \text{ si } M > M_u \rightarrow D_{PS} < 2 \text{ mm}$$

Estudiemos los dos casos:

1. $M < M_u$. Entonces $D_u > 2 \text{ mm}$ y el ojo limita la resolución del instrumento ($\Psi'_D \geq \Psi'_u$), la expresión $M = Q'_u/Q'_D$ se nos convierte en $Q'_D M \leq Q'_u$, y como que $Q'_u = 1'$ tenemos que $Q'_D \leq 1/M$.

2. $M > M_u$. Entonces $D_u < 2 \text{ mm}$ y la difracción limita la resolución del instrumento ($\Psi'_D \leq \Psi'_u$).

3. Aumento visual óptimo y límite mínimo de resolución

Para un objetivo de apertura dada, es decir, un objetivo cuya pupila de entrada o de salida tiene un diámetro dado D , Q es proporcional a $D \cdot Q_o$, donde Q es mínimo cuando $D \cdot Q_o$ es mínimo e igual a 1 mm por minuto, cuando $D = 0,5$ mm.

Este límite sólo se consigue si se tiene:

$$D = \frac{D}{M_v} = 0,5$$

Es decir, cuando M_v toma el valor de

$$M_o = \frac{D}{0,5} = 2 D$$

Este M_o es el aumento óptimo y D es expresado en milímetros.

Es inútil, entonces, sobrepasar M_o pero es necesario alcanzarlo si se quiere obtener el mejor poder de resolución posible para un diámetro D del objetivo dado.

De las consideraciones anteriores, en la práctica, se dice que el ojo en el espacio imagen podrá resolver un ángulo dependiendo del tipo de visión considerada:

$Q'_o = 1'$ (visión nítida)

$Q'_o = 2'$ (visión distinta)

$Q'_o = 4'$ (visión cómoda)

A este ángulo le corresponderá, en el espacio objeto, un ángulo dado por

$$\Psi_o = \frac{\Psi'}{M_v} \quad (5.13)$$

Según hemos visto en el capítulo dedicado a las características generales de los instrumentos, hay diferentes factores que influyen en el poder separador.

Considerando la difracción debida a la pupila de entrada de un antejo, se podrá resolver en el espacio objeto de un ángulo,

$$\Psi_D = \frac{120''}{D_{PE}} \quad (5.14)$$

donde D_{PE} es expresado en milímetros.

De los ángulos Q_D y Q_o , el que tenga un valor más pequeño será el que determinará la resolución del instrumento, porque si el ojo puede resolver un ángulo más pequeño que el que le proporciona el antejo no podrá aprovechar su capacidad, y viceversa, si el instrumento da una imagen de mejor calidad que la que puede apreciar el ojo, este no la apreciará.

Cuando ambos ángulos son iguales se aprovechan totalmente las características del antejo y del ojo. Entonces se obtiene un valor del aumento llamado aumento de resolución que, en visión nítida, cuando $Q_u = 60'$, da

$$M_R = \frac{D_{PE}}{2} \quad (5.15)$$

Para un aumento mayor que el resolvente, el ojo ve borrosa la imagen dada por un antejo, porque el ojo resuelve más que el antejo. Los instrumentos de observación siempre tienen un aumento más pequeño que el de resolución, mientras que en los instrumentos de medida se permite un valor más grande ya que en este caso interesa que la imagen sea la más grande posible, aunque sea borrosa.

Se debe hacer notar que cuando el aumento es igual al de resolución, la pupila de salida tiene un diámetro fijo de 2 mm, que se deduce fácilmente de las relaciones anteriores y que coincide con el concepto de aumento útil difundido anteriormente en el punto 2.

4. Consecuencias. Poder separador

a) Los grandes antejos. Si se quiere tener un gran poder de resolución hace falta tener un objetivo de diámetro también grande. Pero es difícil encontrar un gran volumen de vidrio sin defectos (tales como hilos, burbujas, etc.); por esta razón ningún objetivo de antejos de refracción sobrepasa 1 m de diámetro.

Por otra parte, como que no se puede sobrepasar $1/20$ de apertura relativa, si se quiere una buena corrección de las aberraciones la distancia focal debería ser superior a 20 m, pero el antejo sería muy voluminoso y difícil de realizar. Así pues, para las aperturas grandes (superiores a 1m) se prefiere un antejo con objetivo de reflexión, es decir, lo que se suele denominar telescopio.

b) El límite mínimo de resolución $1/R'$ es teórico porque sólo se puede conseguir si se cumplen las condiciones dadas al principio; las recordaremos. La primera hace referencia al astigmatismo, hecho que implica la existencia de una apertura relativa pequeña. La segunda es la hipótesis de que nada, excepto la difracción, puede dañar la calidad de la imagen.

Además, la agitación atmosférica, debida a las variaciones locales de temperatura, provoca variaciones del índice de aire que perturban la propagación de la luz y afectan la calidad de la imagen (este es el fenómeno que causa el centelleo de las estrellas en las observaciones a ojo desnudo y con antejo, y la deformación de la imagen de un astro dada por un telescopio).

Por tanto, cuando el poder de resolución teórico se hace bastante grande, la agitación atmosférica interviene y es la que limita el poder de resolución práctico a un valor inferior al teórico. Esto se produce en el caso de los anteojos grandes y todavía más en el de los grandes telescopios que tienen bastantes metros de diámetro de apertura.

c) Poder separador. Verdaderamente, al menos para los grandes anteojos, no se puede hablar del poder de resolución que se suele referir a las miras de Foucault, sino del poder separador, que es la aptitud para diferenciar dos estrellas muy cercanas la una de la otra (estrellas dobles).

Se conocen una serie de estrellas dobles, cuyas distancias angulares son conocidas. Basta con observarlas sucesivamente yendo de las más separadas a las más cercanas hasta que no se puedan separar las dos estrellas que las componen.

5.2.2 Claridad

1. Pupilas y luz transmitida

La cantidad de luz o flujo luminoso que proviene de un objeto (puntual o no) y que entra en el ojo depende, evidentemente, de la pupila del ojo. Esta puede ser la pupila natural o el círculo ocular (pupila artificial) en el caso de que sea más pequeña que la pupila natural.

En el primer caso ($D_o < D_{co}$), los haces que entran en el ojo (y salen de los anteojos) les corresponden haces incidentes que son diafragmados por la antiimagen a través de los anteojos de la pupila del ojo, que es lo que se considera pupila de entrada del conjunto instrumento-ojo. Considerando que la pupila del ojo está en el plano del círculo ocular, la antiimagen se debe encontrar en el plano de entrada del objetivo. Su diámetro D es más pequeño que el diámetro del objetivo (D_{PE} , diámetro de la pupila de entrada del instrumento, considerado solo). Además, si M_v es el aumento correspondiente al plano de las pupilas,

$$M_v = \frac{D_{PE}}{D_{PS}} = \frac{D}{D_o} \quad (5.16)$$

Resumiendo, todo pasa como si se hubiera reducido el diámetro del objetivo al valor $D = M_v \cdot D_o$.

En el segundo caso ($D_{co} < D_o$), al contrario, es toda la superficie del objetivo la que está cubierta por los haces conjugados de los haces luminosos que entran al ojo.

El flujo luminoso recibido por el ojo no es igual al flujo luminoso que entra por la pupila de entrada del conjunto instrumento-ojo. En efecto, una parte de la luz es absorbida por el vidrio atravesado y la otra parte es reflejada por las diferentes superficies que se encuentran por el camino hacia el ojo.

En consecuencia, la relación entre el flujo que recibe finalmente el ojo detrás del instrumento y el flujo que entra en el conjunto instrumento-ojo siempre es inferior a 1. En los grandes anteojos esta transmitancia es del orden de 0,65 e incluso puede descender a 0,5.

El flujo luminoso incidente depende, evidentemente, del objeto que emite la luz. Pero, para un objeto determinado, sólo depende de la apertura de la pupila de entrada del conjunto instrumento-ojo o de la apertura de la pupila del ojo en la visión a ojo desnudo.

Se admitirá a partir de ahora que el flujo luminoso recibido por un antejo es efectivamente proporcional a la superficie de la pupila de entrada instrumento-ojo y, por tanto, al cuadrado de su radio.

2. Objetos extensos

a) Cálculo y definición de la claridad

Un objeto extenso es un objeto cuya imagen retiniana cubre diferentes elementos retinianos. En la observación a ojo desnudo el flujo luminoso F recibido por el ojo es, según lo que acabemos de ver,

$$F = k \left(\frac{D_o}{2} \right)^2$$

para todo D_o diámetro de la pupila natural del ojo y siendo k un factor constante de proporcionalidad.

Cuando se observa con los anteojos el flujo que entra es, según el caso, igual a

$$F' = k \left(\frac{D_{PE}}{2} \right)^2 \quad o \quad F' = k \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

y el flujo que entra al ojo es

$$F' = T k \left(\frac{D_{PE}}{2} \right)^2 \quad o \quad F' = T k \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (5.17)$$

Si S es el número de elementos retinianos sobre los cuales el flujo F se reparte, el flujo E recibido por cada elemento (iluminación) es igual a

$$E = \frac{k (D_o/2)^2}{S} \quad (5.18)$$

Y también, si S' es el número de elementos iluminados en la observación a través del antejo, el flujo E' recibido para cada elemento es igual a

$$E' = \frac{T k(D_{PE}/2)^2}{S'} \quad \text{o} \quad E' = \frac{T k(D/2)^2}{S'} \quad (5.19)$$

Se sabe que la imagen retiniana es M_v veces más grande que en la observación a ojo desnudo, de manera que su superficie es M_v^2 veces más grande y se obtiene:

$$S' = M_v^2 S$$

Aunque entre más cantidad de luz al instrumento por el hecho de tener una pupila de entrada más grande, este flujo de luz se debe repartir en una superficie de retina mucho más grande. En efecto, si se hace la relación entre E'/E , se obtiene, según el caso,

$$\frac{E'}{E} = \frac{T (D_{PE}/2)^2}{S'} \frac{S}{k(D/2)^2} = T \left(\frac{D_{PE}}{M_v D} \right)^2 \quad (5.21)$$

o

$$\frac{E'}{E} = T \left(\frac{D}{M_v D_o} \right)^2 \quad (5.22)$$

Pero se sabe que $D_{PE} = M_v D_{PS}$ y que $D = M_v D_o$. Si lo sustituimos en las expresiones 5.21 y 5.28, y si se hace $E'/E = C_1$ se tiene

$$C_1 = T \left(\frac{D_{PS}}{D_o} \right)^2 \quad \text{o} \quad C_1 = T \quad (5.23)$$

según que D_{PS} sea inferior a D_o (diámetro de la pupila natural del ojo) o superior o igual a D_o .

A C_l se le llama claridad y es la relación de los flujos luminosos recibidos por un elemento retiniano (iluminación) cuando observa un determinado objeto a través del instrumento, respecto a cuando lo hace con el ojo desnudo.

b) Valores de la claridad. Aumento normal.

Se ha visto que la claridad es siempre inferior o, al menos, igual al coeficiente de transmisión y depende de la dimensión de D_{PS} (pupila de salida de los anteojos) respecto al de D_o (pupila del ojo). Además, para un valor dado de D_{PE} (diámetro del objetivo), D_{PS} depende del aumento porque

$$D_{PS} = \frac{D_{PE}}{M_v}$$

Con lo cual,

$$D_{PS} < D_o \quad \text{si} \quad M_v > \frac{D_{PE}}{D_o}$$

$$D_{PS} \geq D_o \quad \text{si} \quad M_v \leq \frac{D_{PE}}{D_o}$$

$$D_{PS} \geq D_o \quad \text{si} \quad M_v \leq \frac{D_{PE}}{D_o}$$

Cuando el diámetro del círculo ocular es igual al diámetro de la pupila del ojo ($D_{PS} = D_o$) se dice que el instrumento trabaja con un aumento normal (M_N).

$$M_N = \frac{D_{PE}}{D_{PS}} = \frac{D_{PE}}{D_o} \quad (5.24)$$

Consecuentemente, si M_v es superior a M_N ,

$$D_{PS} < D_o \quad i \quad C_1 = T \left(\frac{D_{PS}}{D_o} \right)^2 \quad (5.25)$$

La claridad es inferior a T y depende de D_{PS} , por tanto de M_v .

Si M_v es inferior a M_N ,

$$D_{PS} \geq D_o \quad i \quad C_1 = T$$

En este caso, la claridad es igual a T e independiente de D_{PS} y de M_v .

c) Consecuencias

1) De

$$D_{PS} = \frac{D_{PE}}{M_v}$$

Y de

$$D_o = \frac{D_{PE}}{M_N}$$

Se deduce que

$$\frac{D_{PS}}{D_o} = \frac{M_N}{M_v}$$

Y en consecuencia,

$$C_1 = T \left(\frac{M_N}{M_v} \right)^2 \quad (5.26)$$

2) Si D_o varía entre 2 mm y 8 mm, M_N variará entre $D_{PE}/2$ y $D_{PE}/8$. Así pues, en la observación nocturna M_N es bastante débil:

Como $M_{\text{util}} = D_{PE}/2$, si $D_o = 2$ entonces $M_N = M_u$, y si $D_o = 8$ entonces

$$M_N = \frac{M_u}{4}$$

Por ejemplo, para un $D_{PS} = 0,5$, $D_o = 4 \text{ mm}$ y $T = 0,64$, la claridad es muy débil:

$$C_1 = 0,64 \left(\frac{0,5}{4} \right)^2 = 0,01$$

Por tanto, un planeta, la luna, o una nebulosa, vistos, con este instrumento, parecen 100 veces menos brillantes que a ojo desnudo.

3. Objeto puntual

a) Cálculo de la claridad

Los únicos objetos puntuales son las estrellas.

Se sabe que esta apariencia puntual se interpreta diciendo que casi toda la luz que sale del objeto y que entra al ojo, después de haber atravesado el antejo, se reparte en el interior de una mancha de difracción lo suficientemente pequeña para que esté contenida un solo elemento retiniano. Entonces, con este razonamiento, no tiene sentido hablar de superficies, y por tanto se define la claridad, $C_2 = F'/F$, es decir, la relación de flujos que llegan al ojo con el instrumento o sin instrumento. Por tanto, la claridad será, según que D_{PS} sea inferior o superior a D_o ,

$$C_2 = \frac{F'}{F} = \frac{T k (D_{PE}/2)^2}{k (D_u/2)^2} = T \left(\frac{D_{PE}}{D_u} \right)^2 \quad \text{o} \quad C_2 = \frac{T k (D/2)^2}{k (D_u/2)^2} = T \left(\frac{D}{D_u} \right)^2$$

(5.27)

También se puede escribir:

$$C_2 = T M_N^2 \quad \text{o} \quad C_2 = T M_v^2$$

De todas maneras tenemos, evidentemente,

$$C_2 = C_1 M_v^2$$

ya que

$$C_1 = T \left(\frac{M_N}{M_v} \right)^2 \quad \text{o} \quad C_1 = T \quad (5.30)$$

b) Consecuencia. Visibilidad de las estrellas

- Una estrella es visible si el elemento retiniano que recoge la luz que proviene de las estrellas recibe una excitación superior a la que proviene de la bóveda celeste y también si el contraste entre los flujos luminosos recibidos es suficiente. La experiencia muestra que si F_2 es el flujo recibido por la célula sobre la cual se forma la imagen de la estrella y F_1 es el flujo recibido por cada célula vecina, la condición de visibilidad se escribe:

$$\frac{F_2 - F_1}{F_1} \geq s \quad (5.31)$$

donde s es del orden de algunas centésimas. También se puede escribir:

$$\frac{F_2}{F_1} \geq 1 + s \quad (5.32)$$

- A ojo desnudo esta condición solo se cumple por la noche y para un cierto número de estrellas. Pero en la observación a través del antejo y a partir de la misma definición de C_1 y de C_2 , F_1 se substituye por $C_1 F_1$ y F_2 por $C_2 F_2$.

De manera que F_2/F_1 es substituido por $C_2 F_2 / C_1 F_1$.

Como C_1 es pequeño, 1/100 en el ejemplo dado antes, y C_2 es mucho mayor (M_v^2 veces mayor) la nueva relación puede superar bastante la unidad, mientras que el antiguo F_2 / F_1 era muy pequeño. En resumen,

$$\frac{C_2 F_2}{C_1 F_1} = M_v^2 \frac{F_2}{F_1} \quad (5.33)$$

Basta con que

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{1}{M_v^2} + \varepsilon$$

con

$$\varepsilon = \frac{S}{M_v^2}$$

Es decir, algunas centésimas de $1/M_v^2$, para que $M_v^2 F_2/F_1$ sea superior a $1+s$.

Consecuentemente:

- Las estrellas, que durante el día son todas invisibles a ojo desnudo, se vuelven visibles, incluso durante el día, si se las observa con un antejo de aumento suficiente.
- Las estrellas invisibles al ojo desnudo, incluso durante la noche, se vuelven visibles cuando se las observa con un antejo. Este hecho se puede comprobar con un antejo de hasta 6x o 8x de aumento, que es el que tienen los prismáticos ordinarios.

Naturalmente, el número de estrellas visibles aumenta a medida que M_v aumenta; en este momento, se dice que el poder de penetración del espacio aumenta. Pero se debe remarcar que si se ven nuevas estrellas no es porque parezcan más grandes (ya que no dejan de ser puntuales) sino porque son más brillantes, ya que se recoge más luz con un antejo que no a ojo desnudo. Los telescopios y los antejos son auténticos embudos de luz que substituyen con su gran apertura (unos cuantos decímetros e incluso metros) la débil apertura de la pupila del ojo (algunos milímetros) en la que concentran la luz recibida.

c) Conclusión

Se ha intentado aumentar el poder de penetración aumentando tanto como sea posible M_v . Pero aumentar M_v quiere decir disminuir D_{PS} , cosa que implica aumentar la mancha de difracción y esta mancha, cuando sobrepasa limpiamente M_v , se puede volver superior al área de un elemento retiniano. En este punto el razonamiento que da la claridad C_2 deja de ser válido. Por ello es inútil incrementar el aumento visual más allá de un cierto límite que está definido por la apertura del objetivo. De aquí el interés por los objetivos de gran diámetro.

A un objetivo de radio dado le corresponden dos valores remarcables del aumento visual que se pueden obtener gracias a diversos oculares. Estos valores son (siendo D_{PE} el diámetro del objetivo dado en milímetros):

- El aumento óptimo igual a $2D_{PE}$ que da el mejor poder separador y un gran poder de penetración, pero

un campo débil $2T/Mv$. Es inútil sobrepasarlo mucho.

- El aumento normal o equipupilar igual a D_{PE}/D_o , generalmente igual a $D_{PE}/3$ (de uso nocturno), que da la claridad máxima para la observación de grandes astros (nebulosas y cometas) y un gran campo.

El hecho de tener valores de aumento por debajo de M_N hace que solo se utilice una parte del objetivo y solo se aumenta el campo.

5.2.3 Telescopios

1. Generalidades

Se llama telescopio, o más exactamente telescopio catróptico (en oposición al antejo astronómico, que es un telescopio dióptrico), a un instrumento destinado a la observación, a la fotografía, a la espectrografía o a la fotometría de los astros, el objetivo del cual es un espejo cóncavo. Este espejo cóncavo es parabólico o esférico y está completado a menudo por un sistema corrector dióptrico o bien por otro espejo; todo el conjunto forma el sistema objetivo, que da una imagen que se observa por un ocular. En el plano focal del objetivo se puede colocar una placa fotográfica o la rendija de un espectroscopio.

El espejo cóncavo objetivo tiene generalmente un gran diámetro de apertura (que puede ser superior a 1 m, y puede llegar a tener más de 6 m en el gran telescopio de Zelenchukskaya, en la antigua URSS, que tiene un total de 425 toneladas de masa de vidrio).

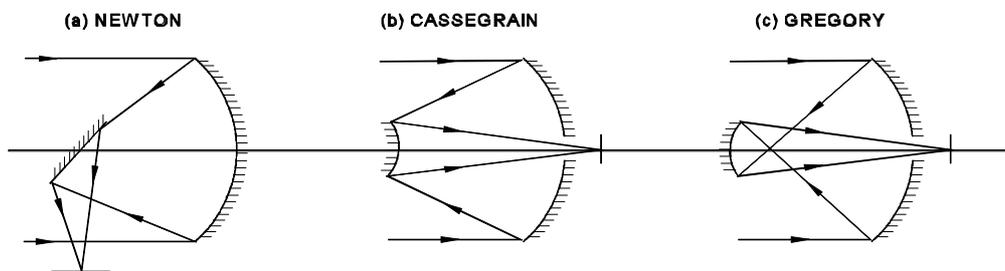


Fig. 5.12

Se utiliza el montaje que haga más accesible la imagen dada por el objetivo según se trate de la observación, la fotografía o la astrofísica. Según la forma de los espejos (principal y secundario) y la manera como se coloquen, se obtienen diferentes clases de objetivos reflectores, los más conocidos son el montaje de Newton, el de Cassegrain (son los dos más clásicos) y el de Gregory (Fig. 5.12).

2. Montaje de Newton

a) Descripción. Se asocia al espejo cóncavo M , un espejo plano m inclinado sobre el eje de M y que tiene como misión dar del foco F y del espejo una imagen F'_1 situada cerca de la pared del tubo, en el cual se ha montado el objetivo (Fig. 5.13).

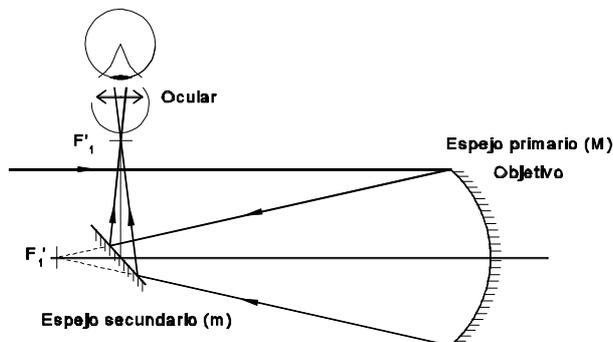


Fig. 5.13

b) Funcionamiento. F'_1 es el plano focal del conjunto formado por los dos espejos. Es donde se forma la imagen de los objetos lejanos. En este punto es donde se coloca la placa fotográfica o la rendija de un espectrógrafo (o de un espectroscopio) o bien, por medio de un ocular (tipo Huygens, en general), se observa la imagen que nos proporciona el objetivo.

c) Notas. La forma y las dimensiones del espejo secundario m son calculadas de manera que se suprima el mínimo de rayos del eje incidente. Es lo mismo para el prisma de reflexión total que se utiliza a veces (hoy día muy poco habitual) en vez del espejo m . Cuando M es muy grande, m llega a ser también tan grande que obliga a suprimirlo, de manera que, entonces, el ocular o la placa fotográfica se coloca directamente cerca de F (Fig. 5.14).

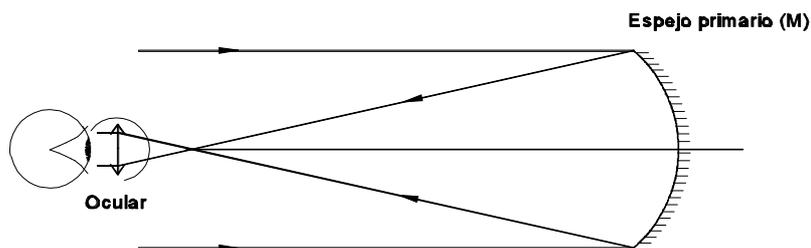


Fig. 5.14

Los telescopios de Hale (de más de 5 m de diámetro en el objetivo) y el de Zelenchukskaya (de más de 6 m) son tan grandes que es posible la observación directa de un observador sentado en una cabina, que está situada en el foco primario (Fig. 5.13).

3. Montaje de Cassegrain

a) Principio. En el montaje de Cassegrain se asocia al espejo objetivo M , un espejo m con el mismo eje. Este último espejo da, de un objeto situado en F' (foco de M), una imagen real F'_2 (foco secundario) que se forma cerca del mismo M , el cual acostumbra a tener un orificio central que permite la observación de la imagen definitiva o bien hacer fotografías (Fig. 5.15).

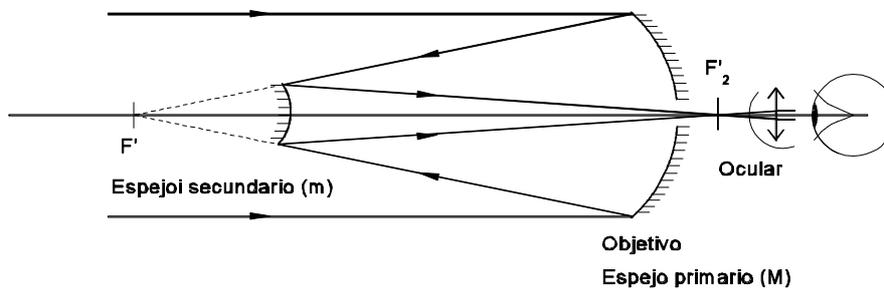


Fig. 5.15

Cuando el espejo M no está agujereado, se utiliza un espejo plano m' que desvía hacia el borde del tubo la imagen dada por la combinación de los dos espejos M y m (como en el montaje de Newton). En ambos casos, igual que en el de Newton, según las necesidades o bien se coloca una placa fotográfica (o la rendija de un espectrógrafo) en el plano donde se forma la imagen definitiva dada por los dos o tres espejos, o bien se observa la imagen para un ocular.

A imágenes iguales, el montaje de Cassegrain tiene una dimensión bastante más pequeña que el montaje de tipo Newton o que un telescopio refractor. Se puede considerar que el montaje de Cassegrain es una especie de teleobjetivo.

Un gran telescopio moderno es, antes que nada, un gran espejo parabólico (cosa que es fundamental) al cual se pueden asociar diferentes espejos y sistemas dióptricos con el fin de realizar los diferentes tipos de combinaciones de Newton o Cassegrain que permitan la observación visual, la fotografía, la espectrografía, etc.

4. Cualidades de un telescopio en la observación visual

Aunque un telescopio está destinado sobre todo a la astrofotografía y a la astrofísica, también se utiliza para la observación visual, que es necesaria para examinar la imagen que proporciona el objetivo antes de utilizarla espectroscópicamente o fotográficamente.

a) Aumento visual. Se expresa de la misma manera que en el caso del antejo astronómico. Si la potencia del ocular es P_{oc} , $T = P_{oc} \cdot y'$ siendo y' la dimensión de la imagen formada en el plano imagen secundario. Si la imagen formada en el foco primario es y , entonces $T = y/f'_{obj}$ y el aumento se expresará así:

$$M_v = \frac{\omega'}{\omega} = f'_{obj} P_{oc} \frac{y'}{y} \quad (5.35)$$

En el montaje de Newton, $y' = y$, por tanto,

$$M_v = f'_{obj} P_{oc}$$

En el montaje de Cassegrain, $y'/y = m'$, por tanto,

$$M_v = m' f'_{obj} P_{oc}$$

b) Círculo ocular. El instrumento está construido de manera que es la montura del gran espejo la que juega el papel de pupila de entrada. Su imagen respecto al resto del telescopio (incluido el ocular) es la pupila de salida, denominada aquí también círculo ocular.

Dado que la focal del objetivo es muy grande comparada con la del ocular, el círculo ocular está muy cercano al foco imagen del ocular. Como es donde se coloca el ojo, resulta que tal y como se demostró con la lupa P_{oc} es aproximadamente igual a la potencia intrínseca $1/f'_{oc}$, sea el telescopio afocal o no.

La aplicación de la fórmula de Lagrange-Helmholtz (que es válida también en el caso de los sistemas catóptricos) da lugar a la relación:

$$D_{PE} \omega = D_{PS} \omega'$$

de donde,

$$D_{PS} = \frac{D_{PE}}{M_v} \quad (5.39)$$

c) Poder de resolución. Aumento visual óptimo. Para el conjunto telescopio-ojo, es válido todo lo que se ha dicho para el anteojo astronómico-ojo.

Tal como en el anteojo astronómico, si la pupila del ojo se encuentra en la misma posición que la pupila de salida del telescopio, entonces la pupila de salida del conjunto telescopio-ojo es la del ojo, si esta es más pequeña que el círculo ocular, y viceversa si el círculo ocular es más pequeño que la pupila del ojo. Si D_o es el diámetro de la pupila del ojo, se sabe que se deben distinguir dos casos:

- $D_o \geq 2 \text{ mm}$. Se tiene, como límite de resolución,

$$\Psi \approx \frac{1}{M_v} \quad (5.40)$$

y, como aumento visual resolvente,

$$M_v = M_r = 2 D_{PE}$$

- $D_o < 2 \text{ mm}$. Q_0 varía, pero pasa por un máximo para $D_o = 0,5 \text{ mm}$ con lo que:

$$M_v = \frac{D_o}{0,5} = 2D_{PE} = M_o$$

donde M_o es el llamado aumento visual óptimo.

No obstante esto, y tal y como se demostró en el anteojo astronómico, el límite angular de resolución continua siendo:

$$\Psi = \frac{2}{D_{PE}} \quad (5.41)$$

d) Claridad. Pasa como en el caso del anteojo astronómico:

- Para los objetos extensos, si D_{CO} es el diámetro del círculo ocular y D_o el diámetro de la pupila natural de entrada del ojo:

$$C_1 = T \left(\frac{D_{CO}}{D_o} \right)^2 \quad (1) \quad \text{o} \quad C_1 = T \quad (2) \quad (5.42)$$

según que $D_{CO} < D_u$ (1) o que $D_{CO} \geq D_u$ (2)

- Para los objetos aparentemente puntuales:

$$C_2 = C_1 M_v^2$$

Se define como aumento equipupilar $M_N = D_{PE} / D_o$, para el cual $D_{CO} = D_o$ y $C_1 = T$. Si M_v es inferior o igual a M_N la claridad C_1 es máxima e igual a T . Por tanto, la visibilidad de las estrellas es tanto mayor cuanto mayor sea M_v , aunque no tiene sentido, tal y como se ha visto en los anteojos astronómicos, el hecho de superar el aumento útil, $M_u = D_{PE}/2 \text{ mm}$, o como máximo, $M_o = 2D_{PE}$.

5. Cualidades de un telescopio para la fotografía

a) Ventaja de la astrofotografía. La fotografía presenta una ventaja principal respecto a la observación visual, que es proporcionar un documento que se puede conservar y sobre el cual se puede trabajar. Los mapas del cielo han sido establecidos así.

Pero, sobre todo, la astrofotografía permite discernir estrellas o pequeños planetas que no se pueden ver a ojo desnudo, ya que, al estar tan lejos, envían un flujo luminoso muy débil que sólo puede detectar la placa fotográfica.

b) Tiempo de exposición y apertura. La placa fotográfica es más sensible que la observación visual gracias a un tiempo de exposición adecuado y suficientemente largo. Esto se explica por el hecho de que la energía que llega a un punto de la placa fotográfica se acumula y se transforma en energía química durante toda la exposición. Así, cuanto más larga sea la exposición más grande será el número de estrellas que aparecerán en la placa; se puede llegar a exposiciones de hasta 12 horas. Un receptor electrónico asociado a una placa fotográfica (procedimiento Ballamand) permite, a tiempos iguales de exposición, aumentar aun más el poder de penetración de un telescopio en el espacio.

c) Claridad. Como no se puede aumentar indefinidamente el tiempo de exposición, lo que se hace es aumentar lo máximo posible la claridad del objetivo, claridad tomada aquí en el sentido de la placa fotográfica.

En el caso de un objeto puntual, la energía luminosa recibida por unidad de tiempo por el objetivo es igual a $E \cdot B (D_{PE}/2)^2$ (donde E es la energía recibida por unidad de área). La energía recibida por el punto imagen es $E \cdot B \cdot T (D_{PE}/2)^2$ (donde T es el coeficiente de transmisión). Así pues, la claridad es proporcional a: $T (D_{PE}/2)^2$. De aquí también el interés de tener un objetivo de gran diámetro de apertura y un buen coeficiente de transmisión.

En el caso de un objeto extenso, la energía $E \cdot T \cdot B(D_{PE}/2)^2$ se reparte sobre toda la superficie de la imagen intermedia, que es proporcional a f^2 . La iluminación de la imagen (energía recibida por unidad de superficie de la imagen y por segundo) es proporcional a $E \cdot T(D_{PE}/f)^2$. Así pues, interesa, además de un buen coeficiente de transmisión, tener una razón de apertura lo mayor posible (igual que en el objetivo fotográfico).

d) Poder de resolución. Si el objeto es una mira muy alejada, ya se ha visto anteriormente que el contraste de la imagen dada por el sistema se anula cuando el paso angular de esta mira imagen es inferior a p' , siempre que w' esté ligado al radio de la pupila de salida R' por la relación:

$$D_{PE} \cdot p/2 = 1 \text{ mm} \cdot \text{min} \text{ y } D_{PE} \cdot T/2 = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}.$$

Por otra parte, como tenemos la relación de Lagrange-Helmholtz $D_{PE} \cdot p = D_{PE}' \cdot p'$, se cumplirá también $D_{PE}' \cdot T/2 = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}$ donde R es el radio de la pupila de entrada del sistema y ω el límite angular de resolución de la mira objeto que se puede resolver.

Aplicando lo anterior al objetivo de un astrógrafo, resulta que el límite angular de resolución será $2/D_{PE}$ siempre que sólo se tengan en cuenta los fenómenos de difracción.

Pero la estructura de la placa también interviene aquí y, si d es el diámetro de un grano, es natural admitir que la curva sólo quedará resuelta en el caso que la distancia entre dos trazos consecutivos de la imagen sea superior a d ; así pues, el límite angular de separación será d/f' rad si sólo se tiene en cuenta el grano de la placa.

Comparemos

$$\left(\frac{2}{D_{PE}} \right)' \quad \text{y} \quad \left(\frac{d}{f'} \right) \text{ rad} \quad (5.44)$$

Como $l' = 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$, se tiene

$$\left(\frac{2}{D_{PE}} \right)' = \left(\frac{3 \cdot 10^{-4}}{R} \right) \text{ rad}$$

Expresando R en milímetros, $d = 20 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$; entonces se busca bajo que condiciones d/f' es superior a $(2/D_{PE})'$ se encuentra:

$$\frac{20 \cdot 10^{-3}}{f'} > \frac{3 \cdot 10^{-4}}{D_{PE}/2}$$

Si

$$\frac{D_{PE}}{f'} > \frac{3 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{100}$$

Así pues, para que el grano de la placa sea el que limite el poder de resolución bastaría que la apertura relativa sea superior a 3/100 o 1/33.

Como la razón de apertura de los objetivos dióptricos (en los anteojos) es siempre más grande que 1/20 y la de los objetivos catóptricos es del orden de 1/3 a 1/5, se puede afirmar que lo que limita el poder de resolución es el grano de la placa, cosa que hace que éste sea, en el caso de la fotografía, mucho peor que en observación visual (a distancias focales iguales).

Por lo tanto, en astrofotografía, si lo que se quiere es un gran poder de resolución se procurará tener una gran distancia focal.

e) Poder separador. En astronomía, lo que generalmente interesa es la amplitud de los telescopios para separar dos puntos (dos estrellas) entre las cuales hay una distancia angular muy corta (poder separador). Aunque se trate de dos calidades diferentes, las conclusiones a que se ha llegado con el poder de resolución se pueden extender al poder separador, siempre con la suposición que los resultados son aproximadamente válidos.

6. Comparación con el anteojo astronómico

La apertura relativa y las aberraciones

a) Ausencia de cromatismo. La necesidad de corregir bien la aberración cromática no permite superar la apertura relativa 1/13 en los grandes objetivos de los anteojos astronómicos. Esta dificultad desaparece al utilizar un objetivo catóptrico con el cual todas las imágenes policromáticas se forman en el mismo lugar.

b) Objetivo parabólico y aberraciones de apertura

b.1) Se suprime la aberración esférica dando al espejo objetivo la forma de un paraboloide de revolución. La parábola es una superficie de reflexión rigurosamente estigmática para su foco y el punto del eje al infinito. Pero un punto situado fuera del eje da una imagen inutilizable a partir del momento en que la

dirección de este punto forma un ángulo superior a $2,5'$ con el eje. Dicho de otra manera, el campo de nitidez de un objetivo no es superior a $5'$ o a $15 \cdot 10^{-4} \cdot f'$. Si $f' = 10 \text{ m}$ la imagen solo es buena en el interior de un círculo, centrado en el foco, el diámetro del cual vale $15 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 15 \text{ mm}$.

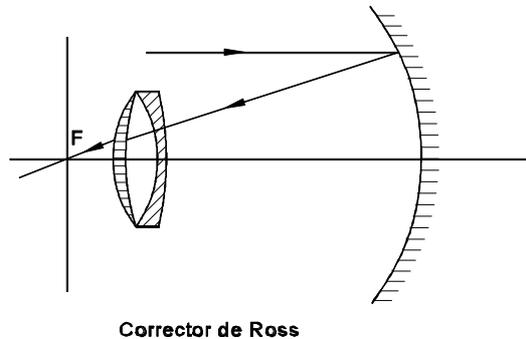


Fig. 5.16

b.2) Para aumentar el campo de nitidez se coloca, entre el foco y el espejo, un sistema afocal formado por dos lentes que se denomina corrector de Ross (Fig. 5.16). Este sistema tiene por efecto multiplicar el campo por 6 o por 7. Para $f' = 10 \text{ m}$ se consigue un diámetro del campo imagen de unos 10 cm (dimensión de la imagen del sol).

b.3) El telescopio aplanático de Ritchley-Chrétien es una combinación Cassegrain en la que se han retocado las superficies reflectoras con tal de conseguir un conjunto aplanático. El inconveniente es que el gran espejo cóncavo no se puede utilizar solo, ni siquiera en el montaje de Newton.

c) Objetivos de Schmidt y de Bouvers-Maksutov

c.1) El espejo objetivo es esférico y esto hace que se corrija la aberración esférica por medio de meniscos afocales (o casi afocales) las caras de los cuales tienen sus centros de curvatura muy cercanos al centro de curvatura del espejo (Bouvers-Matsukov) (Fig. 5.17), o por medio de una lámina de una forma determinada (Fig. 5.18), colocada en el centro de curvatura del espejo (cámara de Schmidt).

c.2) Estos dispositivos no solamente aseguran la corrección de la aberración esférica, sino también la del coma. Con un objetivo de Schmidt se llega a campos de nitidez de casi 10° .

Como única aberración queda la curvatura de campo. Lo que se hace es reemplazar el plano focal por una superficie esférica focal, cosa que obliga a utilizar placas fotográficas curvas.

Por otra parte, algunas veces se ha conseguido corregir ópticamente las aberraciones de campo.

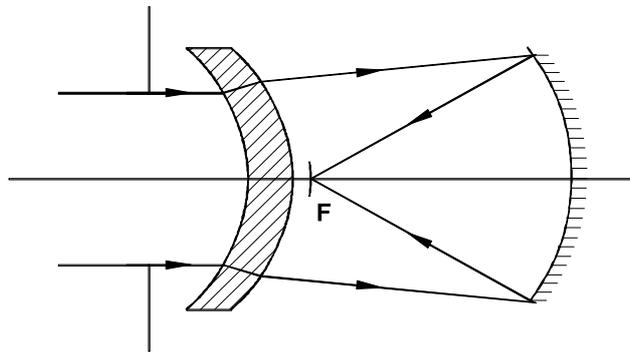


Fig. 5.17

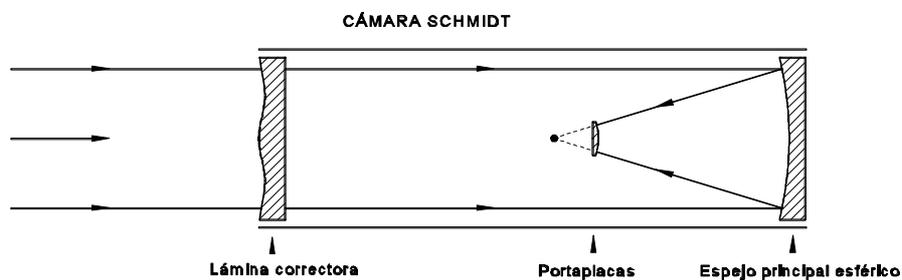


Fig. 5.18

d) Apertura relativa. Con los medios antes descritos, se llega a conseguir una mancha de aberración inferior a la de difracción, dentro de un campo suficiente si se trabaja con una apertura relativa de $1/5$ e incluso de $1/3$ (valor 4 o 5 veces más grande que en los objetivos de los anteojos astronómicos).

De ello resultan dos ventajas importantes del telescopio respecto al antejo: por una parte, con diámetros de apertura iguales, un telescopio es mucho menos voluminoso que un antejo; por otra parte, la claridad, en el caso de la fotografía de objetos extensos, es muy superior a la que se obtiene con un antejo ya que esta claridad es proporcional al cuadrado de la apertura relativa.

Alteraciones de las imágenes

a) Deformaciones de origen mecánico. El aumento del diámetro de la apertura implica evidentemente un aumento de peso. Así pues, para garantizar una forma invariable de la superficie reflectora es necesario que ésta tenga un cierto espesor.

Para disminuir el peso sin disminuir la rigidez, se monta un espejo constituido por partes cruzadas, acopladas, multiplicando los puntos de soporte sobre la montura metálica que tiene que ser, a su vez, lo más rígida posible. Así se consigue reducir mucho la relación del espesor al diámetro de apertura (se ha conseguido $1/4$ con el telescopio de Toronto, cuyo espejo de pirex tiene un diámetro de 1,80 m).

b) Deformaciones de origen térmico. La variación de la temperatura también es una causa de alteración de las imágenes. Incluso admitiendo que el aire ambiente está a la misma temperatura en todas partes, se producen aun los dos fenómenos siguientes:

b.1) De una parte, la temperatura del espejo varía con el tiempo y provoca un desplazamiento del plano focal. Ello exige una verificación frecuente del enfoque (que es un problema para la fotografía con largos tiempos de exposición).

b.2) Por otra parte, y es lo más nocivo, el vidrio es un mal conductor del calor y la temperatura es diferente en puntos distintos de la masa del vidrio el cual, por otra parte, ya no es de por sí homogéneo al constituir una masa tan grande. Ello da lugar a deformaciones en la superficie reflectora (a causa de las diferentes dilataciones en los diferentes puntos del espejo), lo que implica las correspondientes alteraciones de la imagen. Se intenta evitar estas alteraciones ventilando el espejo y provocando calentamientos o enfriamientos locales para compensar así los enfriamientos o calentamientos que provocan las deformaciones. Por otra parte, se utiliza el vidrio pirex ya que se dilata tres veces menos que los vidrios ordinarios y permite también disminuir lo más posible la relación espesor/apertura sin provocar deformaciones elásticas.

c) Agitación atmosférica. A pesar de todas las precauciones antes citadas no se puede eliminar una última causa de alteración atmosférica. Esto tiene por efecto aumentar el diámetro de la mancha de difracción de forma que el razonamiento, que conduce a la fórmula del poder de resolución, ya no es válido.

Esta dificultad, ya dañina para los grandes anteojos, lo es más para los grandes telescopios; primero porque siendo la apertura más grande exige mejores imágenes, y después porque la luz atraviesa dos veces la zona del aire perturbado, con lo cual la influencia de esta perturbación se multiplica por dos.

7. Usos y construcciones

a) Usos. Es imposible apuntar con precisión con un gran telescopio, al menos no mejor que con un gran antejo. La astronomía de posición es un dominio reservado a los anteojos medianos. Pero, para la fotografía astronómica y para la espectrofotografía estelar, los telescopios presentan grandes ventajas. El hecho de que se les pueda dar un gran diámetro de apertura permite obtener una gran claridad sobre todo para la fotografía de las estrellas. Juegan el papel de inmensos embudos de luz.

Ciertamente, los espejos de Newton, o el de Cassegrain con su agujero, disminuyen el 10% la superficie útil del objetivo y la claridad. Pero esta pérdida está ampliamente compensada por el incremento considerable de la superficie total. Por otra parte, el factor de transmisión (más bien el de reflexión) es muy fuerte, de un 92%; este hecho incrementa aún más la claridad del telescopio respecto a la de los anteojos, incluso a igual apertura.

El hecho de que todas las imágenes monocromáticas se superpongan en el mismo plano, cosa que no sucede exactamente cuando el objetivo es refractor, es una ventaja para la espectrografía y para el enfoque fotográfico, que es el mismo que el enfoque visual.

En fin, si la apertura relativa es muy grande, hasta $1/2$, la dimensión de un telescopio, su montura y su cúpula serán mucho más reducidas para un radio de apertura dado, especialmente en el montaje de Cassegrain (que permite aumentar la focal sin aumentar la dimensión de la montura).

Por todas estas razones, la utilidad del telescopio está sobre todo en la fotografía astronómica y en los trabajos de astrofísica (espectrografía y fotometría).

b) Construcción. Montura ecuatorial

b.1) Construcción de los espejos. El espejo parabólico se hace a partir de un espejo esférico del mismo diámetro, mediante los procedimientos habituales, utilizando los abrasivos y las herramientas adecuadas. La fabricación precisa se hace por retoques locales controlados continuamente por diferentes métodos (como el método de las sombras de Foucault).

La anulación de la aberración esférica principal de los espejos esféricos conduce al espejo parabólico. Se pule ligeramente la superficie en el centro o en los bordes. Se trata de sacar solamente un espesor del vidrio del orden de una micra, tal y como se puede demostrar mediante cálculos.

El espejo hiperbólico se hace de la misma manera, pero mucho más fácilmente ya que es más pequeño. Además, un objetivo de telescopio solo tiene una superficie para trabajar mientras que un objetivo de antejo tiene cuatro. Esta es otra ventaja del telescopio.

b.2) Montura ecuatorial. Los telescopios se utilizan para la fotografía de los astros, con exposiciones de unas cuantas horas, hecho que exige apuntar, sobre el astro que se está fotografiando, todo el tiempo que dura la exposición. Esto exige que el telescopio gire alrededor de una línea paralela a la línea de los polos, con un movimiento uniforme idéntico al de la vuelta celeste. Así pues, un telescopio debe montarse en ecuatorial. El tubo puede girar alrededor de un eje EE' paralelo al ecuador, llamado eje de declinación, y alrededor de un eje PP' paralelo a la línea de los polos llamado eje polar (Fig. 5.19). EE' y PP' son evidentemente perpendiculares. Conociendo el ángulo que forma la dirección de la estrella con el plano ecuatorial, se hace girar el tubo alrededor de EE' hasta que el eje del telescopio forme el ángulo en cuestión con el ecuador. Entonces se le bloquea; se le hace girar alrededor de PP' hasta que la estrella de una imagen situada en el punto que se ha escogido previamente en el campo del telescopio; se le bloquea y se enciende el motor y el mecanismo de rotación.

Las figuras 5.19 y 5.20 representan diversos tipos de monturas ecuatoriales.

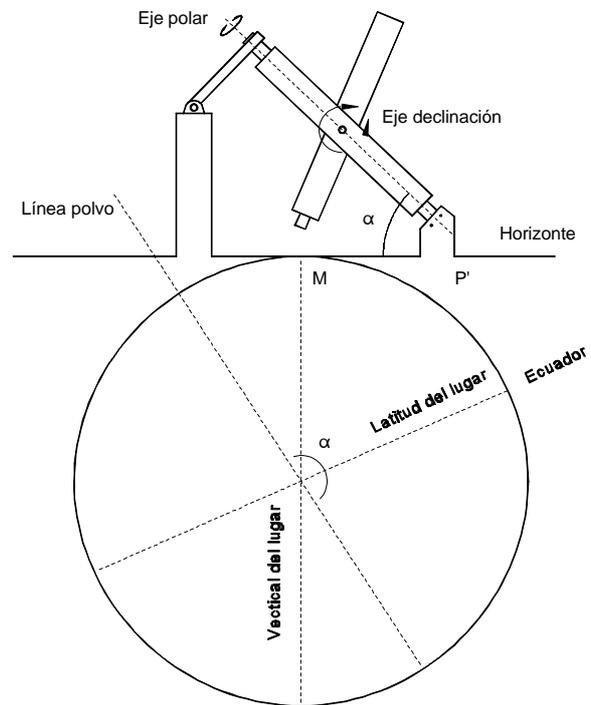


Fig. 5.19

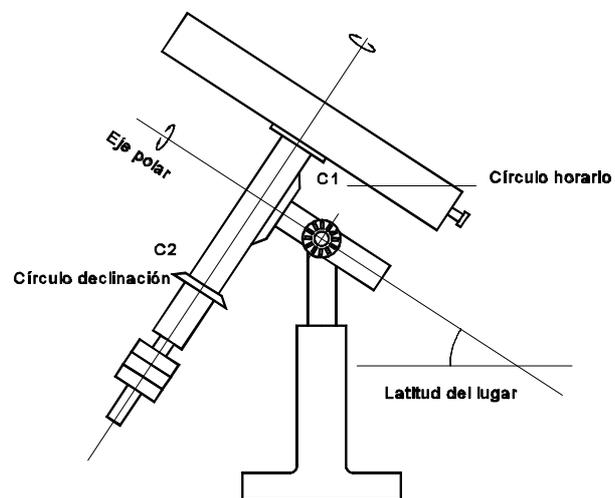


Fig. 5.20

5.3 Visores y anteojos con sistema intermedio

5.3.1 Visores y pequeños anteojos

1. Definición. Visor ordinario

a) Definición. Un visor es un instrumento formado por un objetivo y un ocular convergentes, como un microscopio o un anteojo astronómico.

Según la distancia focal sea pequeña o bien bastante grande, un visor se parece a un microscopio de gran distancia focal o a un anteojo astronómico de pequeña distancia focal. Pero el visor presenta siempre respecto al anteojo astronómico una diferencia fundamental: el objeto ya no puede estar considerado en el infinito y lo más normal es que esté incluso bastante cercano (por ejemplo a 1 m), es decir a menos de 10 veces la distancia focal del objetivo.

b) Descripción. Los visores se utilizan en los laboratorios para referenciar la posición de un objeto que se encuentre sobre el mismo eje del visor o en el plano normal al eje.

Todo visor está compuesto por un objetivo en un tubo T_1 (Fig. 5.21) y un ocular en T_2 que se desplaza telescópicamente uno respecto al otro mediante un sistema de cremallera o helicoidal. A su vez, el ocular y su montura se pueden desplazar (mediante un sistema helicoidal) respecto al retículo (elemento que existe en todo visor y que ocupa una posición fija en T_2).

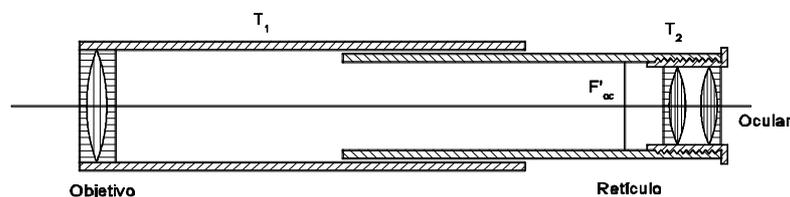


Fig. 5.21

Un retículo consiste en una lámina plano-paralela sobre la cual se graban, pintan o proyectan una serie de trazos o números.

En la figura 5.22 se representan algunos tipos de retículos, que son muy variados en su forma y función.

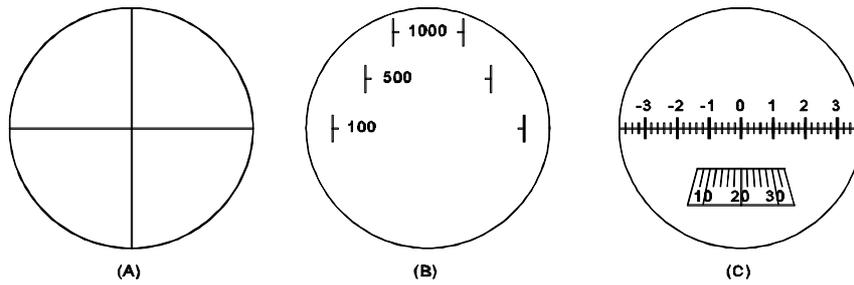


Fig. 5.22

El más sencillo está formado por hilos cruzados (A). Otros más complicados tienen trazos paralelos que permiten apreciar distancias (retículo taquimétrico) cuando el objeto es de dimensión conocida (B). Hay otros (C) que llevan trazos milimetrados o muestran una escala que se proyecta con un sistema óptico auxiliar.

2. Funcionamiento

a) Enfoque del retículo. Gracias al segundo mecanismo, se tira el ocular hacia atrás a fondo, después se hunde progresivamente observando el retículo. La imagen, primero real, se desplaza hacia el infinito en el sentido de la luz hasta llegar al punto remoto; el ojo, entonces, ve el retículo nítido y no le hace falta acomodar; entonces, se dice que el retículo está enfocado.

b) Apuntamiento. Apuntar a un objeto colocado en el eje del visor es desplazar el conjunto retículo-ocular respecto al objetivo hasta que se vean simultáneamente nítidos tanto el retículo como la imagen del objeto a través del objetivo.

Cuando se quiere conocer la distancia entre dos objetos situados ambos sobre el eje del visor se puede proceder de dos maneras:

Se apunta sucesivamente los dos objetos, desplazando el visor por todo su eje (con la ayuda de un banco óptico) sin modificar la longitud. Con esto, la distancia entre los dos objetos es igual a la traslación del visor. Otra manera de hacerlo es, sin desplazar el visor, modificando la longitud del antejo para realizar los dos sucesivos apuntamientos. Si A es el punto objeto y F y F' los focos del objetivo del visor, la fórmula de Newton da:

$$z = - \frac{f^2}{z} = - f^2 X \quad (5.45)$$

Siendo f' la distancia focal del objetivo y A' la imagen objetivo de A . z representa el desplazamiento del conjunto retículo-ocular.

Un índice, solidario al retículo, se desplaza sobre una escala fija, graduada en dioptrías, que indicará el valor del desplazamiento X . Cuando los dos objetos no están situados en el eje, pero sí sobre un mismo plano frontal, se apunta a ambos sucesivamente desplazando el visor paralelamente al segmento que une los dos objetos sin modificar la longitud. Este desplazamiento se mide sobre una escala solidaria a la columna o al banco óptico por donde se hace la traslación. Este es el fundamento del catetómetro (Fig. 5.23).

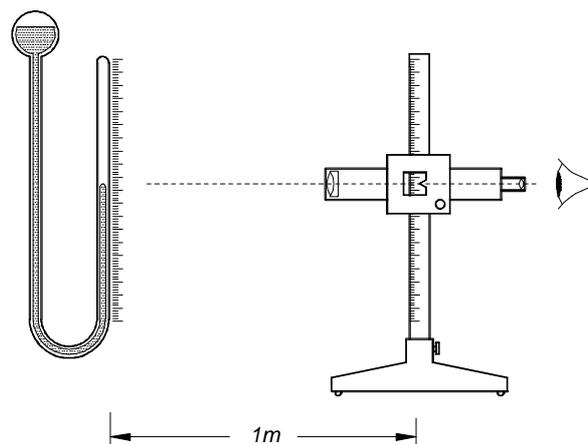


Fig. 5.23

3. Visores con enfoque interno

En estos tipos de visores el retículo ocupa una posición invariable con relación al objetivo S_1 (el ocular se puede desplazar en relación al retículo y se ajusta a su distancia de enfoque tal y como se ha visto en el segundo párrafo). Pero el aparato también lleva una lente divergente L_N , colocada en S_2 entre el objetivo y el retículo, susceptible de ser desplazada mediante una cremallera (Fig. 5.24 y 5.25).

Para un cierto valor de S_1 y S_2 existe en el eje un punto A que tiene su imagen A' sobre el retículo. El visor está enfocado sobre A . Si A se acerca, A' se aleja del retículo. A continuación se desplaza S_2 hacia S_1 . La imagen intermedia A_1 se desplaza en sentido contrario. Pero el desplazamiento de A' (respecto de S_2) es bastante más pequeño que el desplazamiento de A_1 (respecto a S_2). Es por este motivo que el desplazamiento de S_2 es más amplio que el de A_1 , por hacer que A' alcance el plano del retículo. Este dispositivo tiene las ventajas siguientes:

- A un desplazamiento de A le corresponde un desplazamiento de la lente divergente S_2 superior al

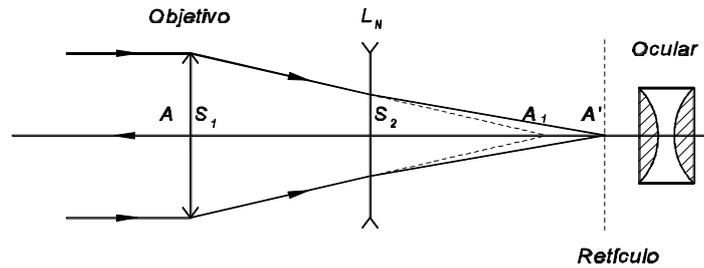


Fig. 5.24

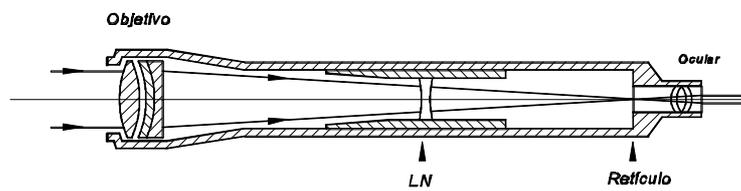


Fig. 5.25

desplazamiento de A_1 , de manera que el enfoque es más sensible.

- La longitud del visor es constante.
- Esta longitud, a igual aumento visual, es menor que la de un visor ordinario si el conjunto S_1, S_2 constituye un teleobjetivo.

4. Anteosjos que utilizan un teleobjetivo

En topografía y en las obras de construcción, se utilizan pequeños anteojos (de tipo astronómico) destinados a realizar alineaciones, nivelamientos y medidas de ángulos (teodolitos).

El aumento debe ser de algunas decenas; el instrumento debe ser corto, robusto y fácilmente transportable. Es por esto que se utilizan los teleobjetivos en su realización (Fig. 5.26)

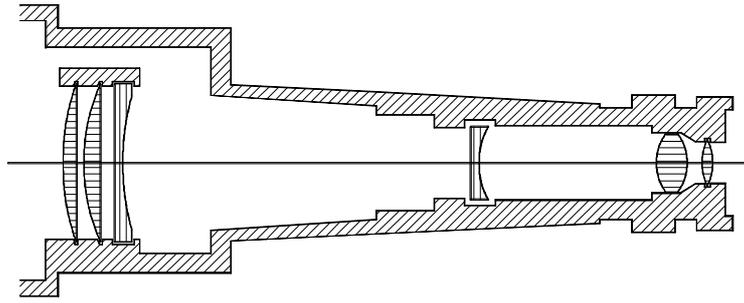


Fig. 5.26

5. Anteojos analíticos

Cuando se utiliza una mira graduada como objeto, se puede buscar la distancia a la que se encuentra con la ayuda de un retículo en el cual hay dibujadas un par de líneas paralelas. Si se cuenta el número de líneas del objeto que se encuentran entre los trazos del retículo, se puede encontrar la distancia del eje de giro del instrumento a la mira D en función del tamaño del objeto R , de la focal F' , de la distancia entre los trazos del retículo i y la distancia del objetivo al eje de giro c según la relación:

$$D = \left(\frac{f}{i} \right) R \quad (f = c) \quad (5.46)$$

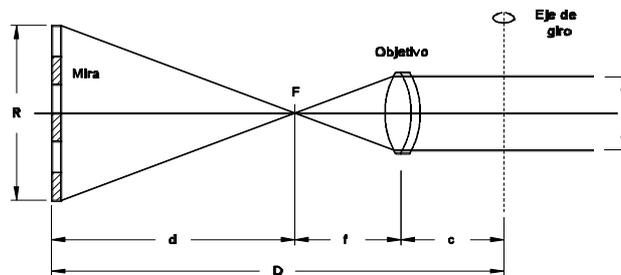


Fig. 5.27

El punto F , foco anterior del objetivo, desde el cual se mide la distancia d al objeto, se llama punto analítico (Fig. 5.27).

Si se utiliza un objetivo de enfoque interno constituido por una lente positiva y otra negativa en forma de teleobjetivo, se puede conseguir que el punto analítico esté situado sobre el eje de giro del instrumento, con lo cual se elimina el sumando d . Los anteojos diseñados de esta manera se llaman anteojos analíticos y son la base de los denominados teodolitos.

Se dice que el analatismo es estable cuando al enfocar en diferentes posiciones del objeto el punto analítico no varía su posición dentro de un margen aceptable de error.

5.3.2 Anteojos con sistema intermedio convergente. Vehículo

1. Estado del problema

Los anteojos y los visores estudiados hasta ahora dan imágenes invertidas. Esto no tiene inconvenientes para el uso astronómico, los objetos de laboratorio e incluso la topografía, es decir, siempre que un objeto tiene una forma geométrica sencilla (punto, línea, cruz).

No es lo mismo cuando se apunta a un elemento de un paisaje, un animal o una persona. En este caso es necesario que la imagen dada por un instrumento esté derecha. De estos tipos hay los anteojos de Galileo y los anteojos terrestres o anteojos astronómicos que incorporan un sistema enderezador de la imagen que nos proporciona el objetivo, que es invertida, y da una imagen derecha respecto al objeto.

El sistema enderezador puede ser un sistema de prismas o un sistema de lentes llamadas vehículos. En el primer caso, se trata de unos instrumentos, los prismáticos, que se estudiarán posteriormente. Aquí el estudio se limitará a los anteojos con sistema intermedio o vehículo (Fig. 5.28).

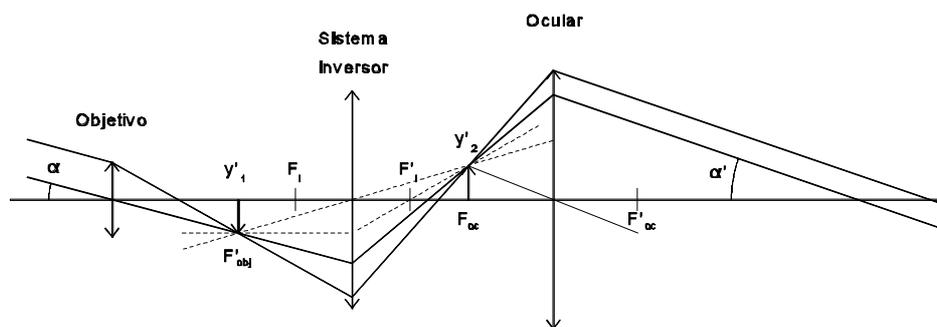


Fig. 5.28

2. Principio del vehículo

a) El más simple de los anteojos con vehículo es el anteojo de Kepler, constituido por tres lentes convergentes: el objetivo, el ocular y el vehículo (Fig. 5.28).

El conjunto es afocal o casi afocal, suponiendo que el ojo del observador es emétrope y desacomodado. El plano focal imagen del objetivo tiene que coincidir con el plano antiprincipal objeto de la lente inversora del ocular. En estas condiciones se ve que:

- La imagen está derecha. y, y'_2 son del mismo sentido.
- El alargamiento es igual a $4f'_1$ (siendo f'_1 la distancia focal del vehículo) y es el mínimo posible.
- El aumento lateral debido a la lente inversora es igual a -1, con lo cual el aumento visual M_v es igual al aumento visual de un anteojo formado por el objetivo y el ocular, $M_v = f'_{obj} \cdot P_{oc}$.

b) Si las imágenes intermedias no se encuentran sobre los planos antiprincipales de la lente inversora (Fig. 5.29), entonces el aumento visual es:

$$M_v = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha'} = \frac{\frac{y_2}{f_{oc}}}{-\frac{y_1}{f_{obj}}} = -\frac{y_2}{y_1} \frac{f_{obj}}{f_{oc}} = m_I M_{va} \quad (5.47)$$

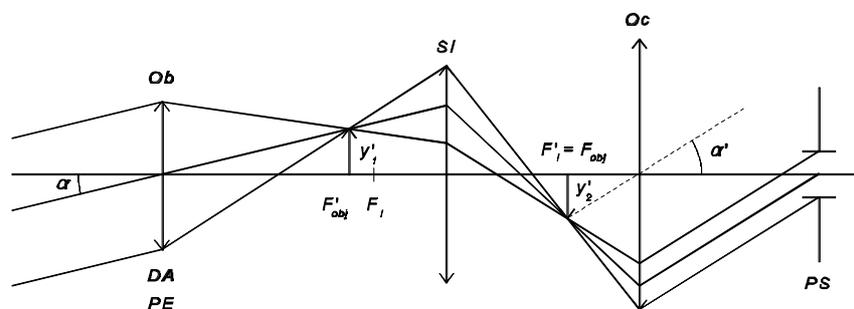


Fig. 5.29

Siendo M_{va} el aumento visual del anteojo astronómico que quedaría al quitar el sistema inversor y m_I el aumento lateral con que trabaja el sistema inversor.

Para que el aumento del terrestre sea positivo, el aumento lateral del sistema inversor debe ser negativo, y por tanto es necesario que y'_1 y y'_2 sean reales, hecho que significa que el foco del sistema inversor debe estar entre y'_1 y y'_2 . Por tanto, se debe dar al sistema inversor una focal pequeña para no alargar excesivamente el instrumento. Con ello el sistema intermedio se comporta como un sistema de focal pequeña y de gran apertura, hecho que introduce muchas aberraciones.

c) Para evitar las aberraciones mencionadas, lo más usual es que el vehículo esté constituido por dos dobletes pegados, generalmente idénticos, haciendo coincidir el plano focal objeto del primero con el plano focal imagen del objetivo, y el plano focal imagen del segundo con el plano focal objeto del ocular. Así, la marcha de rayos es, entre ellos, paralela y los dos dobletes pueden estar entre sí tan cerca como se quiera, acortando así el anteojo terrestre (Fig. 5.30).

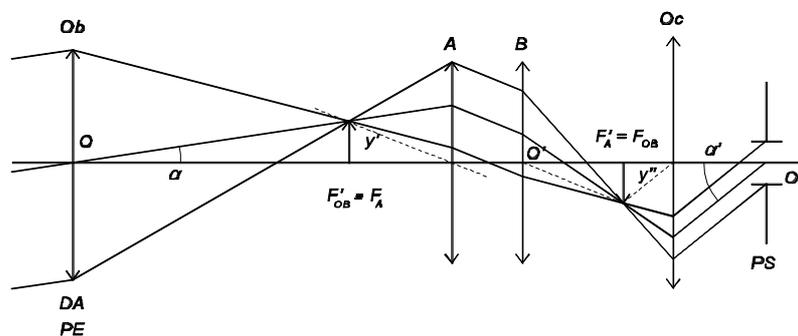


Fig. 5.30

El objetivo acostumbra a ser un doblete pegado, convenientemente corregido de aberraciones de apertura y de la aberración cromática, y el ocular es un doblete corregido de aberraciones de campo y de la aberración cromática de aumento.

El vehículo se calcula de tal manera que no introduzca aberraciones (especialmente las aberraciones de campo). De hecho, lo que se corrige es el sistema vehículo-ocular.

El aumento será

$$M_T = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha'} = \frac{f_{obj}}{f_{oc}} \frac{y_2}{y_1} = - \frac{f_{obj}}{f_{oc}} \frac{f_B}{f_A} = - M_{va} \frac{f_B}{f_A} \quad (5.48)$$

Si $f'_B = f'_A$, el aumento del terrestre no varía respecto al del astronómico equivalente.

Al separar los sistemas *A* y *B* no varía el aumento, sino la posición de la imagen intermedia, por lo que se puede enfocar sin mover el ocular. Es un sistema de enfoque interno y se utiliza en instrumentos que deben estar cerrados herméticamente ya que no varía la longitud del tubo. En un anteojo terrestre con ocular móvil la separación entre los elementos del vehículo viene determinada por el campo deseado.

3. Ejemplos de anteojos con vehículo

a) Anteojo monocular de larga vista (más conocido por *catalejo*) y ocular terrestre. Se menciona el catalejo como un recuerdo histórico, porque hoy ya no se utiliza.

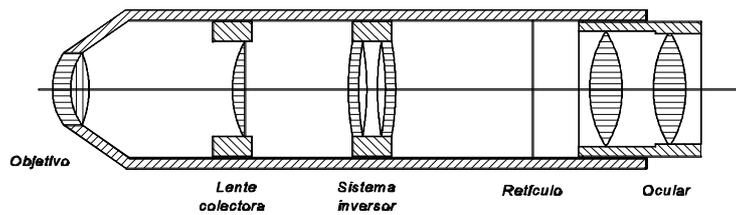


Fig. 5.31

Se debe mencionar la presencia de la lente colectora que se coloca encima de una imagen intermedia. Su función es hacer que converjan los rayos inclinados para mantenerlos dentro del diámetro del tubo. También se puede interpretar como un anteojo astronómico donde el ocular es substituido por un ocular terrestre (Fig. 5.32). Este último está formado por cuatro lentes: S_3, E_3, S_2, E_2 (S_3 y E_3 constituyen el vehículo, y S_2 y E_2 forman el ocular propiamente dicho).

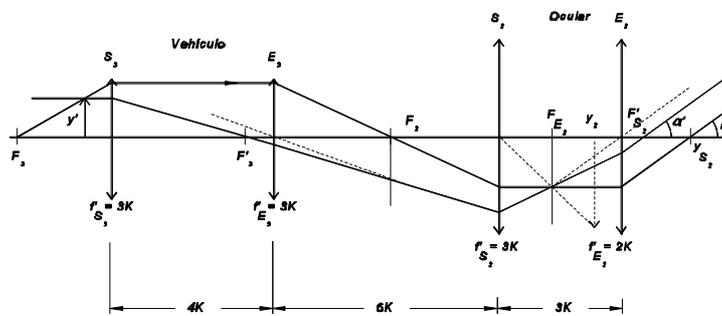


Fig. 5.32

Los símbolos son: 3, 4, 3, 6, 3, 3, 2. El vehículo tiene un aumento lateral igual a -2 y, por tanto, el ocular terrestre tiene una potencia igual a $2 P_{oc}$, siendo P_{oc} la potencia del ocular propiamente dicho.

Se trata de un instrumento muy voluminoso y de campo demasiado débil si se compara, a igual aumento visual, con unos prismáticos. Estos últimos lo han substituido completamente para la observación terrestre.

b) Anteojos de apuntamiento. Frecuentemente se utilizan los anteojos de puntería provistos de un sistema de vehículo (y a veces también de una lente colectora) para equipar las armas de fuego y sobre todo los cañones. El aumento de estos visores de puntería varía entre 3 y 6 con un círculo ocular de diámetro bastante grande (de 5 a 7 mm) para que sean muy claros incluso en el crepúsculo y con un campo bastante grande (más de 200 m y hasta a 375 m a una distancia de 1000 m), de manera que permitan apuntar fácilmente.

Estos visores tienen, además, como característica funcional una gran emergencia de pupila como elemento de seguridad de cara al retroceso que experimentan este tipo de armas en el momento de disparar.

Es necesario darse cuenta que estas lentes no son visores, en el sentido que lo más frecuente es enfocarlos sobre objetos lejanos (al menos unos cuantos metros). Su longitud no pasa de los 200 mm con un objetivo de fuerte apertura relativa (de $1/3$ a $1/2$). Deben estar bien corregidos de las aberraciones de apertura y de la aberración cromática de posición.

Tal y como se ha dicho anteriormente, los vehículos son combinaciones de dos sistemas con marcha paralela entre ellos, que transportan la imagen del plano focal del objetivo al del ocular.

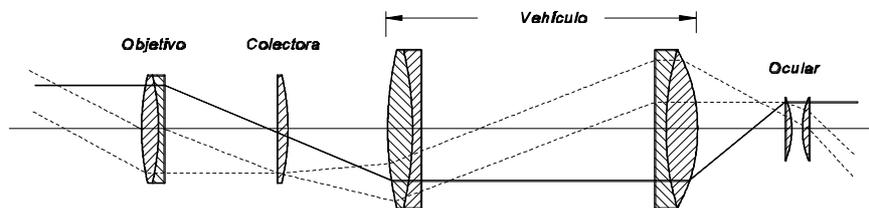


Fig. 5.33

La figura 5.33 se puede interpretar también como si se tratase de dos telescopios alineados en el mismo eje. El primero estará formado por el objetivo y el primer elemento del vehículo, y trabaja con un aumento más pequeño que la unidad para reducir la inclinación de los haces de campo. El segundo telescopio estará formado por el segundo elemento del vehículo y por el ocular, con un aumento tal que compense el del primero, de tal manera que resulte el aumento con el signo deseado.

En la figura 5.33 se representa la marcha de un rayo que entra al sistema paralelo al eje (trazo continuo) y un haz de campo del cual entra el 50% de la luz (trazo discontinuo), por ejemplo para un periscopio del

cual se ha suprimido el prisma de cabeza.

Para conseguir más campo se pueden colocar diversos vehículos hasta conseguir la longitud deseada.

En cada superficie aire-vidrio, con tratamiento antireflectante, se pierde del orden del 1% de la luz incidente, y por cada centímetro de vidrio recorrido por la luz se pierdo otro 1%. Como en un periscopio necesita muchas lentes, las pérdidas acostumbran a alcanzar el 80% de la luz incidente.

Además del sistema óptico principal para formar la imagen, un periscopio lleva algún sistema óptico auxiliar para medir distancias, iluminar retículos, acoplar máquinas fotográficas, medir alturas del sol o de las estrellas, etc., que hacen que el conjunto de un periscopio sea un sistema muy complicado.

4. Anteojos de visión nocturna

Según hemos visto al estudiar la iluminación en la imagen dada por los anteojos, no se puede aumentar la luminancia de la imagen por medios puramente ópticos. Es por esta razón que modernamente se han desarrollado instrumentos electro-ópticos, que consiguen un gran aumento de la luminosidad acoplando un antejo astronómico con un elemento intensificador de imagen que extrae la energía necesaria de una fuente eléctrica. El formato más usual es el descrito en la figura 5.34.

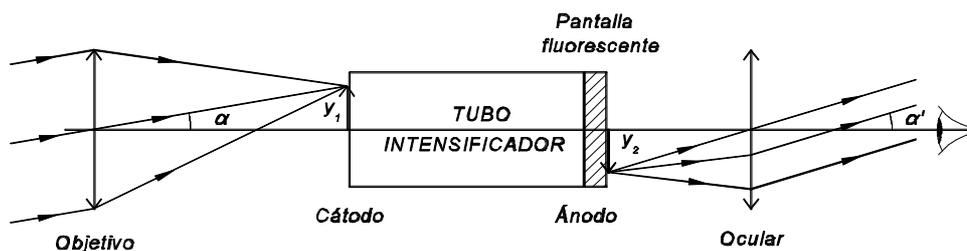


Fig. 5.34

Un objetivo forma una imagen real sobre el cátodo de un tubo intensificador de imagen, de manera que emite electrones por efecto fotoeléctrico. Los electrones son acelerados en el interior del tubo, su número se multiplica y se focalizan sobre el ánodo en contacto con una pantalla fluorescente, que da una imagen parecida a la del cátodo, pero con más luminancia. Un ocular permite ver cómodamente esta imagen.

Así se consigue ver con toda nitidez objetos débilmente iluminados, por ejemplo, con la luz de las estrellas. El tubo intensificador tiene que llevar una batería incorporada que proporciona la energía necesaria para la amplificación.

Al no haber una marcha de rayos continua desde el objetivo hasta el ocular, cada uno debe estar corregido por sí mismo de aberraciones, que no se pueden compensar entre uno y otro sistema. Por otra parte, la pantalla fluorescente proporciona una imagen monocromática (de un color amarillo verdoso), por lo que el ocular no necesita estar corregido de aberraciones cromáticas.

El aumento del conjunto será

$$M = - \frac{f_{ob}}{f_{oc}} m_T \quad (5.49)$$

donde m_T es el aumento lateral del tubo intensificador que suele ser de -1 o de -1,5.

Modernamente, se han desarrollado tubos microcanales en los cuales el espesor y el peso del tubo son muy pequeños en comparación con los de los tubos intensificadores anteriores de 1a y 2a generación.

5.4 Antejos. Prismáticos

5.4.1 Inversión por reflexión

1. Nota preliminar

Por ejemplo, de un triedro orientado situado en el infinito, el objetivo de un anteojo da una imagen que se deduce del objeto por la rotación de 180° alrededor del vector que se encuentra en la dirección del rayo luminoso. El vector, dirigido según este eje, tiene siempre la misma dirección y el mismo sentido. El vector vertical da un vector imagen vertical, pero invertido. El vector horizontal da un vector imagen pero también invertido (Fig. 5.35).

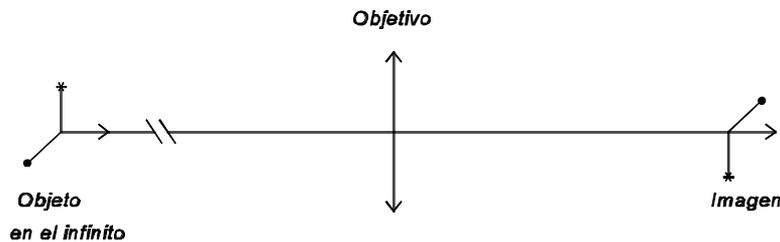


Fig. 5.35

Para enderezar la imagen es necesario efectuar una nueva rotación de 180° alrededor del vector axial. Esto se consigue usando prismas de reflexión total.

Un prisma, cuya sección es un triángulo rectángulo isósceles, tiene los mismos efectos que dos espejos que formen entre ellos un ángulo de 90° . Si se coloca un prisma de estos en el trayecto de la luz, antes de la imagen dada por el objetivo, se obtendrá la inversión deseada.

Se toma primeramente el plano que pasa por el eje del objetivo y es perpendicular a la arista del prisma, supuesta horizontal. Las leyes de la reflexión dan el trayecto seguido por la luz, según la figura 5.36.

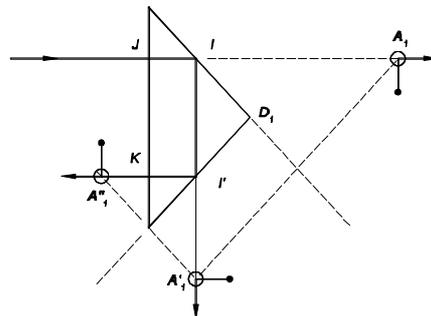


Fig. 5.36

Suponiendo que el ojo mira en un plano perpendicular al eje del sistema, la arista D_1 del prisma será una recta horizontal, el punto y se verá por encima y el punto I' por debajo. Los triedros A_1 y A''_1 se verán como se indica en la figura 5.37.

Como regla se puede decir que hay simetría en relación a D_1 para los vectores paralelos al plano del papel e inversión para el vector que le es perpendicular.

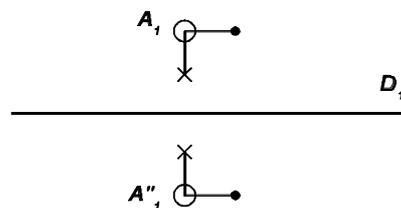


Fig. 5.37

2. Prisma de Porro de primera especie

Se compone de dos prismas. Uno, con la arista horizontal, y el otro, con la arista vertical. En general están enganchados por las caras hipotenusas que están en contacto la una con la otra.

En el segundo plano de proyección, se obtiene el trayecto siguiente por la luz, según la figura 5.38, aplicando la regla establecida en el párrafo anterior.

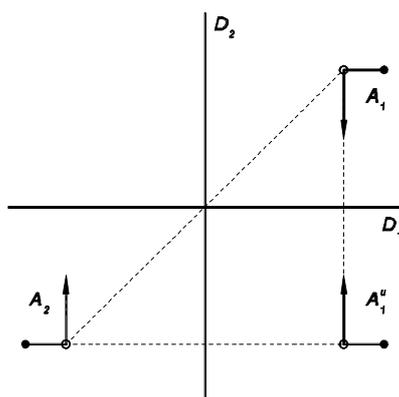


Fig. 5.38

Refiriendo el resultado sobre un dibujo en perspectiva, se observa que el triedro A_2 tiene el mismo sentido que el triedro A_1 (Fig. 5.39).

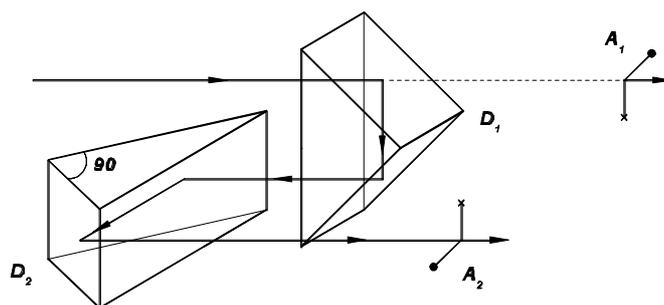


Fig. 5.39

3. Prisma de Porro de segunda especie

Es el conjunto de tres prismas de reflexión total (tal y como se ve en la figura 5.40), con la arista mayor D_3 paralela al eje. Por necesidad de construcción, existe un plano medio por donde está cortado el conjunto y las dos partes que forman el prisma se pegan. Las dos reflexiones dobles dan el mismo efecto que antes. En el dibujo se ven representadas las proyecciones en el plano que contiene D_3 (Fig. 5.41).

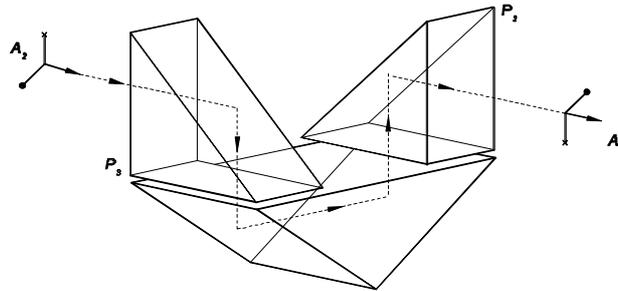


Fig. 5.40

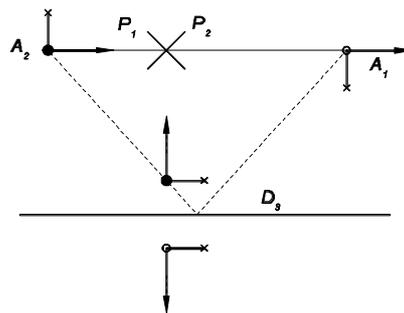


Fig. 5.41

4. Prisma inversor de techo

(Fig. 5.42) P_1 y P_2 están colocados (teóricamente) sobre un prisma P_3 llamado prisma de techo. El eje está replegado, pero emerge en la prolongación de la dirección incidente. Los puntos fuera del eje dan imágenes por reflexión sobre las dos caras de P_3 . Se obtendrán dos imágenes correspondientes a las dos reflexiones sobre cada una de las caras. Por tanto, para que las imágenes se superpongan exactamente, es necesario que el ángulo del prisma sea recto con una precisión de segundos en lugar de minutos, que es lo más habitual.

En efecto, un punto no tiene la misma imagen con relación a dos espejos cualquiera que sea el orden de las reflexiones, solo la tiene si forman un ángulo de 90° exactamente. Si el ángulo no es de 90° ,

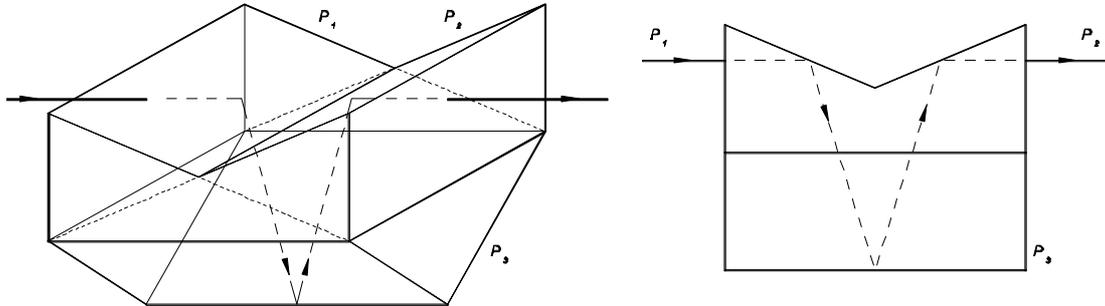


Fig. 5.42

las dos imágenes se separan la una de la otra, tal y como se puede ver en la figura 5.43.

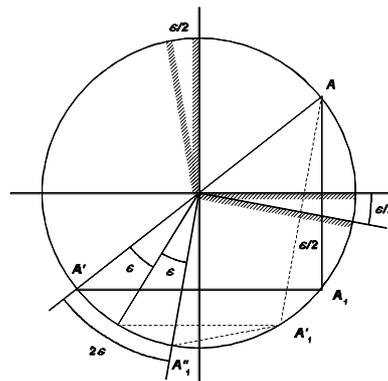


Fig. 5.43

5.4.2 Generalidades

1. Comparación con el antejo astronómico y otros antejos

Se han asimilado los sistemas de prismas anteriores como equivalentes a sistemas de espejos. Es necesario añadir a estos espejos una lámina plano-paralela, de espesor igual al espesor del vidrio que atraviesa la luz, si se quiere obtener un resultado exacto. Esta equivalencia es fácil de demostrar por medio de simetrías respecto a la cara en que se producen reflexiones.

a) Comparación con el anteojo astronómico. Así pues, el sistema inversor da, de la imagen que nos proporciona el objetivo y_1 , una imagen de y_2 igual a y_1 pero invertida en relación con y_1 ; y_2 está situada sobre el eje replegado a una distancia del punto A (donde el eje encuentra la cara de entrada del primer prisma) igual a $O_1 A + d$ (Fig. 5.44). Esta distancia está calculada según el perímetro de la línea discontinua constituida por el eje del objetivo y los rayos sucesivamente reflejados que le corresponden. La longitud d es el desplazamiento producido por la lámina plano-paralela, del mismo vidrio que los prismas, y de espesor igual al del vidrio que ha atravesado.

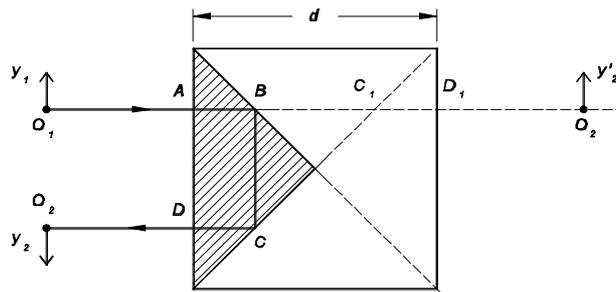


Fig. 5.44

Se ve, entonces, teniendo en cuenta la sustitución de y_1 por y_2 , que el anteojo prismático es idéntico al astronómico y que se le podrán aplicar las definiciones y los cálculos que se han hecho en el caso del astronómico (capítulo 5.2).

Lo que se exige de un anteojo terrestre es que sea claro (para objetos extensos), que tenga un gran campo y que sea ligero y poco voluminoso, ya que debe ser fácilmente transportable. Su aumento debe ser el aumento equipupilar, igual a $2D_{PE}/3$ (anteojo medianamente claro), $2D_{PE}/5$ (anteojo muy claro) o $2D_{PE}/7$ (anteojo de noche), ya que los diámetros de la pupila del ojo varían generalmente entre 3 y 7 mm. Por otra parte, este aumento no debería ser muy grande, de manera que el campo $2T = 2T'/M_v$ sea bastante grande, siendo $2\omega'$ del orden de 60° ; a los 90° solo llegan los oculares más complejos y caros. M_v tiene un valor comprendido, normalmente, entre 4 y 12. Además esto implica además la elección de una distancia focal bastante pequeña y, por tanto, que el anteojo prismático tenga una dimensión pequeña. El problema de la corrección de las aberraciones es el mismo que para el anteojo astronómico, pero con la diferencia que se deben tener presentes las aberraciones debidas al trayecto de la luz a través de los prismas y que el ocular deben tener un gran campo aparente.

b) Comparación con otros anteojos

b.1) La claridad. Si el círculo ocular es suficientemente grande la claridad es igual al coeficiente de transmisión, que supera un 80% en los anteojos prismáticos si se cubren las superficies con capas

antireflectantes. El anteojo de Galileo puede ser también claro, pero cuando el círculo ocular debe ser grande no lo puede ser tanto, puesto que el número de superficies ópticas que tienen que atravesar los rayos luminosos es mayor.

b.2) La dimensión es muy reducida, sobre todo tomando los aumentos pequeños, a causa del repliegue del eje óptico. Por ejemplo, para $M_v = 8$ (aumento habitual), se tiene $f'_{oc} = 2 \text{ cm}$ y $f'_{obj} = 16 \text{ cm}$. El anteojo terrestre tiene unos 34 cm de largo y el anteojo prismático solo tiene 12. Por otra parte, los ejes del objetivo y del ocular son paralelos en ambos casos, pero, en los prismáticos, la separación de los objetivos es mayor porque los prismas les obligan a estar desviados hacia el exterior. Hay una exageración del efecto estereoscópico, hecho que es una ventaja suplementaria.

Además, como se trata de un instrumento binocular, se consigue una mejor detección de las pequeñas diferencias de brillo gracias a la acción conjunta de los dos ojos. Entonces, crece la rapidez en la detección de los objetos, con una ventaja de 0,5 s, aproximadamente, respecto a un monocular.

b.3) Es imposible, para un aumento igual y a precio de coste igual, conseguir en un anteojo monocular un campo tan grande como en un anteojo prismático, pues esto complica el sistema intermedio agregándole una lente colectora suplementaria. Por otra parte, se verá (tema 5.5) que el anteojo de Galileo no puede tener un campo grande.

2. Clasificación

Para aumentos grandes, superiores a 20, la segunda ventaja (la disminución del tamaño) desaparecerá casi completamente, pero la tercera ventaja (el efecto estereoscópico) se conserva. Además la claridad es mejor que en el anteojo monocular y el campo mucho mejor que en el anteojo de Galileo. También sería ilusorio querer exceder 25 aumentos, porque en los casos usuales la agitación atmosférica daña la calidad de las imágenes.

Para aumentos débiles, los anteojos prismáticos montados en gemelos son preferibles al anteojo de Galileo, montado igualmente en gemelos, a causa de su incremento de campo, pero las otras cualidades son comparables (excepto el precio de coste).

Para aumentos medios (6 a 12) las tres ventajas hacen preferir el anteojo prismático, sobre todo montado como binocular, a los anteojos terrestres y al anteojo de Galileo.

5.4.3 Diferentes tipos de anteojos prismáticos

1. Gemelos de teatro

El aumento es del orden de 3. En general se tiene $f'_{obj} = 150 \text{ mm}$ y $f'_{oc} = 50 \text{ mm}$.

El círculo ocular es de 4 a 10 mm. Entonces se tiene la máxima claridad $D_{ps} > D_o$. El campo 2ω vale de 10° a 12° , ya que $2T' = 30E$ a $40E$ y $2T = 2T'/M_v$.

Estos gemelos, en general, están equipados con un sistema inversor con prismas de techo.

2. Gemelos prismáticos portátiles

El aumento varía entre 6 y 8 (a veces llega hasta 12). El objetivo tiene un diámetro variable de 20 a 50 mm. La apertura del objetivo es bastante grande (por término medio 1/5); f'_{obj} es de 4 a 5 veces mayor que el diámetro del objetivo ($f'_{obj} = 8$ a 30 cm).

El ocular acostumbra a ser de tipo Huygens o de tipos Kellner 3-2-1.

Valores medios: campo aparente $2\omega = 50^\circ$. Coeficiente de transmisión $t = 0,6$ (0,8 si la óptica está tratada con capas antireflectantes).

Excepcionalmente, con unos buenos gemelos, se obtiene $D_{co} = 10$ a 14 mm y $2\omega' = 70^\circ$ o también 90° . Pero este último valor es excepcional y supone el uso de superficies parabólicas.

El sistema inversor es de Porro de primera especie, en general.

3. Anteojos de gran aumento ($M_v > 20$)

Están equipados con un inversor de Porro de segunda especie (se utiliza muy poco el prisma de techo, excepto si conviene que el eje no esté desviado).

Tabla 5.1

D_{pf}	D_{pf}/f'_{obj}	f'_{obj}	M_v	D_{ps}	$2T'$
80 mm	1/6	500 mm	12	6,7	40°
			20	4	
			40	2	
110 mm	1/11	1300 mm	32	3,3	40° - 45°
			52	2,1	
			72	1,5	

El cuadro anterior da las características de los anteojos prismáticos provistos de oculares sobre revólver, por ejemplo los que Zeis fabricaba antes de la Guerra Mundial.

Evidentemente, no se trata de anteojos portátiles, sino que van montados sobre un trípode.

Conclusión

El antejo prismático no tiene rivales para aumentos medios (de 6 a 12). Presenta unas ligeras ventajas, poco apreciables, sobre los anteojos monoculares para grandes aumentos (sobre todo claridad) y sobre los anteojos de Galileo, para aumentos débiles (de 3 a 5) sobre todo de campo y de calidad de imagen.

Los anteojos prismáticos están indicados en los catálogos de los fabricantes por dos cifras separadas por una X. La primera da el aumento y la segunda el diámetro del objetivo en milímetros. El cociente del segundo por el primero da el diámetro del círculo ocular y una idea de la claridad.

Tabla 5.2

<i>notación</i>	<i>M</i>	<i>D_{pr}</i>	<i>D_{ps}</i>	<i>claridad</i>
8 x 24	8	24	3	ordinaria
8 x 40	8	40	5	muy clara
8 x 50	7	50	≈7	para la noche

5.4.4 Otros instrumentos telescópicos con prismas

1. Telémetros de coincidencia

Con el nombre de telémetros se recogen los instrumentos que sirven para medir distancias desde el punto de observación a lugares inaccesibles.

Se basan en la resolución de un triángulo rectángulo. Si conocemos un cateto c y el ángulo B , podemos encontrar la distancia de la manera siguiente:

$$b = c \operatorname{tg} B$$

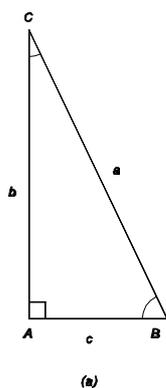


Fig. 5.45

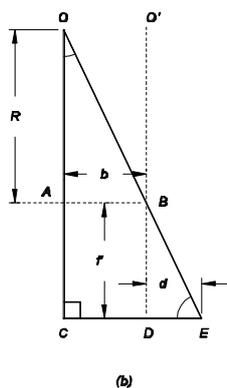


Fig. 5.46

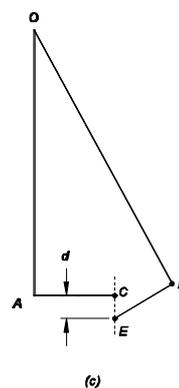


Fig. 5.47

La medición se podría hacer montando dos teodolitos (instrumentos que miden ángulos en vertical y en horizontal) en A y en B , midiendo los ángulos respectivos. Para aumentar la velocidad de cálculo se montan sobre el mismo instrumento dos objetivos de telescopio de igual focal. Suponiendo que estos objetivos se encuentren en los puntos A y B de la figura 5.46, si los objetos O y O' están en el infinito las imágenes respectivas estarán situadas en los puntos C y d , y para el objeto O , que está a distancia R , la imagen a través del objetivo B caerá sobre E .

La distancia $d = DE$ se llama desplazamiento paraláctico. Por semejanza de triángulos podemos obtener R :

$$\frac{R}{f} = \frac{b}{d} \rightarrow R = \frac{b f}{d}$$

o lo que es equivalente:

$$\operatorname{tg} E = \frac{f}{d} = \operatorname{tg} B = \frac{R}{b}$$

Normalmente se colocan dos prismas en A y B que desvían los haces 90° hacia adentro, y se escogen las focales de manera que se formen las imágenes en el mismo plano, con un desplazamiento entre sí (Fig. 5.47).

Para medir la distancia d entre las dos imágenes, se añade un sistema de compensación que modifica la posición de una hasta que el observador las vea coincidentes; entonces se lee la distancia del objeto en una escala conectada en su movimiento al compensador.

A continuación, se verán algunos tipos de compensadores (Fig. 5.48):

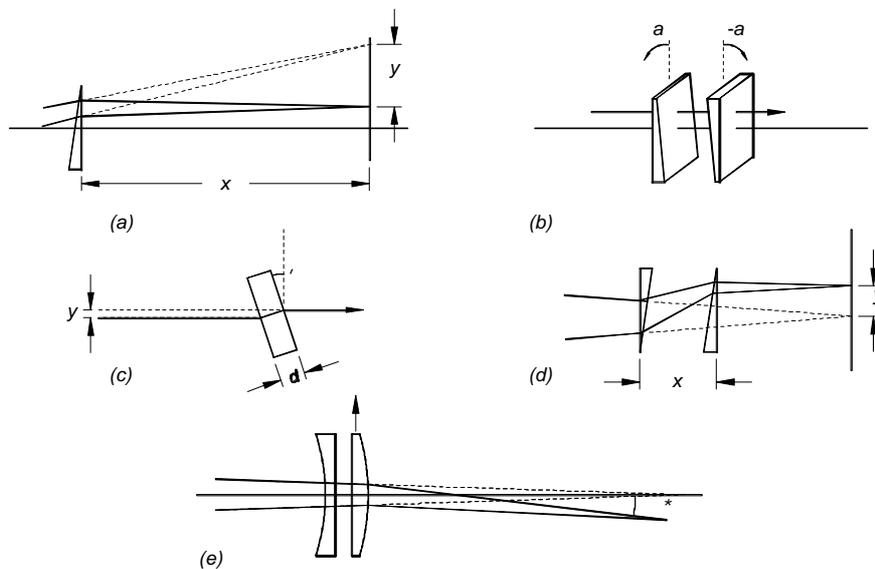


Fig. 5.48

a) Traslación de un prisma delgado. Se sitúa un prisma entre el objetivo y la imagen. La desviación y depende de la distancia al plano imagen X , del índice n y del ángulo de refringencia a :

$$y = (n - 1) a X$$

Debe tenerse en cuenta que incluso cuando el objeto está en el infinito hay una pequeña desviación; por tanto, uno de los brazos debe ser considerado ópticamente como ligeramente inclinado respecto al otro. El montaje es muy sencillo y por eso se utiliza mucho en la práctica con un prisma acromático.

b) Diasporámetro. Cuando los prismas están situados como en el dibujo, anulan entre sí sus desviaciones. Al girar uno respecto al otro, siendo ángulos iguales de signos contrarios (a y $-a$ respectivamente) la desviación angular que producen es

$$\delta = 2\omega \operatorname{sen} a$$

donde ω es la desviación angular de uno de los prismas. El máximo de desviación es para $a = 90^\circ$. Este montaje se puede utilizar con luz paralela, situándolo delante del objetivo.

c) Lámina plano-paralela de inclinación variable. La desviación que introduce la lámina plano-paralela depende del ángulo de incidencia i . Si su espesor es d y el índice n , la desviación vale

$$y = d \frac{n - 1}{n} \sin i \quad (5.53)$$

Se debe utilizar con haces convergentes y produce desviaciones muy pequeñas, por esto se utiliza para la calibración del instrumento (coincidencia para objeto en infinito).

d) Dos prismas iguales con separación variable. Este sistema consiste en dos prismas iguales con el extremo delgado de uno frente al extremo grueso del otro. Variando la separación una distancia X , si su ángulo de refringencia es a y el índice n , producen una desviación y tal que

$$y = (n - 1) a X$$

Cuando están en contacto $X = 0$ no producirán desviación, hecho que significará una ventaja respecto al caso a . De la misma manera que en aquel caso, solo pueden ser utilizados con haces convergentes.

e) Lente deslizante. Consiste en la combinación de una lente divergente y otra convergente que forman un sistema afocal. Como se sitúan muy próximas no producen aumento, ya que compensan las potencias. La lente convergente puede desplazarse lateralmente variando la desviación y está acoplada a una escala de distancias que se mueven con ella. El ángulo de desviación será

$$\delta = \frac{D}{f} \quad (5.55)$$

donde d es el desplazamiento lateral y f la focal de la lente positiva. Como la lente lleva sobre sí la escala, se puede leer d directamente a través del ocular o graduando el retículo convenientemente se puede leer directamente la distancia.

f) Otros tipos de compensadores. Otros formatos que han sido utilizados alguna vez son los siguientes:

- Prisma delgado que gira sobre su base de manera similar al caso de la lámina plano-paralela.
- Prismas reflectores giratorios.
- Objetivo que se desplaza lateralmente.

- Imágenes de diferente dimensión que se llevan a coincidencia girando todo el instrumento sobre un eje vertical.

En la figura 5.49 se ha representado el esquema de un telemetro de coincidencia.

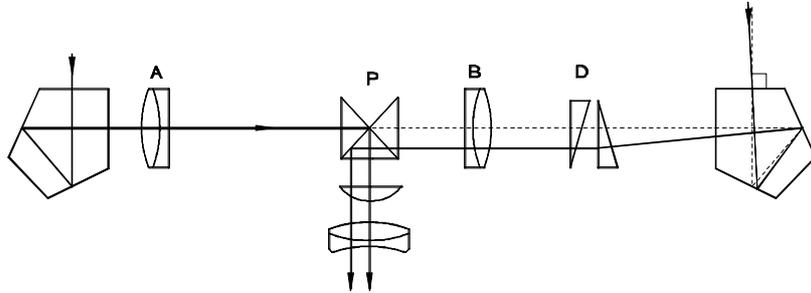


Fig. 5.49

Como sistema compensador se utiliza un diasporámetro que se puede mover a lo largo del eje óptico. El movimiento de giro sobre el eje óptico se usa para la calibración del instrumento y el de traslación produce la coincidencia y hace que el rayo B salga paralelo a A.

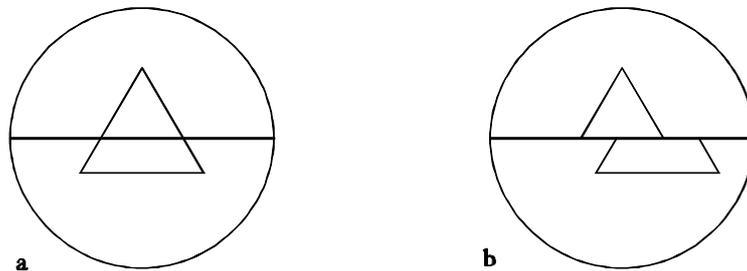


Fig. 5.50

El observador ve un campo dividido en dos mitades. En la parte superior se forma la imagen dada por el telescopio de la derecha, y en la parte inferior se ve la imagen del telescopio de la izquierda. En la figura 5.50 se muestra el campo cuando hay coincidencia (a) y cuando no hay (b).

Para que la línea de separación entre las dos mitades sea lo más nítida posible se usan prismas con montajes parecidos a los de la figura 5.51. La cara de unión está plateada entre A y B, y refleja la mitad de la imagen de cada brazo hacia el observador.

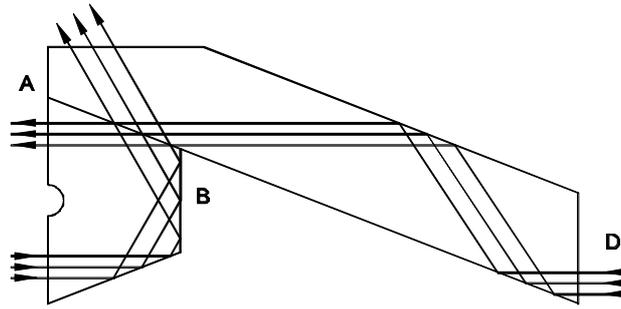


Fig. 5.51

2. Telémetros estereoscópicos

Se basan en la capacidad estereoscópica que se produce al recibir cada ojo una imagen del objeto distante, lo cual produce la sensación de que está suspendido en el aire.

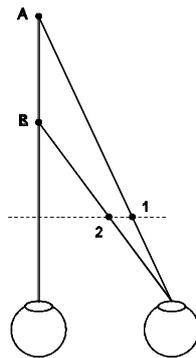


Fig. 5.52

Los telémetros estereoscópicos se basan en el principio de la figura 5.52. Si sobre la imagen intermedia de un telescopio se coloca un retículo con un punto dibujado, este punto se ve como si estuviera en el espacio objeto; al mover horizontalmente el retículo de la derecha pasando del punto 1 al 2, la imagen que se ve se mueve de A a B.

Si se mide el desplazamiento producido en el retículo para conseguir que el punto se encuentre sobre el objeto, se conocerá la posición de este último.

Para aumentar el efecto estereoscópico se hace un montaje parecido al telémetro de coincidencia, con dos brazos horizontales que incrementan artificialmente la distancia interpupilar, según vimos al tratar los binoculares. Un ejemplo de montaje es el de la figura 5.53.

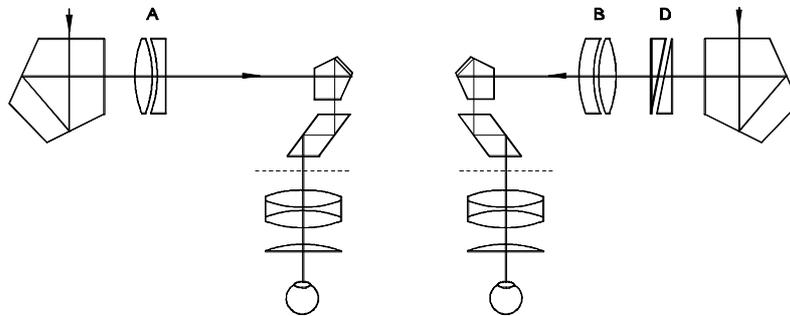


Fig. 5.53

El diaforámetro D se varía en dioptrías prismáticas hasta que el ángulo con que entran los rayos provenientes del objeto a los ojos es el mismo que el que forman los rayos al observador desde el retículo. Entonces, el retículo se ve proyectado sobre el objeto. Este mecanismo equivale al desplazamiento del retículo descrito anteriormente.

Otros telémetros estereoscópicos disponen de retículos con una serie de líneas que se proyectan a diferente profundidad (Fig. 5.54). Buscando qué conjunto de líneas queda a la misma profundidad aparente que el objeto se conoce la distancia de ésta.

Una objeción que se puede poner a este tipo de telémetros es que su buen uso depende de la capacidad del observador para la visión estereoscópica y de su entrenamiento.

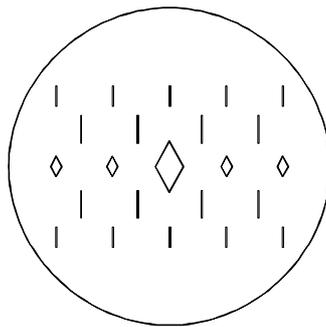


Fig. 5.54

3. Estadímetros

Una estadía es un objeto de dimensión conocida. Los estadímetros se basan en la medida del ángulo bajo el cual se ve este objeto desde la posición del observador, y es desde donde se deduce su distancia. En la figura 5.55 se representa un estadímetro de doble espejo, donde a través del anteojo de Galileo se recibe la doble imagen dada por el divisor del haz. Una de las imágenes proviene directamente del objeto y la otra de un espejo giratorio.

Para medir el ángulo α se hacen coincidir los extremos de distinto lado de las imágenes y se hace girar el espejo hasta que coincidan los extremos del mismo lado. El espejo habrá girado un ángulo de $\alpha/2$.

Entonces se encuentra:

$$R = \frac{h}{\alpha}$$

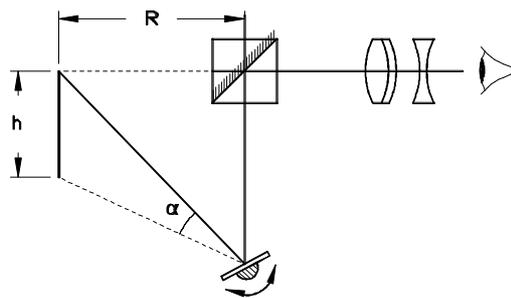


Fig. 5.55

El objeto puede ser un barco, una persona, o cualquier otra cosa de dimensiones conocidas. En el campo de la topografía se utilizan barras de líneas alternas rojas y blancas, de longitud conocida, llamadas miras.

4. Periscopios

Los periscopios tienen algunas características que los diferencian de los anteojos, la más importante de las cuales es que el tubo tiene más longitud y requiere el uso de muchas lentes para reducir el tamaño de los haces. A continuación, se estudian las diferentes partes.

- Cabeza: las cabezas de los periscopios son los elementos ópticos situados en la parte más alta, que tienen como misión permitir un barrido horizontal y vertical del campo observado.

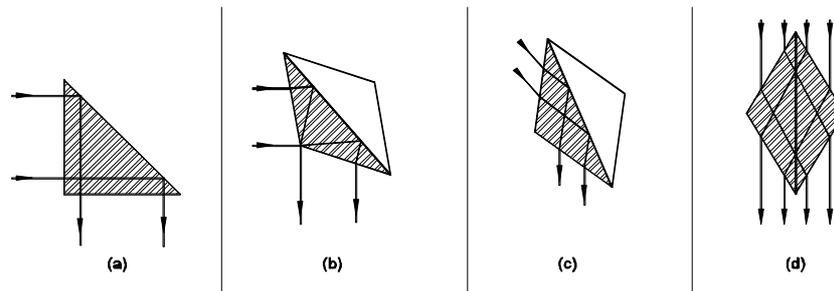


Fig. 5.56

El tipo más sencillo es un prisma en ángulo recto como el de la figura 5.56 (a), pero este sistema no permite un barrido vertical porque se reduce progresivamente el tamaño de los haces al elevar el plano de la visión. Una buena solución para este problema es un prisma isósceles doble, como el de la figura 5.56 (b), que consiste en dos prismas de Dove plateados por la base y pegados. El prisma superior tiene la función de aumentar la dimensión de los haces para grandes elevaciones, como se muestra en las figuras 5.56 (c) y 5.56 (d).

- Aumentos: los periscopios se diseñan para trabajar con dos tipos de aumentos. Un aumento es del orden de 1,5 para dar la impresión de mirar a ojo desnudo con lo que se compensa el efecto psicológico de observar a través de un tubo estrecho. El otro aumento acostumbra a valer entre 4 y 6 y sirve para ver detalles del objeto. El cambio de un aumento a otro se suele hacer mediante un telescopio de Galileo escamoteable situado delante del objetivo. La inserción de un telescopio de Galileo invertido cambia del mayor aumento al menor al sistema que le sigue. Si el aumento de Galileo es de 4 y el del periscopio de 6, al insertar el Galileo invertido el aumento total se reduce a 1,5.

- Prisma de Dove o de Wollaston: cuando se quiere que la cabeza del periscopio pueda barrer en horizontal, sin que se gire a la vez el observador, se debe tener en cuenta la inversión de imagen producida por el giro. Para mostrar claramente este efecto, en las figuras 5.57(a,b y c) se da un giro al espejo superior de un periscopio simple manteniendo fijo el espejo inferior.

Entonces, la imagen gira un ángulo mitad en su plano, de tal manera que cuando los espejos miren en la misma dirección (Fig. 5.57 (c)) la imagen se presenta girada 90° respecto a la posición que tenía cuando los espejos miraban en direcciones opuestas (Fig. 5.57 (a)).

Para compensar el giro de la imagen se inserta un prisma de Dove de manera que, cuando el prisma de cabeza gire un ángulo dado en horizontal, el prisma de Dove gire sobre el eje vertical un ángulo mitad en la misma dirección. Si el prisma inferior es un Amici con techo, se consigue una inversión total de la imagen que se compensará con la que produce el objetivo. En la figura 5.58 se muestra el funcionamiento de esta combinación, que mantiene la orientación de la imagen cuando el prisma de cabeza gire ángulos de 0° (Fig. 5.58 (a)), 90° (Fig. 5.58 (b)) y 180° (Fig. 5.58 (c)).

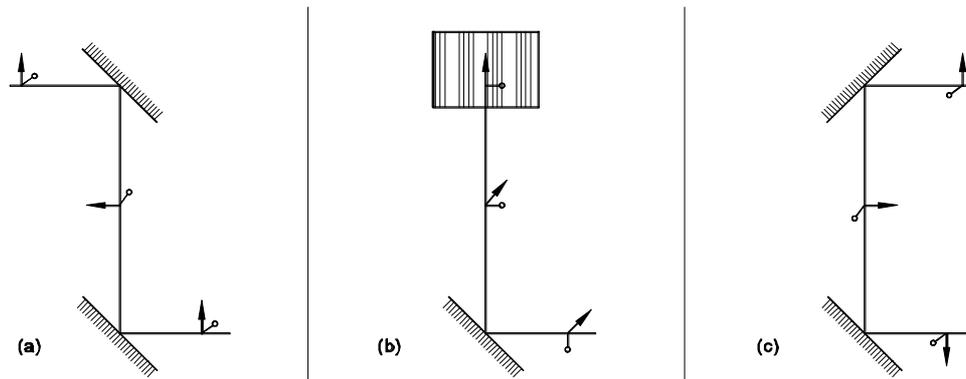


Fig. 5.57

El prisma de Dove debe ser utilizado siempre con luz paralela porque no tiene las caras de entrada y de salida perpendiculares al eje óptico; si no es así introducirá grandes aberraciones. A veces se coloca delante del objetivo, aunque para su gran peso se prefiere situarlo en otra parte fija del sistema donde haya marcha paralela. En lugar del prisma de Dove se puede utilizar cualquier otro tipo de prisma con un número impar de reflexión; son los llamados rotadores.

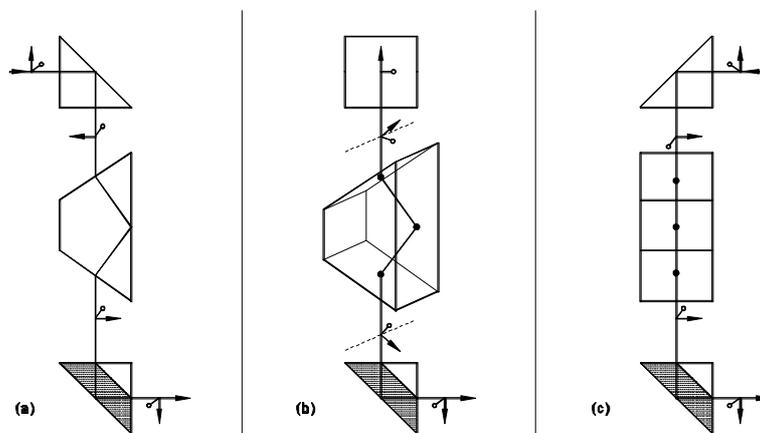


Fig. 5.58

5.5 Anteosojos de Galileo

5.5.1 Funcionamiento

1. Principio

a) Composición. El anteojo de Galileo se compone de una lente convergente que hace de objetivo y de una lente divergente que hace de ocular (Fig. 5.59). Este conjunto da imágenes derechas de los objetos considerados. Es un sistema afocal o casi afocal, al menos cuando el observador es emétrope o débilmente emétrope y cuando el objeto observado por el anteojo está lejano.

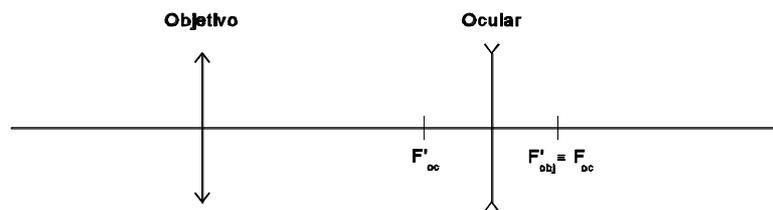


Fig. 5.59

La distancia focal del objetivo es, en los anteojos corrientes, del orden de 100 a 150 mm; la del ocular, alrededor de 50 mm.

b) Construcción de la imagen. El objetivo da del objeto y , muy alejado, una imagen y_1 invertida y real que está sobre el plano focal F'_{obj} del objetivo (Fig. 5.60). Pero delante de F'_{obj} (y delante de la imagen y_1) se interpone el ocular divergente, que da de y_1 una imagen derecha y virtual y' que generalmente está en el infinito, cosa que permite ver sin acomodar si el observador es emétrope (Fig. 5.61).

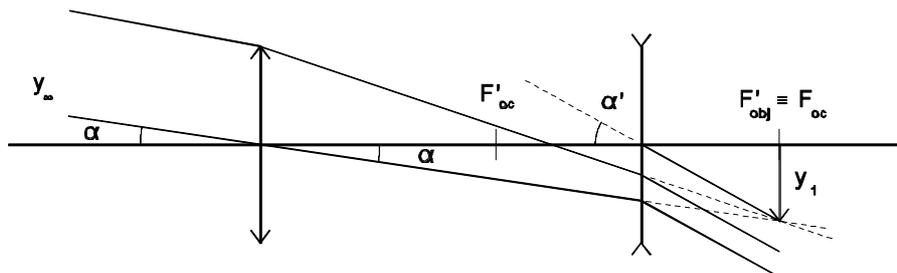


Fig. 5.60

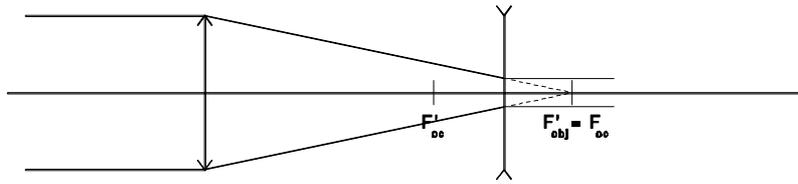


Fig. 5.61

2. Círculo ocular. Enfoque

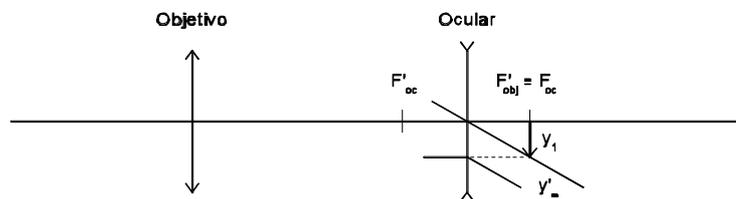


Fig. 5.62

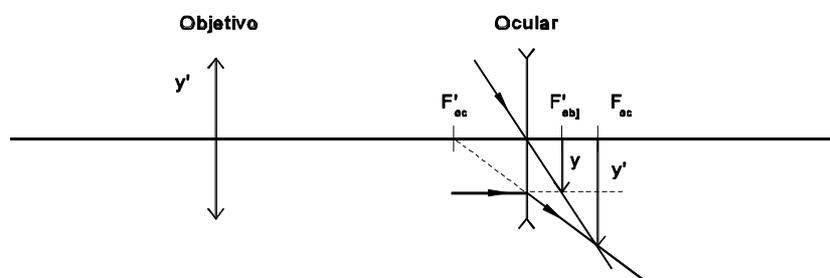


Fig. 5.63

a) Para enfocar es suficiente desplazar el ocular respecto al objetivo, hundiéndolo progresivamente después de haberlo extraído totalmente. Para un ojo emétrope es ventajoso que el antejo sea afocal (acomodación relajada). Para ello se hará coincidir F'_{obj} y F_{oc} (Fig. 5.62). Un ojo hipermetrope tiene que hundir menos el ocular a fin de que y' esté en su punto remoto (Fig. 5.63).

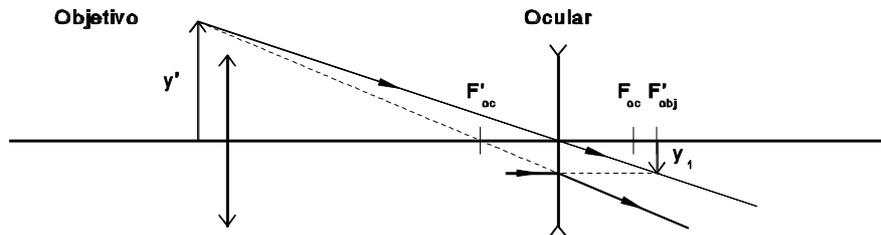


Fig. 5.64

Un miope hunde suficientemente el ocular hasta poner F_{oc} delante de y_1 . Entonces, y' está delante del ojo miope, entre su punto remoto y su punto cercano, o mejor, en su punto remoto (Fig. 5.64). Así pues, el enfoque se hace hundiendo el ocular hasta que se obtiene una imagen nítida.

b) Círculo ocular: es la imagen del objetivo a través del ocular. Es bastante grande y virtual. Se determina de la misma manera que en los otros anteojos. Se encuentra:

$$z = -\frac{f_{oc}^2}{z} \quad (5.56)$$

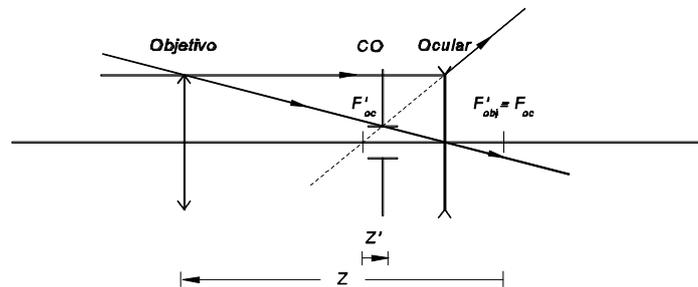


Fig. 5.65

Si el antejo es afocal:

$$z = -f_{obj}$$

Entonces,

$$z = \frac{f_{oc}^2}{f_{obj}}$$

Por ejemplo, para un antejo de Galileo típico, donde $f_{oc} = -50 \text{ mm}$ y $f_{obj} = 150 \text{ mm}$, se tendrá:
 $z' = -2500 / -150 = 16,7 \text{ mm}$.

Considerando que el ojo está colocado lo más cercano posible del ocular (córnea a 13 mm del ocular), el centro de la pupila de el ojo P estará, entonces, a $13 + 3,6 = 16,6 \text{ mm}$ del ocular. Se ve que, en este caso,

$$z \approx S_2 P$$

Siendo S_2 la posición del ocular.

Por otra parte,

$$\frac{D_{CO}}{D_{obj}} = \frac{f_{oc}}{-z} = \frac{f_{oc}}{f_{obj}} = -\frac{f_{oc}}{f_{obj}}$$

con lo que

$$D_{CO} = -\frac{D_{obj} f_{oc}}{f_{obj}}$$

Si se toma el valor de la razón de apertura usual,

$$\frac{D_{obj}}{f_{obj}} = \frac{1}{5} \quad i \quad f_{oc} = -50 \text{ mm}$$

resultará

$$D_{CO} = 50 \frac{1}{5} = 10 \text{ mm}$$

3. Posición del ojo. Marcha de rayos

a) Posición del ojo. En el antejo de Galileo no hay una posición del ojo que permita recibir todos los rayos que salen del instrumento, ya que el círculo ocular es, de hecho, virtual. El observador tiene que colocar el ojo lo más cerca posible del ocular para poder recibir la mayor parte de los rayos procedentes

de un punto del objeto. Se ha visto, en el párrafo anterior, que esto sitúa el centro de la pupila del ojo a unos 16 mm del ocular, de manera que $S_2 P \cdot F_{oc} S'_1$, siendo S la posición del C.O. En seguida se verá la importancia de esta equivalencia en el cálculo del campo del anteojo de Galileo.

b) Marcha de rayos. Es la pupila del ojo la que limita los haces emergentes del anteojo. Consideremos el caso del anteojo afocal y tracemos los haces sucesivos comenzando por el que entra en el ojo (Fig. 5.66), se ve que la pupila del ojo es utilizada siempre en toda su extensión (es la pupila de salida del instrumento asociada al ojo) y que sólo se utiliza una parte del objetivo, que depende a la vez del punto objeto observado.

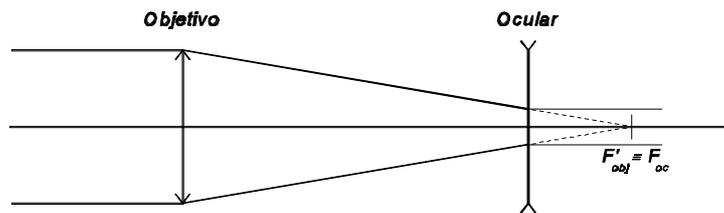


Fig. 5.66

5.5.2 Aumento visual y campo

1. Definición y expresión del aumento visual

a) Definición. Se llama aumento visual a la relación entre el ángulo bajo el que se ve el objeto a través del instrumento y el ángulo bajo el cual se ve a ojo desnudo.

b) Expresión (Fig. 5.67).

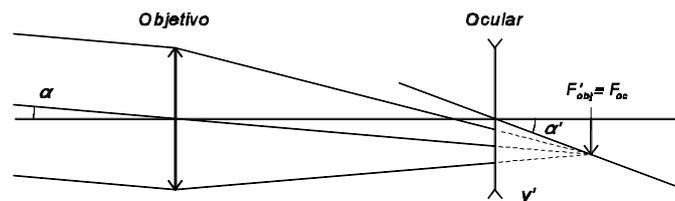


Fig. 5.67

- En el caso de un anteojo afocal. Considerando la figura 5.67, se tiene

$$\alpha = \frac{y}{f_{oc}} \quad i \quad \alpha = \frac{y}{f_{obj}}$$

entonces,

$$M_v = \frac{\alpha}{\alpha} = \frac{f_{obj}}{-f_{oc}}$$

Este es el aumento intrínseco (aumento del antejo afocal). Se observa que

$$M_v = \frac{f_{obj}}{-f_{oc}} = \frac{D_{CO}}{D_{PE}}$$

2. Medida del aumento visual intrínseco

Para medir el aumento intrínseco existen diversos métodos:

a) Se mide f'_{obj} y f_{oc} y se hace la relación:

$$M_v = \frac{f'_{obj}}{f_{oc}}$$

b) Se mide, siendo el antejo afocal, la relación $M_v = f'_{obj}/f'_{oc}$ mediante una lámina semiplataada por donde se superpone la imagen del círculo ocular y una regla graduada (Fig. 5.68).

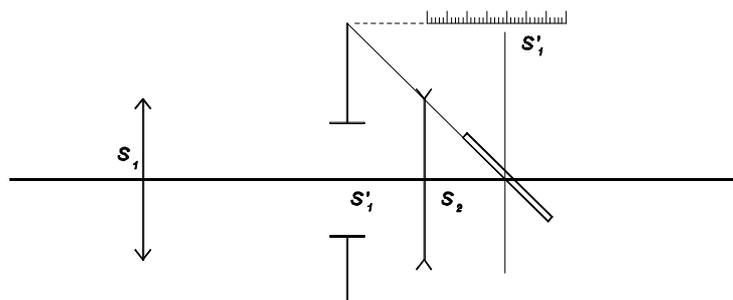


Fig. 5.68

c) Se utiliza el método de la cámara clara (Fig. 5.69). El ojo recibe al mismo tiempo los rayos procedentes del objeto a través del anteojo y los rayos procedentes directamente del objeto que son reflejados en los espejos.

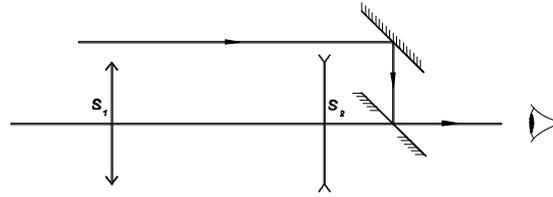


Fig. 5.69

Sea n el número de divisiones vistas claramente por el ojo desnudo que recubre una visión del objeto (que es una regla graduada) visto claramente a través del anteojo. N es manifiestamente la relación de las imágenes retinianas y es igual a M_i si la regla está lejos. Sin cámara clara también se puede observar el objeto a través del anteojo con un ojo y directamente con el otro ojo.

3. Campo

Para fijar ideas, utilizaremos un anteojo con $f'_{obj} = 150$, $M_i = 3$, $D_{obj}/f'_{obj} = 1/5$, $D_{CO} = 10 \text{ mm}$ y se supondrá afocal.

Se consideran diversos puntos B del plano objeto y los ejes cilíndricos emergentes que les corresponden. Todos estos haces adoptan el círculo ocular S'_1 como directriz. Cuanto más alejado esté el punto B del eje, más inclinado sobre el eje estará el haz emergente que le corresponde.

Se distingue:

- Un campo límite, correspondiente a los puntos que envían haces emergentes, cubriendo la pupila del ojo totalmente o parcialmente (Fig. 5.70).

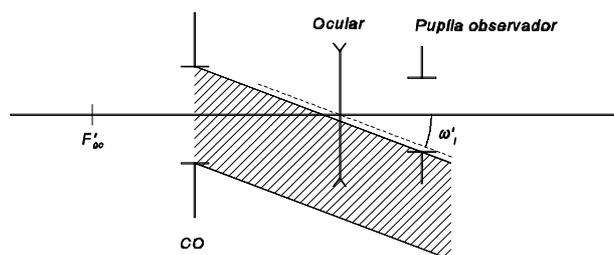


Fig. 5.70

- Un campo de iluminación plena correspondiente a los puntos que envían haces y cubriendo toda la pupila del ojo (Fig. 5.71).

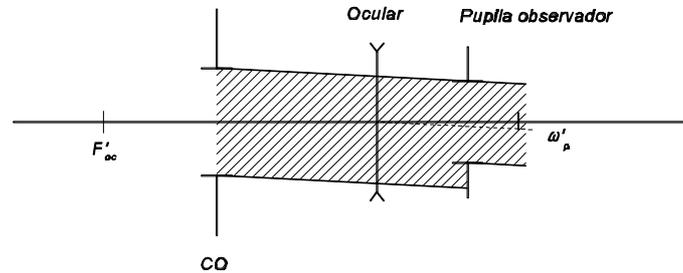


Fig. 5.71

- Un campo medio correspondiente a los puntos que envían un haz que cubre al menos la mitad de la pupila (Fig. 5.72).

La figura 5.73 representa la marcha de rayos que provienen de un punto B_m situado sobre el borde del campo medio objeto. Su imagen B'_m estará sobre el borde del campo medio imagen (o campo medio aparente).

Se calcula, basándose en la figura 5.73, el valor del campo medio objeto. Si se denomina ω' al semiángulo vértice del campo medio imagen, se tiene:

$$\omega_m = \frac{D_{CO}}{S_1 P}$$

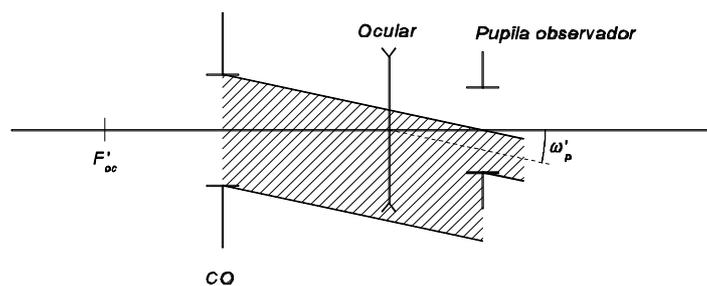


Fig. 5.72

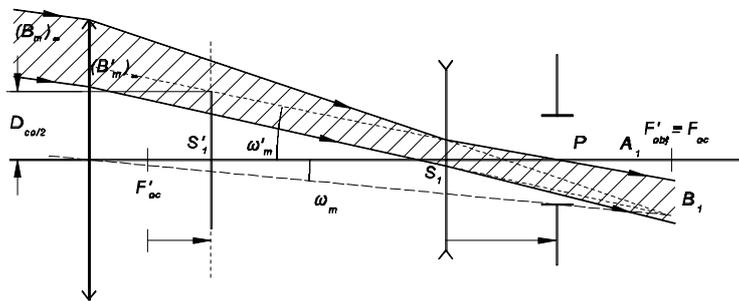


Fig. 5.73

Se sabe que

$$D_{CO} = \frac{(D_{obj}/2) f_{oc}}{f_{obj}}$$

Entonces,

$$\omega_m = \frac{(D_{obj}/2) f_{oc}}{f_{obj} S_1 P}$$

Y como ya se ha visto, en el caso que se considera que $S_2 P \approx F'_{oc} S'_1$, se puede escribir:

$$S_1 P = S_1 S_2 \quad S_2 P \approx S_1 S'_1 \quad F'_{oc} S_1 \approx f_{oc}$$

Entonces,

$$\omega_m = \frac{D_{obj}/2}{f_{obj}} \frac{f_{oc}}{f_{oc}} = \frac{D_{obj}/2}{f_{obj}}$$

o también,

$$2\omega_m = \frac{D_{obj}}{f_{obj}}$$

que es la razón de apertura.

Como

$$\frac{D_{obj}}{f_{obj}} = \frac{1}{3} \text{ o } \frac{1}{5}$$

Se tiene:

$$2\omega_m \leq \frac{1}{3} \text{ rad} \quad \text{o} \quad 2\omega_m \leq 20^\circ$$

Por otra parte, como en todos los anteojos,

$$\frac{2\omega_m}{2\omega_v} = M_v$$

Se tiene, por tanto,

$$2\omega_m = \frac{2\omega_v}{M_v} \quad \text{y} \quad 2\omega_m \leq \frac{20^\circ}{M_v}$$

siendo ω_m el semicampo medio angular objeto correspondiente a ω'_m , semicampo angular imagen.

Se ve, por tanto, que el campo es pequeño, siendo éste el gran defecto del antejo de Galileo. Es dos veces más pequeño, como mínimo, que el campo de los otros anteojos, en los cuales

$$2\omega_m = \frac{40^\circ}{M_v}$$

4. Observaciones

- No es posible limitar el campo de iluminación plena por medio de un diafragma convenientemente colocado, tal y como se puede hacer con los otros anteojos, pues no hay ninguna imagen objetiva que juegue el papel de objeto real para el ocular.

- Todo sucede como si el ojo (centrado sobre el eje) viera el plano imagen a través de una *ventana* a la cual no se puede acercar. El papel de esta lucarna lo desempeña el círculo ocular. Es por esto que el círculo ocular se llama lucarna de salida y la montura del objetivo se llama lucarna de entrada.

En los otros instrumentos el círculo ocular es la pupila de salida. Aquí la pupila del ojo es la que juega este papel, la cual no está totalmente cubierta excepto cuando el campo está en iluminación plena (Fig. 5.70).

- Para aumentar el campo será necesario disminuir S'_1P que tiene un límite imposible de superar en S'_1S_2 . Lo que se debe hacer es colocar el ojo lo más cerca posible de S_2 .

Como $2T'_m = D_{obj}/f'_{obj}$, se toma D_{obj}/f'_{obj} tan grande como sea posible, pero no se puede sobrepasar 1/3 a causa de las aberraciones, y como $2T'_m = 2T'_n/M_v$, se limita el valor de M_v a 3 (o 5 como máximo) a fin de que $2\omega_m$ conserve un valor aceptable.

Si

$$M_v = 3,2 \quad \omega_m \approx 60^\circ \approx \frac{1}{10} \text{ rad}$$

es decir, un campo lineal de 100 m para objetos colocados a 1 km de distancia.

- En nuestro ejemplo el círculo ocular es mucho más grande (10 m) que la pupila del ojo (de 3 a 5 mm de diámetro). Siempre se arregla para que sea así a fin de que toda la pupila sea cubierta en las condiciones más normales de uso de los anteojos.

5.5.3 Poder de resolución y claridad

1. Poder de resolución

Se ha visto que, en el campo de iluminación plena, como mínimo toda la pupila está cubierta por el haz que proviene de un punto de la imagen. El radio de la mancha de difracción sólo dependerá del radio de la pupila del ojo; en consecuencia, el instrumento no limitará el poder separador y el ángulo límite de resolución será igual a $1/M_v$ (tomando 1 como ángulo límite de resolución correspondiente al ojo).

2. Claridad

Los anteojos de Galileo son unos anteojos muy claros, mucho más claros que los anteojos terrestres para un aumento igual ya que, como se ha visto anteriormente, la pupila del ojo estará plenamente cubierta por los haces convergentes.

La claridad es, por tanto, igual al coeficiente de transmisión que puede llegar fácilmente a 0,8 al haber pocas lentes y, por tanto, pocas superficies de refracción y reflexión.

3. Realización

El objetivo está generalmente compuesto por un doblete pegado (lentes biconvexa y planoconvexa, la una de vidrio flint y la otra crown. El ocular generalmente es simple).

Esta combinación de tres lentes está corregida en su conjunto por compensación; se corrigen sobre todo las aberraciones de campo.

Si se precisa una buena corrección de las aberraciones cromáticas, se acromatiza separadamente el objetivo y el ocular. Este último, en lugar de ser una simple equicóncava de crown, es entonces el conjunto de dos bicóncavas de crown que envuelven una equicóncava de flint (lupa de Steinheil).

Como conclusión, se puede decir que los anteojos de Galileo son de un precio poco elevado. Compiten en precio y calidad con los anteojos terrestres en cuanto a los pequeños aumentos. Pero la debilidad de su campo hace que se prefieran los anteojos con prismáticos para aumentos superiores a 5.