

2B. ECUACIONES DE CORRESPONDENCIA EN SISTEMAS CENTRADOS.

2B.1. Relaciones generales tomando distintas referencias.

Ecuaciones generales. Sea un sistema definido por sus elementos cardinales, planos principales y focos, y tratamos de hallar las ecuaciones algebraicas que relacionan la posición, aumento, etc. de un objeto y con su imagen y' .

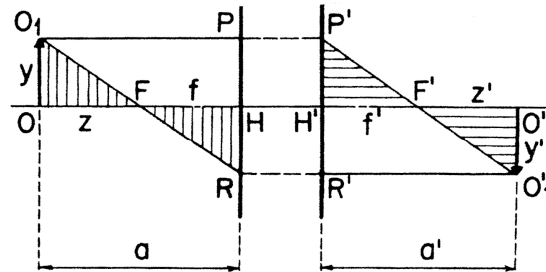


Fig. 2B.1

Designamos por z y z' las distancias FO y $F'O'$, y por a y a' las HO y $H'O'$. Para determinar la imagen de y trazamos desde O_1 dos rayos, uno paralelo al eje y otro que pasa por el foco objeto F . Sus conjugados se cortan en el punto O'_1 . De los triángulos rectángulos semejantes OO_1F y FHR , y de los $P'H'F'$ y $F'O'O'_1$, deducimos las ecuaciones:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{f}{a-f} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{a'-f'}{f'} \quad (2B.1)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

como vemos el aumento se puede determinar de conocer z o de conocer z' , distancias al objeto y a la imagen contadas desde los focos, respectivamente.

Ecuación de correspondencia de Newton. De las expresiones (2B.1) (3) y (5) se obtiene

$$z z' = f f' = -\frac{n}{n'} f'^2 \quad (2B.2)$$

que es la *ecuación de correspondencia de Newton*, y en caso de medios extremos iguales, $n = n'$,

$$z z' = -f'^2 \quad (2B.3)$$

por lo que siempre z y z' son de signos contrarios y O y O' siempre están a distinto lado de F y F' .

Orígenes en puntos principales. A partir de las expresiones (2B.1) (4) y (6) se tiene:

$$\frac{f}{a-f} = \frac{a'-f'}{f'} \quad (2B.4)$$

y operando se llega a la ecuación:

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1 \quad (2B.5)$$

Introduciendo la relación entre focales $f = -(n/n') f'$, se tiene:

$$-\frac{n}{a} + \frac{n'}{a'} = \frac{n'}{f'} \quad (2B.6)$$

y para sistemas en medios con índices extremos iguales,

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (2B.7)$$

que se emplea habitualmente para lentes delgadas, al estar confundidos los planos principales con la propia lente.

2B.2. Aumentos y sus relaciones.

De las ecuaciones (2B.1) (1) y (6) se tiene

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{f' - a'}{f'} = 1 - \frac{a'}{f'}$$

De (2B.6), multiplicando sus dos miembros por a' y dividiéndolos por n' se obtiene a'/f' , lo que sustituido en la anterior da

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \frac{a'}{a} \quad (2B.8)$$

y para índices extremos iguales

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2B.9)$$

Relación entre los aumentos lateral β' , axial α' y angular γ' . Tomando incrementos en (2B.6) se tiene

$$z \Delta z' + z' \Delta z = 0, \quad \text{o bien} \quad \frac{\Delta z'}{\Delta z} = -\frac{z'}{z} = \alpha'$$

Multiplicando las (2B.1) (3) y (5), resulta

$$\beta'^2 = \frac{z'}{z} \frac{f}{f'} = -\frac{n z'}{n' z} \quad (2B.10)$$

de donde

$$\alpha' = \beta'^2 \frac{n'}{n} \quad (2B.11)$$

Y teniendo en cuenta que $\beta' = (n/n') \gamma'$, obtenemos la siguiente relación entre los tres aumentos:

$$\beta' = \alpha' \gamma' \quad (2B.12)$$

2B.3. Sistemas compuestos: caso general y acoplamiento en aire.

Acoplamos dos sistemas (I) y (II), de los cuales se conocen sus focos y puntos principales y vamos a determinar los elementos cardinales del sistema compuesto, F, F', H y H' .

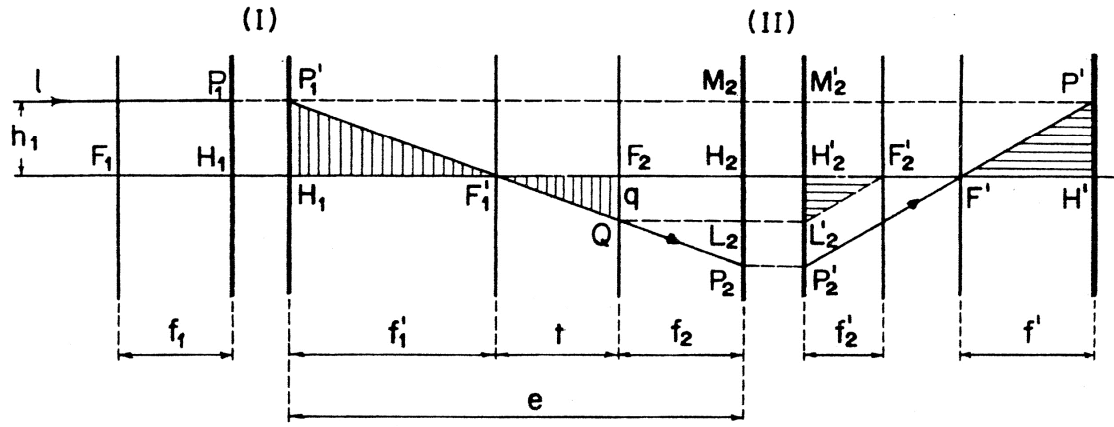


Fig. 2B.2

A t , la distancia de acoplamiento $F'_1 F_2$ entre el foco imagen del sistema (I) y el foco objeto del sistema (II), se le denomina *intervalo óptico*. A la distancia de acoplamiento entre los planos principales la llamaremos e , es decir $e = H'_1 H_2$.

Trazamos un rayo, l , paralelo al eje a una altura h_1 . Este rayo saldrá del sistema (I) pasando por F'_1 y del (II) pasando por F' , ya que entró paralelo al eje del sistema total. Para conocer su dirección a partir de P'_2 , trazamos el rayo auxiliar QL_2 , paralelo al eje, que saldrá por F'_2 , por tanto el rayo $P'_1 P_2$ saldrá del sistema (II) paralelo a $L'_2 F'_2$, y determinará F' . Pero además, su intersección con la prolongación de l dará el punto P' del plano principal imagen correspondiente al sistema total, con lo que queda determinado H' .

Los triángulos $P'_1 H'_1 F'_1$ y $F'_1 Q F_2$ (rayados verticalmente) son semejantes al $P'_1 M_2 P_2$. Por eso, podemos escribir que

$$\frac{h_1}{f'_1} = -\frac{q}{t} \quad (2B.13)$$

$$\frac{M'_2 P'_2}{e} = \frac{q}{t} \quad (2B.14)$$

Análogamente, los rayados horizontalmente $H'_2 L'_2 F'_2$ y $F' H' P'$ son semejantes al $M'_2 P'_2 P'$. De ellos se obtienen:

$$\frac{q}{f'_2} = \frac{h_1}{f'} \quad (2B.15)$$

$$\frac{M'_2 P'_2}{M'_2 P'} = \frac{q}{f'_2} \quad (2B.16)$$

De (2B.13) y (2B.15) se obtiene

$$-\frac{f'_1}{t} = \frac{h_1}{q} = \frac{f'}{f'_2} \quad (2B.17)$$

y para la focal imagen del sistema total se tiene

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t} \quad (2B.18)$$

De (2B.14) y (2B.16), se obtiene

$$\frac{e}{t} = \frac{M_2 P_2}{q} = \frac{M'_2 P'_2}{q} = \frac{M'_2 P'}{f'_2} \quad (2B.19)$$

y teniendo en cuenta que $M_2 P_2 = M'_2 P'_2$ y que $M'_2 P' = H'_2 H'$, queda

$$H'_2 H' = \frac{e}{t} f'_2 = -\frac{e f'_1}{f'_1} \quad (2B.20)$$

que nos da la abscisa del punto principal del sistema total tomando como origen el punto principal imagen del sistema (II).

Haciendo razonamientos análogos entrando por la derecha con un rayo paralelo al eje daría para la focal objeto

$$f = \frac{f_1 f_2}{t} \quad (2B.21)$$

y para la posición del plano principal objeto del sistema total respecto al plano principal objeto del sistema (I)

$$H_1 H = \frac{e}{t} f_1 = \frac{e f}{f_2} \quad (2B.22)$$

Si en vez de referir las ecuaciones (2B.18) y (2B.21) a la distancia entre focos, introducimos la de acoplamiento entre planos principales, e , de la figura 2B.3, se tiene

$$t = e - f'_1 + f_2 \quad (2B.23)$$

con lo cual (2B.18) resulta

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{e - f'_1 + f_2} \quad (2B.24)$$

o bien, teniendo en cuenta que $f_2 = -f'_2 (n_2 / n'_2)$

$$\frac{1}{f'} = \frac{n_2}{n'_2} \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2} \quad (2B.25)$$

Introduciendo (2B.23) en (2B.20) y (2B.22) se tiene para la posición del plano principal imagen

$$H'_2 H' = \frac{e f'_2}{e - f'_1 + f_2} \quad (2B.26)$$

Análogamente para la posición del plano principal objeto del sistema respecto a H_1

$$H_1 H = \frac{e f_1}{e - f'_1 + f_2} \quad (2B.27)$$

Si se introducen en (2B.25) las potencias en lugar de las focales, se tiene

$$\varphi' = \frac{n_2}{n'_2} \varphi'_1 + \varphi'_2 - e \varphi'_1 \varphi'_2 \quad (2B.28)$$

finalmente en función de los poderes refractores tendremos

$$\mathbf{F}' = \mathbf{F}'_1 + \mathbf{F}'_2 - \frac{e}{n_2} \mathbf{F}'_1 \mathbf{F}'_2 \quad (2B.29)$$

que es la *fórmula de Guldstram*. Los sistemas en los que F'_1 coincide con F_2 , es decir $t = 0$, tienen según (2B.18) y (2B.21) sus focos en el infinito y se llaman *afocales o telescópicos*.

Acoplamiento en aire. Si los sistemas se acoplan en aire, $n_1 = n_2 = n'_2 = 1$, $f_1 = -f'_1$, $f_2 = -f'_2$, $f = -f'$ y las fórmulas anteriores quedan:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}, \quad \varphi' = \varphi'_1 + \varphi'_2 - e \varphi'_1 \varphi'_2, \quad F' = F'_1 + F'_2 - e F'_1 F'_2$$

$$H_1 H = \frac{e f'_1}{f'_1 + f'_2 - e}, \quad H'_2 H' = \frac{-e f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}$$

$$H_1 F = H_1 H + H F = \frac{e f'_1}{f'_1 + f'_2 - e} - \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{f'_1 (e - f'_2)}{f'_1 + f'_2 - e}$$

$$H'_2 F' = H'_2 H' + H' F' = \frac{-e f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} + \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{f'_2 (f'_1 - e)}{f'_1 + f'_2 - e}$$

Sistemas convergentes y divergentes. Un sistema se dice que es *convergente* cuando un haz de rayos incidente paralelo al eje converge realmente en el foco imagen, es decir cuando el foco imagen es real. Si el foco imagen es virtual, los rayos divergen a la salida del sistema y se llama *divergente*.

Nótese que el que el sistema tenga su focal imagen f' positiva o negativa no determina su comportamiento. Por ejemplo, un sistema como el de la figura 2B.2 es convergente (F' real) y, sin embargo, $f' < 0$. Si los sistema I y II se acercaran más ($t < 0$), los planos principales serían interiores a los focos, f' sería positiva y el sistema sería convergente o divergente según que F' fuera real o virtual. También pueden darse situaciones en las que el carácter convergente o divergente dependa de que la luz paralela entre por la derecha o por la izquierda.

2B.4. Lentes gruesas y delgadas.

Un sistema compuesto formado por dos superficies de radios r_1 y r_2 , tomando estas como sistema simples en los cuales los puntos principales coinciden con los vértices constituye una lente. La distancia $S_1 S_2 = d$ se llama *espesor* y tiene su origen en S_1 . Si suponemos que el índice de la lente es n , y que está en el aire, $n_1 = n'_2 = 1$, tendremos para las potencias imagen de las dos superficies

$$\frac{1}{f'_1} = \varphi'_1 = \frac{n-1}{n} \frac{1}{r_1} \quad \text{y} \quad \frac{1}{f'_2} = \varphi'_2 = \frac{n-1}{n} \frac{1}{r_2} \quad (2B.30)$$

Sustituyéndolas en (2B.28), y teniendo en cuenta que el espesor de la lente en el eje es $d = H'_1 H_2 = e$, se obtiene para la potencia imagen de la lente

$$\frac{1}{f'} = \varphi' = \frac{n-1}{n} \frac{1}{r_1} \frac{1}{1} - \frac{n-1}{n} \frac{d}{r_1 r_2} + \frac{(n-1)^2}{n} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 r_2} \quad (2B.31)$$

cuya recíproca da la focal imagen f' .

Para hallar la posición de los planos principales respecto a los vértices bastará tener en cuenta las ecuaciones (2B.20) y (2B.22) una vez calculada la focal f' , y las (2B.30) con lo que se obtiene

$$H'_2 H' = -\frac{f' e}{f'_1} = -\frac{(n-1) f' d}{n r_1} = \frac{r_2 d}{n(r_1 - r_2) - (n-1)d} \quad (2B.32)$$

$$H_1 H = -\frac{f e}{f_2} = -\frac{(n-1) f' d}{n r_2} = \frac{r_2 d}{n(r_1 - r_2) - (n-1)d} \quad (2B.33)$$

Lentes delgadas. Una lente se dice que es delgada cuando su espesor es despreciable frente a cada uno de los radios de curvatura, de modo que despreciando el último sumando en (2B.32) la potencia imagen vendrá dada por:

$$\frac{1}{f'} = \varphi' = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2B.34)$$

En una lente delgada pueden considerarse los vértices de las dos superficies confundidos, así como los planos principales, y éstos coincidiendo con los vértices. En ellas serán de aplicación las ecuaciones (2B.5), (2B.6), (2B.7), (2B.8) y (2B.9), siendo en este caso a y a' las distancias de la lente al objeto e imagen. También será aplicable (2B.28) a su acoplamiento, poniendo en ella las potencias de las lentes y siendo e la distancia que la separa. Así para dos o más lentes delgadas pegadas con medios extremos en aire, la potencia total será:

$$\varphi'_T = \sum_{j=1}^n \varphi'_j \quad (2B.35)$$

Además, multiplicando (2B.6) por h y de la figura 2B.3., se obtiene

$$n' \sigma' - n \sigma = n' h \varphi' \quad (2B.36)$$

análoga a la fórmula de Lange para una superficie esférica, y que es aplicable a cualquier conjunto de lentes delgadas yuxtapuestas.

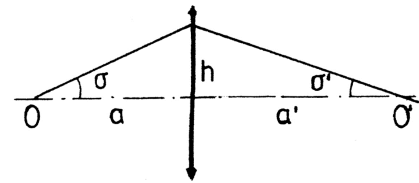


Fig. 2B.3

2B.5 Espejos: asociaciones.

Las fórmulas generales para el manejo de los sistemas centrados y sus asociaciones son válidas también para las asociaciones de espejos, pero tomando ciertas precauciones:

- (1) Un espejo sólo tiene un foco y una focal, puesto que la luz sólo puede llegarle en un sentido.
- (2) Para un espejo que opera en un medio de índice n , el espacio imagen tiene un índice $-n$.
- (3) En un espejo, cuando la luz incide por la izquierda, nunca hay luz real a su derecha, por tanto las distancia frontales positivas indican objetos e imágenes virtuales; las negativas, reales.
- (4) Dos espejos esféricos de vértices S_1 y S_2 se comportan igual que una lente de espesor d negativo, ya que $S_1 S_2$ tiene sentido contrario a la luz incidente. El índice de la lente, que es el espacio intermedio, si se acoplan en aire será $n = -1$. En general, un número par de espejos, $2k$, puede manejarse como un sistema de k lentes.

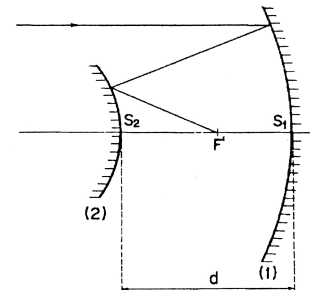


Fig. 2B.4

- (5) Si el número de espejos es impar, puede tratarse como un sistema dióptrico asociado a un espejo.

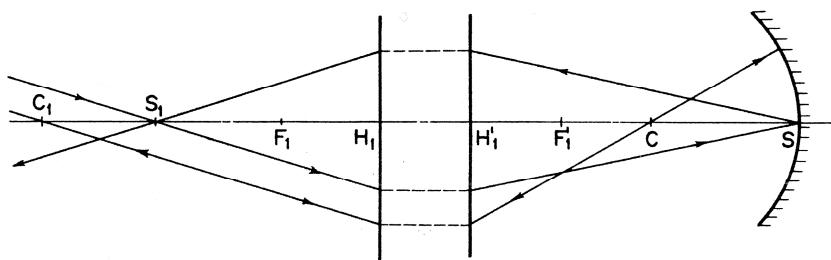


Fig. 2B.5

Veamos cómo encontrar el sistema equivalente a un sistema dióptrico y un espejo. Suponemos un sistema dióptrico definido por sus planos principales y focos, asociado a un espejo de centro C y vértice S . Sean S_1 y C_1 las imágenes de S y C dadas por el sistema en su parte anterior. Cualquier rayo que entre en el conjunto por S_1 seguirá una trayectoria como la indicada, simétrica respecto al eje y saliendo nuevamente por S_1 . Todo rayo que entre por C_1 se reflejará perpendicularmente en el espejo y volverá por C_1 siguiendo una trayectoria inversa. Todo sucede como si en S_1 tuviésemos un espejo de centro C_1 . Este espejo ficticio es el equivalente al sistema total y resuelve todos los problemas.

Si el centro del espejo, C , coincide con F'_1 , C_1 está en el infinito y el espejo equivalente sería un espejo plano.

Si el vértice del espejo, S , coincide con F'_1 , el sistema da imágenes simétricas respecto a C_1 .

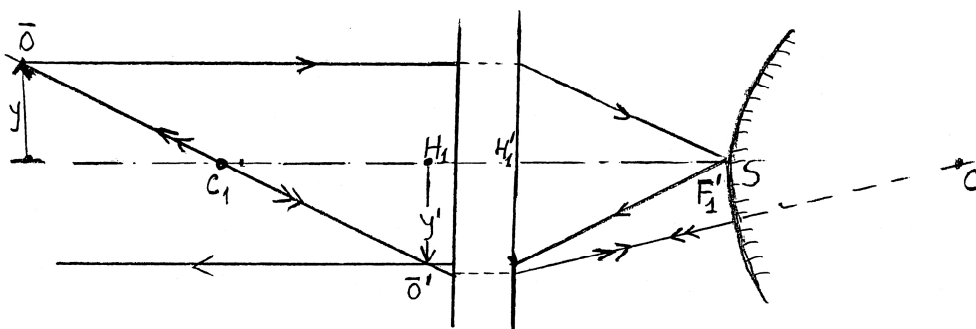


Fig. 2B.6

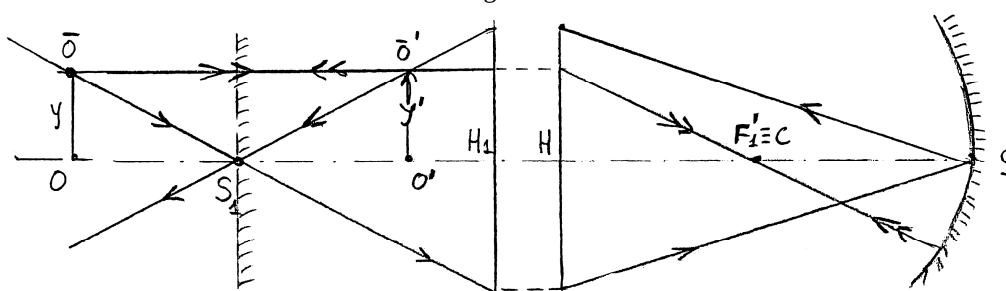


Fig. 2B.7

Regla general. Para pasar un rayo a través de un sistema formado por lentes y espejos se observarán las siguientes reglas:

- (1) Los índices de refracción de todos los medios que el rayo encuentra después de una reflexión se cambian de signo.
- (2) Los espesores de todos los medios que el rayo encuentra después de una reflexión se cambian de signo.

- (3) Los radios de curvatura permanecen siempre con los signos que le correspondan en relación con el sentido de propagación de la luz incidente primitiva.

Por tanto, cuando haya dos reflexiones en el sistema, los índices y espesores de los medios que siguen a la segunda sufrirán dos cambios quedando al final con los signos primitivos.

TEMA 4A. LA CÁMARA FOTOGRÁFICA

4A.1. Elementos de una cámara fotográfica .

Sus principales elementos son los siguientes (fig. 4A.1):

- El *objetivo fotográfico* forma imágenes reales de objetos relativamente lejanos. Un material fotosensible situado en un plano próximo al plano focal imagen del objetivo permite registrar la imagen (*fotografía*).

- El *diafragma* va incorporado en el objetivo fotográfico y constituye el diafragma de apertura del sistema. Se trata de un diafragma regulable que regula la cantidad de energía que entra por el objetivo.

- El *obturador* es el dispositivo que, mediante un mecanismo de apertura y cierre, controla el tiempo de iluminación del material fotosensible. Existen dos tipos fundamentales de obturadores: (a) *centrales*, están situados entre las lentes del objetivo y suelen estar formados por laminillas que se abren como un diafragma iris y (b) *de plano focal*, que están situados próximos al foco imagen del objetivo y formados por dos hojas de tejido cauchutado, material sintético o metal flexible. Cuando se oprime el disparador, la primera cortinilla comienza a moverse, descubriendo el material fotosensible; un instante después sale la segunda laminilla, formando con la anterior una rendija del tamaño adecuado al tiempo de exposición seleccionado.

- El *material fotosensible* reacciona cuando la luz incide sobre él. Tradicionalmente se trataba de material fotosensible *químico*, en el que la imagen se obtiene a partir de procesos de revelado aunque actualmente se han impuesto los materiales fotosensibles *digitales*. En ese caso la luz incide en un CCD (Charge Coupled Device), que es un dispositivo formado por un gran número de elementos, los píxeles, en los que la señal luminosa se transforma en señal eléctrica, permitiendo un procesamiento digital de la imagen obtenida.

- El *visor* permite conocer (y seleccionar) el campo objeto que va a ser registrado en la película. En algunas cámaras llamadas *cámaras reflex*, se aprovecha la imagen que forma el objetivo para presentarla al observador mediante un espejo plano, un prisma de reflexión total y una lente final.

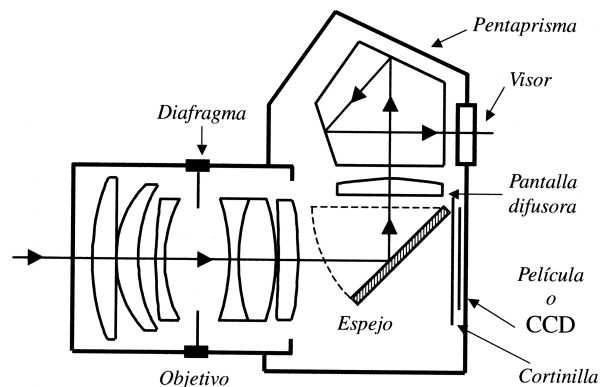


Fig. 4A.1

Mecanismo de enfoque. Cuando un objeto situado en el infinito se acerca hacia el objetivo, su imagen se sitúa detrás del foco imagen F' . En tal caso es necesario desplazar la película (o el CCD) hacia atrás, o bien, adelantar el objetivo (fig. 4A.2). La limitación en el desplazamiento determina el punto próximo OP, es decir, la posición del objeto más cercana al objetivo que la cámara es capaz de enfocar correctamente.

Según el tipo de cámara existen dos mecanismos de enfoque: por puntos y continuo. El primero se realiza en cámaras sencillas, en las que el visor es independiente del objetivo fotográfico y está formado por un anteojo que apunta en la misma dirección que éste.

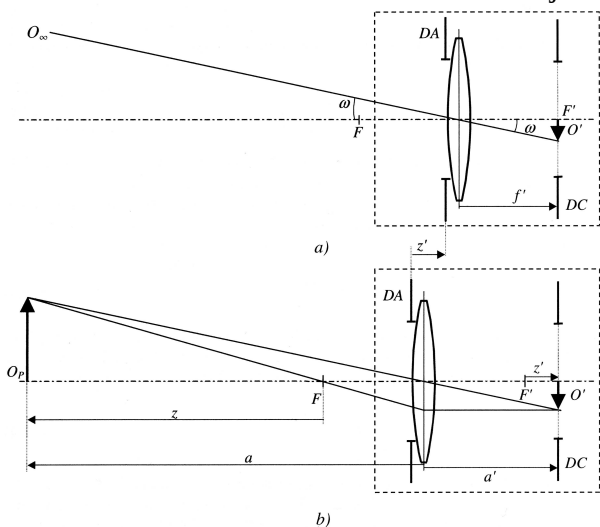


Fig. 4A.2

En las cámaras reflex el visor es el mismo objetivo, y el enfoque puede ser continuo. Mediante un espejo abatible, la luz que sale del objetivo es desviada hacia una placa de vidrio

esmerilado, donde se forma una imagen real, ya que esta placa es simétrica de la película respecto del espejo. Al oprimir el disparador de la cámara, el espejo es escamoteado antes de abrir el obturador, para luego volver a abatirse al terminar el tiempo de exposición prefijado.

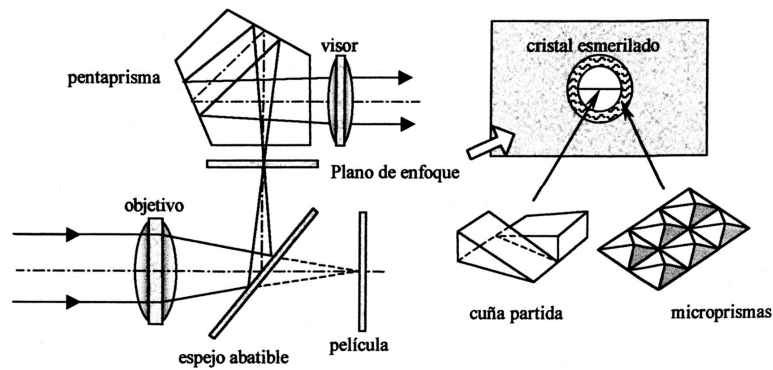


Fig. 4A. 3

La imagen formada sobre el espejo esmerilado suele observarse mediante un ocular, que proporciona una imagen aumentada. Un pentaprisma con techo es el medio usual para conseguir que la imagen final sea derecha. El esmerilado del vidrio sirve para evitar que el ojo acomode para ver la imagen, que solamente se verá nítida cuando se forma en el plano del cristal. En muchas cámaras se colocan sobre el cristal esmerilado otros elementos que aseguran el enfoque correcto como el prisma partido o la corona de microprismas de la fig. 4A.3.

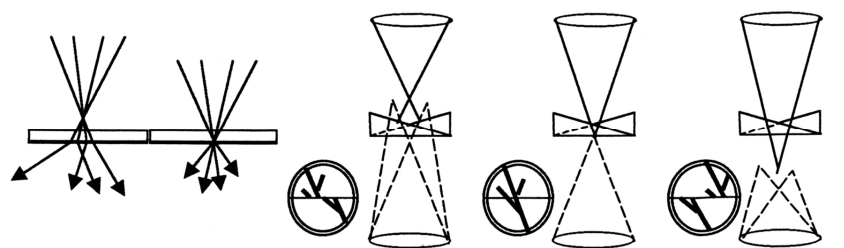


Fig. 4A. 4

El fundamento de estos elementos se describe en la fig. 4A.4. En el cristal esmerilado y los microprismas, el observador debe conseguir la máxima nitidez de la imagen. Si la imagen de un punto está situada fuera del plano esmerilado, tras atravesarlo, cada rayo sigue una trayectoria independiente del resto, luego no se forma una imagen nítida del punto. En el prisma partido, si la imagen no coincide en el plano de los dos prismas se produce una imagen final partida por el efecto de desviación que introduce cada prisma en la parte del haz que lo atraviesa.

4A.2. Campo. Relaciones geométricas en los objetivos fotográficos.

El campo lineal imagen es el que ocupa el material fotosensible. Los objetivos se diseñan de manera que el campo lineal imagen coincide con el de iluminación plena, al hacer la propia película o la matriz de detectores de diafragma de campo. Para objetos muy alejados del objetivo (situados en el infinito) el campo angular (2ω) se determina a partir de (fig. 4A.5):

$$\tan \omega = \frac{r}{f'} \quad (4A.1)$$

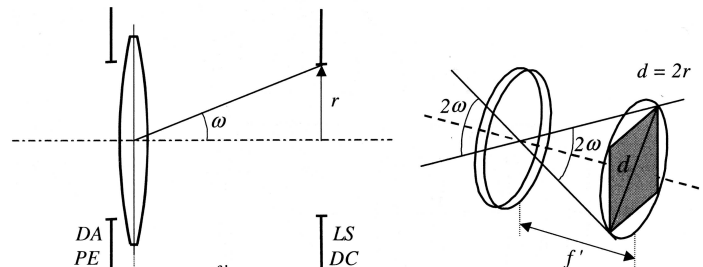


Fig. 4A.5

donde r es el semicampo lineal imagen, el cual coincide con el radio del formato, supuesto circular, o con su semidiagonal si es un formato rectangular. El valor del campo angular permite clasificar los objetivos en *normales* ($2\omega \approx 50^\circ$), *grandes angulares* ($2\omega > 50^\circ$), y *teleobjetivos* ($2\omega < 50^\circ$).

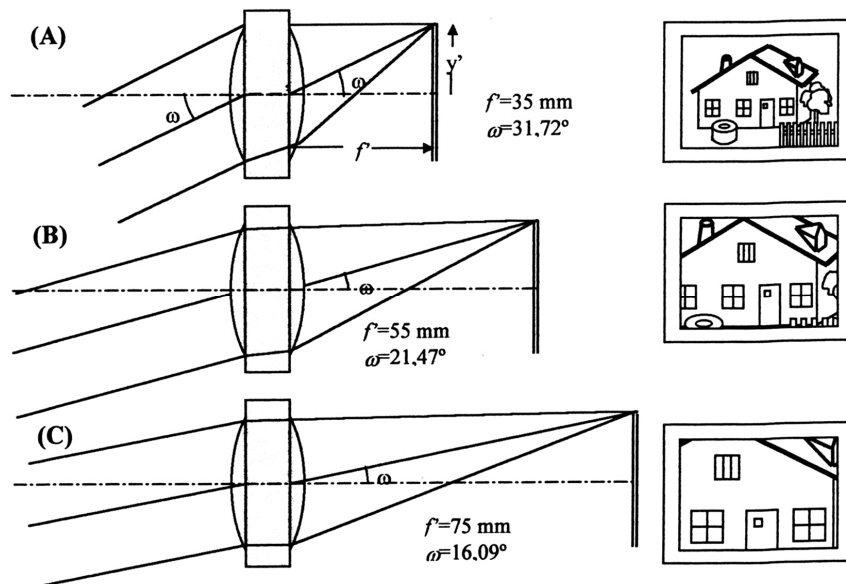


Fig. 4A.6

La figura 4A.6 representa (A) un gran angular; (B) un objetivo normal y (C) un teleobjetivo, que representan la misma escena, tomada desde el mismo punto.

4A.3. Profundidad de foco y de campo. Límites de enfoque próximo y lejano.

En la figura 4A.7 se representa un objetivo que refracta un haz de luz que converge en el foco imagen F' . Al situar una película fotográfica o una matriz de detectores en F' se obtiene una imagen latente del punto imagen sobre un gránulo de haluro de plata. Al revelarlo, aunque sólo una parte del gránulo hubiera recibido luz, todo el grano precipita en forma de plata, y aparece una mancha en la película denominada círculo de mínima confusión, cuyo diámetro se representa por C . Si se sitúa un CCD sobre F' el círculo corresponde a las dimensiones del pitch (distancia entre centros de dos sensores) y toma un valor de entre 20 y 30 μm .

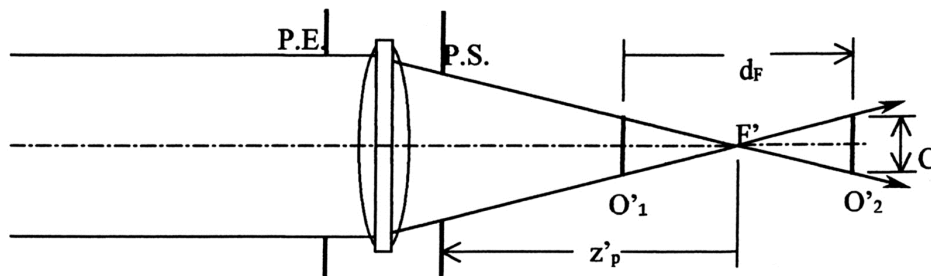


Fig. 4A.7

Si se desplaza la superficie fotosensible a izquierda o derecha de F' , tendremos una mancha imagen en lugar de un punto imagen. Sin embargo, si esta mancha imagen es menor que el círculo de confusión, será inapreciable. En consecuencia, existe un desenfoque tolerable en la imagen, mientras la imagen de un punto sea menor que C .

Se denomina *profundidad de foco* a la máxima distancia que puede desplazarse la superficie fotosensible sin que se pierda el enfoque de la imagen. En la fig. 4A.7 d_F es la distancia entre los puntos O'_1 y O'_2 , obtenidos al tomar sobre el haz de luz un segmento de longitud C normal al eje óptico.

Sea D' el diámetro de la pupila de salida, z'_p la distancia de F' a dicha pupila, C el diámetro del círculo de mínima confusión y d_F la profundidad de foco. Aplicando el teorema de Tales a los triángulos de la figura 4A.7, con vértice común en F' , bases D' y C , y alturas respectivas z'_p y $d_F/2$, se obtiene para la profundidad de foco el valor

$$d_F = -\frac{2C}{D'} z'_p \quad (4A.2)$$

El aumento pupilar es la relación entre los diámetros de las pupilas de entrada y salida, luego $\beta'_p = \Phi_{PS} / \Phi_{PE} = -z'_p / f'$, de donde, despejando z'_p y sustituyendo en 4A.2, queda

$$d_F = 2 C N \quad (4A.3)$$

La profundidad de foco es importante para el fabricante de cámaras fotográficas, pues indica la precisión que debe tener el mecanismo de enfoque de la película. Sin embargo, para el usuario de una cámara no es una magnitud muy útil.

Profundidad de campo. Supongamos que el CCD no está situado sobre el foco imagen, sino que se ha desplazado para situarse exactamente sobre la imagen O' correspondiente a un objeto O . Se denomina profundidad de campo la distancia en profundidad que puede desplazarse el objeto sin que se aprecie desenfoque en la imagen.

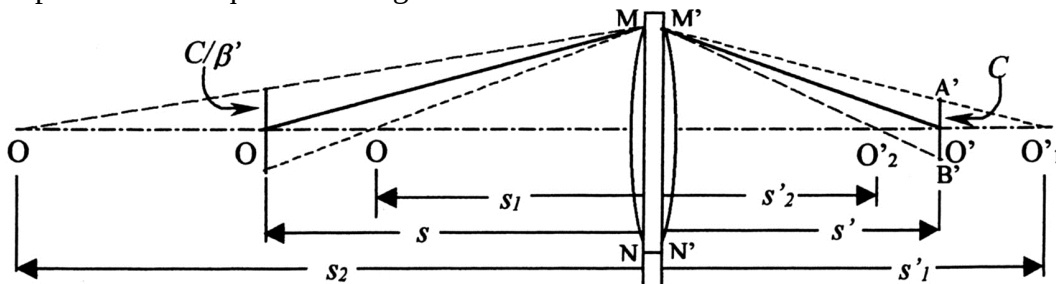


Fig. 4A.8

En la figura 4A.8 representamos un sistema óptico y un objeto O , cuya imagen es O' , donde está situado el CCD. El segmento $M'N'$ representa la pupila de salida. El segmento $A'B'$ tomado sobre el plano del CCD, es igual al diámetro del círculo de confusión, C . Uniendo los extremos del mismo lado de $M'N'$ y $A'B'$ obtenemos el punto O'_1 . Igualmente, uniendo los extremos del lado contrario de $M'N'$ y $A'B'$ se obtiene el punto O'_2 .

Los puntos O'_1 y O'_2 son los límites de enfoque en el espacio imagen, ya que cualquier punto imagen situado entre ellos dará una mancha de diámetro menor que C en el plano del CCD. Los correspondientes puntos objeto O_1 y O_2 representan los límites de enfoque en el espacio objeto. La profundidad de campo es la distancia existente entre O_1 y O_2 .

En una primera aproximación podemos suponer que el segmento $O'_1O'_2$ coincide con el valor de la profundidad de foco, calculada en (4A.3). Sabiendo que el aumento axial, α' , se define como la relación entre un segmento imagen horizontal (d_F : profundidad de foco) y el segmento objeto correspondiente (d_C : profundidad de campo), se obtiene:

$$\alpha' = \frac{n'}{n} \beta'^2 = \frac{d_F}{d_C} \quad (4A.4)$$

luego

$$d_C = \frac{n}{n'} \frac{d_F}{\beta'^2} = \frac{n}{n'} \frac{2 C N z^2}{f'^2} \quad (4A.5)$$

La profundidad de campo es directamente proporcional al diámetro del círculo de confusión, al número de diafragma y al cuadrado de la distancia objeto; e inversamente proporcional al cuadrado de la focal. La máxima profundidad de campo se consigue con objetivos de pequeña focal y con números de diafragma grandes (pequeñas aberturas). Algunas cámaras llevan una escala donde puede leerse para cada abertura los límites anterior y posterior del campo nítido cuando se enfoca sobre un plano determinado. En las cámaras de abertura relativa muy pequeña, N muy grande, a partir de una corta distancia todo el espacio queda enfocado en profundidad. Estas cámaras se denominan de *foco fijo* y carecen de mecanismo de enfoque.

Límites de enfoque próximo y lejano. La relación anterior (4A.5) es una aproximación que no permite determinar la posición de los puntos de enfoque próximo y lejano. Para determinar esas posiciones, supongamos que s_1 es la distancia al punto O_1 y s la distancia a O (ambas negativas). Al tamaño de imagen C le corresponderá un tamaño C/β' en el plano objeto, siendo β' el aumento

lateral para el par de puntos conjugados O y O' . El haz de rayos con vértice en O_1 debe pasar por los extremos de la pupila de entrada (de diámetro D) y por los extremos de la mancha tolerable sobre el objeto. Los triángulos con vértice en O_1 y bases D y C/β' son semejantes, luego:

$$\frac{C}{\beta' D} = \frac{s_1 - s}{s_1} \quad (4A.6)$$

Dividiendo por s y sustituyendo $\beta' = s'/s$, se obtiene

$$\frac{1}{s_1} = \frac{1}{s} - \frac{C}{D s'} \quad (4A.7)$$

De forma similar se determina la posición de O_2 , dado por la distancia s_2 , como:

$$\frac{1}{s_2} = \frac{1}{s} + \frac{C}{D s'} \quad (4A.8)$$

Para objeto en el infinito, $s = \infty$, $s' = f'$, y se obtiene una distancia al punto de enfoque próximo llamada distancia hiperfocal, s_H , cuyo valor es

$$s_H = -\frac{D}{C} f' = -\frac{f'^2}{N C} \quad (4A.9)$$

expresada en función de número de diafragma $N = f'/D$.

La distancia hiperfocal determina el punto próximo de enfoque cuando la película está en el foco imagen y, por tanto, se supone objeto en el infinito. Se dice por eso que la distancia hiperfocal es el comienzo del infinito de la cámara fotográfica. En cámaras que trabajan con pequeñas focales y aberturas la distancia hiperfocal puede ser de pocos metros, por lo que puede prescindirse del mecanismo de enfoque, con la consiguiente reducción del precio. Estas cámaras se denominan de foco fijo y están ampliamente extendidas por el mercado.

Puede suponerse en las ecuaciones (4A.7) y (4A.8) que s' es aproximadamente igual a la focal f' , con lo que se obtienen expresiones sencillas que dan las posiciones de los puntos de enfoque próximo y lejano en función de la distancia hiperfocal

$$\frac{1}{s_1} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s_H} \quad (4A.10)$$

$$\frac{1}{s_2} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s_H} \quad (4A.11)$$

Obsérvese que si se enfoca la cámara al punto hiperfocal ($s = s_H$), el punto próximo de enfoque es $s_1 = s_H/2$, mientras que el punto lejano es infinito. Esta propiedad se aprovecha en las cámaras de foco fijo para aumentar la profundidad de campo.

Tal como la hemos definido, la distancia hiperfocal es una cantidad negativa, según las normas de signos aplicadas. Sin embargo, suele utilizarse en muchos textos divulgativos de fotografía como una cantidad positiva, quitando el signo menos de (4A.9). En este caso se toman las distancias s , s_1 , s_2 y s_H como positivas para aplicar las relaciones (4A.10) y (4A.11), sin olvidar su significado. Si el valor obtenido de s_2 es de distinto signo que s y s_1 , el punto de enfoque lejano es el infinito, ya que no tienen sentido puntos objeto situados detrás de la cámara.

4A.4. Iluminancia de la imagen.

Sea un objeto O de luminancia L . La iluminancia en la imagen O' formada por un objetivo simétrico es (2.50):

$$E = \tau \frac{\pi L}{4N^2 (1 - \beta')^2} \quad (4A.12)$$

donde τ es la transmitancia del objetivo, L la luminancia del objeto, N el número de diafragma y β' el aumento lateral entre los elementos conjugados O y O' . En el caso de objetos suficientemente alejados del objetivo el aumento es muy pequeño ($\beta' \approx 0$) y la ecuación (10.2) se puede aproximar por:

$$E = \tau \frac{\pi L}{4N^2} \quad (4A.13)$$

La magnitud que mide la cantidad de luz recibida por el material fotosensible es la exposición H , que se define como $H = E \times t$, donde E es la iluminancia de la imagen y t el tiempo de exposición (también llamado velocidad). De modo que:

$$H = \tau \frac{\pi L}{4N^2} t \quad (4A.14)$$

Si queremos doblar la exposición, podemos hacerlo doblando el tiempo de exposición. La mayoría de las cámaras presentan en el dispositivo controlador de la velocidad una secuencia de números semejante a ésta: 1.000; 500; 250; 60; 30; 15; 8; 4; 2; 1, que representan los diferentes tiempos, en fracciones de segundo, durante los que puede exponerse el material fotosensible cuando se abre el obturador. También podemos hacerlo doblando el área de la pupila de entrada, lo que equivale a reducir el número de diafragma N en un factor $\sqrt{2}$. Por esta razón, en el anillo de diafragmas del objetivo aparece grabada una secuencia de números N de la forma 22; 16; 11; 8; 5.6; 4; 2.8; 2; 1.4, que se relacionan entre ellos por el factor $\sqrt{2}$.

4A.5. La matriz CCD y la resolución de la cámara.

La base de las cámaras digitales es una matriz de detectores cuadrados. La principal dificultad no es disponer de un conjunto de detectores sensibles a la luz visible, sino la lectura secuenciada de las señales. El nombre CCD (Charge Coupled Device: dispositivo de acoplamiento de carga) proviene del sistema de lectura de las señales.

Cuando un detector recibe luz, se produce una cierta carga eléctrica en el propio detector. En el sistema CCD, cuando se aplica un cierto potencial eléctrico, cada detector transfiere su carga al detector situado al lado, de manera que la salida da una señal secuenciada de las cargas eléctricas correspondientes a cada detector de la línea. Es lo que se denomina un barrido electrónico por líneas. La reproducción de color se consigue con microfiltros de color superpuestos a los píxeles correspondientes.

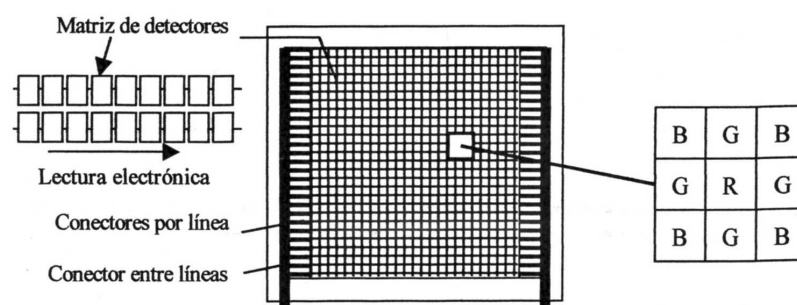


Fig. 4A.9

La resolución de las cámaras CCD se expresa en Megapíxeles. Los dispositivos CCD se utilizan en cámaras fotográficas con memoria digital para almacenar las fotografías que se pueden procesar posteriormente en un ordenador, al cual se trasladan los datos mediante una conexión apropiada. La resolución viene determinada por el tamaño del píxel, que se denomina *pitch*, que corresponde a la distancia entre centros de dos sensores. Los tamaños más habituales corresponden a un pitch de 7 a 20 μm . Teniendo en cuenta que las barras de Foucault se verán resueltas cuando cada par de líneas cae en dos sensores adyacentes, la frecuencia máxima resoluble corresponde al doble del pitch. A efectos del cálculo de la profundidad de campo, se suele tomar un valor del diámetro del círculo de confusión de 20 a 30 μm .

4A.6. Tipos de objetivos fotográficos.

Los objetivos fotográficos son sistema ópticos complejos que operan con luz blanca y, en general, su apertura suele ser grande con el fin de que los tiempos de exposición puedan ser reducidos. Si queremos formar imágenes de óptima calidad, necesitan estar bien corregidos de todas las aberraciones de apertura, campo y cromáticas, siendo este requisito muy importante en el caso de la fotografía científica, aunque en los objetivos para retrato puede permitirse una aberración esférica residual con el fin de suavizar la imagen.

Actualmente, se tiende a formatos más pequeños con focales más cortas y cámaras más manejables. La reducción de la focal aumenta el ángulo bajo el que se ve el grano, facilitando la corrección de aberraciones. Para objetivos con focal normal, el campo es de unos 50° con aberturas de 1:2 o mayores. Cuando se desean grandes campos (grandes angulares) o grandes focales (teleobjetivos) se renuncia a la consecución de grandes aberturas.

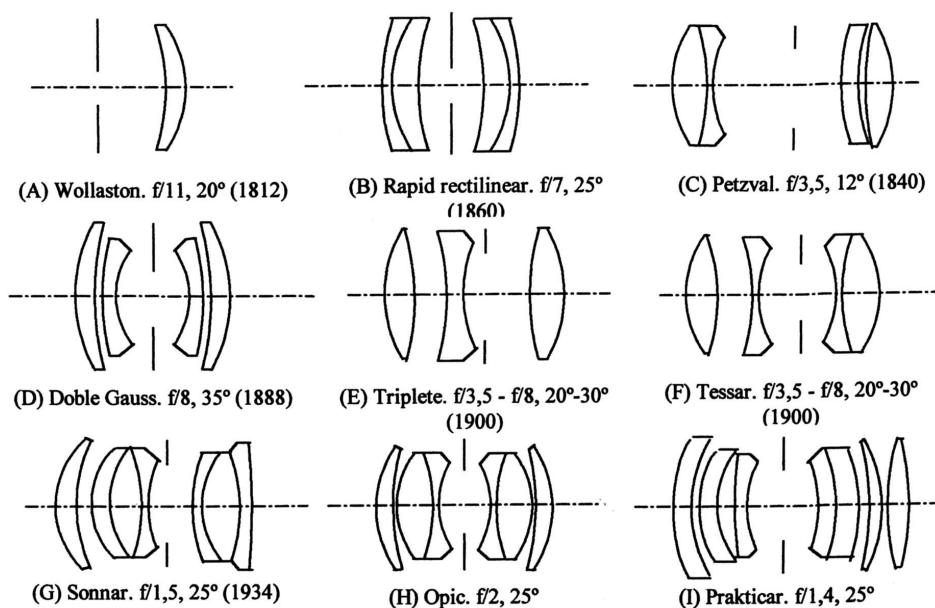


Fig. 4A.10

La figura 4A.10 recoge los diseños más usuales en los objetivos fotográficos normales, indicando el número de diafragma máximo y el semicampo. Se incluyen diseños sencillos como el menisco de Wollaston, el Rapid Rectilinear de Steinheil y Dallmeyer y el objetivo de Petzval, apropiado para grandes aberturas. El doble Gauss apareció gracias al descubrimiento de nuevos tipos de vidrios. Tanto el triplete de Taylor como el Tessar de Rudolph abandonan el formato simétrico consiguiendo formatos apropiados para una gran variedad de aperturas y campos. El Sonnar de Zeiss fue muy utilizado antes del descubrimiento de las láminas antirreflejantes por presentar solo 6 superficies aire-vidrio.

En la actualidad, la introducción del ordenador como herramienta de cálculo en el diseño de objetivos ha permitido mejorar los sistemas ópticos primitivos, utilizándose muchos derivados del triplete o de los objetivos simétricos por desdoblamiento de las lentes frontales para lograr grandes campos y aberturas. Por ejemplo, el Opic y el Prakticar y diseños similares suelen encontrarse en los catálogos de material fotográfico.

El gran angular. Los grandes angulares, como los recogidos en la figura 4A.11, se caracterizan por los meniscos de gran curvatura en la frontal y parte posterior del objetivo. Cuando se trabaja con grandes campos, aparece el problema de la disminución de luz hacia los bordes de la imagen, efecto que se agrava por la deformación de la pupila de entrada, que se ve como una elipse para rayos inclinados. Además la distorsión es muy difícil de corregir para grandes campos. Por ejemplo, el Aviogon de la figura 4A.11 es un objetivo para fotografía aérea que requiere muchas lentes para lograr una imagen sin distorsión, dada su finalidad. Para campos excesivamente grandes es imposible corregir la distorsión en barril, típica de los objetivos denominados en ojo de pez.

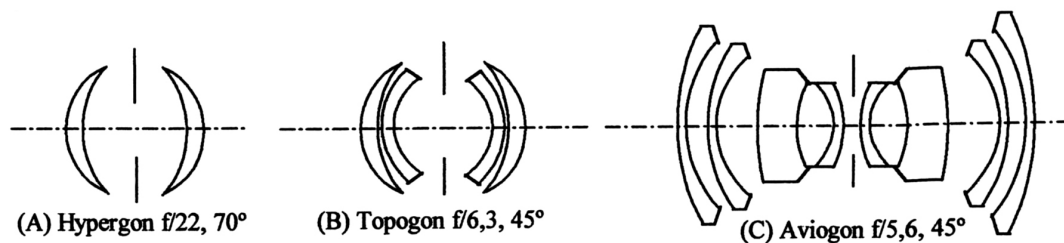


Fig. 4A.11

El teleobjetivo. En los objetivos de gran focal se utiliza el denominado diseño de teleobjetivo, fig. 4A.12(B), en el que hay una lente o grupo de lentes convergente, con una separación apreciable de un segundo grupo de lentes divergente. Como puede observarse en la figura 4A.12(A), el plano principal imagen está por delante del instrumento, resultando el sistema más corto que su focal, lo que supone una gran ventaja en sistemas voluminosos.

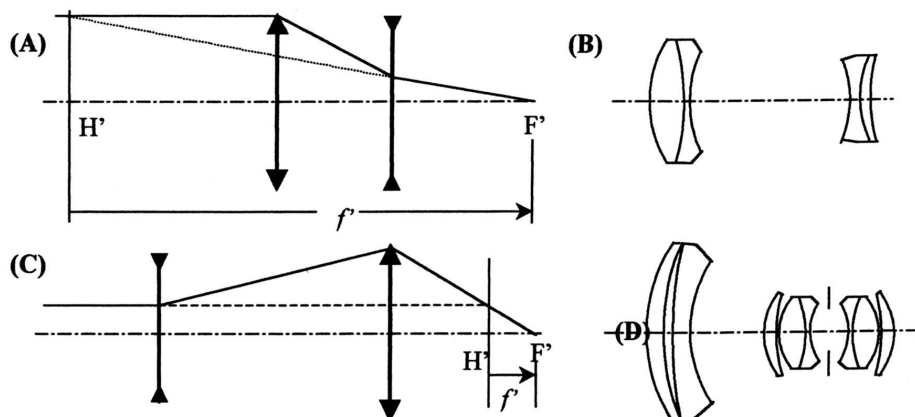


Fig. 4A.12

Cuando se desea tener un objetivo de pequeña focal adaptado a una cámara reflex, se presenta el problema de que la distancia de la última lente al plano focal debe permitir la inserción del espejo abatible de la cámara. Puede entonces recurrirse al formato de teleobjetivo invertido de la figura 4A.12(C). El efecto es contrario al del teleobjetivo, consiguiéndose una distancia mayor que la focal, ya que el plano principal imagen H' está situado detrás de la última lente. La segunda lente o grupo de lentes (convergente) hace de diafragma de abertura, mientras que el primer grupo de lentes (divergente) debe tener un gran diámetro para admitir los rayos fuertemente inclinados sin viñeteo. En ocasiones, se disponen lentes divergentes antepuestas a un objetivo normal que producen el efecto de teleobjetivo invertido, aumentando el campo del conjunto. Se denominan lentes reductoras de focal, de las que un ejemplo se ve en la figura 4A.12(D).

El zoom. Se denominan objetivos de focal variable, pancráticos o zoom a aquellos en los que se varía de un modo continuo el valor de la focal mediante un dispositivo mecánico, manteniendo la imagen enfocada en el plano de la película, es decir, sin variar la posición del foco imagen. El efecto aparente del accionamiento de un objetivo zoom es el de acercar y alejar la imagen que se ve a través de la cámara, pudiendo obtenerse diferentes encuadres sin cambiar de objetivo. Hay dos tipos de objetivos zoom (Fig. 4A.13):

- De *compensación óptica* (A), en los que las lentes se desplazan solidarias entre si, compensando sus contribuciones a la focal total mediante una cuidadosa distribución de potencias.
- De *compensación mecánica* (B), donde cada lente realiza un movimiento independiente del ejecutado por otras lentes móviles. Este tipo de zoom requiere mayor complicación mecánica, pues cada lente debe seguir una ley de movimiento obtenida al imponer la condición de zoom.

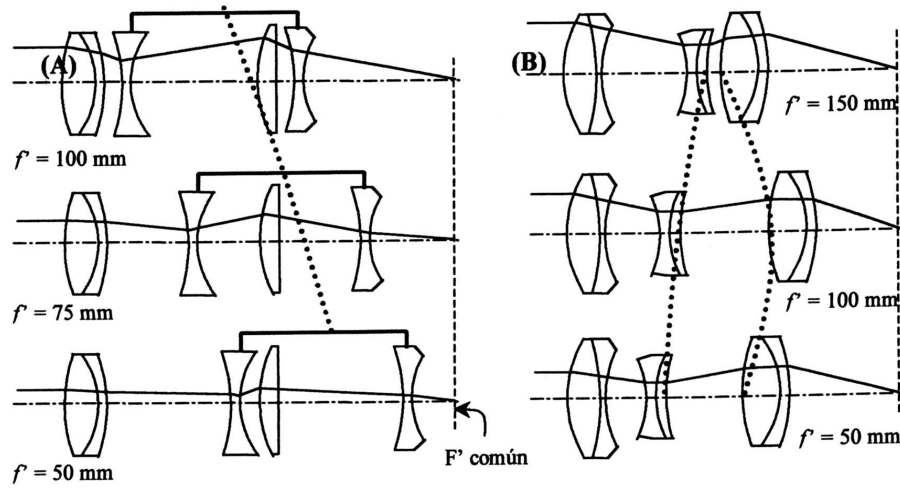


Fig. 4A. 13

Estos objetivos se caracterizan por la relación o factor de zoom, que es la variación máxima de la focal. En cualquier caso no alcanza una gran abertura, pudiendo variar ésta con la focal elegida.

TEMA 4B. SISTEMAS DE PROYECCIÓN

4B.1. Elementos y tipos.

Si se sitúa un punto objeto próximo al foco objeto de un sistema óptico convergente, se obtiene una imagen real, invertida y mucho mayor que el objeto, siempre que el objeto esté más alejado del sistema óptico que el foco objeto. La imagen así formada puede recogerse sobre una pantalla, que debe situarse sobre el plano imagen. El hecho de que la imagen aparezca invertida se resuelve girando el objeto 180° respecto a su posición derecha, con lo que se compensa la inversión. El sistema así utilizado se denomina *proyector* o *sistema de proyección*.

Objetivo. Es el sistema óptico cuya función es la de proyectar la imagen del objeto sobre la pantalla. Puesto que, en general, el sistema óptico trabaja con un aumento lateral grande, la pantalla debe estar alejada del proyector y además, el objeto requerirá una iluminación uniforme e intensa.

Sistema de iluminación. En la figura 4B.1 se muestra un sistema de proyección con un sistema de iluminación simple y deficiente. La lente objetivo además de proyectar la imagen del objeto O , proyectará sobre la pantalla, con cierto grado de desenfoque, la imagen del filamento de la fuente de luz que ilumina el objeto. Esta superposición hace que la iluminación del plano imagen no sea uniforme. Para evitar este efecto se deben diseñar sistemas de iluminación más complejos.

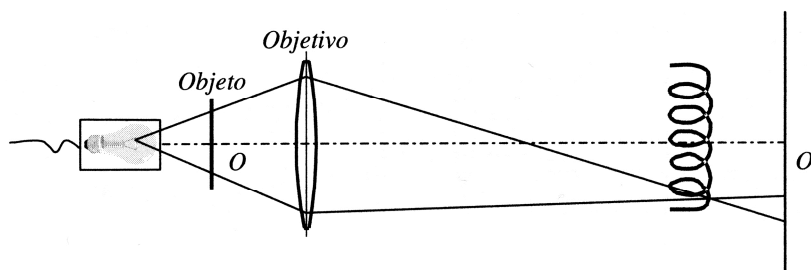


Fig. 4B.1

Por otro lado, en los sistemas de proyección se debe iluminar el objeto para conseguir que la imagen aparezca suficientemente luminosa. Si simplemente se sitúa una fuente de luz en las proximidades del objeto, se pierde gran parte de la radiación emitida por la fuente de luz. Para aumentar la eficiencia de la iluminación sobre el objeto, se debe utilizar un condensador, que es un sistema óptico situado entre la fuente de luz y el objeto, y cuya finalidad es concentrar sobre el objeto la luz que produce la fuente luminosa. El sistema de iluminación que proporciona un haz de luz intenso y uniforme, está constituido por una fuente de luz FL y un condensador de dos lentes LC_1 y LC_2 (fig. 4B.2).

El condensador dirige el haz de luz sobre el objeto a proyectar para iluminarlo intensamente. Con el fin de aprovechar el flujo luminoso que emite la fuente de luz en la dirección contraria a la de proyección, se sitúa un espejo esférico E cuyo centro coincide con la posición de la fuente de luz. Entre las lentes del condensador conviene intercalar filtros de absorción de calor o filtros fríos F que sólo transmiten en el rango visible.

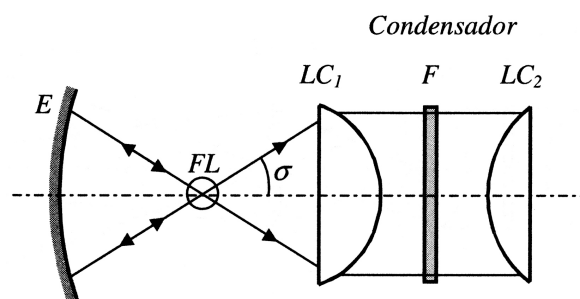


Fig. 4B.2

Pantalla. Las pantallas suelen ser de tejido blanco difusor, pintadas de un blanco especial. A veces, para poder aumentar su poder reflejante, se les cubre de una capa de pintura metalizada, o de una capa de pintura con pequeñas esferas de vidrio (pantalla perlada). Las esferas se caracterizan por su retrorreflexión, así se refleja más luz en dirección normal, alejándose de la ley de Lambert de los difusores perfectos.



Fig. 4B. 3

Clasificación de sistemas de proyección. Se distinguen varias clases según el tipo de objeto:

- *Diascopios*: proyectan objetos transparentes, atravesados por la luz de iluminación.
- *Episcopios*: proyectan objetos opacos, que reflejan la luz del sistema de iluminación.
- *Epidiascopios*: permiten la proyección de objetos opacos o transparentes.

Además según el movimiento del objeto se diferencian:

- *Proyectores de vistas fijas*: el objeto permanece fijo
- *Proyectores cinematográficos*: proyectan objetos en sucesión para simular movimiento.

Los llamados proyectores *anamórficos*, aquellos en los que el objeto sufre una deformación longitudinal o transversal, producida por lentes cilíndricas o prismas. Por ejemplo en el cinemascopio se aumenta la anchura de la pantalla en relación a su altura utilizando una película normal, lo que se consigue comprimiendo lateralmente la imagen al grabarla. En la reproducción compensa la deformación mediante un proyector anamórfico adecuado.

4B.2. Sistemas de iluminación.

En general existen dos tipos de sistemas de iluminación: el sistema de iluminación crítica y el sistema de iluminación Köhler.

(1) *Sistema de iluminación crítica.* Si se dispone de una fuente de luz homogénea y extensa, puede utilizarse el denominado sistema de iluminación crítica, que se describe en la fig. 4B.4. El condensador forma la imagen de la fuente de luz directamente sobre el objeto y, por lo tanto, el objetivo proyectará en el mismo plano de la pantalla, las imágenes del objeto y de la fuente de luz.

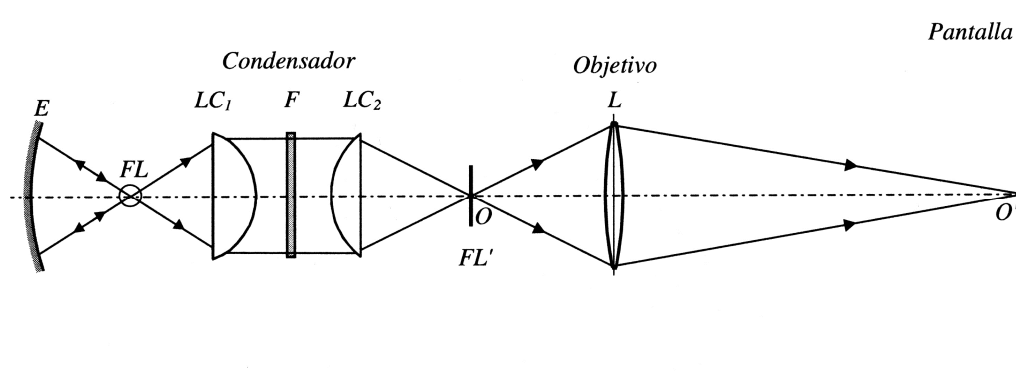


Fig. 4B.4

Para conseguir una iluminación uniforme del objeto la fuente debe ser muy intensa y uniforme y el formato de la transparencia a proyectar debe ser pequeño. Las fuentes de luz más usadas son los arcos de carbón o de Xenon, que cumplen la condición de extensión y homogeneidad, aunque requieren un gran consumo de energía eléctrica. El objetivo de proyección debe tener gran abertura para recoger la mayor cantidad posible de luz emitida por la fuente.

Además, es conveniente que el objeto a proyectar sea una secuencia de transparencias en movimiento, ya que la concentración de energía en el plano objeto podría quemarlas o deteriorarlas. Este sistema ha sido tradicionalmente propio de los proyectores cinematográficos, ya que se requiere un gran aumento en la proyección por usarse pantallas de gran tamaño, y el uso de potentes fuentes de luz.

(2) *Sistema de iluminación Köhler.* El sistema de iluminación crítica no es apropiado en los proyectores portátiles, pues las fuentes de arco tienen un consumo excesivo. El sistema de iluminación de Köhler permite el uso de fuentes de luz de cualquier tipo, incluso lámparas de filamento. La característica fundamental de este sistema de iluminación es que el condensador forma la imagen de la fuente de luz sobre el objetivo, evitando, de este modo, la imagen de la fuente de luz sobre la pantalla (fig. 4B.5). La transparencia a proyectar *O* se sitúa cerca del condensador de modo que es iluminada uniformemente y a la distancia apropiada del objetivo para conseguir el aumento deseado. Para evitar que la imagen final proyectada contenga posibles defectos de la superficie de la lente *LC2* no conviene que el objeto esté en contacto con el condensador. En general

este sistema es utilizado comúnmente en proyectores de vistas fijas (proyectores de diapositivas y de transparencias) y ampliadoras fotográficas, consiguiendo una iluminación bastante uniforme aunque la fuente de luz no lo sea. Para que la imagen se vea correctamente, basta con colocar la diapositiva invertida, no siendo preciso un sistema inversor de imagen.

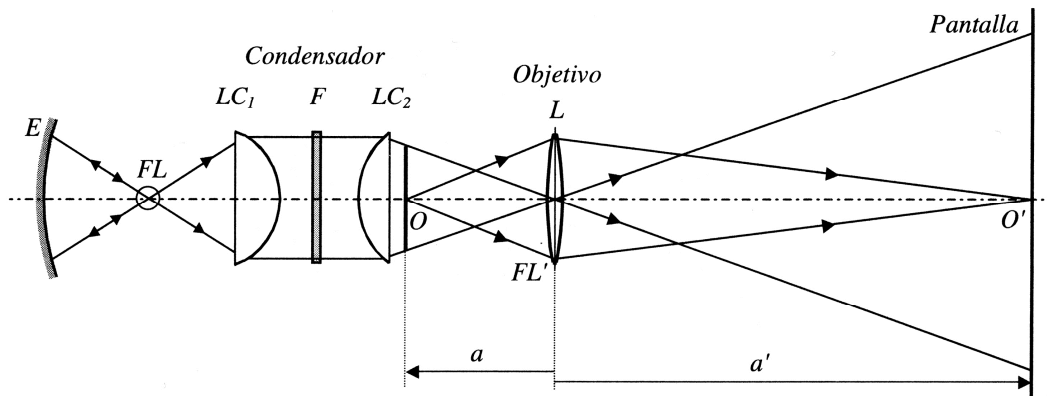


Fig. 4B.5

Las normas internacionales establecen que la luminancia de la pantalla sin diapositiva debe ser al menos de 15 nt (cd/m^2), luego la distancia de proyección estará limitada por la intensidad emitida por la fuente de luz. Algunos proyectores de diapositivas disponen de un sistema zoom para cambiar la focal del proyector. Con ello se consigue controlar el tamaño de la imagen sin cambiar la distancia de proyección, dentro de ciertos límites.

4B.3. Luminancia de la imagen proyectada.

Como la luz que procede de una pequeña área del objeto debe repartirse en un área grande de la imagen, la luminancia de la imagen es mucho menor que la del objeto. La iluminancia en la imagen, E' , se puede calcular en función de la luminancia del objeto, L , según

$$E' = \pi \tau L \sin^2 \sigma', \quad (4B.1)$$

donde τ es el factor de transmisión entre objeto e imagen, y σ' el ángulo de abertura imagen. Cuando el aumento pupilar es la unidad, puede expresarse esta relación de otra forma, deducida previamente, que suele ser más útil en la práctica,

$$E' = \frac{\pi \tau L f'^2}{4 N^2 s'^2}, \quad (4B.2)$$

donde f' es la focal imagen del sistema óptico, N es el número de diafragma utilizado y s' es la distancia del proyector a la imagen. Una vez conocida la iluminancia que recibe la pantalla, si ésta es un difusor perfecto, se puede calcular la luminancia que presenta la imagen utilizando la relación

$$L' = \frac{\rho}{\pi} E', \quad (4B.3)$$

donde L' es la luminancia de la imagen, ρ es la reflectancia de la pantalla y E' es la iluminancia que recibe la pantalla. En las pantallas perladas, se refleja más luz en dirección normal, a expensas de la luz difundida con mayores ángulos, por lo que la luminancia de la pantalla varía con el ángulo bajo el que se ve, y en dirección normal puede alcanzarse una luminancia mayor que la indicada por (4B.3).

4B.4. El proyector de transparencias.

En la fig. 4B.6 se expone de forma esquemática el proyector de transparencias o retroproyector. El sistema de iluminación es de tipo Köhler, estando el condensador formado por una lente de Fresnel. El espejo plano E desvía la trayectoria de los rayos de luz de forma que la posición de la imagen se adapta a las posiciones relativas del orador y de su público.

En los proyectores de objetos grandes, como transparencias o planos, se utilizan para el condensador las llamadas lentes de Fresnel, moldeadas en plástico, que cumplen la función de una lente más pesada y con mayor grosor, tal como se ve en la Fig. 4B.6. La superficie de la lente de Fresnel son escalones de unas décimas de milímetro, manteniendo la curvatura de la superficie entre los escalones (Fig. 4B.7). De esta forma, los rayos luminosos encuentran en la lente de Fresnel la misma curvatura de la superficie que en la lente más gruesa, por lo que se mantiene la desviación introducida. El objeto se suele situar directamente sobre la cara plana de la lente.

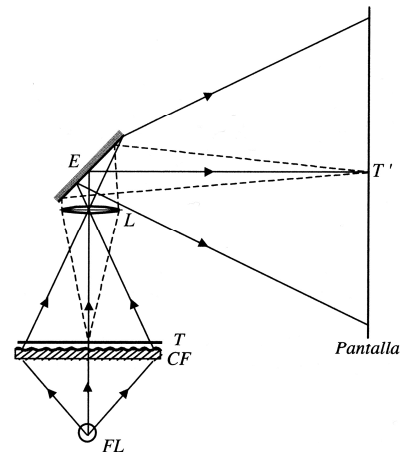


Fig. 4B.6

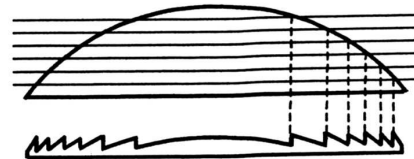


Fig. 4B.7

El proyector de transparencias se denomina también retroproyector debido a que se usa para proyectar a la espalda del conferenciante. Éste ve el objeto en la misma dirección que el público verá la imagen proyectada en la pantalla.

4B.5. El proyector de optotipos.

La refracción subjetiva es la determinación de la ametropía de un sujeto y la mejor alternativa de corrección, basándose en las respuestas del sujeto a una serie de pruebas visuales o test. Existen varias formas de presentar las pruebas: (1) carta de optotipos o póster; (2) pantalla traslúcida iluminada por detrás; (3) proyector de optotipos; (4) colimador de optotipos y (5) presentación en pantalla controlada por ordenador.

Todos ellos se utilizan en la actualidad, aunque el proyector es el más extendido en los gabinetes de optometría, por las ventajas que presenta en cuanto al número de pruebas que se pueden realizar en relación a su precio.

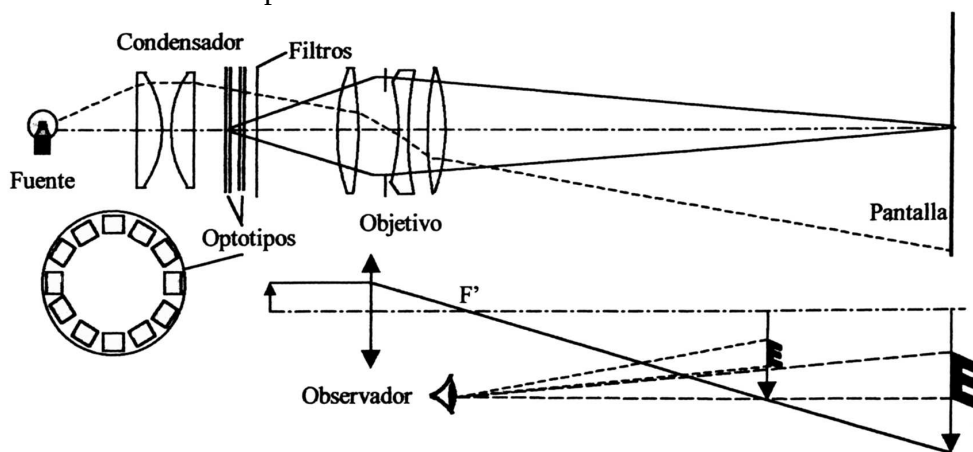


Fig. 4B.8

La figura 4B.8 representa un proyector de optotipos típico, con sistema de iluminación de Köhler. Suele tener ruedas giratorias con dispositivos de optotipos, junto con filtros de color y polarizadores. En la misma figura se observa la ventaja principal del proyector de optotipos: si se cambia la distancia de proyección, el tamaño de la imagen crece en la misma proporción, de manera que se mantiene el ángulo que subtiende desde el observador, si éste se encuentra en las proximidades del foco imagen del proyector.

Se aconseja que la distancia de proyección sea de 5 metros, que equivale a un esfuerzo acomodaticio de 0.2 D que coincide con el retraso acomodativo mínimo que se obtiene al suponer máxima agudeza visual y mínimo diámetro pupilar, por lo que no entra en juego la acomodación. Dicho de otra forma, se considera que el ojo no acomodado es capaz de ver un objeto situado a 5 m de distancia sin cambiar su estado acomodativo.

TEMA 4C. LUPAS Y OCULARES.

Con la lupa comenzamos el estudio de los instrumentos subjetivos o de visión directa, en los que el ojo mira directamente la imagen proporcionada por el instrumento. La lupa consiste en un sistema óptico convergente que se utiliza para aumentar el tamaño aparente de los objetos pequeños y accesibles, proporcionando al ojo una imagen virtual y directa que se ve bajo mayor ángulo que se vería el objeto sin la ayuda de la lente.

Las lupas facilitan el trabajo de cerca lo cual, para una persona con visión normal puede ser necesario en muy pocas ocasiones; sin embargo, para quienes tienen dificultades para la visión cercana, como los presbíteros fuertes y personas con baja visión, la lupa puede ser un instrumento imprescindible para mantener su capacidad de lectura y realización de trabajos en visión cercana y, de hecho, la lupa entra dentro del grupo de instrumentos denominados *ayudas visuales* para sujetos con baja visión. Por otra parte, las lupas y los resultados obtenidos facilitan el estudio de instrumentos más complicados, como el microscopio.

Los oculares son elementos ópticos que forman parte de otros instrumentos que veremos más adelante. En lo fundamental se consideran como lupas, que trabajan con un objeto que es a su vez la imagen dada por otro sistema óptico previo.

4C.1. Aumento visual.

Cuando se sitúa un objeto ante una lente convergente, entre su foco objeto y la lente, ésta da una imagen virtual y derecha que el observador puede ver mirando a través de la lente. Supongamos un sistema óptico convergente de focal f' como en la fig. 4C.1. En un punto O situamos un objeto de tamaño y , de manera que se forma una imagen virtual en O' , de tamaño y' . Si se sitúa el objeto entre el foco F y el vértice V de la lente (fig. 4C.1a), la imagen formada es virtual, derecha y de tamaño mayor que el objeto.

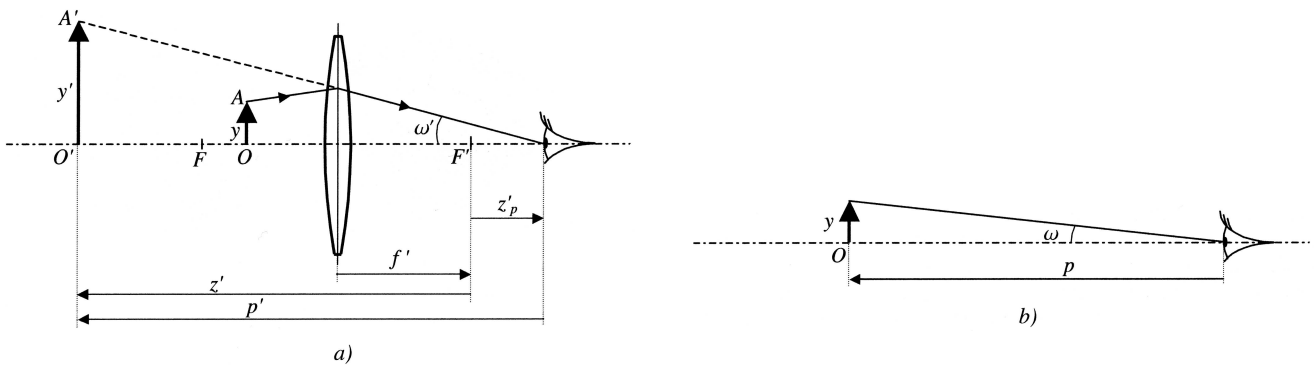


Fig. 4C.1

Se definió el aumento visual, Γ' , como la razón entre las tangentes de dos ángulos ω' y ω , donde el ángulo ω' es el ángulo que subtiende la imagen observada a través del instrumento y el ángulo ω es el que subtiende el objeto cuando es observado directamente por el ojo sin instrumento. A partir de la figura 4C.1 se pueden establecer las relaciones

$$\tan \omega' = \frac{y'}{p'}; \quad \tan \omega = \frac{y}{p}; \quad z' = p' + z'_p, \quad (4C.1)$$

donde p es la distancia del ojo al punto próximo, p' es la distancia del ojo del observador a la imagen O' , z'_p es la distancia de F' al ojo y f' es la distancia focal de la lupa. Estas relaciones, conjuntamente con el aumento lateral $\beta' = y'/y = -z'/f'$ y (3.1) permiten obtener

$$\Gamma' = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{p}{f'} \left[1 + \frac{z'_p}{p'} \right] \quad (4C.2)$$

El aumento visual de la lupa depende de las condiciones de observación. Existen dos situaciones particulares a tener en cuenta; cuando $p' = \infty$ (imagen en el infinito) y $z'_p = 0$ (ojo del observador en el punto focal imagen. En ambos casos (4C.2) se simplifica y toma la forma

$$\Gamma' = -\frac{p}{f'} \quad (4C.3)$$

Vamos a ver con un poco más de detalle estas dos situaciones.

Imagen situada en el infinito ($p' = \infty$). En este caso el objeto está situado en el foco objeto de la lente y todos los rayos emitidos por un mismo punto del objeto emergen paralelos entre sí (fig. 10.14). Para un ojo emétrope esta disposición presenta diversas ventajas: el ojo no acomoda, lo que permite largos periodos de observación sin fatiga y además, el ángulo ω' (y por tanto el tamaño aparente de la imagen) no varía cuando el ojo se desplaza a lo largo del eje óptico.

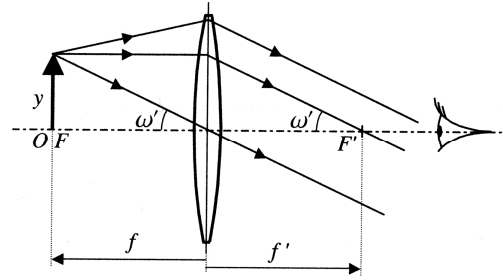


Fig. 4C.2

Ojo del observador situado en el foco imagen de la lupa ($z'_p = 0$). En este caso, cuando el objeto O se desplaza a lo largo del eje óptico entre los límites O_1 y O_2 , correspondientes a los conjugados objetos de O_R y O_P (fig. 10.15), el ángulo aparente ω' se mantiene constante.

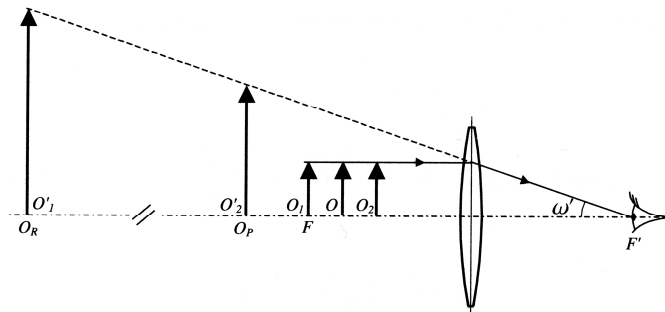


Fig. 4C.3

Esta configuración es ventajosa, por ejemplo, para un relojero o un naturalista. Previa acomodación, podrán ver siempre con el mismo aumento visual los diferentes planos del objeto (engranaje de un reloj o partes de un insecto) situados entre O_1 y O_2 .

En los catálogos comerciales, la lupa viene caracterizada por el aumento comercial, que coincide con la ecuación (10.8) cuando la distancia al punto próximo se toma como $p = -250$ mm. En este caso:

$$\Gamma'_c = \frac{250}{f'} = \frac{\varphi'}{4}, \quad (4C.4)$$

en la que se debe expresar f' en mm y donde φ' es la potencia de la lente en dioptrías. En general los aumentos comerciales varían entre 2,5x ($f' = 100$ mm) y 25x ($f' = 10$ mm).

Cuando no se cumple alguna de las anteriores condiciones, el aumento visual podrá ser mayor o menor que el aumento comercial de la lente usada como lupa. Este resultado parece contradecir la experiencia de que cuanto más lejos está la lupa mayor es el aumento. El efecto se explica en la figura 4C.4. Lo que ocurre en realidad es que se mantiene el tamaño de la imagen, mientras que el objeto reduce su tamaño angular al alejarse, por lo que parece que la imagen es mayor, por comparación, lo cual se denomina *aumento aparente*.

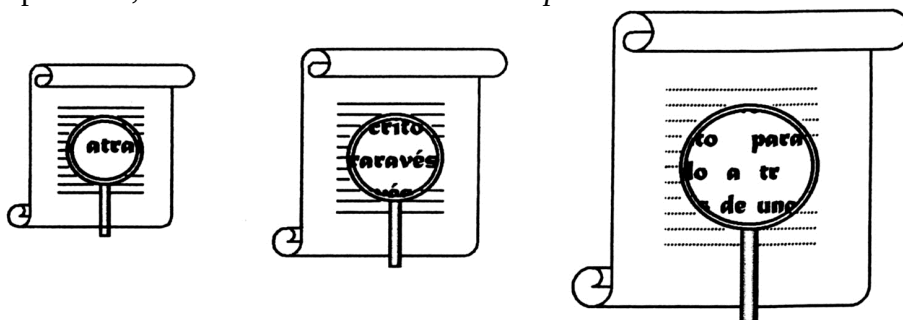


Fig. 4C.4

Se denomina *aumento máximo*, Γ_{max} aumento iso-acomodativo o también aumento del fabricante el valor del aumento visual que se obtiene cuando la imagen está en el punto de visión cómoda, y el ojo del observador se encuentra pegado a la lente. En estas condiciones, se debe cumplir que $z'_p = -f'$, y que $k' = -0,25\text{ m}$, por lo que sustituyendo en la ecuación (4C.4) queda:

$$\Gamma_{max} = \Gamma_N + 1 \quad (4C.5)$$

Muchos fabricantes prefieren especificar este valor del aumento, simplemente porque es mayor que el aumento comercial; el mismo motivo que para tomar una distancia al punto de visión cómoda de 300 mm o incluso de 400 mm, con lo que la misma lupa tiene aparentemente mayor aumento. Por este motivo, se debe comprobar los datos en los que se basa el fabricante para definir el aumento de sus lupas y evitar errores en una prescripción de estos instrumentos.

4C.2. Luminosidad, campo y poder separador.

Las lentes usadas habitualmente como lupas tienen mayor diámetro que la pupila del ojo del observador, por lo que ésta última es la que limita el haz de rayos que penetran en el ojo procedentes del centro del objeto. El ojo del observador es diafragma de apertura y pupila de salida, siendo la pupila de entrada la imagen del ojo a través de la lente. El ojo trabaja a plena apertura, con su pupila llena de luz. En esta situación, la luminancia de la imagen es prácticamente igual a la del objeto, por lo que la lupa es un instrumento muy luminoso.

El campo de la lupa se mide sobre el objeto en mm o cm y depende de las dimensiones de la lente, la distancia de observación y la posición del objeto. La lente hace de diafragma de campo, por lo que al aumentar el tamaño de la lente se aumenta el campo.

El campo de la lupa no está nítidamente delimitado, ya que se produce una caída de luminosidad hacia los bordes de la imagen, a causa del viñeteo en la montura. El cálculo de los campos de iluminación plena, media y límite se hace uniendo el extremo de la lucarna de salida (la propia lente) con el punto apropiado de la pupila de salida, resolviendo el problema geométrico, tal como se ve en las figuras 7.4.

En las lupas de gran aumento puede suceder que la lente tenga menor diámetro que la pupila del ojo del observador, haciendo aquella de diafragma de apertura y de pupila de entrada, mientras que el ojo es diafragma de campo. La luminosidad es menor que en el caso anterior, pues el ojo no trabaja a plena apertura. Este caso, sin embargo, carece de interés práctico, ya que para grandes aumentos se usa el microscopio.

Como la limitación de rayos se hace por el ojo del observador, no hay fenómenos de difracción en la lente que puedan limitar el poder separador del ojo en el centro de la imagen.

Si las aberraciones están suficientemente corregidas, el observador verá aumentado su poder separador en proporción al aumento de la lupa. Así, si suponemos que un observador es capaz de resolver 1 minuto de arco para un objeto en el punto de visión cómoda, con una lupa de 5 aumentos el mismo observador será capaz de resolver 1/5 de minuto sobre el objeto.

Se puede tener en cuenta que a 250 mm de distancia 1 minuto de arco equivale a un límite de resolución dado por $r = 250 \tan(1') = 0,073\text{ mm}$, lo cual supone una resolución de 14 líneas / mm, o un tamaño de letra de $5r = 0,364\text{ mm}$, aunque la resolución en visión próxima varía notablemente de un sujeto a otro, y para el mismo sujeto a lo largo de su vida, por depender de la acomodación que es capaz de poner en juego.

Para lupas de gran aumento, podrá intervenir la difracción en la limitación del poder separador, en cuyo caso se aplica la teoría del poder separador en el microscopio, estudiada posteriormente.

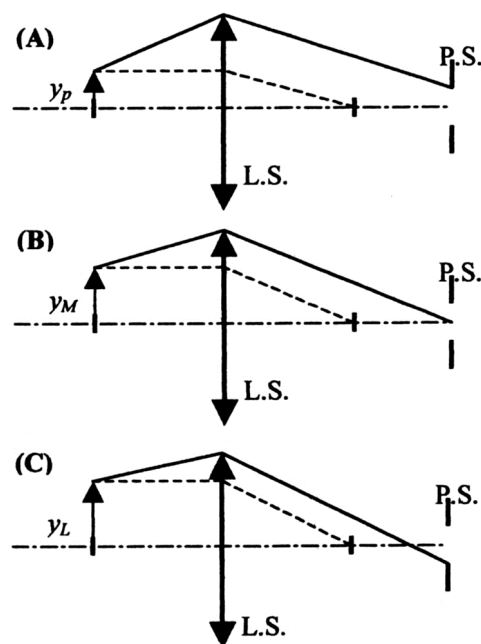


Fig. 4C.5

4C.3. Profundidad de campo.

Cuando se coloca un objeto en el foco de la lupa, la imagen aparece en el infinito, y un observador emétrope la verá nítida sin acomodación. Si desplazamos el objeto una pequeña distancia z , en dirección a la lente, la imagen estará a una distancia finita del ojo, y éste deberá acomodar para ver dicha imagen con nitidez. Conforme aumenta z en valor absoluto, la imagen se acerca al ojo, hasta que sobrepasa el punto próximo del observador, siendo éste incapaz de ver nítidamente dicha imagen.

La profundidad de campo (también denominada en este caso profundidad de enfoque) es la máxima distancia que puede desplazarse el objeto mientras la imagen correspondiente pueda ser enfocada por el observador. Si tenemos un objeto rugoso en el plano focal de la lupa, la profundidad de enfoque representa la máxima altura de las rugosidades que será admisible por el ojo.

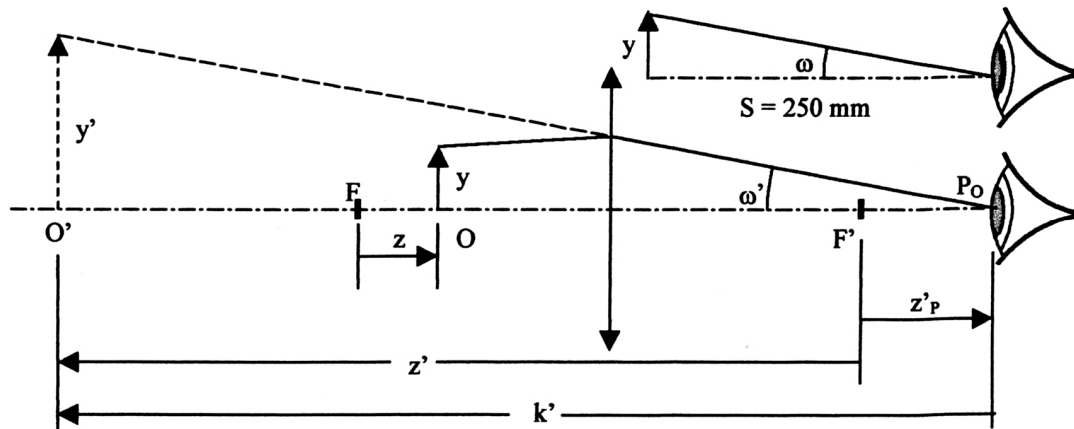


Fig. 4C.6

Podemos estudiar cuantitativamente el valor de la profundidad de enfoque utilizando la figura 4C.6. Vamos a tomar como distancia mínima del ojo a la imagen el valor de -250 mm, correspondiente al punto de visión cómoda. Evidentemente, se podría enfocar a un punto más próximo al ojo, dependiendo de la capacidad de acomodación del sujeto; pero para ello se requeriría un cierto esfuerzo, que no es conveniente suponer cuando se utiliza un instrumento para la observación durante largo tiempo, como puede ser el caso de la lupa. Tomaremos, por tanto, el valor mínimo de la distancia a la imagen como $k' = -250$ mm.

Además, vamos a suponer que la distancia z' es despreciable frente a la distancia del ojo a la imagen. Esta aproximación equivale a suponer el ojo del observador próximo al foco imagen de la lente, y será más o menos cierta según los casos. Por ejemplo, en las lupas de mesa usadas de forma habitual, la distancia de la lente al ojo es considerablemente mayor que la focal de la lente, y la aproximación anterior no sería cierta. En las lupas de relojeros o en aquellas usadas para leer escalas, el ojo se aproxima a la lente, estará en las proximidades del foco imagen, y se puede aplicar el resultado obtenido a continuación. Veremos posteriormente que en los microscopios se puede suponer cierta esta aproximación. Según las suposiciones indicadas, tomamos como distancia mínima del foco imagen a la imagen el valor

$$z'_{\min} = -250 \text{ mm} \quad (4C.6)$$

De la fórmula de Newton obtenemos la posición del objeto

$$z_{\max} = \frac{f'^2}{250} = \frac{250}{\Gamma_N^2} \quad (4C.7)$$

Cuando la lupa tiene un valor grande del aumento, la profundidad de foco se reduce a valores muy pequeños, y entonces debe usarse un soporte apropiado para la lupa, a fin de que la pulsación de la mano del sujeto no dificulte la visión. Se puede tener en cuenta la profundidad de campo del ojo, a través del retraso acomodativo. La relación 4C.5 permite cuantificar su influencia, si suponemos las mismas condiciones (ojo en F').

4C.4. Corrección de aberraciones y tipos más usuales de lupas.

En las lupas de poco aumento la focal es larga y la abertura pequeña, por lo que se atiende fundamentalmente a corregir las aberraciones de campo: coma, astigmatismo, y cromática de aumento. Las lupas de lectura de focal larga no se corrigen de aberraciones. Por el contrario, en lupas potentes de focal corta la abertura es grande y hay que corregir además la esférica y cromática longitudinal.

Las lupas de mano suelen ser lentes sencillas de gran diámetro como las de la (A). La lupa de Steinheil (B) es una lente convergente entre dos lentes divergentes. Las lupas de relojero tienen mayor aumento, y suelen ser del tipo de Fraunhofer o cuentahilos (C) o Wilson (D), variedad acromática de la anterior.

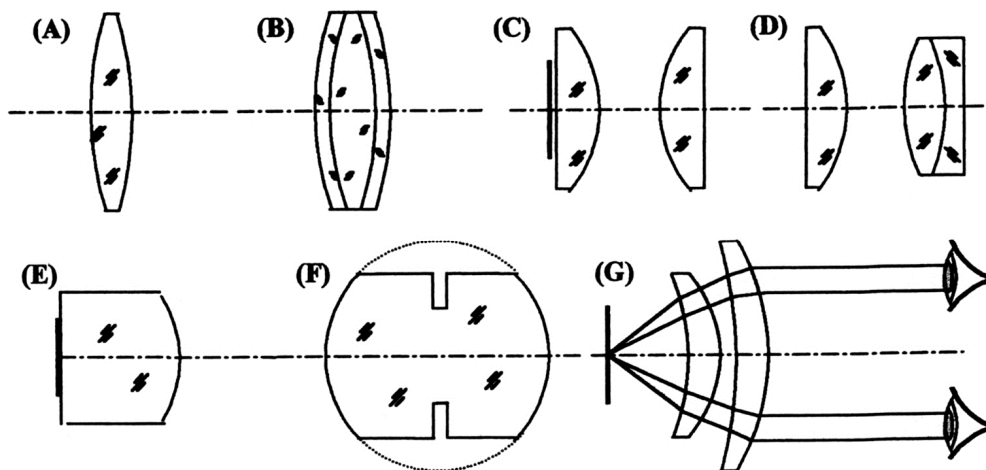


Fig. 4C.7

Una semiesfera de vidrio (E) en contacto con el objeto en su cara plana da excelente calidad de imagen, con un aumento igual al índice de refracción del vidrio. En la forma de una esfera diafragmada en su interior, se conoce con el nombre de lupa de Coddington (F). Las lupas bioculares permiten la observación con ambos ojos a la vez, aunque para obtener una buena calidad de imagen requieren una adecuada corrección de aberraciones, utilizándose en ocasiones superficies esféricas, necesarias sobre todo para eliminar la distorsión.

También se da el nombre de lupas a otras combinaciones con 20 aumentos o más, y que son propiamente microscopios de pequeño aumento. Se consideran también como lupas los espejos cóncavos, que proporcionan un cierto aumento y se usan como espejos de tocador.

4C.5. Oculares.

El ocular es el último componente de los instrumentos de visión de modo que el ojo se acopla directamente a él. El ocular actúa como una lupa aumentando el tamaño aparente de la imagen intermedia que proporciona el objetivo del instrumento. Sin embargo, hay grandes diferencias entre los oculares y las lupas, entre las que destacamos las tres siguientes:

- (1) En los oculares, los haces emergentes no están limitados por la pupila del ojo, sino por el objetivo. El diafragma de abertura está en el objetivo, y su imagen a través del ocular es el llamado círculo ocular. La pupila de salida coincide en posición con el círculo ocular, pero puede tener distinto diámetro cuando la pupila del ojo es más pequeño que el círculo ocular.
- (2) En los oculares no es preciso corregir completamente todas las aberraciones, pues algunas de ellas pueden compensarse con las del objetivo.
- (3) La distancia de una lupa al objeto debe ser suficientemente grande para permitir su manipulación y, en cualquier caso, el objeto debe ser real. En los oculares, el objeto es a su vez una imagen producida por un objetivo, luego no importa su posición respecto a las lentes del ocular, pudiendo ser incluso virtual, tal como veremos en el ocular de Huygens. Esta característica no será posible en caso de utilizar retículo.

Para comprender como funciona un ocular, debemos pensar que lo que se desea aumentar no es directamente un objeto real sino una imagen de él a través de un sistema óptico anterior. En tal caso podría utilizarse una lupa, pero una única lente podría no ser suficiente. En la figura 4C.8a) cada punto del objeto real emite rayos en todas direcciones, parte de los cuales pararán por la lente de aumento L_o . En 4C.8b) la imagen intermedia O_i formada por un sistema óptico anterior hace las veces de objeto respecto de L_o . Ahora bien el haz de rayos que pasa por cada punto de dicha imagen O_i está limitado por la PS del sistema óptico anterior. Puede ocurrir, por tanto, que los rayos que pasan por el extremo superior de O_i no alcancen a pasar por L_o . Los oculares tratan de resolver este problema. Para ello, además de la lente de aumento, L_o , incorporan una lente colectora auxiliar L_c (también conocida como *lente de campo*), cuya misión es la de capturar los rayos periféricos procedentes de O_i y desviarlos para que crucen L_o (fig. 4C.8c). Como lente de campo se emplea una lente convergente colocada en las proximidades de O_i , para que así no se altere el aumento del conjunto ni se vean aumentadas, junto con el objeto, las imperfecciones de la lente L_c . La focal de L_c se ajusta de tal modo que el ocular en su conjunto forme la imagen de la PS del sistema óptico anterior sobre la PE del ojo a fin de evitar viñeteos.

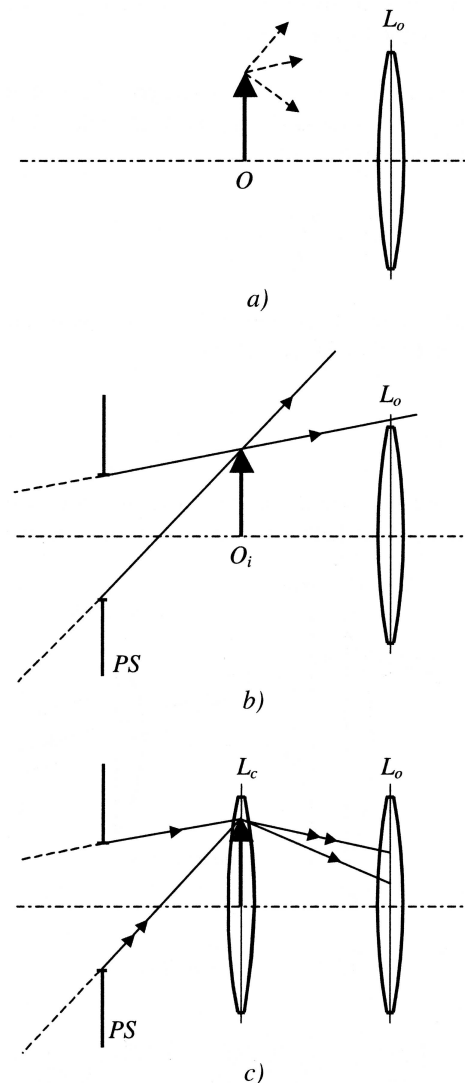


Fig. 4C. 8

Los oculares no se suelen corregir de todas las aberraciones, debido a su sencillez frente al gran número de condiciones que se les exigen de focal corta, emergencia de pupila y gran campo. La esférica y la cromática longitudinal se suelen compensar con las del objetivo. Las aberraciones que mejor se deben corregir son la cromática de aumento y el coma. Puede dejarse una curvatura de campo de hasta 4 dioptrías, siempre que la concavidad de la imagen mire hacia el ojo. La distorsión puede llegar al 6% y hasta al 8% sin que sea apreciada por el ojo, ayudando a ello la forma circular del campo observable. Al corregir el astigmatismo se tiene en cuenta que el ojo ve la mejor imagen en el foco sagital, que debe ser el mejor corregido.

Se denomina campo de nitidez al ángulo de campo aparente del ocular para el que las aberraciones quedan bien corregidas. El campo de nitidez es característico de cada tipo de ocular y es independiente del valor de su focal.

4C.4C. Acoplamiento del ocular y el ojo.

El acoplamiento entre un instrumento y el ojo del observador se realiza instintivamente: el observador acerca su ojo al ocular hasta que consigue ver la mejor imagen de la forma más cómoda posible, cosa que se consigue cuando la pupila del ojo del observador coincide con el círculo ocular del instrumento, que es la imagen del objetivo a través del propio ocular.

La emergencia pupilar debe ser suficientemente grande para permitir una observación cómoda, lo que supone un mínimo de 9 ó 10 mm de distancia desde la montura del ocular hasta el círculo ocular. Si se desea que un ocular pueda ser usado por un usuario de gafas sin quitarse éstas, se debe dejar una emergencia de pupila de 20 ó 25 mm.

Otro efecto a atender en cuenta es la aberración de pupila. Consiste en el desplazamiento de la posición de la pupila de salida con el campo a causa de la aberración esférica del ocular para las pupilas, que hace que los rayos principales para diferentes ángulos de campo corten al eje óptico en diferentes puntos (Fig. 4C.9). Cuando ocurre esto se producen sombras que tapas parte del campo observable, a poco que se mueva el ojo lateralmente, pues los haces de luz inclinados se pierden fácilmente.

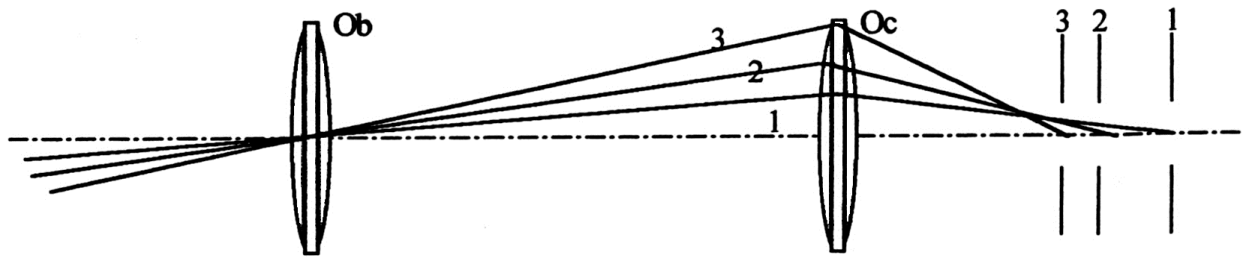


Fig. 4C.9

El tamaño del círculo ocular influye en la luminosidad de la imagen, como se vio en el tema 3. Cuando el círculo ocular es menor que la pupila del ojo, la imagen presenta menos luminancia que el objeto. Si el círculo ocular es mayor o igual que la pupila del ojo, la luminancia de la imagen es prácticamente la misma que la del objeto. En algunos instrumentos se encuentran pupilas de gran diámetro (hasta 10 ó 15 mm), no justificado por razones de luminosidad. El motivo es facilitar la observación gracias a la mayor flexibilidad de colocación de la pupila del ojo, que no perderá la imagen aunque se mueva lateralmente.

4C. 7. Oculares más usuales

Al comparar entre sí los formatos de los oculares más usuales hay que tener en cuenta dos datos fundamentales que son: el campo de nitidez y la emergencia de pupila de salida, que se suele dar en relación a la focal.

Ocular de Huygens. Está formado por dos lentes, L_c y L_o , generalmente planoconvexas, con la concavidad dirigida hacia el objetivo. Opera con objeto virtual (fig. 4C.10). El diafragma de campo y los posibles retículos para mediciones se sitúan dentro del sistema, en el plano de la imagen intermedia del ocular O'_i , quedando así protegidos de partículas de polvo y suciedad en general. El campo de nitidez es de unos 40° , con una emergencia de pupila de un tercio de la focal.

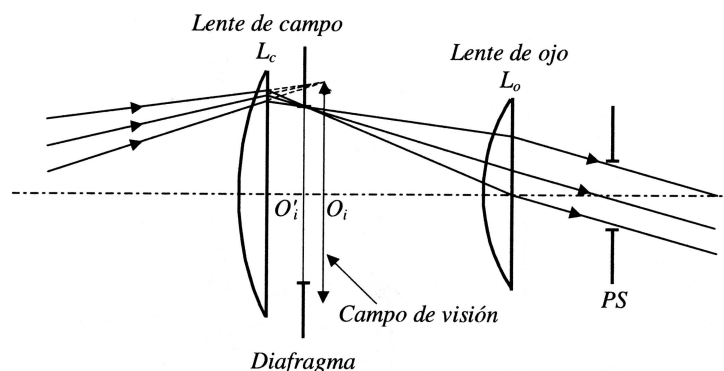


Fig. 4C.10

Ocular de Ramsden. Opera con objeto real (fig. 4C.11a). Está constituido por dos lentes plano convexas L_c y L_o , de igual distancia focal, con sus superficies convexas enfrentadas entre sí. El diafragma de campo y los posibles retículos para medición se sitúan en el plano objeto del ocular. Se obtiene un campo de nitidez y emergencia de pupila similares a las del ocular de Huygens.

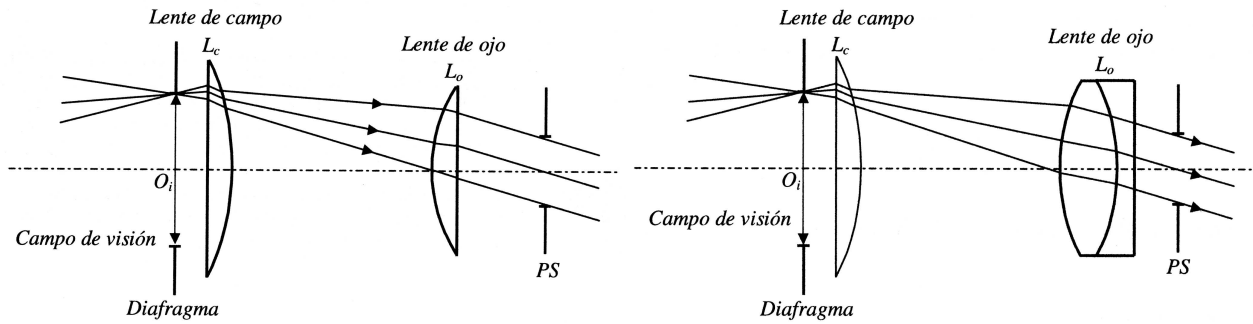


Fig. 4C.11

Ocular de Kellner. Es una variación del ocular de Ramsden. Un doblete acromático pegado actúa como lente de ojo (fig. 4C.11b), con vidrios de parecido índice y diferente dispersión. Se consigue así una mejora en la cromática de aumento, llegando a los 50° de campo de nitidez, con emergencias de pupila del 45% de la focal.

El ocular de Plöessl u ocular simétrico (D) consigue una gran emergencia de pupila, del orden de la focal, por lo que es recomendable para pequeñas focales. El campo no puede superar los 50° , pues este ocular exige un diámetro de las lentes muy superior al de los anteriores tipos.

El ocular ortoscópico o de Abbe (E) se denomina así por estar libre de distorsión, permitiendo un campo de 60° con emergencias de pupila del 80% de la focal. Sin embargo, no es muy utilizado en la actualidad por presentarse problemas de centrado en el triplete pegado.

En la actualidad se utilizan oculares de muy diversos tipos, parecidos al ocular de Erfle (F). La emergencia de pupila es del 80% de la focal, con campos de hasta 70° , dando una buena corrección de aberraciones.

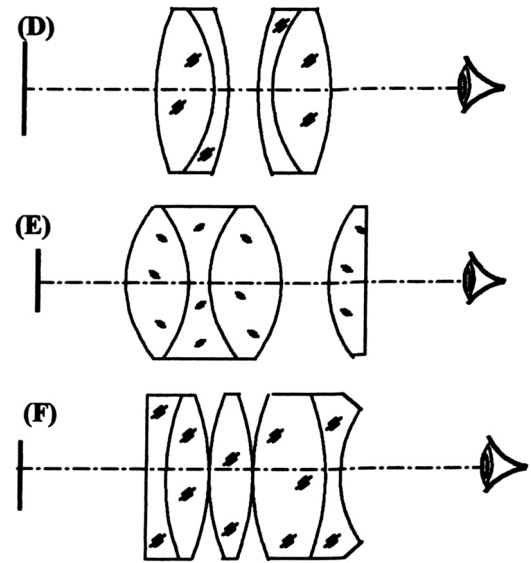


Fig. 4C.12

TEMA 4D. TELESCOPIOS.

Los telescopios son instrumentos ópticos utilizados para la observación de objetos lejanos, con el fin de conseguir un mayor tamaño aparente. A veces se emplean como instrumentos de visión, en cuyo caso también reciben el nombre de anteojos.

Los telescopios son sistemas ópticos compuestos formados básicamente por dos elementos: el objetivo y el ocular, situados de manera que forman un sistema afocal, en el que sus focos se encuentran en el infinito (fig. 4D.1). En estos sistemas, para un objeto situado en el infinito, su imagen correspondiente se forma también en el infinito, que un observador emétrope podrá ver sin acomodar. En ocasiones incorporan un sistema inversor que proporciona una imagen derecha del objeto observado, adaptándose, de ese modo, a la observación terrestre. Los telescopios también pueden ser utilizados como sistemas no afocales para ver objetos a distancia finita, dando imágenes que pueden verse con cierta acomodación, o bien por sujetos miopes o hipermetropes sin acomodar.

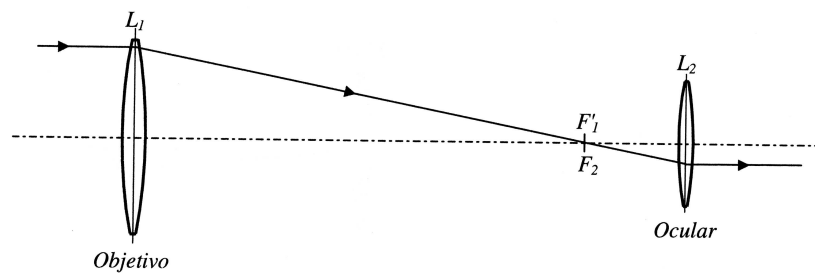


Fig. 4D.1

Los telescopios se clasifican en refractores, reflectores y mixtos, según su objetivo sea dióptrico, catóptrico o catadióptrico. El mecanismo de enfoque en un antejo se realiza ajustando adecuadamente la distancia entre objetivo y ocular, de modo que la imagen intermedia proporcionada por el objetivo coincida con el conjugado objeto, a través del ocular, del punto remoto del observador.

4D.1. Anteojo astronómico o de Kepler.

El telescopio de Kepler o anteojo astronómico es el sistema telescópico más sencillo, para el que introduciremos una serie de conceptos generales de todos los telescopios. Está formado por dos sistemas ópticos convergentes: el objetivo, de gran focal y diámetro, que forma una imagen real de tamaño mucho menor que el objeto y el ocular, de pequeña focal, que actúa como una lupa con la imagen dada por el objetivo, aumentando su tamaño aparente. Los ejes ópticos de objetivo y ocular son coincidentes, y forman el eje óptico del telescopio.

Para que el ocular actúe con aumento normal, la imagen intermedia debe encontrarse sobre su foco objeto. Para un objeto en infinito, la imagen intermedia estará sobre el foco imagen del objetivo. Se dice que un telescopio de Kepler está enfocado a infinito cuando el foco imagen del objetivo coincide con el foco objeto del ocular, y entonces a un objeto en infinito le corresponde una imagen en infinito, y en ese caso el sistema es afocal.

En la figura 4D.2 se muestra su representación esquemática en la que puede observarse el objetivo y el ocular, ambos representados por sendas lentes delgadas, así como el diafragma de campo.

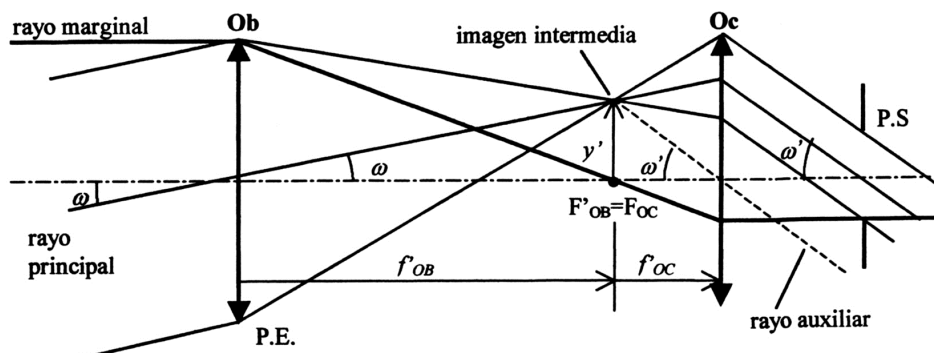


Fig. 4D.2

Aumento visual. El telescopio astronómico de la fig. 4D.2 es atravesado por un haz de rayos paralelos entre sí, procedentes de un punto objeto en el infinito situado fuera del eje óptico del telescopio. Este haz de rayos atraviesa el objetivo y focaliza en un punto de su plano focal imagen. Después de formar la imagen intermedia, el haz de rayos continúa su trayectoria, llegando al ocular. Mediante el rayo auxiliar marcado con línea de trazos, determinamos la dirección de salida del haz emergente del ocular. Sea f'_1 la focal imagen del objetivo y f_2 la focal objeto del ocular, de la figura 4D.2 se deducen los valores de las tangentes de ω y ω' :

$$\tan \omega = \frac{y'}{f'_1} ; \tan \omega' = \frac{y'}{f_2} \quad (4D.1)$$

donde y' es la altura de la imagen intermedia. Sustituyendo estas últimas expresiones en la definición de aumento visual, se obtiene su valor para un telescopio de Kepler como

$$\Gamma' = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{y' f_2}{y' f'_1} = \frac{f'_1}{f_2} = -\frac{f'_1}{f'_2} \quad (4D.2)$$

expresión que relaciona el aumento visual del instrumento con la razón de focales del objetivo y del ocular y, además, confirma que la imagen observada es invertida. La inversión de la imagen no es importante para la observación astronómica, de ahí el nombre de telescopio astronómico. Sin embargo, existen diversos métodos, que estudiaremos más adelante, para hacer que la imagen final se vea derecha. Para que el valor absoluto del aumento visual sea mayor que la unidad, la focal del objetivo debe ser mayor que la del ocular.

Diafragma de abertura y pupilas. El objetivo hace de diafragma de abertura, ya que el haz de rayos paralelos al eje óptico es limitado siempre por la montura del objetivo, que hace además de pupila de entrada, por no existir lentes antepuestas. La pupila de salida es la imagen del objetivo a través del ocular, que se encuentra fuera del telescopio, un poco más alejada del ocular que su foco imagen. La expresión obtenida para el aumento visual puede reescribirse en función de los diámetros de las pupilas de entrada y salida, aplicando semejanza de triángulos a la región sombreada en la figura 4D.2:

$$\Gamma' = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{\phi_{PE}}{\phi_{PS}}, \quad (4D.3)$$

lo que nos proporciona una manera de medir el aumento visual en un anteojero astronómico. En (4D.3) ϕ_{PE} y ϕ_{PS} son los diámetros de las pupilas de entrada y salida y el signo menos indica que los rayos que entran por la parte superior de la pupila de entrada salen por la parte inferior de la pupila de salida.

La pupila de salida es la imagen de la pupila de entrada a través del ocular. La distancia del ocular a la pupila de entrada es igual a la suma de focales $f'_1 + f'_2$. Sea s'_p la emergencia de la pupila de salida medida desde el plano principal imagen del ocular. Es fácil demostrar que:

$$s'_p = -\frac{f'_1 + f'_2}{\Gamma'}, \quad (4D.4)$$

expresión que permite hallar fácilmente la emergencia pupilar.

Diafragma de campo y retículos. La existencia de una imagen intermedia permite colocar sobre ella una serie de elementos con diferentes funciones, como son los diafragmas de campo, los retículos y las lentes colectoras.

Es usual que en el plano donde se forma la imagen intermedia se sitúe un diafragma de forma circular, cuyo objeto es limitar el campo del instrumento, por lo que hace de diafragma de campo. El tamaño del diafragma de campo, y' , depende del semicampo real ω o del semicampo aparente ω' a partir de las relaciones 4D.1.

Una vez conocido el campo, se puede determinar el tamaño necesario del ocular para que permita el paso de los haces inclinados. En algunas ocasiones se desea obtener una imagen final sin

viñeteo por la montura del ocular, tal como en la figura 4D.3(A). Es habitual permitir un viñeteo del 50% del haz del plano meridiano, dando al ocular menor diámetro, tal como en la figura 4D.3 (B), ya que la imagen que se ve a través del telescopio resalta sobre un fondo oscuro, proporcionado por el diafragma de campo, razón por la que no se aprecia la pérdida de luz que se produce al eliminar rayos en el borde del campo.

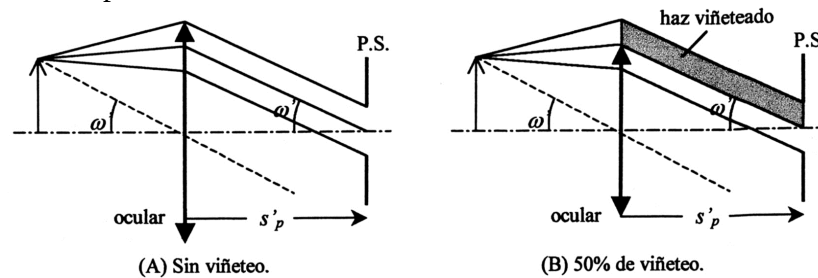


Fig. 4D.3

Otro elemento que se suele colocar sobre la imagen intermedia es el retículo. Consiste en una lámina planoparalela transparente, sobre la que se graban, pintan o proyectan una serie de trazos o números (fig. 4D.4). El ojo verá el retículo superpuesto a la imagen proporcionada por el telescopio, permitiendo así tener referencias, hacer medidas, leer escalas, etc. La montura del retículo hará además de diafragma de campo.

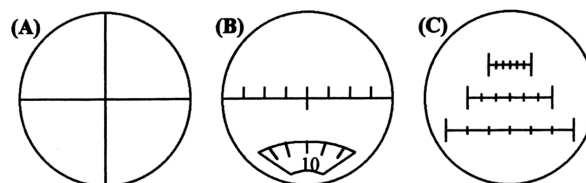


Fig. 4D.4

El retículo más sencillo es el formado por dos hilos cruzados, llamado cruz fiar. Otros retículos más complicados pueden llevar escalas graduadas o mostrar una escala que se proyecta sobre el plano de la imagen intermedia mediante un sistema óptico auxiliar. Los trazos finos del retículo suelen realizarse por métodos fotográficos, que proporcionan gran definición de trazo. Asimismo, puede hacerse una máscara que deje al descubierto partes del vidrio que son atacadas por ácido fluorhídrico.

Podemos decir que un telescopio sin retículo es un instrumento de observación, mientras que la presencia de un retículo convierte al telescopio en un instrumento de medida. Los retículos deben estar perfectamente pulidos y limpios, evitando además la presencia de burbujas o inhomogeneidades pues las imperfecciones aparecerán nítidamente sobre la imagen final.

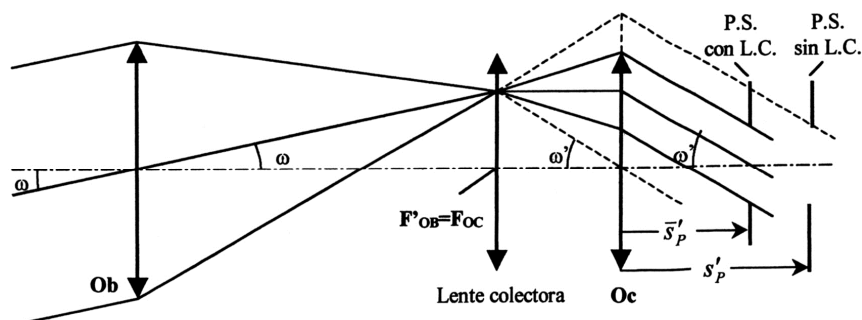


Fig. 4D.5

Lentes colectoras. Otro elemento que puede colocarse sobre la imagen intermedia es la lente colectora. El efecto de la lente colectora se ve en la figura 4D.5. La presencia de una lente colectora no modifica el valor del aumento del telescopio, pues se mantiene el valor del semicampo aparente ω' para un valor dado del semicampo real ω . Tampoco modifica el diámetro de la pupila de salida, pues se sigue cumpliendo (4D.3). La lente colectora convergente desvía los rayos inclinados hacia el eje óptico, permitiendo un ocular de menor diámetro para el mismo campo. Una lente colectora divergente requiere mayor diámetro del ocular, pero proporciona mayor emergencia pupilar.

Existe una sencilla relación que permite predecir el efecto de una lente colectora sobre la posición de la pupila de salida, fácil de demostrar calculando la imagen del objetivo a través de la lente colectora y el ocular. Se cumple que:

$$\bar{s}'_p = s'_p - \frac{f'^2_{oc}}{f'_c} \quad (4D.5)$$

donde $\bar{s}'_p$ es la emergencia de pupila de salida con lente colectora, s'_p es la emergencia de pupila de salida sin lente colectora, f'_c es la focal de la lente colectora y f'_{oc} la focal del ocular.

Resolución angular del telescopio. La resolución del telescopio viene fijada por la capacidad del objetivo de resolver dos puntos cercanos al formar la imagen intermedia. Si el objetivo no tiene una buena resolución, el ocular no podrá mejorar la imagen final.

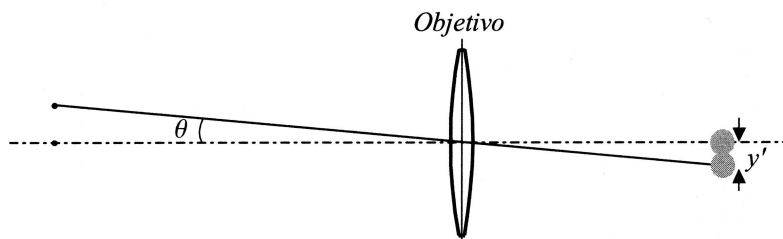


Fig. 4D.6

Si suponemos un objetivo bien corregido de aberraciones, la resolución viene limitada por la difracción y el límite de resolución angular o ángulo mínimo de separación entre dos puntos situados en el plano objeto es (fig. 4D.6):

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{\phi_{PE}} \quad (4D.6)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz y ϕ_{PE} el diámetro de la pupila de entrada del instrumento (objetivo). Tomando $\lambda = 550 \times 10^{-6}$ mm y expresando las unidades angulares en segundos de arco se obtiene:

$$\theta = \frac{140''}{\phi_{PE}} \quad (4D.7)$$

Objetivos para telescopios. Los objetivos más utilizados en los telescopios consisten en un simple doblete formado por dos lentes, una convergente de vidrio crown, y otra divergente de vidrio flint. Con un doblete pegado se puede alcanzar el campo necesario, relativamente pequeño (entre 3 y 7 grados) con una abertura relativa que no supera el valor $f / 3,5$. Si el diámetro del objetivo es grande, no se pueden pegar las superficies debido a que los diferentes coeficientes de expansión térmica conducen al rápido deterioro del pegado. En estos casos se deja un pequeño espacio de aire entre las lentes, aunque el espacio de aire es muy crítico en la corrección de aberraciones. El uso de dobletes con el vidrio flint delante no es recomendable, por ser este vidrio más frágil y atacable por el medio ambiente, aunque se consigue mejor corrección de esférica. Para aberturas o campos mayores se usan objetivos como los usados en fotografía.

4D.2. Fotometría del telescopio.

(1) *Objetos puntuales.* Los objetos puntuales, como es el caso de las estrellas, presentan diámetros aparentes prácticamente nulos, de modo que aún vistos a través de un telescopio de gran aumento, se continúan mostrando como puntos de luz. Así, al observar una estrella con un telescopio el interés estará en permitir que el observador reciba una cantidad de luz (flujo luminoso) mucho mayor que en el caso de la observación a simple vista y no en aumentar el tamaño aparente del objeto.

Sea I la intensidad luminosa de una estrella situada a distancia r (muy grande). En el caso de observación a ojo desnudo (fig. 4D.7a) el flujo luminoso que incide en el ojo del observador vale:

$$F_{\text{ojo}} = I\Omega_{\text{ojo}} = I \frac{\pi(\phi_{\text{ojo}}/2)^2}{r^2} \quad (4D.8)$$

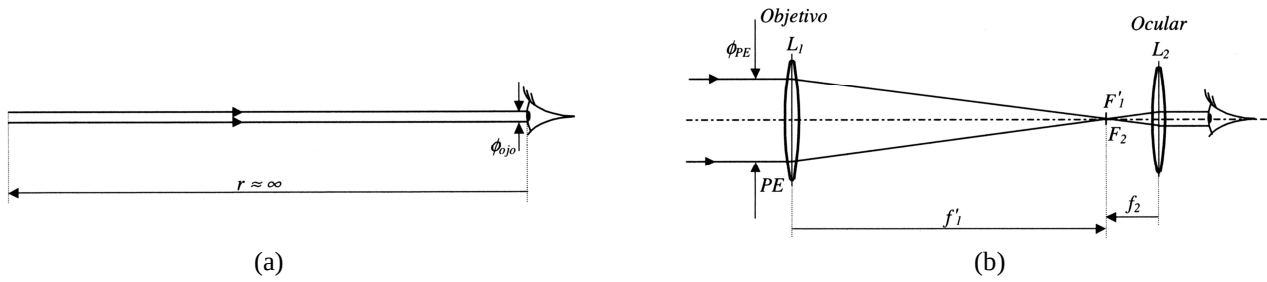


Fig. 4D.7

El flujo que recibe el telescopio y que se transmite al ojo del observador cuando éste se encuentra acoplado al ocular (fig. 4D.7b) vale

$$F_T = I\Omega_T = I \frac{\pi(\phi_{PE}/2)^2}{r^2} \quad (4D.9)$$

Así pues, de (4D.8) y (4D.9) se obtiene:

$$\frac{F_T}{F_{\text{ojo}}} = \left(\frac{\phi_{PE}}{\phi_{\text{ojo}}} \right)^2 \quad (4D.10)$$

Si, como es habitual, el tamaño de la pupila de salida del telescopio coincide con la pupila del ojo, entonces, introduciendo (4D.3) en (4D.10) se obtiene

$$\frac{F_T}{F_{\text{ojo}}} = \Gamma'^2 \quad (4D.11)$$

Lo que significa que el flujo que recibe el ojo cuando observa a través del telescopio es Γ'^2 veces mayor que el que recibe cuando se observa a simple vista.

(2) *Objetos extensos.* Sea un pequeño objeto de área dS y luminancia L situado a una gran distancia del observador (fig. 4D.8a).

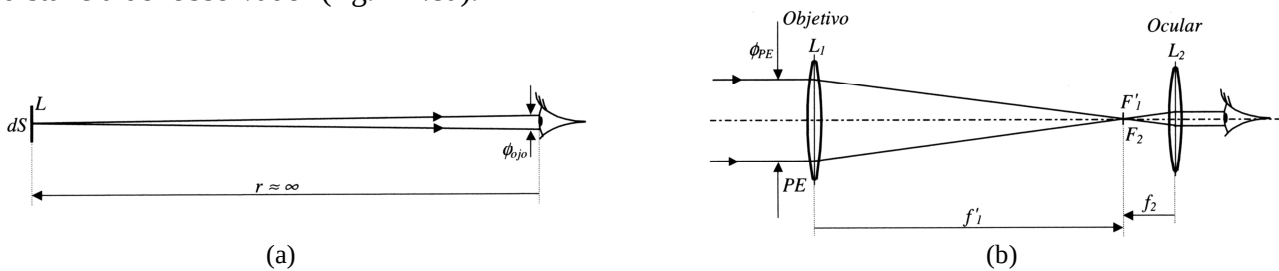


Fig. 4D.8

El flujo luminoso que penetra en el ojo del observador es

$$F_{\text{ojo}} = LdS \frac{\pi(\phi_{\text{ojo}}/2)^2}{r^2} \quad (4D.12)$$

En el caso de observar el objeto a través del telescopio (fig. 4D.8b), el flujo que penetra en él es:

$$F_T = LdS \frac{\pi(\phi_{PE}/2)^2}{r^2} \quad (4D.13)$$

De (4D.12) y (4D.13) se obtiene

$$\frac{F_T}{F_{\text{ojo}}} = \left(\frac{\phi_{PE}}{\phi_{\text{ojo}}} \right)^2 \quad (4D.14)$$

en el caso de que ϕ_{ojo} coincida con ϕ_{PS} resulta que, al igual que (4D.11):

$$\frac{F_T}{F_{\text{ojo}}} = \Gamma'^2 \quad (4D.15)$$

Sin embargo, al ser el objeto extenso, la superficie de la imagen retiniana aumentará en un factor Γ'^2 (fig. 10.31):

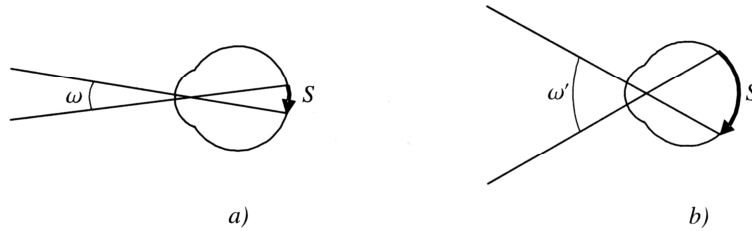


Fig. 4D.9.

$$S' = \Gamma'^2 S \quad (4D.16)$$

la iluminación de la imagen retiniana, en el caso de observación a ojo desnudo es:

$$E_{\text{ojo}} = \frac{F_{\text{ojo}}}{S} \quad (4D.17)$$

mientras que, en la observación mediante telescopio, vale:

$$E_T = \frac{F_T}{S'} = \frac{\Gamma'^2 F_{\text{ojo}}}{\Gamma'^2 S} = \frac{F_{\text{ojo}}}{S} = E_{\text{ojo}} \quad (4D.18)$$

De lo que resulta que la iluminación de la imagen retiniana es la misma con o sin instrumento. Esto permite ver las estrellas durante el día mediante un anteojito, ya que el flujo que se recibe de ellas está multiplicado por Γ'^2 respecto a la observación a ojo desnudo y la iluminación de la imagen retiniana correspondiente al fondo del cielo extenso es igual en ambos casos. De este modo, aumenta el contraste de las imágenes puntuales de las estrellas haciéndolas visibles sobre el fondo del cielo.

4D.3. Antejos reflectores o telescopios de espejo.

Tiene el objetivo formado por espejos y se usan casi en exclusiva para la observación astronómica. Carecen de aberración cromática y, además de operar con luz visible, también operan en el infrarrojo, ultravioleta y en la zona de los rayos X, lo que explica su atractivo en astronomía.

Existen distintas configuraciones para este tipo de telescopios, pero la base de todos ellos es un objetivo en forma de espejo parabólico cóncavo que recoge la luz y la concentra en el punto focal imagen.

El uso de un espejo parabólico para el primario se justifica por tratarse de la superficie que presenta stigmatismo entre el punto objeto del infinito y su conjugado imagen en el foco del espejo. El espejo parabólico carece de aberración esférica. Para su construcción se parte de un espejo esférico del mismo diámetro, que se retoca en el centro y bordes. Para obtener el espejo parabólico basta quitar algunas micras de espesor. El problema de los espejos parabólicos es que permiten campos muy pequeños, ya que el coma aumenta rápidamente. Por este motivo son utilizados como objetivos de gran focal con pequeño campo.

El espejo cóncavo primario llega a alcanzar a veces un gran diámetro, como en el GRANTECAN con un espejo primario de 10,4 metros, segmentado en 36 piezas hexagonales. La preferencia por los espejos se debe a que estas dimensiones son imposibles de conseguir con elementos dióptricos, al presentarse inhomogeneidades y tensiones por el propio peso del vidrio.

El espejo principal o primario es completado habitualmente por un espejo secundario de menor tamaño que se sitúa frente al primario para desviar el haz de luz reflejado por él y enviarlo hacia el ocular.

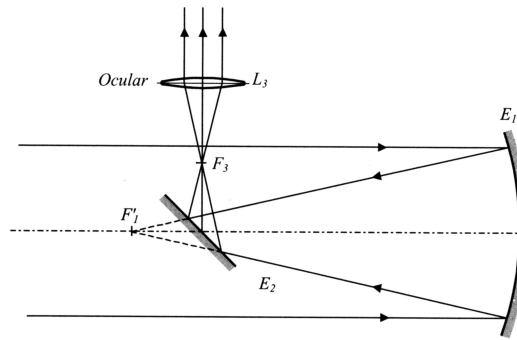


Fig. 4D.10

En el montaje de Newton (fig. 4D.10) un espejo plano o un prisma saca la luz fuera del eje óptico del espejo primario. En el montaje de Cassegrain (fig. 4D.11a), la luz que proviene del espejo primario se refleja en un espejo secundario convexo, emergiendo por la zona central del espejo primario, que debe estar horadada al efecto. El montaje de Gregory (fig. 4D.11b) usa un espejo secundario cóncavo, y tiene mayor longitud que el anterior.

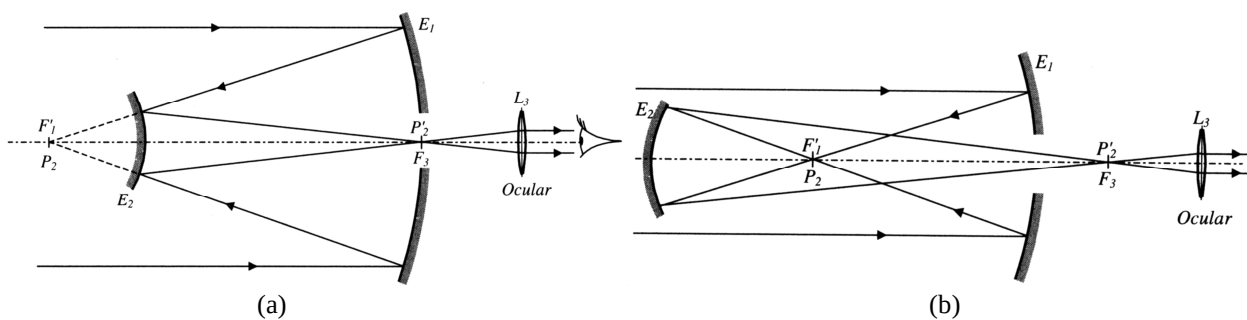


Fig. 10.11

4D.4. Anteojo terrestre.

El anteojo astronómico presenta una importante desventaja cuando se pretende usarlo para observar objetos en la superficie terrestre, pues la imagen final es invertida, y esto supone un gran obstáculo para la identificación de objetos. Para conseguir que la imagen final se vea derecha se debe insertar un sistema inversor entre el objetivo y el ocular que, al introducir una nueva inversión, compensa la producida por el telescopio astronómico. Cuando el sistema inversor está formado por lentes, el conjunto recibe el nombre de anteojo terrestre. Si se utilizan prismas para invertir la imagen, se habla de telescopio prismático.

Anteojo con sistema inversor simple. La inversión de la imagen se puede conseguir con una lente situada entre el objetivo y el ocular, separando ambos elementos para permitir su inserción, tal como se muestra en la figura 4D.12. La lente inversora se sitúa de manera que los rayos que provienen de la imagen intermedia formada en el foco imagen del objetivo producen, tras atravesar el sistema inversor, una segunda imagen intermedia en el foco objeto del ocular. La imagen y' es transportada a y'' . Por esta razón se denomina al sistema inversor con los nombres de vehículo óptico o transportador de imagen.

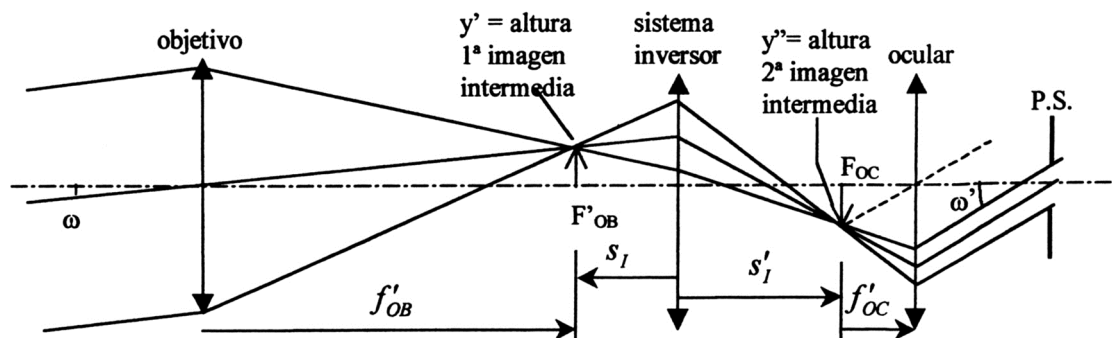


Fig. 4D.12.

El aumento del telescopio terrestre se deduce de la figura 4D.12, donde se ha trazado un haz de rayos que entran por el objetivo paralelos entre sí con una inclinación ω , y salen por el ocular también paralelos entre sí, pero con diferente inclinación respecto al eje óptico, ω' . El aumento visual se puede calcular en función de las alturas de las imágenes intermedias, y' e y'' :

$$\Gamma' = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{y''/f'_{OC}}{-y'/f'_{OB}} = -\frac{y''}{y'} \frac{f'_{OB}}{f'_{OC}} \quad (4D.19)$$

Como el cociente y''/y' es el aumento lateral del sistema inversor, β'_I , queda:

$$\Gamma' = -\frac{f'_{OB}}{f'_{OC}} \beta'_I \quad (4D.20)$$

La introducción del sistema inversor, en contrapartida, aumenta la longitud del instrumento, lo que supone un problema práctico en su utilización. Para el caso del sistema inversor compuesto por una sola lente la longitud aumenta en un valor $d \geq 4f_i$, siendo f_i la distancia focal de la lente inversora. Por otro lado, el campo de estos telescopios no podía ser muy grande, pues entonces el sistema inversor alcanzaría un diámetro excesivo, lo que introduce muchas aberraciones. De ahí que en la actualidad se prefiera el uso de los prismáticos que, con menor tamaño, permiten mayor campo que los telescopios terrestres

Anteojo con sistema inversor doble. Parte de los problemas que se presentan en al telescopio con sistema inversor simple se pueden solucionar con el telescopio con un sistema inversor formado por dos lentes, tal como se muestra en la figura 4D.13, donde se ha trazado un haz de rayos inclinados que atraviesan el conjunto.

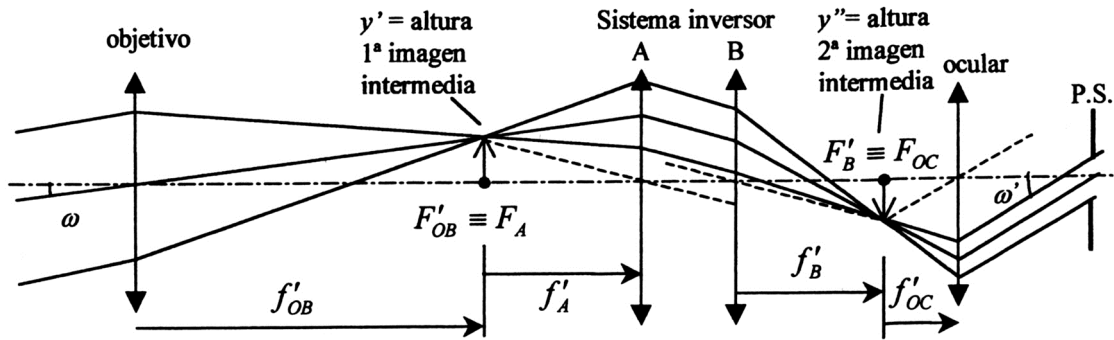


Fig. 4D.13

El sistema inversor está formado por las lentes A y B, de focales respectivas f'_A y f'_B . El foco imagen del objetivo coincide con el foco objeto de la lente A, y allí se forma la primera imagen intermedia, de altura y' . El foco imagen de la lente B coincide con el foco objeto del ocular, y en ese plano se forma la segunda imagen intermedia, de altura y'' . Los haces de rayos procedentes de un punto del objeto forman un haz de rayos paralelos entre sí en el espacio situado entre las lentes A y B. Se han trazado unos rayos auxiliares (de trazos) por el centro de las lentes A y B para deducir gráficamente la trayectoria de los rayos que atraviesan estas lentes. Otro rayo auxiliar, por el centro del ocular se utiliza para determinar la inclinación de los rayos emergentes del ocular.

El aumento del telescopio se obtiene de la figura 4D.13, de la misma forma que en el telescopio con sistema inversor simple y se llega a

$$\Gamma' = -\frac{f'_{OB}}{f'_{OC}} \frac{y''}{y'} \quad (4D.21)$$

Puesto que los triángulos que forman los rayos auxiliares con el eje óptico son semejantes, sus lados serán proporcionales dos a dos:

$$\frac{y''}{y'} = -\frac{f'_A}{f'_B} \quad (4D.22)$$

donde debe añadirse el signo menos por tener y'' e y' distinto signo. Sustituyendo en (4D.21) se obtiene finalmente:

$$\Gamma' = \frac{f'_{OB} f'_{B'}}{f'_{OC} f'_{A}} \quad (4D.23)$$

4D.5. Anteojo de Galileo.

Está formado por un objetivo convergente y un ocular divergente, obteniéndose de esta manera una imagen final directa sin necesidad de sistema inversor, Fig. 10.25. Resulta adecuado en ocasiones que requieren pocos aumentos y un dispositivo pequeño y ligero.

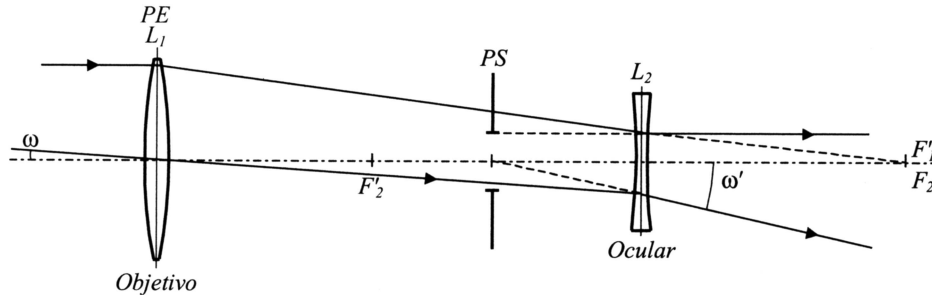


Fig. 4D.14

Como se observa en la figura 4D.14, la pupila de salida del sistema es virtual, lo que provoca incomodidad en la observación ya que no es posible un acoplamiento correcto de la PS del instrumento con la pupila del ojo. Esta falta de acoplamiento conlleva que, en el conjunto formado por el instrumento y el ojo, la pupila del ojo sea la que limita finalmente la apertura y lo que era la PS del instrumento pasa a ser lucarna que limita el campo observado. Como se aprecia en la figura 4D.15, el campo aparente depende, en este caso de la posición relativa del observador respecto al anteojo.

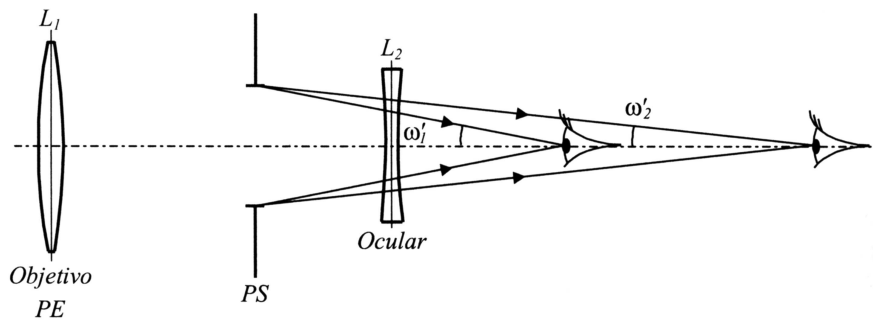


Fig. 4D.15

4D.6. Prismáticos.

En el caso de los prismáticos el sistema inversor del anteojo terrestre está formado por prismas de reflexión total (fig. 4D.16). Estos prismas invierten la imagen pero no la aumentan y pliegan en forma de S el eje óptico, permitiendo una reducción del tamaño del instrumento. Además el diseño del instrumento admite que se construya el anteojo por duplicado permitiendo la observación binocular en un amplio rango de situaciones.

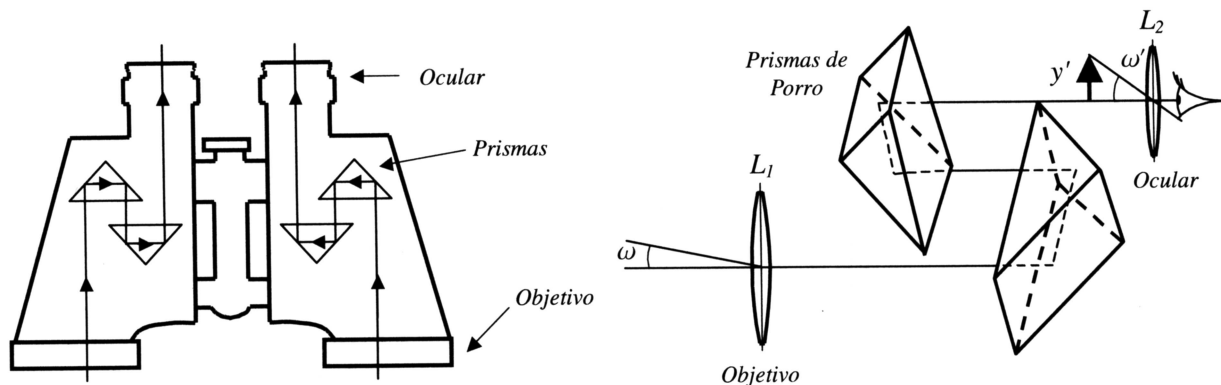


Fig. 4D.16

Los prismáticos suelen especificarse con dos números separados por un aspa. El primero es el aumento y el segundo diámetro del objetivo en milímetros. Los más usuales son 4 x 20, 6 x 30, 8 x 30, 7 x 50, 12 x 60, etc. Al elegir un instrumento para una observación debe tenerse en cuenta que a altas luminosidades, durante el día, la pupila del ojo se cierra y no es necesario utilizar un instrumento de gran objetivo; sin embargo, para observaciones nocturnas iría bien, p. e., un 7 x 50.

TEMA 4E. LIMITACIÓN DE RAYOS: DIAFRAGMAS DE APERTURA Y CAMPO.

En los temas anteriores no se ha hecho una limitación precisa del tamaño de los haces que atraviesan los sistemas ópticos, pues al tratar los casos de stigmatismo perfecto se ha dicho que todos los rayos, sin limitación, lo cumplían. En óptica paraxial la extensión quedaba fijada por el límite, siempre impreciso, de que los senos y tangentes pudieran sustituirse por los arcos según el grado de aproximación exigida.

Los sistemas ópticos que se utilizan en la práctica presentan limitaciones en los haces de luz que los atraviesan debido a las monturas de las lentes y a orificios en chapas que se ponen para evitar luces parásitas, mejorar el comportamiento de los instrumentos, etc. Estos diafragmas, que pueden ser variables (iris) hay que tenerlos en cuenta por sus efectos en: (a) la iluminación de las imágenes, (b) el campo transmitido, (c) el poder resolutivo y (d) las aberraciones en las imágenes.

Los haces de luz que proceden de los distintos puntos del objeto atraviesan un instrumento óptico sufren, a causa de la finitud de los diámetros útiles de las lentes, que son los que permiten sus monturas, limitaciones en su extensión. Desde el punto de vista de la iluminación de las imágenes, estos "diafragmas" según su función se clasifican en "diafragmas de apertura" y "diafragmas de campo".

4E.1. Diafragma de apertura: pupilas de entrada y salida.

En un sistema óptico centrado recibe el nombre de *diafragma de apertura* (DA) el orificio que limita la extensión del haz que penetra en él de un punto del objeto situado en el eje del sistema.

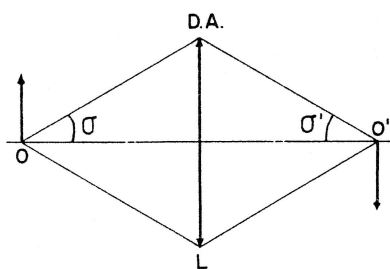


Fig. 4E.1

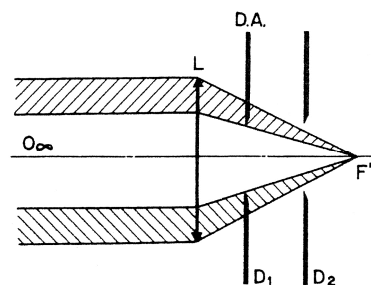


Fig. 4E.2

Ejemplos. Sea un sistema constituido por una sola lente (fig. 4E.1). El haz que sale de O sólo tiene la limitación de la montura de la lente, ésta es el DA. En la figura 4E.2 hay una lente L y dos diafragmas D_1 y D_2 , estando el objeto en el infinito O_∞ . La lente produce una limitación a la luz incidente, pero el diafragma D_1 todavía corta la luz que deja pasar la lente, por tanto, el diafragma D_1 es el diafragma de apertura.

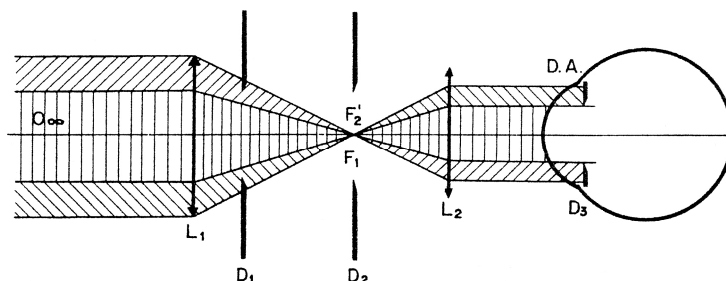


Fig. 4E.3

Otro ejemplo es el de un telescopio seguido del ojo, fig. 4E.3. La lente L_1 limita el haz que viene de un punto del eje en el infinito, una segunda limitación la produce el diafragma D_1 que

recorta el haz que deja pasar L_1 , pero la limitación definitiva está en el iris del ojo, que es el diafragma de apertura del conjunto instrumento-ojo.

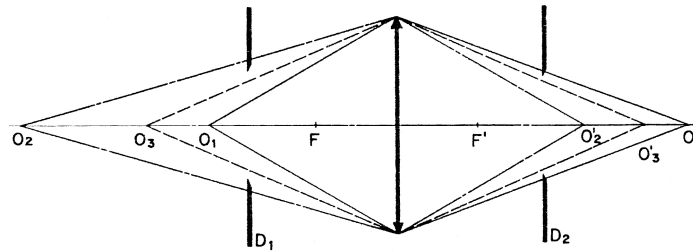


Fig. 4E.4

En general, no se puede decir que un sistema constituido por una serie de lentes y diafragmas tiene un determinado diafragma de apertura, pues éste depende de la posición del objeto. En la figura 4E.4 tenemos un sistema formado por la lente L y los diafragmas D_1 y D_2 . Si el objeto está en O_1 el diafragma de apertura es D_2 , pero si el objeto se pone en O_2 el diafragma de apertura es D_1 , y si estuviera en O_3 sería la montura de la lente L .

Norma práctica. Dado un sistema formado por varias lentes y diafragmas, si se quiere determinar cuál de los orificios es el diafragma de apertura, lo más práctico es hallar las imágenes de todas las monturas y diafragmas del sistema a través de la parte del sistema que les antecede, en posición y tamaño, y entonces ver cual de estas imágenes subtiende menor ángulo en valor absoluto desde el punto objeto en el eje: el orificio material correspondiente a dicha imagen es el diafragma de apertura. Los cálculos de las posiciones y tamaño de las imágenes se conducen siempre por los métodos de la óptica paraxial.

Ejemplo gráfico. Consideramos en la fig. 4E.5 un sistema formado por las lentes L_1 y L_2 y los diafragmas D_1 , D_2 y D_3 . Supongamos que la imagen de D_3 a través de las dos lentes que le anteceden es D'_3 ; la de la montura de L_2 , L'_2 ; la de D_2 a través de la primera lente, que es la única que le queda delante, es virtual y es D'_2 ; la de L es ella misma y la de D_1 también es D_1 , puesto que ya no tiene delante ninguna lente. Desde el objeto O quien menor ángulo subtiende es D'_2 , luego D_2 es el diafragma de apertura.

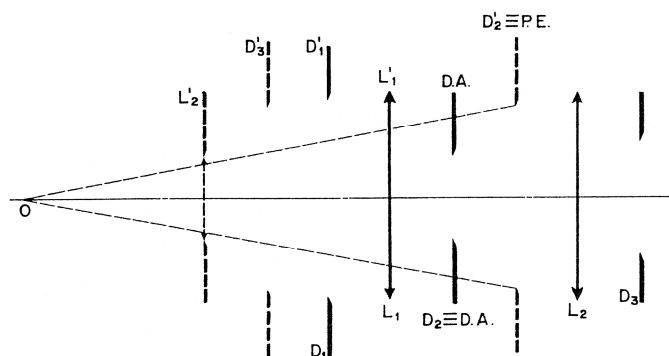


Fig. 4E.5

La imagen del diafragma de apertura en el espacio objeto, en este caso D'_2 , recibe el nombre de *pupila de entrada* (PE) del sistema. Si O estuviera en el infinito sería PE la imagen de menor diámetro, L'_2 , y la montura de L_2 sería el DA.

Análogamente podría resolverse el problema hallando la imagen de O a través de todo el sistema y las de todas las monturas y diafragmas a través de la parte del sistema que les sigue. La imagen del orificio que se viera bajo menor ángulo desde el punto imagen O' sería la *pupila de salida* (PS) y el orificio correspondiente, sería también el diafragma de apertura. Teniendo en cuenta su definición, la PE y la PS son conjugadas respecto al sistema óptico. Igual podría

resolverse llevando todo a un espacio intermedio, lo que en ocasiones puede requerir menos cálculos.

Apertura. Para expresar el tamaño de los haces se define, cuando el objeto está en el infinito, la *apertura* o *apertura relativa* como la razón, A , del diámetro, ϕ , de la PE a la focal f' :

$$A = \frac{\phi}{f'} \quad (4E.1)$$

Esta definición de apertura es la que se emplea en cámaras fotográficas y telescopios. En cámaras fotográficas es muy corriente, sin embargo, utilizar el número recíproco de la apertura, es decir, $N = f' / \phi$, que se llama número de apertura.

Cuando el objeto está a distancia finita como en la fig. 4E.1, se define por la apertura o *apertura numérica*, AN ,

$$AN = n \sen \sigma \quad (4E.2)$$

Siendo n el índice del espacio objeto y σ el ángulo que forma con el eje el rayo que partiendo del pie del objeto pasa por el borde de la PE. La apertura numérica se utiliza para caracterizar a los objetivos de microscopio. Si en el espacio imagen el índice de refracción es n' , se le llama *apertura numérica imagen* al producto

$$n' \sen \sigma' \quad (4E.3)$$

4E.2. Diafragma de campo. Lucarnas.

Sea un sistema óptico, fig. 4E.bis, en el que las imágenes de todos sus diafragmas en el espacio objeto resultan ser D'_1, D'_2, D'_3 . Si el objeto está situado en O , de la geometría de la figura se deduce que D'_1 es la PE puesto que ella limita el haz que parte de O .

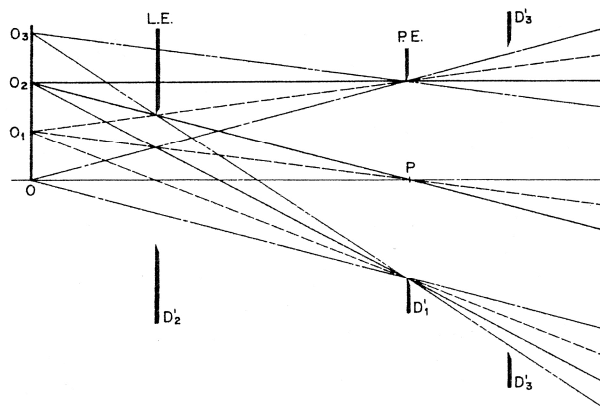


Fig. 4E.6

Si nos desplazamos a lo largo del objeto, encontramos que hasta el punto O_1 todos los haces que partiendo de los puntos del objeto limita la pupila de entrada pasan íntegramente a través del sistema, pero a partir de O_1 los haces vienen mermados (viñeteados) por el diafragma D_2 o lo que es igual, por su imagen D'_2 . Para el punto O_3 solo pasa un rayo, el O_3Q , y a partir de O_3 , a causa del diafragma D_2 , ningún rayo atraviesa el sistema, por tanto no pueden formarse imágenes de puntos más alejados de O que O_3 . Este diafragma que limita el campo o parte del objeto que puede verse a través del instrumento (en este caso D_2) se llama *diafragma de campo*, y su imagen anterior, D_2 , dada por el sistema, recibe el nombre de *lucarna de entrada* (LE). Análogamente la imagen posterior del diafragma de campo se llama *lucarna de salida* (LS).

Para ver el efecto de la lucarna en el viñeteo de los haces basta proyectar la LE sobre la PE desde cada uno de los puntos objeto. La luz que pasa por el instrumento se indica por el área rayada.

De O a O_1 la pupila de entrada se llena de luz. Para el punto O_2 y los intermedios de O_1 a O_2 el sistema no opera con pupila circular y se dice que opera con *pupila de ojo de gato*. Para el punto O_3 la PE y la LE aparecen como tangentes y solamente pasa el rayo correspondiente al punto de contacto.

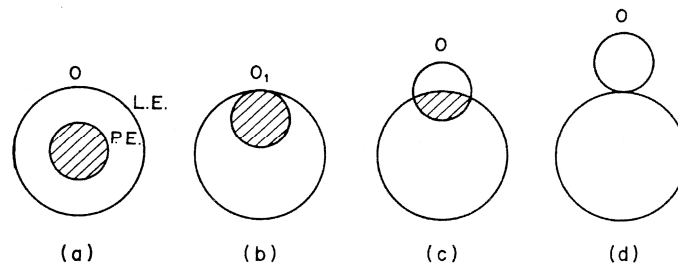


Fig. 4E.7

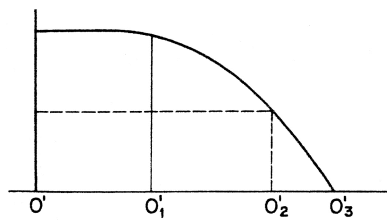


Fig. 4E.8

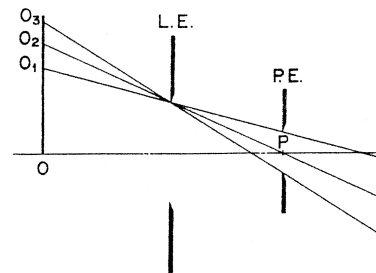


Fig. 4E.9

Si este dispositivo operara en una cámara fotográfica, la iluminación en la placa presentaría una disminución hacia los bordes, tal como en 4E.8. En realidad, las cosas no ocurren exactamente así, pues las proyecciones de la lucarna lo hacen como elipses.

Tamaño del campo. La forma de limitar el campo en la fig. 4E.6 es nociva para la imagen ya que a partir de O'_1 se va oscureciendo paulatinamente debido al viñeteo de los haces.

En la fig. 4E.9 se ve que OO_1 es el *campo de plena iluminación*, pues los haces que parten de puntos entre O y O_1 transportan prácticamente el mismo flujo luminoso, salvo el factor de inclinación de la pupila. Este campo queda determinado en la sección meridiana por la intersección con el objeto de la recta que une los bordes del mismo lado de la PE y la LE. Para el punto O_2 solamente pasa medio haz. El radio del *campo de iluminación media*, OO_2 , lo determina sobre el objeto la recta que une el centro de la pupila de entrada con el borde de la lucarna de entrada. El radio del *campo límite* OO_3 , viene determinado, en la sección meridiana del sistema, por la recta que une bordes opuestos de la PE y la LE.

Cuando el objeto está en el infinito, en algún lugar del campo lineal, se utiliza el *campo angular*, que se define respectivamente en los tres casos mencionados como el doble del ángulo que forman con el eje del sistema las rectas que se han comentado. Cuando se habla del *campo de un instrumento* ha de especificarse de cuál de ellos se trata.

Ejemplo. Supongamos un sistema, fig. 4E.10, en el que llevadas las imágenes de todos los diafragmas y monturas al espacio objeto se obtienen las seis imágenes que aparecen en la figura, con el objeto emisor en O . Como se puede apreciar, D_5 es el que menor ángulo subtende desde O , luego en D_5 está la pupila de entrada del sistema. En caso de duda, basta con hallar las tangentes de los ángulos que las rectas OA forman con el eje.

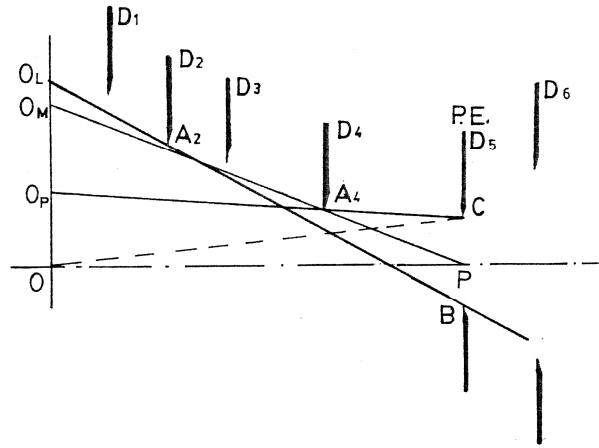


Fig. 4E.10

Para hallar la lucarna de entrada basta determinar el diafragma que impone menor campo límite, OO_L , el cual se halla uniendo el extremo B de la PE con los bordes A_i de los demás diafragmas que están delante, y con los B_i que están detrás. Aquel que determina el punto O_L más cerca de O es la lucarna de entrada. En la figura 4E.10 se ve que es D_2 .

Limitación correcta del campo. La forma de limitar el campo como se hace en los casos anteriores es incorrecta por la forma en que se hace la limitación, que va dejando a la imagen sin luz paulatinamente. En general, es conveniente que todo el campo resulte prácticamente con igual iluminación.

La forma correcta de poner el diafragma de campo en los instrumentos es situarlo sobre las imágenes intermedias, como se hace en microscopios y telescopios, o bien en la imagen final como en las cámaras fotográficas, con lo cual la lucarna de entrada quedará sobre el objeto y sólo habrá campo de iluminación plena.

Ejemplo. La fig. 4E.11 muestra un anteojo astronómico que tiene la PE sobre el objetivo. El paso de un haz de campo se esquematiza con tres de sus rayos. El RS o rayo que entra por el *borde superior* de la pupila de entrada; el RP o *rayo principal*, nombre que se da siempre al rayo de campo que pasa por el centro de la pupila, y el RI o rayo de *borde inferior*.

Por la pupila pueden penetrar sin ninguna limitación haces que lleguen con cualquier inclinación sobre el eje. Estos haces concurren en el plano focal del objetivo y en él es donde se pone el DC, con lo cual la limitación es nítida, pues la LE estará en el infinito sobre el objeto y la LS en el infinito sobre la imagen que da el ocular, ya que la imagen intermedia junto con el DC están en el plano focal del ocular. La PS estará situada en P' , pues es la imagen de P , y todos los haces que entran por PE, saldrán por el interior de PS en los instrumentos de visión cuando el campo se limita correctamente. El ángulo 2ω bajo el cual se ve la LE desde el centro de la PE es el *campo real*, y $2\omega'$ es el *campo aparente*.

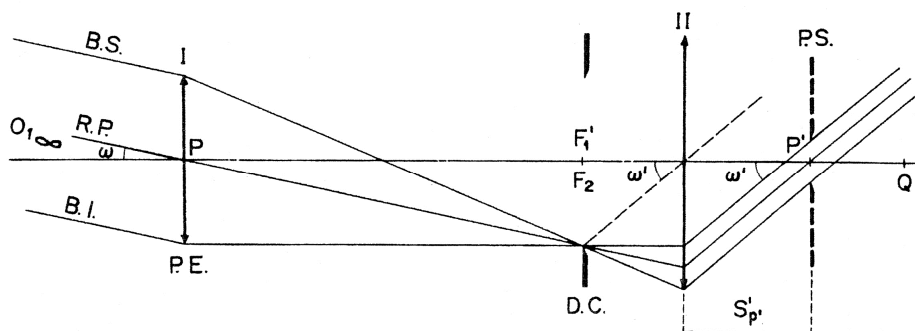


Fig. 4E.11

La situación de la PS en los instrumentos, particularmente en los de visión, resulta muy importante pues en ella ha de ponerse el iris del ojo para que recoja todos los rayos que proceden del objeto. Suponiendo que el ojo que se acopla con el anteojos en la fig. 4E.11 tuviera el mismo diámetro de iris que la PS del anteojos, poniendo el centro del iris en P' se vería todo el campo de una vez, pero si se pone en un punto como Q , para ver todo el campo habría que desplazarlo perpendicularmente al eje, y se verían sombras debido a que en él no penetran los haces completos. Cuando la *emergencia de pupila* (distancia de la última superficie óptica del instrumento al plano de la PS) s'_p , es muy pequeña, el ojo no puede llegar a situarse correctamente y la visión es incomoda y defectuosa. En algunos instrumentos como los visores de puntería de rifles la emergencia debe ser grande para evitar contusiones debidas al retroceso del arma. La emergencia de pupila se puede controlar por medio de *lentes colectoras* que se sitúan en los anteojos cerca del plano focal del objetivo y con una potencia adecuada para que la pupila salga o se acerque a la última lente del instrumento según convenga.