

# GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA

v.2.0

(Actualizada: Curso 2006/07)

**Prof.Dr. Emilio Gómez González**

Departamento de Física Aplicada III  
E.S.Ingenieros – Universidad de Sevilla

Esta *Guía Básica de Conceptos de Óptica Geométrica* se fundamenta en una traducción, modificada y revisada, de la excelente obra de **J.E. Greivenkamp: *Field Guide to Geometrical Optics***. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2004*, y ha sido específicamente adaptada al Curso de Óptica que imparte el autor en la asignatura de *Campos Electromagnéticos* de Ingeniería de Telecomunicación de la E.S.Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

# GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA

**Prof.Dr. Emilio Gómez González**

Departamento de Física Aplicada III  
E.S.Ingenieros – Universidad de Sevilla

## NOTAS:

1. Debido a su utilización generalizada en los ámbitos científico y tecnológico, al expresar las definiciones, y en su caso acrónimos, de los diferentes términos, se ha mantenido, entre paréntesis y en letra cursiva, la denominación en idioma inglés.

2. Se recomienda encarecidamente la consulta de los materiales originales en: *SPIE: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (The International Society for Optical Engineering)*: [www.spie.org](http://www.spie.org)

3. Esta *Guía Básica de Conceptos de Óptica Geométrica* ha sido específicamente adaptada al Curso de Óptica que imparte el autor en la asignatura *Campos Electromagnéticos* de Ingeniería de Telecomunicación de la E.S.Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Se recomienda su utilización combinada con los demás materiales y referencias de la asignatura.

## ÍNDICE de EPÍGRAFES

La Óptica .....	4
Elementos de los sistemas ópticos. Criterio de signos .....	5
Conceptos básicos .....	6
Camino óptico y Principio de Fermat .....	6
Refracción y reflexión .....	7
Espacios ópticos .....	8
Óptica Gaussiana .....	9
Superficies refractantes y reflectantes .....	10
Formulación de Newton .....	11
Formulación de Gauss .....	12
Magnitudes reducidas .....	13
Puntos nodales .....	14
Distancias a los vértices .....	14
Lente gruesa y lente delgada .....	15
Formación de imágenes en la lente delgada .....	16
Lentes de Fresnel o zonales .....	17
Sistemas afocales .....	17
Óptica paraxial .....	18
Diafragmas y pupilas .....	19
Rayos marginal y principal .....	20
Campo de visión .....	21
Invariante de Lagrange .....	22
Apertura numérica y número-f .....	22
Transferencia radiativa .....	23
Profundidad de foco y profundidad de campo .....	25
Imagen a través de planos paralelos .....	26
Triangulación y medida de distancias .....	27
Dispersión .....	28
Vidrios ópticos .....	30
El arco iris y el cielo azul .....	32
Dispersión en prismas .....	32
Prismas delgados y sus aplicaciones .....	34
El ojo humano .....	35
Defectos de visión y su corrección .....	37
Lentes y objetivos .....	39
Formatos y tamaños fotográficos .....	42
Exposición y número ISO .....	43
Lupas .....	44
Telescopios .....	45
Telescopios refractores .....	45
Telescopios reflectores .....	47
Microscopios .....	48
Visores .....	51
Visores <i>Single Lens Reflex</i> (SLR) .....	52
Sistemas de iluminación .....	53
Iluminación difusa .....	54
Óptica condensadora en los sistemas de proyección .....	55
Fuentes luminosas mediante espejos .....	56
Retroproyector .....	57
Sistemas <i>Schlieren</i> y de <i>Campo Oscuro</i> .....	57

## La Óptica

La **Óptica** ha sido definida, históricamente, como “la ciencia de la luz”. En la actualidad, esta definición se precisa afirmando que la Óptica es la parte de la Física que estudia los fenómenos relacionados con la propagación de la radiación electromagnética en un rango determinado del espectro, denominado **rango de frecuencias ópticas**.

Este rango, habitualmente descrito en la **escala equivalente de longitudes de onda**, incluye tres franjas (o, genéricamente, **espectros**): el **ultravioleta (desde 10 nm hasta 390 nm)**, el **visible (desde 390 nm hasta 760 nm)** y el **infrarrojo (desde 760 nm hasta 1mm)**. Dentro del espectro visible, conjunto de frecuencias a las que es sensible el sistema visual humano, se denominan **colores** a ciertas subfranjas particulares:

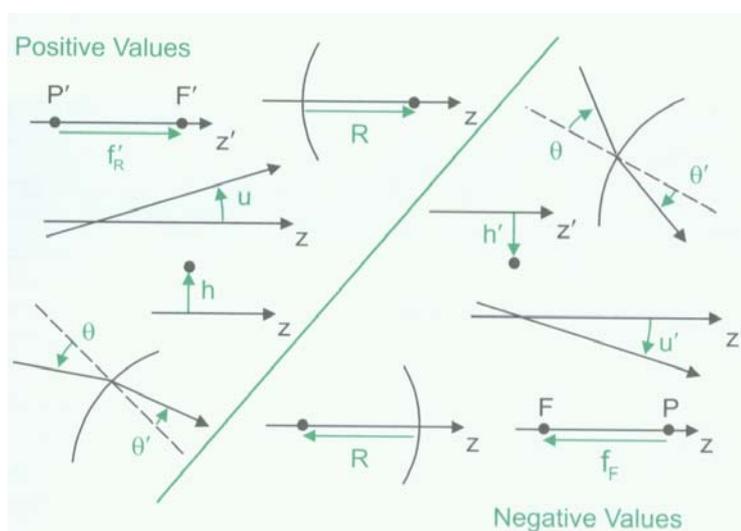
Rojo:	desde 650 nm hasta 760 nm
Naranja:	desde 590 nm hasta 650 nm
Amarillo:	desde 570 nm hasta 590 nm
Verde:	desde 490 nm hasta 570 nm
Azul:	desde 420 nm hasta 490 nm
Violeta:	desde 390 nm hasta 420 nm

Una posible clasificación de la Óptica define la **Óptica Geométrica (OG)** como aquella que abarca el estudio de los fenómenos relativos a la propagación de la luz sin incluir los efectos de interferencia ni de difracción, considerando los objetos compuestos por un conjunto de fuentes radiantes puntuales independientes. Esta descripción, basada en el análisis de las trayectorias (rayos) de propagación de la energía, es válida siempre que la longitud de onda de la perturbación que se desplaza sea mucho menor que las dimensiones características de los objetos con los que se encuentra, y justifica la gran aplicabilidad de los formalismos de la OG, originariamente obtenidos para la luz pero válidos para cualquier perturbación ondulatoria (mecánica o electromagnética) en las condiciones indicadas. Cuando, en el rango de frecuencias ópticas, es necesario incorporar los citados efectos de interferencia y difracción, surge la **Óptica Ondulatoria**, y para tener en cuenta el carácter vectorial transversal del campo electromagnético, se define la **Óptica Electromagnética**, incluyendo a ambas. Para describir los fenómenos relacionados con la interacción luz-materia se define la **Óptica Cuántica**, marco teórico general que, en los límites adecuados, nos permite reobtener los demás formalismos indicados.

## Elementos de los sistemas ópticos. Criterio de signos.

En las condiciones de validez de la Óptica Geométrica, los sistemas ópticos se caracterizan por los siguientes elementos:

- El eje de simetría de un sistema óptico con simetría rotacional se denomina **eje óptico** y es el eje  $z$  del sistema de referencia.
- El plano  $y$ - $z$  es el **plano meridional** del sistema y es el plano habitualmente utilizado para representar los elementos en el sistema.
- Todas las distancias se miden respecto a un punto/línea/plano de referencia en sentido cartesiano: las **distancias orientadas** sobre/hacia la derecha de la/s referencias son positivas, por debajo/hacia la izquierda son negativas.
- Todos los **ángulos** se miden respecto a una línea/plano de referencia en sentido cartesiano (usando la regla de la mano derecha): los ángulos antihorarios (horarios) son positivos (negativos).
- El **radio de curvatura** de una superficie se define como la distancia orientada desde su vértice hasta su centro de curvatura.
- La luz viaja de izquierda a derecha (de  $-z$  hacia  $+z$ ) en medios con índice de refracción positivo.
- Tras una reflexión, la luz viaja de derecha a izquierda y su velocidad se puede tomar como negativa por lo cual los signos de los índices de refracción se consideran negativos tras una reflexión.



## Conceptos básicos

Dentro de la Óptica Geométrica, la **Óptica de Primer Orden** abarca el estudio de los sistemas ópticos ideales (*perfect optical systems*) que son aquellos sistemas ópticos carentes de aberraciones. Los métodos de análisis incluyen la “**Óptica Gausiana**” y la “**Óptica Paraxial**”. Los resultados de estos análisis incluyen las propiedades “de formación de imagen” (*imaging properties*), es decir, posición y magnificación de la imagen formada por el sistema así como las propiedades radiométricas (*non imaging properties*) del mismo. Hay sistemas formadores de imagen (*imaging systems*) y sistemas no formadores de imagen (*non imaging systems*)

Las **aberraciones** son las desviaciones del comportamiento ideal de los sistemas ópticos, inherentes al diseño de los mismos y existen aún cuando los procesos de producción, fabricación y manufactura sean perfectos (ideales). Estos procesos pueden aportar otras aberraciones añadidas.

La “**Óptica de Tercer Orden**” (y la “**Óptica de Órdenes Superiores**”) incluye los efectos de las aberraciones en el comportamiento de los sistemas y permite evaluar la calidad de los mismos. A veces también incluye los efectos de difracción.

## Camino Óptico y Principio de Fermat

El **camino óptico** (*optical path length, OPL*) es proporcional al tiempo que la luz invierte al viajar entre dos puntos cualesquiera A y B de un medio de índice de refracción  $n$ .

$$OPL = \int_A^B n(s) ds$$

En un medio homogéneo:  $OPL = n d$ , siendo  $d$ =distancia entre A y B

Los **frentes de onda** son las superficies (lugar geométrico) de camino óptico constante respecto a una fuente puntual

Los **rayos** indican las direcciones de propagación de la energía y son normales (trayectorias ortogonales) a los frentes de onda.

En un **sistema óptico ideal** (*sistema óptico de primer orden*), todos los frentes de onda son planos o esféricos.

**Principio de Fermat:** La trayectoria seguida por un rayo luminoso de un punto A hasta un punto B (a través de un conjunto cualquiera de medios de propiedades ópticas arbitrarias) es una (trayectoria) extremal del camino óptico. En un medio homogéneo, los rayos luminosos siguen trayectorias rectilíneas. En un sistema óptico de primer orden (o sistema paraxial), todos los rayos luminosos de una fuente puntual a su imagen tienen idénticas OPL.

## Refracción y Reflexión

**Ley de Snell de la refracción:** Cuando sobre una superficie de discontinuidad, separadora de dos regiones del espacio con índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , incide un rayo luminoso, tiene lugar una transferencia total o parcial de la energía luminosa de un medio al otro en la que los rayos incidente y refractado verifican:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

siendo  $\theta_1/ \theta_2$  los ángulos que forman los rayos incidente/refractado con la normal a la superficie. Asimismo,

- los rayos incidente, refractado y la normal a la superficie son coplanares.
- en la propagación a través de una serie de interfases paralelas, se conserva la cantidad “ $n \operatorname{sen}\theta$ ”

**Ley de la reflexión:** En las condiciones de la ley de Snell, si parte (o toda) la energía incidente es reflejada hacia el medio del que procede, los rayos incidente y reflejado verifican

$$\theta_1 = - \theta_2$$

- Los rayos incidente, reflejado y la normal a la superficie son coplanares.
- La reflexión se interpreta como una refracción con  $n_2 = - n_1$

En general, desde el punto de vista de la Óptica Geométrica, cuando se produce la incidencia de un rayo luminoso sobre una superficie de discontinuidad, tienen lugar una reflexión y una refracción. La fracción de la energía reflejada depende del coeficiente de reflexión (reflectividad o reflectancia) de la superficie.

La **reflectancia ( $\rho$ )** de una superficie de separación entre dos medios (regiones del espacio) con índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  está dada por los coeficientes de reflexión de Fresnel, (dependientes, entre otros factores, del ángulo de incidencia y de la absorción). En el caso de incidencia normal, y admitiendo que no haya absorción en la interfase, se tiene que

$$\rho = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

**Reflexión total interna (*total internal reflection, TIR*)** ocurre cuando el ángulo de incidencia de un rayo que se propaga desde un medio con un índice de refracción mayor hacia un medio con índice de refracción menor supera el valor del **ángulo límite (*critical angle,  $\theta_c$* )**

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Cuando el rayo incide con el ángulo límite, el ángulo de refracción  $\theta_2 = 90^\circ$

## Espacios Ópticos

Cualquier superficie óptica (superficie de separación o interfase) crea dos espacios ópticos: un **espacio objeto** y un **espacio imagen**. Cada espacio óptico se extiende desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$  y tiene asociado un índice de refracción. En general, hay subespacios (*segments*) reales y virtuales en cada espacio óptico.

Los rayos se trazan desde un espacio óptico a otro. Dentro de cada espacio óptico, los rayos son trayectorias rectilíneas desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$  con segmentos reales y virtuales. Los rayos de espacios adyacentes se encuentran (coinciden) en la superficie óptica común.

Si un sistema tiene  $N$  superficies ópticas, entonces tiene  $N+1$  espacios ópticos. Los objetos e imágenes individuales existen en cada espacio. Comúnmente, se combinan múltiples

superficies ópticas en un único elemento individual y se consideran únicamente los espacios objeto e imagen del elemento resultante sin tener en cuenta los espacios intermedios, interiores al elemento. El caso más sencillo son las lentes, obtenidas como las regiones del espacio (volúmenes) intersección de superficies (alabeadas) limitantes.

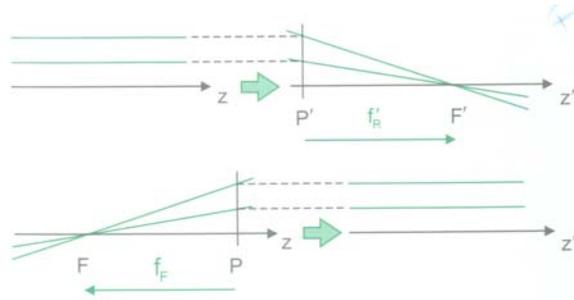
## Óptica Gausiana (OG)

La OG estudia la formación de imagen como una **aplicación del espacio objeto en el espacio imagen**, siendo un caso particular de una transformación colineal aplicada a un sistema con simetría traslacional y aplica puntos en puntos, líneas en líneas y planos en planos. Los elementos objeto e imagen correspondientes (por la transformación) se denominan **elementos conjugados**. En particular

- Planos perpendiculares al eje en un espacio se aplican en planos perpendiculares al eje en el otro espacio.
- Líneas paralelas al eje en un espacio se aplican en líneas conjugadas en el otro espacio que, o bien intersecan al eje en un punto común (**sistema focal**) o bien son también paralelas al eje (**sistema afocal**)
- El aumento (o magnificación) transversal (o lateral) es el cociente entre las alturas (respecto al eje) de un punto imagen ( $h'$ ) y de su punto conjugado ( $h$ ):  $m = h'/h$

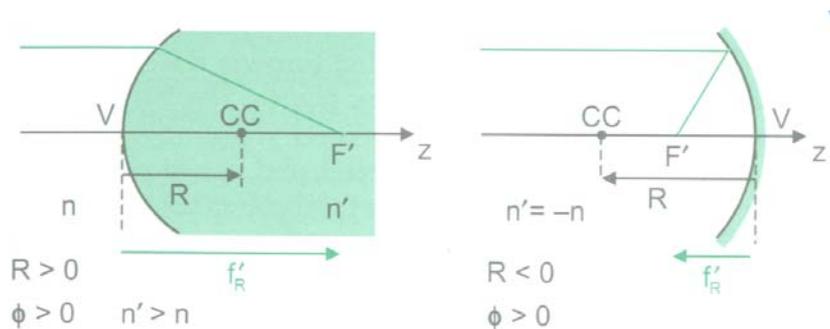
Los **puntos y planos cardinales** (**puntos y planos focales y principales**, anteriores y posteriores) describen completamente la aplicación. Se definen por sus magnificaciones específicas:

$F'$	<i>front focal point/plane</i>	$m = \infty$
$F$	<i>rear focal point/plane</i>	$m = 0$
$P$	<i>front principal plane</i>	$m = 1$
$P'$	<i>rear principal plane</i>	$m = 1$



Las **distancias focales anterior y posterior** (*front and rear focal lengths*,  $f_F$ ,  $f_R$ ) se definen como las distancias orientadas desde los planos principales anterior y posterior a los puntos focales correspondientes.

## Superficies refractantes y reflectantes



- El **radio de curvatura**  $R$  es la distancia orientada desde su vértice ( $V$ ) a su centro de curvatura ( $CC$ ). La curvatura de la superficie es  $C = 1/R$
- Los **planos principales anterior y posterior** ( $P$  y  $P'$ ) de una superficie óptica son coincidentes y están localizados en el vértice de la superficie ( $V$ )
- La **potencia de una superficie óptica** es

$$\phi = (n - n')C = \frac{n - n'}{R}$$

- La distancia focal efectiva (o equivalente, o, simplemente, **distancia focal**), (*effective or equivalent focal length*,  $f_E$ ) se define como

$$f = f_E = \frac{1}{\phi}$$

- Las distancias focales anterior y posterior se relacionan con la distancia focal por

$$f_F = -\frac{n}{\phi} = -n f_E \quad f'_R = -\frac{n'}{\phi} = n' f_E$$

$$f_E = -\frac{f_F}{n} = \frac{f'_R}{n'} \quad \frac{f'_R}{f_F} = -\frac{n'}{n}$$

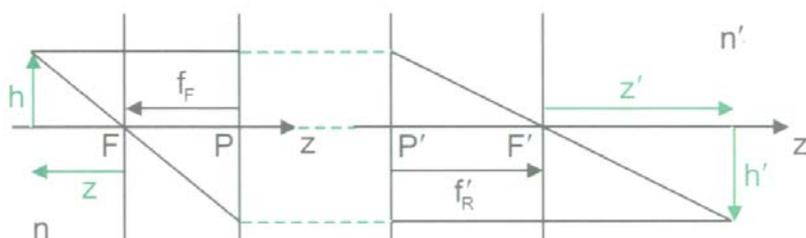
- Una superficie reflectante es un caso particular con  $n'=-n$

$$\phi = -2nC = -2\frac{n}{R}$$

$$f_F = f'_R = -\frac{n}{\phi} = -n f_E = \frac{R}{2} = \frac{1}{2C}$$

## Formulación (ecuaciones) de Newton

Para un sistema focal formador de imagen (*focal imaging system*), la posición de cada plano objeto se relaciona con la posición de su plano imagen conjugado mediante la magnificación transversal ( $m$ ) asociada con esos planos. Las **ecuaciones de Newton** caracterizan esta aplicación gaussiana cuando las posiciones axiales de los planos objeto e imagen conjugados se miden relativas a los respectivos puntos focales. Por definición, las distancias focales anterior y posterior se miden respecto a los planos principales y, así, las ecuaciones de Newton resultan del análisis de los triángulos semejantes:



$$z = -\frac{f_F}{m} \quad \frac{z}{n} = \frac{f_E}{m}$$

$$z' = -m f'_R \quad \frac{z'}{n'} = -m f_E$$

$$z z' = f_F f'_R \quad \left(\frac{z}{n}\right)\left(\frac{z'}{n'}\right) = -f_E^2$$

- Los puntos focales anterior y posterior se aplican en el infinito ( $m=\infty$  y  $m=0$ )
- Los dos planos principales son conjugados entre sí ( $m=1$ )

Los puntos cardinales, y las distancias focales y potencias asociadas especifican completamente la aplicación del espacio objeto en el espacio imagen, para sistemas focales y, así, la formulación gaussiana se fundamenta en reducir cualquier sistema óptico focal, independientemente del número de superficies ópticas que lo compongan, a un único conjunto de puntos cardinales.

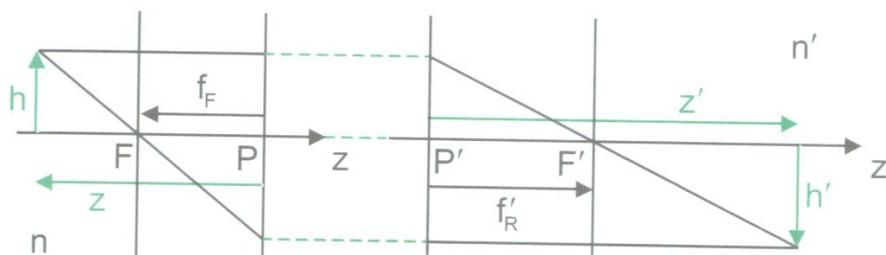
La **distancia focal efectiva de un sistema** se determina, por tanto, a partir de sus distancias focales anterior o posterior, de manera análoga a la descrita para una única superficie:

$$f_E = -\frac{f_F}{n} = \frac{f'_R}{n'} \quad f = f_E = \frac{1}{\phi}$$

La **potencia óptica** ( $\Phi$ ) se puede evaluar también en dioptrías (D) definidas como el recíproco de la distancia focal cuando ésta se mide en metros.

## Formulación (ecuaciones) de Gauss

Cuando las referencias para medir las localizaciones de los planos objeto e imagen conjugados son los planos principales respectivos, las ecuaciones que resultan para las aplicaciones focales se denominan **ecuaciones gaussianas**:



$$\begin{aligned} z &= -\frac{(1-m)}{m} f_F & \frac{z}{n} &= \frac{(1-m)}{m} f_E \\ z' &= (1-m) f'_R & \frac{z'}{n'} &= (1-m) f_E \\ m &= -\left(\frac{z'}{z}\right) \left(\frac{f_F}{f'_R}\right) & m &= \frac{z'/n'}{z/n} \\ \frac{f'_R}{z'} + \frac{f_F}{z} &= 1 & \frac{n'}{z'} &= \frac{n}{z} + \frac{1}{f_E} \end{aligned}$$

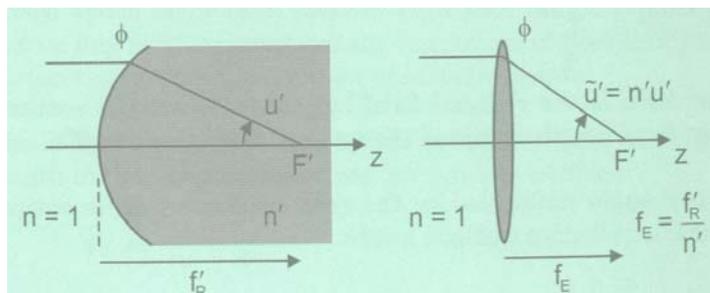
## Magnitudes reducidas

Cuando se expresan las ecuaciones de Newton y de Gauss en función de la EFL o de la potencia ( $f_E$  o  $\Phi$ ) todas las distancias axiales aparecen como el cociente de una distancia física entre el índice de refracción de su espacio óptico y, por tanto, permiten definir las **distancias reducidas** correspondientes (simbolizadas por una letra griega):

- dado el espesor  $t \rightarrow \tau = t/n$
- la EFL es, en esta interpretación, la distancia focal posterior reducida (o menos la distancia focal anterior reducida)

Análogamente, el producto de un ángulo físico ( $u$ , *ray angle*) por el índice de refracción del espacio en el que se encuentra se denomina **ángulo óptico** ( $\omega$ , *optical angle*):  $\omega = n u$

La utilización de las magnitudes reducidas (distancias reducidas y ángulos ópticos) permite encontrar sistemas *lente delgada-aire* equivalentes a cualquier sistema, facilitando su resolución analítica y numérica. Como ejemplo, mostramos una superficie refractante y su equivalente:

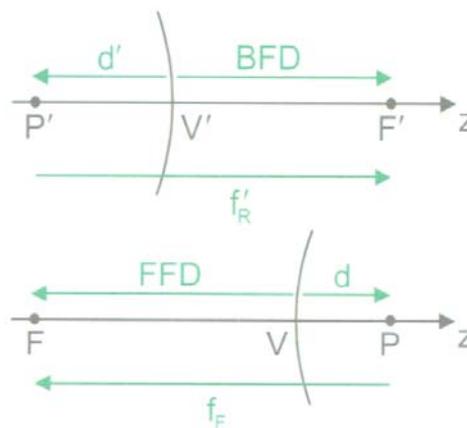


## Puntos Nodales

Los puntos nodales anterior y posterior (N y N') son dos puntos cardinales adicionales que, en los sistemas focales, definen las localizaciones (posiciones) en las que el aumento angular es unitario. Un rayo que pase por un punto nodal de un sistema se aplica por la transformación en un rayo que pasa por el otro punto nodal con el mismo ángulo respecto al eje óptico. Para una única superficie refractante/reflectante, los dos puntos nodales están situados en el centro de curvatura de la superficie.

## Distancias a los vértices

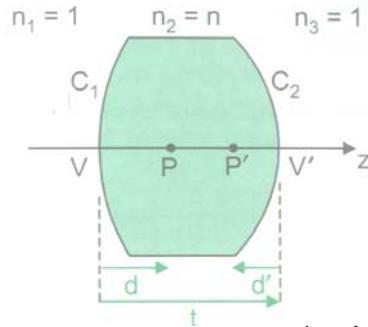
Los vértices de las superficies son los datos disponibles para el montaje mecánico de los elementos ópticos y, frecuentemente, se toman como posiciones de referencia para localizar los elementos cardinales:



- distancia focal posterior (*back focal distance, BFD*):  $BFD = f'_R + d'$
- distancia focal anterior (*front focal distance, FFD*):  $FFD = f_F + d$
- distancias objeto e imagen a los vértices: se determinan usando las distancias gaussianas  $z$  y  $z'$ :  $s = z + d$ ,  $s' = z' + d'$

## Lente gruesa y lente delgada

Las magnitudes que caracterizan una **lente gruesa** en aire son las siguientes:



$$\tau = \frac{t}{n}$$

$$\phi = (n-1)[C_1 - C_2 + (n-1)C_1 C_2 \tau]$$

$$d = \frac{\phi_2}{\phi} \tau$$

$$\phi_1 = (n-1)C_1 \quad \phi_2 = -(n-1)C_2$$

$$d' = -\frac{\phi_1}{\phi} \tau$$

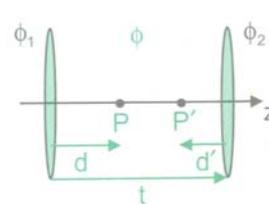
Siendo V y V' los vértices de las superficies y los puntos nodales coincidentes con los planos principales.

Una **lente delgada** se obtiene haciendo  $t \rightarrow 0$  en la lente gruesa:

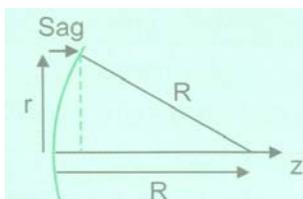
- $\phi = (n-1)(C_1 - C_2)$
- $d = d' = 0$
- los planos principales y los puntos nodales están localizados en la propia lente
- cuando se tienen dos lentes delgadas separadas (en el aire)

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_1 \phi_2 t$$

$$d = \frac{\phi_2}{\phi} t \quad d' = -\frac{\phi_1}{\phi} t$$



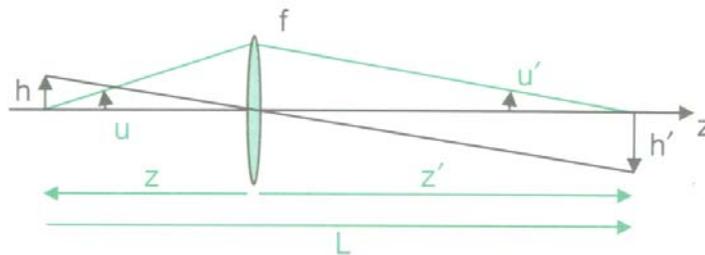
Es importante recordar que la distancia de combado (*sag*) debido a la curvatura de una superficie esférica puede calcularse utilizando la aproximación parabólica como



$$Sag = s(r) \approx \frac{r^2}{2R} \quad \text{si } Sag \ll r$$

## Formación de imágenes en la lente delgada

La lente delgada es el elemento más común utilizado en los sistemas de primer orden. Es un elemento ideal que tiene potencia óptica pero espesor nulo, análogo (conceptualmente) a una única superficie refractante separadora de dos medios con el mismo índice (usualmente aire). Los planos principales y los planos nodales están situados en la lente:



$$f = f_E = f'_R = -f_F = \frac{1}{\phi} \quad \frac{1}{z'} = \frac{1}{z} + \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{m} = 1 + \frac{z}{f} \quad m = 1 - \frac{z'}{f}$$

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{z'}{z} = \frac{u}{u'}$$

La **distancia total objeto-imagen** para una lente delgada en el aire es una función de la magnificación conjugada

$$L = z - z' = -\frac{(1-m)^2}{m} f_E$$

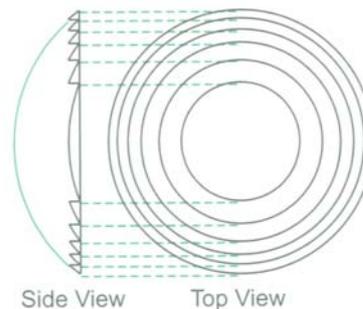
y, por tanto, para cada L hay dos posibles magnificaciones conjugadas (**magnificaciones recíprocas**):  $m$  y  $1/m$ .

La mínima distancia objeto-imagen (con objeto e imagen reales) ocurre cuando se tiene una **relación de imagen 1:1 (1:1 imaging)**

$$m = -1 \quad L = 4 f_E$$

## Lentes de Fresnel (o lentes zonales)

Las lentes de Fresnel son lentes habitualmente realizadas en un material plástico en el que, sobre una superficie plana, se moldea la estructura de zonas radiales correspondiente a aproximar la curvatura de cada parte de una lente volumétrica por la parte exterior de la misma (véase Figura). Al recibir la luz procedente de un objeto, cada zona (cuya resolución está limitada por la difracción) produce una imagen y el conjunto de imágenes se superpone de forma incoherente. Su principal ventaja es la notable reducción de peso y volumen respecto a una lente volumétrica de la misma distancia focal, aunque su calidad óptica es menor. Asimismo, es necesario mantener su temperatura de funcionamiento por debajo de los límites de deformación del material para garantizar la correcta formación de la imagen.



## Sistemas afocales

Un **sistema afocal** está formado por la combinación de dos sistemas focales situados de manera tal que el punto focal posterior del primer sistema coincide con el punto focal anterior del segundo sistema. Así, los rayos paralelos al eje en el espacio objeto son conjugados de los rayos paralelos al eje en el espacio imagen (**sistema infinito-infinito**). Los sistemas afocales se utilizan en telescopios, binoculares y expansores de haz.

En estos sistemas

- los aumentos longitudinal y transversal son constantes y
- planos equiespaciados se aplican en planos equiespaciados. Los espaciados (axiales) relativos se modifican en el factor magnificación longitudinal

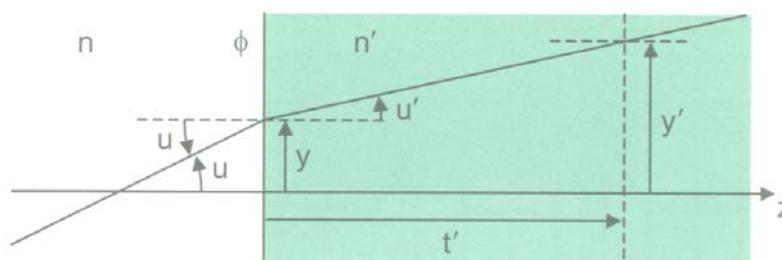
$$\bar{m} = \frac{n'}{n} m^2$$

- los puntos cardinales no están definidos y, por tanto, las ecuaciones de Newton y de Gauss no son aplicables. No obstante, cualquier par de planos conjugados (acoplados mediante  $\bar{m}$ ) pueden utilizarse para los cálculos.

## Óptica Paraxial

La Óptica Paraxial es un método de determinación de las propiedades de primer orden de un sistema óptico que asume que todos los ángulos de los rayos respecto al eje óptico son pequeños. El trazado de rayos es así lineal con respecto a los ángulos y las alturas puesto que se considera que

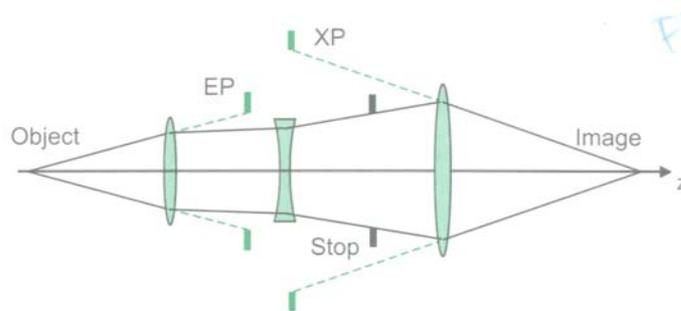
- todos los ángulos  $u$  verifican  $u = \text{sen}(u) = \text{tan}(u)$
- sólo se consideran rayos próximos al eje óptico
- la curvatura de las superficies se consideran despreciables
- la refracción y la reflexión tienen lugar en las interfases entre dos espacios ópticos
- la distancia de transferencia  $t'$  permite determinar la altura  $y'$  de los rayos en cualquier plano dentro de un espacio óptico (incluyendo los segmentos virtuales). Este tipo de trazado de rayos se denomina “trazado YNU” (*YNU raytrace*).



Refracción/Reflexión:	$n'u' = nu - y\phi$	$\omega' = \omega - y\phi$
Transferencia:	$y' = y + u't'$	$y' = y + \omega'\tau'$

## Diafragmas y Pupilas

El **diafragma de apertura** (*aperture stop*) es la apertura en el sistema que limita el haz luminoso que se propaga a través del sistema desde el punto axial (intersección con el eje) del objeto considerado. Este diafragma puede ser la propia apertura (diámetro) de alguna de las lentes componentes del sistema o una apertura independiente, por ejemplo, un diafragma de iris, situado en alguna parte del sistema. Es importante señalar que un diafragma siempre es una superficie física limitante.



Por otra parte, las **pupilas de entrada** (*entrance pupil, EP*) y **de salida** (*exit pupil, XP*) son las imágenes del diafragma de apertura en los espacios objeto e imagen. Las pupilas (EP y XP) definen los conos de luz que entran y salen del sistema óptico desde cualquier punto objeto. Hay un diafragma o pupila en cada espacio óptico, la EP en el espacio objeto y la XP en el espacio imagen. La pupila de salida (XP) de un instrumento visual (diseñado para visualizar una imagen mediante observación directa por el ojo humano) se denomina también **círculo ocular** (*eye circle*) o **círculo de Ramsden**.

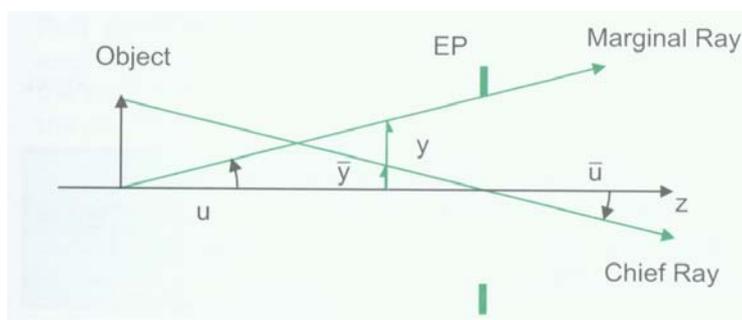
Hay dos procedimientos para determinar cuál de las aperturas presentes en un sistema funciona como el diafragma de apertura del mismo:

- i) obtener la imagen de cada apertura “potencial” en el espacio objeto. La pupila con el mínimo tamaño angular (desde el punto objeto axial) corresponde al diafragma de apertura. Un procedimiento análogo puede realizarse en el espacio imagen.
- ii) Trazar un rayo a través del sistema (desde el punto axial del objeto) con un ángulo arbitrario. La apertura que defina (sea) el diafragma de apertura será aquella proporcionalmente más cercana a este rayo: para determinarla, hay que evaluar los cocientes formados por los radios de cada diafragma ( $a_k$ ) y las alturas de este rayo en

las posiciones de cada superficie ( $y_k$ ), de manera que el diafragma de apertura será la apertura correspondiente a:  $\min |a_k/y_k|$

## Rayos marginal y principal

Los rayos contenidos en el plano y-z se denominan rayos meridionales. Hay dos rayos meridionales particularmente importantes puesto que definen las pupilas y los tamaños de las imágenes:

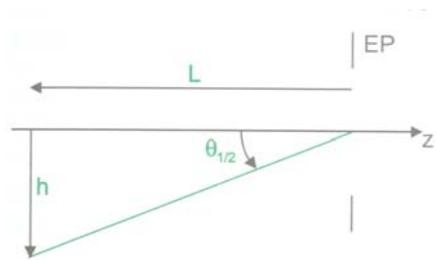


- el **rayo marginal** (*marginal ray*): parte de la posición axial del objeto, tangente al borde de la pupila de entrada, y define las posiciones de las imágenes y los tamaños de las pupilas. Se propaga tangente a los bordes del diafragma de apertura y de la pupila de salida y su altura y su ángulo son, respectivamente  $(y, u)$
- el **rayo principal** (*chief ray*): parte del borde del objeto, pasa por el centro de la pupila de entrada y define las alturas de las imágenes y las posiciones de las pupilas. Pasa por los centros del diafragma de apertura y de la pupila de salida. Su altura y su ángulo son, respectivamente  $(\bar{y}, \bar{u})$ .

Las alturas de los rayos marginal y principal pueden evaluarse en cualquier z de cualquier espacio óptico.

## Campo de visión (Field Of View, FOV)

El campo de visión (FOV) de un sistema óptico se expresa habitualmente como el máximo tamaño angular de un objeto visto desde la pupila de entrada, aunque a veces se utiliza también la máxima altura de la imagen. En el caso de los sistemas conjugados finitos, esta altura máxima es muy útil porque pueden definirse triángulos rectángulos que simplifican los cálculos. Al ser la pupila de entrada la posición de referencia para el FOV, este rayo “límite” define el rayo principal del sistema.



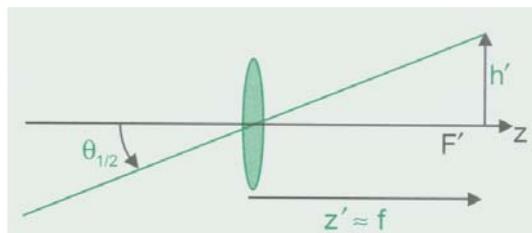
FOV (también denominado *Full Field Of View*, FFOV)= diámetro del objeto/imagen

HFOV (semicampo de visión, *Half Field Of View*):

$$HFOV = \theta_{1/2} \quad \text{ó} \quad HFOV = h$$

$$\tan(\theta_{1/2}) = \frac{h}{L} \quad \bar{u} = \tan(\theta_{1/2}) = \frac{h}{L}$$

**Para objetos distantes, suponiendo una lente delgada** (en aire) con el diafragma de apertura en la propia lente, se tiene:



$$\bar{u} = \tan(\theta_{1/2}) \approx \frac{h'}{f} \quad h' \approx f \tan(\theta_{1/2}) = f \bar{u}$$

El FOV está determinado así por el máximo tamaño del objeto, el tamaño del detector o por el campo sobre el que el sistema tiene buenas prestaciones. Cuando se tiene formatos de imagen rectangular, por ejemplo, en cámaras (analógicas o digitales), hay que especificar los FOVs vertical, horizontal y diagonal.

## Invariante de Lagrange

La linealidad de los sistemas ópticos paraxiales permite definir una relación entre las alturas y los ángulos de cualquier par de rayos que se propaguen a través del sistema. El invariante de Lagrange ( $\mathcal{H}$  o  $H$ ) se forma cuando se consideran los rayos (paraxiales) principal y marginal, y se expresa como

$$\mathcal{H}=H= n \bar{u} y - n u \bar{y} = \bar{\omega} y - \omega \bar{y}$$

siendo esta expresión invariante en la refracción y en la propagación (transferencia) de los rayos. Si se construye usando otra pareja cualesquiera de rayos, se denomina **invariante óptico**.

Si se cambia el invariante de Lagrange de un sistema, se produce un *escalado* del mismo: duplicar el invariante de Lagrange manteniendo los mismos tamaños de objeto e imagen y diámetros de las pupilas equivale a dividir a la mitad todas las distancias axiales (incluyendo la distancia focal).

La magnitud energética denominada “*throughput*” (o “*etendue*”, o “*producto  $A\Omega$* ” en radiometría y transferencia radiativa) se relaciona con el invariante de Lagrange por

$$n^2 A\Omega = \pi^2 H^2$$

## Apertura Numérica (*numerical aperture, NA*) y número-f (número de diafragma, *F-Number, f/#*)

En un espacio óptico de índice de refracción  $n$ , la **apertura numérica**  $NA$  describe el cono (axial) de rayos definido por el rayo marginal real con el eje del sistema:

$$NA = n \sin(U) \approx n U$$

Por otra parte, el **número-f** (*F-number, f/#*) describe el cono de luz que forma, en el espacio imagen, un objeto en el infinito: siendo  $D_{EP}$ =diámetro de la pupila de entrada (EP), se tiene

$$f / \# = \frac{f_E}{D_{EP}}$$

Para una lente delgada con diafragma de apertura en la lente, en un sistema de conjugados infinitos (sistema infinito-infinito), ambas magnitudes están relacionadas:

$$f / \# \approx \frac{1}{2 NA}$$

Esta aproximación permite definir el número-f en otros sistemas conjugados: en particular, para sistemas finito-finito, con magnificación  $m$ , se define el **working F-number** ( $f/\#_w$ ) que es la magnitud útil para describir el cono de formación de imagen:

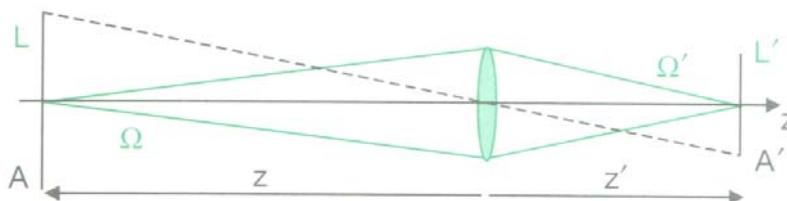
$$f / \#_w = \frac{1}{2 NA} \approx (1 - m) f / \# = (1 - m) \frac{f_E}{D_{EP}}$$

- Los **sistemas ópticos** (y, en particular, las lentes) denominados **rápidos** tienen valores numéricos pequeños del número-f.
- La mayoría de las lentes utilizadas en las aplicaciones prácticas que tienen diafragmas regulables permiten seleccionar el valor del  $f/\#$  en una escala etiquetada en incrementos de  $\sqrt{2}$ , correspondientes a cambiar la superficie de la pupila de entrada (y, por tanto, la “capacidad de admitir luz”) en el sistema en un factor 2:

$f/\#$ :	$f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22, \dots$
Cono de entrada:	grande $\rightarrow$ pequeño
Entrada de luz:	“mucha” $\rightarrow$ “poca”

## Transferencia radiativa

La **transferencia radiativa** determina la cantidad de luz procedente de un objeto que alcanza a su imagen.



En el aire, la radiancia (potencia por unidad de área (proyectada) por unidad de ángulo sólido,  $L$ , [ $L$ ]=W/(m<sup>2</sup> sr)) y el “**producto  $A\Omega$** ” (o “**throughput**”) se conservan, y el flujo luminoso  $\Phi$  incidente en la lente se transmite al área de la imagen  $A'$ .

Así

$$L = L', \quad A\Omega = A'\Omega', \quad m^2 = A'/A = (z'/z)^2$$

$$\Phi = L A\Omega = L' A'\Omega'$$

y la irradiancia (potencia por unidad de área incidente,  $E$ , [ $E$ ]=W/m<sup>2</sup>) en el plano de la imagen

es

$$E' = \frac{\pi L}{4(1-m)^2 (f/\#)^2} = \frac{\pi L}{4(f/\#_w)^2} = \pi L (NA)^2$$

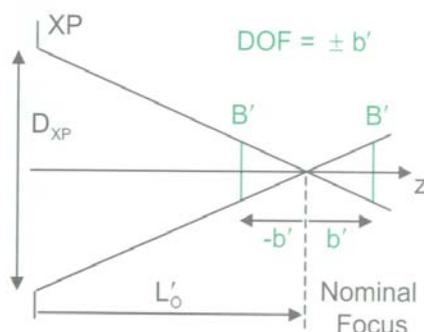
Esta ecuación se denomina “**ecuación de la cámara**” y es válida para objetos lambertianos (superficie perfectamente difusora), ángulos pequeños respecto al eje del sistema y planos objeto e imagen perpendiculares al eje del sistema. La inclusión de los factores debidos a la oblicuidad (inclinación) respecto al eje y a objetos no axiales lleva a obtener la “**ley del coseno a la cuarta**”, en la que la irradiancia varía como el coseno a la cuarta del ángulo de campo.

El producto de la irradiancia en el plano de la imagen,  $E'$  (W/m<sup>2</sup>), por el tiempo de exposición  $\Delta t$  (del detector) nos da la **exposición**  $H = E' \Delta t$  (en J/m<sup>2</sup>). Por ejemplo, la **constante solar media** es de 1386 W/m<sup>2</sup> fuera de la atmósfera terrestre y de unos 1000 W/m<sup>2</sup> sobre la superficie a nivel del mar.

En el caso general de un medio con índice de refracción no unidad, los invariantes son el “**basic throughput**” =  $n^2 A\Omega$  y la “**radiancia básica**” =  $L/n^2$ . Como el **throughput** se basa en las áreas (objeto e imagen), la condición general es  $n^2 A\Omega = \pi^2 H^2$

## Profundidad de Foco (*depth of focus, DOF*) y profundidad de campo (*depth of field*)

La máxima resolución espacial discernible por un sistema detector define un “*criterio de borrosidad*” (*blur criterion*) dado por el diámetro  $B'$  (mínimo) por debajo del cual las “manchas imagen” de dos puntos del objeto no son distinguibles. Esta definición es en ausencia de aberraciones, cuyo efecto habría que añadir en cada sistema real (incrementando, por tanto,  $B'$ ).



El diámetro  $B'$  permite definir la profundidad de foco, (*depth of focus, DOF*), como la máxima distancia que el detector puede desplazarse desde la posición nominal (ideal, teórica) de la imagen de un objeto sin que el “emborronamiento” resultante supere el diámetro  $B'$  del criterio de borrosidad. Para un sistema particular, como se muestra en la Figura, siempre que el detector se coloque dentro del intervalo  $\pm b'$  (respecto al foco nominal), la imagen sería igual (de tamaño  $B'$ ) a la registrada en la posición del foco nominal (puesto que imágenes de tamaño menor de  $B'$  no pueden ser distinguidas por el detector).

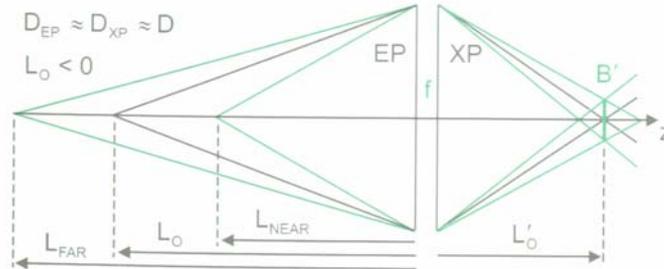
$$DOF = \pm b' \quad b' = \frac{B' L'_o}{D_{XP}} \approx \frac{B' z'}{D_{EP}}$$

$$\rightarrow DOF \approx B' f / \#_w$$

$$\rightarrow DOF \approx \pm \frac{B'}{2 NA}$$

Por otra parte, para un sistema óptico dado, podemos definir, de manera análoga, un rango de posiciones del objeto (desde  $L_{FAR}$  a  $L_{NEAR}$ ), denominado **profundidad de campo** (*depth of field*) tal que siempre que el objeto esté dentro de ese rango de distancias respecto al sistema, su imagen aparecerá enfocada (para cada posición fija del detector o del plano de

observación) puesto que en el detector (que correspondería a la imagen de un objeto en  $L_o$ ) se verifica la condición de que el diámetro de la “mancha imagen” es menor o igual que el diámetro  $B'$  del criterio de borrosidad:

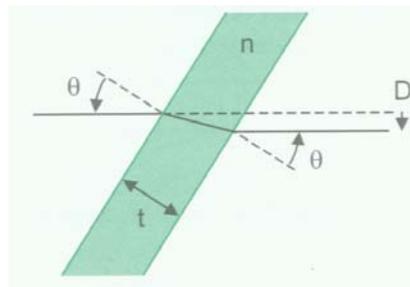


En el caso de lentes delgadas con diafragma de apertura en la lente ( $D_{EP} \approx D_{XP} \approx D$  y  $L_o < 0$ ) se tiene

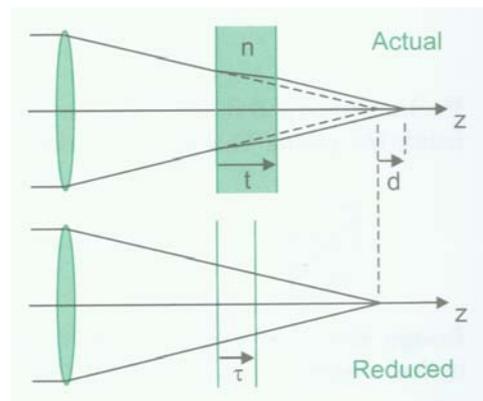
$$L_{NEAR} \approx \frac{L_o f D}{f D - L_o B'} \quad L_{FAR} \approx \frac{L_o f D}{f D + L_o B'}$$

## Imagen a través de planos paralelos

Un rayo luminoso que atraviesa una placa de caras planas paralelas se desplaza pero no se desvía, y los rayos de entrada y salida son paralelos. Así, la imagen formada a través de una placa de caras plana paralelas está longitudinalmente desplazada pero su magnificación no se ha modificado.



$$D = t \operatorname{sen} \theta \left[ 1 - \sqrt{\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \theta}{n^2 - \operatorname{sen}^2 \theta}} \right] \rightarrow D \approx t \theta \left( \frac{n-1}{n} \right)$$

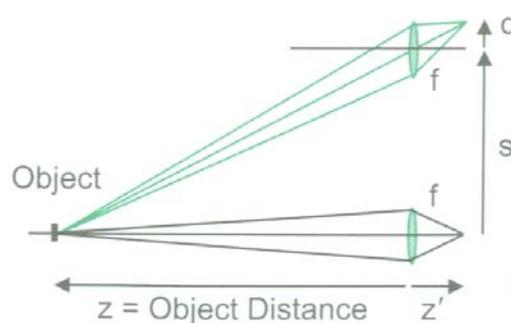


$$d \approx \left( \frac{n-1}{n} \right) t \rightarrow \text{para } n = 1.5 \quad d \approx \frac{t}{3}$$

$$\tau = t - d = \frac{t}{n}$$

## Triangulación y medida de distancia

La diferencia de perspectiva (**paralaje**) entre las imágenes obtenidas mediante dos objetivos (de distancia focal  $f$ ) separados una cierta distancia conocida ( $d$ ) (y con ejes ópticos no paralelos) puede utilizarse para determinar, por triangulación, la distancia  $z$  a un objeto:



Como la distancia objeto  $z$  está relacionada con el desplazamiento relativo de la imagen  $d$  por

$$z = -\frac{s z'}{d} \approx -\frac{s f}{d}$$

los **sistemas medidores de distancia mediante triangulación pasiva** se fundamentan en medir la luminosidad de las dos imágenes de la escena observada, mientras que los **sistemas de triangulación activa** emiten un haz luminoso a través de uno de los objetivos y observan la luz reflejada por el objeto mediante el otro objetivo. Suelen utilizarse haces de luz infrarroja para no interferir con la iluminación ambiente ni el campo visual del observador.

## Dispersión

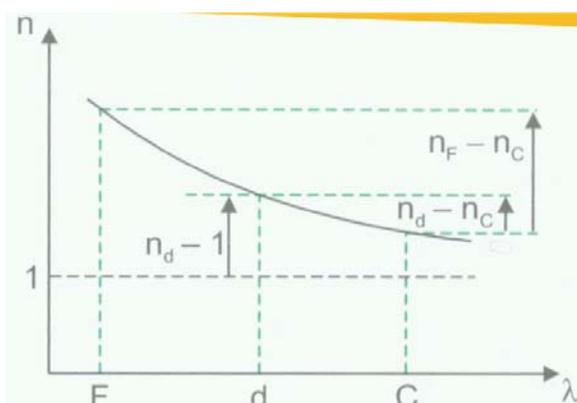
El índice de refracción de un medio,  $n$ , se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío ( $c = 2.99792458 \cdot 10^8$  m/s) y la velocidad de la luz en ese medio ( $v$ ),

$$n = \frac{c}{v}$$

y, en general, puede ser función de la posición (medio inhomogéneo), de la dirección/trayectoria de propagación la energía (medio anisótropo) y de la longitud de onda  $\lambda$  de la misma (medio dispersivo). Así, para caracterizar el valor de  $n$  es necesario indicar la longitud de onda a la que se refiere. Habitualmente se toma como referencia el espectro de emisión del sol, cuya longitud de onda dominante es  $\lambda_0 = 550$  nm.

Recordemos que la longitud de onda de la perturbación  $\lambda$  se relaciona con la frecuencia (física) de la misma ( $\nu$ ) como  $\lambda = v / \nu$ , de manera que en el vacío ( $n = 1$ ) se tiene que  $\lambda = c / \nu$ , siendo el número de onda ( $w$ ) el número de longitudes de onda por unidad de longitud,  $w = 1 / \lambda$ .

En el espectro visible (desde  $\lambda_{\text{azul}} \approx 400$  nm hasta  $\lambda_{\text{roja}} \approx 700$  nm), la dispersión del índice refracción de los vidrios ópticos (utilizados para la fabricación de componentes ópticos) respecto a su valor medio varía desde un 0.5% (vidrios de baja dispersión) hasta un 1.5% (vidrios de alta dispersión). En la Figura se muestra la variación de  $n = n(\lambda)$  indicándose las longitudes de onda más utilizadas (F, d y C) para caracterizar las propiedades de los componentes ópticos en el espectro visible.



Denominación de la línea espectral	Elemento emisor	Longitud de onda (nm)
F	H	486.1
d	He	587.6
C	H	656.3
I	Hg	365.0
h	Hg	404.7
F'	Cd	480.0
g	Hg	435.8
e	Hg	546.1
D	Na	589.3
C'	Cd	643.8
r	He	706.5
t	Hg	1014.0

Las magnitudes comúnmente utilizadas para caracterizar las propiedades de los materiales ópticos son así

- la **refractividad**, definida como

$$\text{Refractividad} = n_d - 1$$

- la **dispersión principal**,

$$\text{Dispersión Principal} = n_F - n_C$$

- el **Número de Abbe** (o **dispersión relativa recíproca** = refractividad/dispersión principal)

$$v = V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

encontrándose los valores típicos del numero de Abbe para los vidrios ópticos en el rango 25 – 65 (valores bajos de v indican alta dispersión)

- la **dispersión parcial**

$$\text{Dispersión Parcial} = n_d - n_c$$

- la **relación (cociente) de dispersión parcial relativa, P**

$$P = P_{d,c} = \frac{n_d - n_c}{n_F - n_c}$$

que nos indica la fracción del cambio total del índice de refracción ( $n_F - n_C$ ) que ocurre entre las longitudes de onda “d” y “C”. Debido al aplanamiento de la curva de dispersión,  $P_{d,c} < 0.5$ . El valor de P puede definirse para cualesquiera otros rangos de longitudes de onda X, Y:

$$P_{X,Y} = \frac{n_X - n_Y}{n_F - n_C}$$

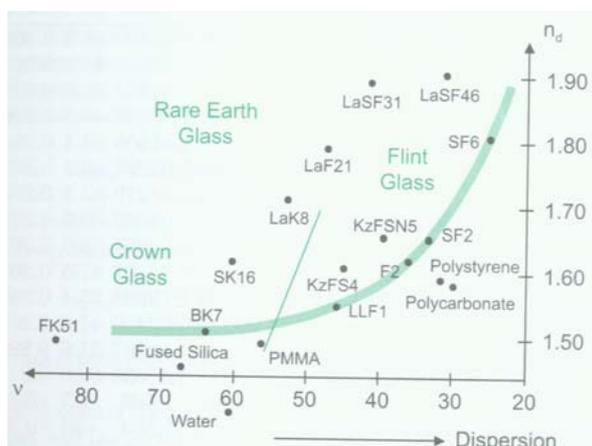
## Vidrios ópticos

El “**mapa de vidrios**” (*glass map*) es una gráfica del índice de refracción frente al número de Abbe (Figura 20) que se utiliza para caracterizar las propiedades de los materiales utilizados para la fabricación de componentes ópticos. Por razones históricas, el número de Abbe se representa creciente hacia la izquierda, y así la dispersión aumenta hacia la derecha. La **curva de vidrios** (*glass line*) es el lugar geométrico de los vidrios ópticos comunes, fabricados con dióxido de silicio. La línea en  $v \sim 50-55$  separa los vidrios ópticos en dos grandes grupos: **vidrios crown** (baja dispersión) y **vidrios flint** (alta dispersión). La adición de óxido de plomo incrementa la dispersión y el índice de refracción del vidrio, desplazándolo hacia la parte superior de la curva. Si se desea aumentar el índice de refracción sin aumentar la dispersión, es necesario añadir óxido de bario. Los vidrios de tierras raras se basan en óxido de lantano (en vez de en dióxido de silicio) y presentan altos índices con baja dispersión.

Los vidrios alejados de la curva son, en general, más “suaves”, y difíciles de pulir, mientras que los vidrios de índice bajo suelen ser menos densos y tener mejor transmisión en las longitudes de onda azules.

En la actualidad se está investigando en la “reformulación” de los materiales ópticos para intentar eliminar de su composición, a causa de su toxicidad para el medio ambiente, el

arsénico y el plomo, siendo este último sustituido por titanio. Estos nuevos vidrios ópticos se identifican por la letras “E”, “N” o “S”, dependiendo del fabricante.



Para identificar los materiales ópticos se utiliza, así, un código de seis números, el **código del vidrio (glass code)**, que indica su índice de refracción y su número de Abbe:

$$abcdef \leftrightarrow n_d = 1.abc \quad y \quad v = de.f$$

A veces, los valores de los índices de refracción en los catálogos se refieren al índice de refracción del aire ( $n_{\text{aire}} \approx 1.0003$ ). Asimismo, suelen especificarse otras propiedades de interés en los montajes de aplicaciones como los **coeficientes de expansión térmica**, los **coeficientes de variación con la temperatura o de transmisión interna** en función de la longitud de onda, diversas propiedades mecánicas y valores de resistencia química y ambiental.

Material	Code	$n_d$	$n_F$	$n_C$	$v$	$P$
N-FK51*	487845	1.48656	1.49056	1.48480	84.5	0.306
N-BK7	517642	1.51680	1.52238	1.51432	64.2	0.308
LLF1	548458	1.54814	1.55655	1.54457	45.8	0.298
N-KzFS4	613445	1.61336	1.62300	1.60922	44.5	0.301
N-F2	620364	1.62005	1.63208	1.61506	36.4	0.294
N-SK16	620603	1.62041	1.62756	1.61727	60.3	0.305
SF2	648339	1.64769	1.66123	1.64210	33.9	0.292
KzFSN5	654396	1.65412	1.66571	1.64920	39.6	0.298
N-LaK8	713538	1.71300	1.72222	1.70897	53.8	0.304
N-LaF21	788475	1.78800	1.79960	1.78301	47.5	0.301
N-SF6	805254	1.80518	1.82783	1.79608	25.4	0.287
N-LaSF31	881410	1.88067	1.89576	1.87429	41.0	0.297
N-LaSF46	901316	1.90138	1.92156	1.89307	31.6	0.292
Fused Silica	458678	1.45847	1.46313	1.45637	67.8	0.311
PMMA	492574	1.492	1.498	1.489	=55	=0.33
Polycarbonate	585299	1.585	1.600	1.580	=30	=0.25
Polystyrene	590311	1.590	1.604	1.585	=31	=0.26
Water	333560	1.333	1.337	1.331	=60	=0.33

\* Schott Glass Technologies Inc. designation. Equivalent glasses can also be obtained from Ohara Corp. and Hoya Corp.

## El arco iris y el cielo azul

El arco iris se origina por la combinación de los efectos de refracción, reflexión y dispersión en el interior de las gotas de agua en la atmósfera. Aún cuando el rayo incidente se refracta y dispersa dos veces, en la formación del **arco iris primario**, el rayo experimenta una única reflexión total interna mientras que en la formación del **arco iris secundario** se experimentan dos reflexiones. En ambos casos, la luz azul se desvía más que la luz roja. Los ángulos de observación son, aproximadamente, de 42° y de 51°, respecto a la horizontal del observador.

Las moléculas en la atmósfera actúan como centros dispersores para la luz solar incidente. Como el mecanismo primario de dispersión es la **dispersión Rayleigh**, que tiene una dependencia del tipo  $1/\lambda^4$ , la luz azul es más dispersada que las longitudes de onda más largas, por lo que, en condiciones de incidencia de luz “en la vertical local” el cielo se ve predominantemente azul. Por la misma razón, en la salida y puesta del sol, como los rayos solares recorren una mayor distancia en la atmósfera (incidencia tangente respecto a la posición del observador), las componentes azul y verde son desviadas, dejando las componentes rojas y naranjas del espectro emitido, las cuales llegan al observador y proporcionan el color rojizo anaranjado característico.

## Dispersión en Prismas

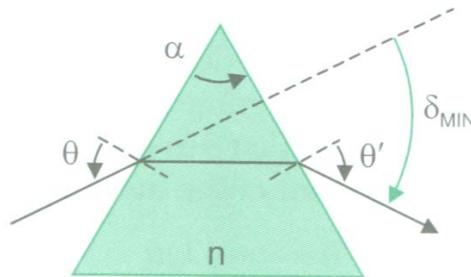
En las condiciones denominadas de mínima desviación, la trayectoria de un rayo luminoso que incide sobre la (primera) cara de un prisma con un ángulo  $\theta$  es simétrica,  $\theta^i = \theta^r$ , puesto que la desviación experimentada en las dos caras es de la misma magnitud. Se define así el **ángulo de mínima desviación**,  $\delta_{\min}$ , como

$$\delta_{\min} = \alpha - 2 \arcsen\left(2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$$

de manera que se puede determinar el índice de refracción del material con que se ha hecho el prisma únicamente midiendo  $\delta_{\min}$  y el ángulo  $\alpha$  del vértice:

$$n = \frac{\text{sen}\left[\frac{(\alpha - \delta_{\text{min}})}{2}\right]}{\text{sen}(\alpha/2)}$$

Con el mismo fundamento, los espectrómetros de prisma, utilizados para medir las longitudes de onda componentes de un espectro pueden alcanzar precisiones de una parte en  $10^6$ .



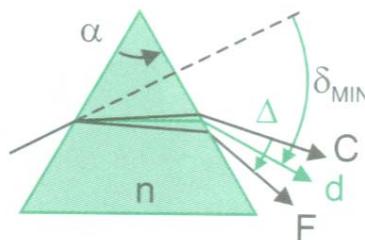
En general, aunque el análisis detallado de la dispersión de la luz por un prisma requiere tener en cuenta la geometría utilizada y la expresión particular de la curva de dispersión del material, si nos encontramos cerca de las condiciones de ángulo mínimo indicadas anteriormente, se puede estimar la dispersión media del prisma en una banda de longitudes de onda (desde F hasta C) como

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{d\delta}{dn} \frac{dn}{d\lambda} \approx \frac{d\delta_{\text{min}}}{dn} \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} \approx \frac{d\delta_{\text{min}}}{dn} \frac{(n_F - n_C)}{(\lambda_F - \lambda_C)}$$

donde

$$\frac{d\delta_{\text{min}}}{dn} = \frac{-2 \text{sen}(\alpha/2)}{\cos\left[\frac{(\alpha - \delta_{\text{min}})}{2}\right]}$$

Y, en particular, observamos cómo la luz azul experimenta mayor desviación que la luz roja.

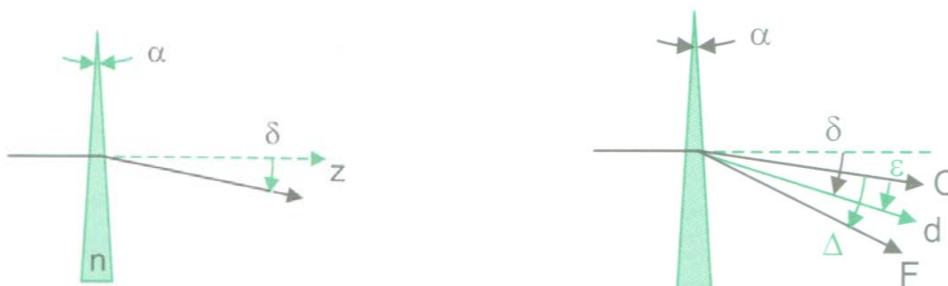


## Prismas delgados y sus aplicaciones

En el caso de prismas delgados, las desviaciones angulares introducidas son pequeñas, y aproximadamente independientes del ángulo de incidencia,

$$\delta \approx - (n-1) \alpha$$

por lo que suelen utilizarse como elementos correctores de alineamiento de haces en montajes ópticos, o para la corrección optométrica del estrabismo.



La desviación se cuantifica en “**dioptrías de prisma**” (*prism diopters*), de manera que un prisma de 1 dioptría desvía un haz 1 cm a 1 m.

Un **prisma de Risley** consiste en una pareja de prismas delgados opuestos cuya rotación relativa permiten realizar ajustes finos en un sistema óptico.

Por otra parte, la **dispersión de un prisma delgado** ( $\Delta$ ) mide la dispersión angular total de la luz en el rango de longitudes de onda (C-F), mientras que la **dispersión secundaria** ( $\epsilon$ ) mide la desviación en desde la longitud de onda C hasta la d. Estas magnitudes dependen del índice  $n_d$ , el número de Abbe  $v$ , y la relación de dispersión parcial P del vidrio:

Desviación:  $\delta = -(n_d - 1) \alpha$

Dispersión:  $\Delta = -(n_F - n_C) \alpha$        $\Delta = \delta / v$

Dispersión Secundaria:  $\epsilon = -(n_d - n_C) \alpha$        $\epsilon = P \Delta = P \delta / v$

Un **prisma delgado acromático** o **cuña acromática** (*achromatic wedge*) puede así construirse combinando dos prismas delgados de manera que se produzca desviación de la trayectoria de los rayos luminosos sin dispersión.

## El ojo humano

La **potencia óptica** del ojo humano es de unas 60 D, de las cuales la córnea supone unas 43 D. El radio de curvatura de la **córnea** es de unos 8 mm, y la longitud total del ojo (a lo largo del eje óptico) es de unos 25 mm. Puesto que el humor vítreo ( $n_v=1.337$ ) llena el globo ocular, la distancia focal posterior difiere de la distancia focal

$$f = \frac{1}{\phi} \approx 17 \text{ mm} \quad f'_R = n_v f \approx 23 \text{ mm}$$

Las variaciones anatómicas pueden suponer diferencias de hasta un 25% en estas propiedades. El **crystalino** es una lente de gradiente de índice, no homogénea, con un índice de refracción mayor en su zona central. Cuando el ojo está relajado (enfocado al infinito), su potencia es de unas 19 D, mientras que para observar objetos cercanos, la contracción de los **músculos ciliares** aumenta la potencia de la lente, incrementando sus radios de curvatura. El rango de **acomodación** puede suponer hasta 15 D, aunque disminuye con la edad de la persona. El **iris** es el diafragma de apertura del ojo, y la **pupila** es la pupila de entrada (óptica, EP), con un diámetro típico de unos 4 mm, en un rango de 2 mm (cuando hay mucha luz exterior) a 8 mm (en condiciones de oscuridad).

Los **planos principales** anterior y posterior (P y P') del ojo se localizan a unos 1.6 mm y 1.9 mm aproximadamente tras el vértice de la córnea. Los **puntos nodales** N y N' se sitúan cerca de la superficie anterior del cristalino, a unos 7.2 mm y 7.5 mm respectivamente del vértice de la córnea. El **eje visual** del ojo se define por la posición de la mácula y esté desplazado unos 5° respecto al **eje óptico**. Se definen los puntos

- **Punto lejano**: distancia objeto que produce una imagen enfocada sin acomodación
- **Punto cercano**: distancia objeto que produce una imagen enfocada sin acomodación.

Para un sujeto estándar, se encuentra a unos 250 mm (10 pulgadas) del ojo.

La **retina** recubre el interior del globo ocular. En ella, los **conos** proporcionan la visión en color (en los niveles de iluminación diurna). La mayor densidad de de conos reside en la **fovea**, en el centro de la **mácula**. La mácula tiene unos 3 mm de diámetro (FOV  $\approx 11^\circ$ ), y la fovea tiene un diámetro de 1.5 mm y un FOV  $\approx 5^\circ$ . Los **bastones** están más uniformemente distribuidos por la retina y son los responsables de la visión adaptada a la oscuridad.

La **sensibilidad a la luz** del ojo humano abarca un rango dinámico del orden de  $10^{10}$  -  $10^{15}$  niveles, mientras que la mayoría de los sensores electrónicos cubren únicamente unos  $10^3$  -  $10^5$ . La mayor contribución a esta capacidad de adaptación a condiciones luminosas tan diferentes es debida a la capacidad de registro de las células de la retina, mientras que la variación del diámetro de la pupila supone únicamente un factor de 16 niveles.

En cuando a la **capacidad de resolución del ojo humano**, en condiciones de luz brillante es de 1 min arc (aproximadamente 1 mm a 3 m), equivalente a unos 100 lp/mm en la retina. Esta resolución se puede cuantificar midiendo la

- **agudeza vernier** (capacidad de alinear dos segmentos a una cierta distancia), que es de unos 5 s arc (aproximadamente 0.1 mm a 3 m)
- **Agudeza Visual (*visual acuity, VA*) de Snellen**: representación mediante un único número de la agudeza visual humana mediante la capacidad del sujeto de identificar caracteres y/o símbolos. Un valor 20/XX indica que el sujeto puede identificar una letra a 20 pies que un observador estándar puede apenas discernir a 10 pies. La línea de caracteres 20/20 en una tabla VA subtiende 10 min arc (descompuestos en 5 segmentos de 1 min arc). La retina humana es capaz de tener una VA superior a 20/10. La tabla VA también se gradúa en unidades del SI con valores en metros.

La resolución del ojo humano y los efectos de difracción, combinados, son los **factores limitantes de la capacidad de aumento (*magnifying power, MP*)** de los telescopios y **de la magnificación visual  $m_V$**  de los microscopios:

$$|MP| \leq 0.43 D_{EP} \text{ con } D_{EP} \text{ en mm, } m_V \leq 230 NA$$

Los **modelos oculares** son sistemas simplificados utilizados para representar el ojo humano desde el punto de vista óptico. El más simple es el **modelo reducido** que lo representa por una única superficie refractante que aproxima sus propiedades paraxiales suponiendo  $n = 1.333$ ,  $R = 5.65$  mm y longitud = 22.6 mm. Algunos modelos más complejos incluyen incluso los efectos de las aberraciones.

## Defectos de visión y su corrección

- **Emetropía (*emmotropia*):** condición de visión normal. La imagen de objetos distantes se forma en la retina.
- **Miopía (*myopia, nearsighted*):** la potencia óptica del ojo es superior a su longitud axial. Las imágenes de objetos distantes se forman antes de la retina. Se corrige con una lente divergente que reduce la potencia óptica total.
- **Hipermetropía (*hyperopia, farsighted*):** la potencia óptica del ojo es insuficiente para objetos cercanos cuyas imágenes se forman más allá de la retina. Se corrige con una lente convergente que aumenta la potencia óptica total.
- **Presbicia (*presbyopia*):** reducción o pérdida de la capacidad de respuesta acomodativa (acomodación) por aumento de la rigidez del cristalino al aumentar la edad. Ocurre a partir de unos 40 años y puede compensarse mediante lentes positivas (bifocales o progresivas).
- **Efecto Stiles-Crawford:** reducción en la “efectividad” (eficiencia luminosa) de los rayos de luz que entran en el ojo tangentes a los bordes de la pupila por variaciones en la forma y orientación de los conos situados en las zonas correspondientes de la retina. La eficiencia luminosa en función del radio de la pupila varía aproximadamente como  
 $1 \text{ mm} \leftrightarrow 90\%$ ,  $2 \text{ mm} \leftrightarrow 70\%$ ,  $3 \text{ mm} \leftrightarrow 40\%$ ,  $4 \text{ mm} \leftrightarrow 20\%$
- **Astigmatismo:** Variación en la potencia óptica ocular según el plano meridional considerado, debida a inhomogeneidades que hacen perder la simetría rotacional (respecto al eje óptico) en la córnea o en el cristalino
- **Estrabismo (*strabismus*):** Defecto en el alineamiento del eje óptico/visual del ojo

### Lentes correctoras

- **Gafas (*spectacles*):** el punto focal posterior de la lente correctora debe situarse en el punto lejano del ojo relajado. Así, si se sitúa la lente en el punto focal anterior del ojo, los objetos distantes aparecen enfocados (por el desplazamiento del punto focal posterior del ojo) sin cambiar la potencia ni aumento de la imagen.
- **Lentes de contacto:** cambian la potencia óptica del ojo porque modifican el radio de curvatura de la superficie exterior (interfase con el aire)
- **Lentes intraoculares (*intraocular lens, IOL*):** cuando el cristalino se deteriora con la edad, volviéndose opaco, puede ser sustituido quirúrgicamente por una lente artificial IOL

### Técnicas de cirugía refractiva

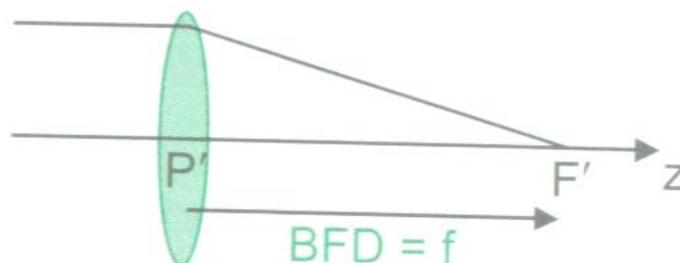
- **RK (*radial keratotomy, queratotomía radial*):** se realiza una serie de incisiones “no penetrantes” en la periferia de la córnea para distenderla y cambiar su forma (“relajándola”)
- **PRK (*photorefractive keratectomy, queratectomía fotorefractiva*):** Se quita la capa externa de la córnea (epitelio) para exponer la capa interna (estroma) y poder modelarla mediante ablación por un láser de excímero (193 nm), cambiando su forma y, por tanto, su potencia óptica. El proceso de cicatrización vuelve a regenerar el epitelio eliminado.
- **LASIK (*Laser in situ keratomileusis*):** variación de la técnica PRK en la que se corta una “ventana” en la córnea, levantando el epitelio (sin retirarlo) para exponer el estroma y, una vez modelado mediante ablación, se vuelve a suturar.
- **Phakik IOL:** implantación quirúrgica de una pequeña lente delante del cristalino para corregir la potencia óptica del ojo.

## Lentes y Objetivos

En términos fotográficos, una **lente estándar** es una lente que proporciona una perspectiva de la imagen y un FOV ajustados para el sistema visual humano. Suelen tener una distancia focal igual a la diagonal del formato donde se registra la imagen (película sensible o plano del detector), aunque hay una considerable variación: por ejemplo, históricamente se consideran como lentes estándar para una cámara de 35 mm (formato 135) aquellas de distancia focal 50-55 mm.

Las lentes que proporcionan un FOV amplio se denominan genéricamente **lentes de gran angular** (*wide angle lenses*), mientras que las lentes que proporcionan un FOV pequeño son las **lentes de distancia focal larga** o “**lentes largas**” (*long focus lenses*).

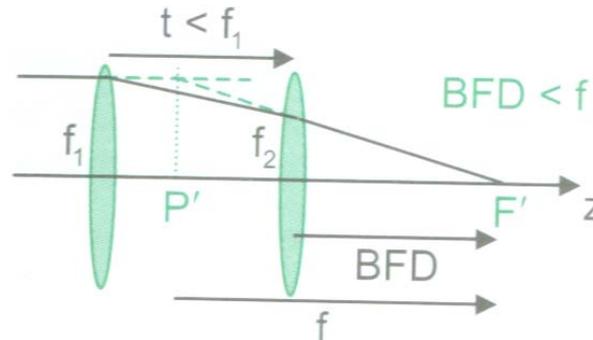
Los **objetivos** son combinaciones de lentes individuales, agrupadas en elementos **componentes** (compuestos cada uno por varias lentes), normalmente utilizados para formar imágenes de objetos distantes. Cada elemento se modela como una lente delgada con las características ópticas (distancia focal, posición de los planos y puntos principales) de la combinación.



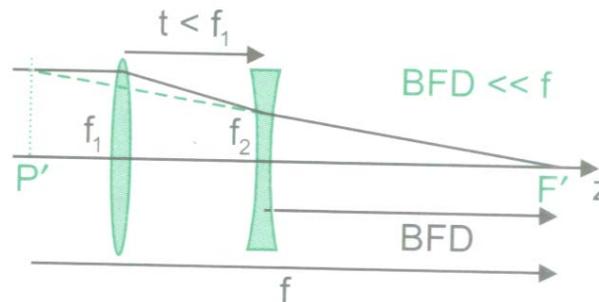
Los tipos de objetivos más comunes son los siguientes:

- El **objetivo simple**, representado como una lente delgada convergente en la que la distancia focal posterior (BFD) coincide con su distancia focal.

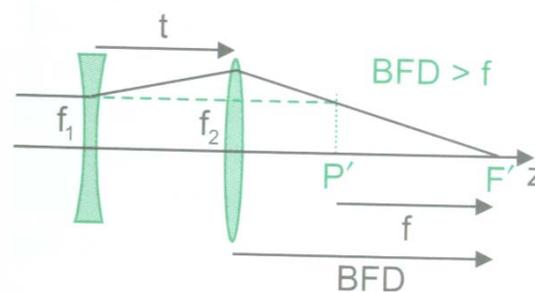
- El **objetivo Petzval**, compuesto por dos grupos componentes convergentes cuyo plano principal posterior (del sistema) se sitúa entre los dos grupos componentes, de manera que  $f > \text{BFD}$



- El **objetivo telefoto (o teleobjetivo)**, compuesto por un grupo convergente y otro divergente, cuya distancia focal es superior a la longitud total del sistema,  $f > (t + \text{BFD})$ , de manera que  $f \gg \text{BFD}$



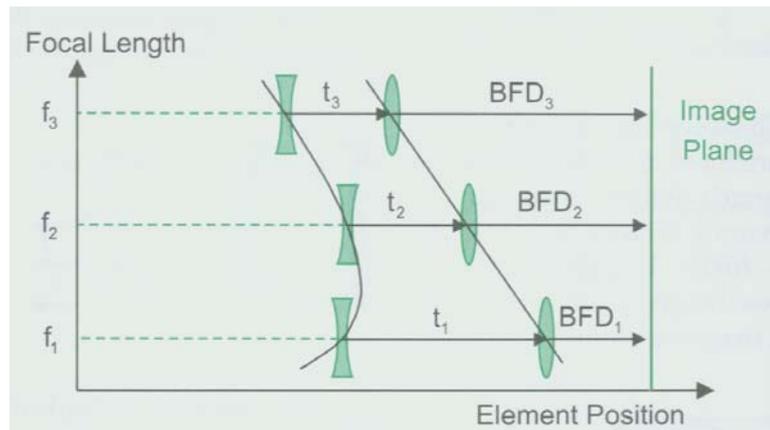
- El **objetivo telefoto inverso (reverse telephoto objective)** u **objetivo retrofoco (retrofocuss objective)**, compuesto por un grupo divergente y uno convergente, de manera que la  $\text{BFD} > f$ , habitualmente utilizado en los objetivos tipo gran angular.



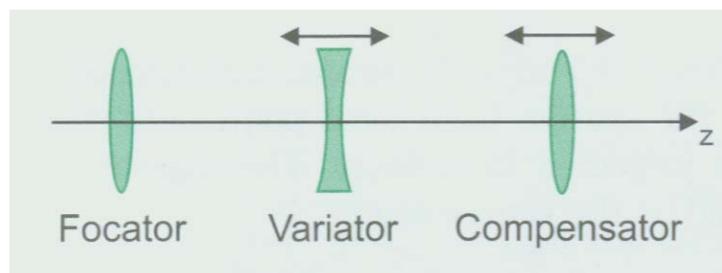
- Un **colimador** es un objetivo invertido (*reversed objective*) que forma un haz colimado (proyectado en el infinito) a partir de una fuente situada en el punto focal. El grado de colimación viene determinado por el tamaño de la fuente.

Una **lente zoom** es un objetivo que posee distancia focal (y, por tanto, capacidad de acercamiento) variable según su distancia relativa ( $t$ ) manteniendo un plano imagen fijo, donde se posiciona la película o el detector. El caso más sencillo consiste en dos elementos de potencias ópticas  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  cuyas potencia y BFD son

$$\varphi = 1/f = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 t \quad \text{BFD} = f - (\varphi_1 / \varphi) t$$



Para modificar la distancia focal del conjunto, la pareja de elementos se desplaza respecto al plano imagen fijo mediante un sistema mecánico o electromecánico de precisión. A veces, para simplificar los problemas del montaje y los derivados del movimiento, se introduce un tercer elemento óptico (y, en ocasiones, más elementos) de manera que se pueda conseguir la variación deseada en la distancia focal del sistema manteniendo fija la posición del primer elemento, además, por supuesto, de mantener constante la posición del plano imagen. Este aspecto es interesante porque la primera lente del sistema es la que “cierra” el conjunto y si se mantiene en una posición fija en el tubo soporte facilita su sellado para impedir la entrada de polvo y otros elementos extraños e, incluso, evitar la salida de gases que se introduzcan en el sistema óptico, por ejemplo, para reducir los efectos de condensación de vapores asociados a las variaciones de temperatura.



En la figura se muestran las posiciones relativas de los dos componentes de un objetivo telefoto inverso, de gran interés en las aplicaciones fotográficas por la posibilidad de obtener grandes BFD. Cuando la separación entre los dos elementos se acerca al valor suma de sus distancias focales ( $f_1 + f_2$ ) el sistema tiende a convertirse en un sistema afocal ( $f \rightarrow \infty$ ). El límite de la capacidad de zoom está dado, obviamente, porque el elemento posterior no llegue a la posición del plano imagen, cuando la separación entre los elementos componentes se aproxima a  $f_1$ .

## Formatos y Tamaños fotográficos

Los **tamaños y formatos estándar en fotografía** son los siguientes:

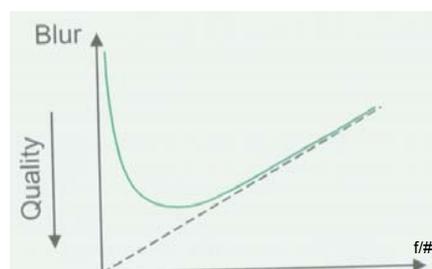
Film format	Film width (mm)	Frame size (mm × mm)	Diagonal (mm)
120 (4:3)	61.5	60 × 45	75.0
220 (1:1)	61.5	60 × 60	84.9
220 (7:6)	61.5	70 × 60	92.2
220 (3:2)	61.5	90 × 60	108.2
126 (1:1)	35.0	28 × 28	40.0
110 (4:3)	16.0	17 × 13	21.4
135 (3:2)	35.0	36 × 24	43.3
Disk (4:3)		11 × 8	13.6
APS Classic (3:2)	24.0	25.0 × 16.7	30.1
APS HDTV (16:9)	24.0	30.2 × 16.7	34.5
APS Panoramic (3:1)	24.0	30.2 × 10.0	31.8

Video format	Image size (mm × mm)	Diagonal (mm)
2/3 inch	8.8 × 6.6	11.0
1/2 inch	6.4 × 4.8	8.0
1/3 inch	4.8 × 3.6	6.0
1/4 inch	3.6 × 2.7	4.5

Por otra parte, para ajustarse a los **estándares de televisión**, los sensores de las cámaras de video/cámaras fotográficas digitales (**video sensors** o **focal plane arrays**) suelen fabricarse en formato 4:3, aunque esto probablemente cambiará cuando se introduzca plenamente la televisión digital de alta definición (HDTV). Es interesante apreciar que el tamaño del formato (por ejemplo, 2/3 de pulgada) no tiene relación con el tamaño del sensor, puesto que, originariamente, estos formatos se utilizaron con dispositivos vidicón o de tubo y se definieron como el diámetro exterior del tubo necesario para obtener un área activa dada. En la actualidad, existen un gran número de formatos y tamaños de sensor, dependientes del fabricante y de la aplicación.

En una fotografía impresa de pequeño formato, una imagen con un diámetro mínimo de punto (**criterio de borrosidad, *blur criterion***) de unas 7  $\mu\text{m}$  se considera de excelente calidad. Esto corresponde a la máxima capacidad de resolución del ojo humano (1 min arc) en el punto cercano (250 mm). Imágenes con diámetros de punto mayores de 200  $\mu\text{m}$  se consideran inaceptables.

Para cuantificar el efecto de las características ópticas (número-f) de una lente dada en el tamaño mínimo del punto se utiliza una gráfica cualitativa como la que se muestra, en la que se aprecia cómo con grandes aperturas (números-f pequeños) las aberraciones y los errores debidos a la profundidad de campo son dominantes, aumentando la borrosidad, como contrapartida a la ventaja que supone una mayor entrada de luz que permite exposiciones más cortas (exposiciones rápidas). Cuando el sistema tiene una apertura pequeña (números-f grandes), los efectos de difracción son dominantes y hay una dependencia lineal de la borrosidad con el  $f/\#$ . El inconveniente que se presenta en estos casos es la reducida cantidad de luz que alcanza el plano de la película o del detector. Para la mayoría de las cámaras fotográficas, la mínima borrosidad se produce con valores  $f/5.6 - 8$ .



## Exposición y número ISO

La **exposición** (energía incidente,  $H$ , en  $\text{J}/\text{m}^2$ ) necesaria para impresionar una película fotográfica (dependiente de la irradiancia incidente,  $E$ , y del tiempo de duración de la exposición,  $\Delta t$ ) se indica por su **velocidad (o número) ISO (ISO number, ISO #)**:

$$H = E \Delta t = 0.8 / \text{ISO \#} \quad (\text{en lx s})$$

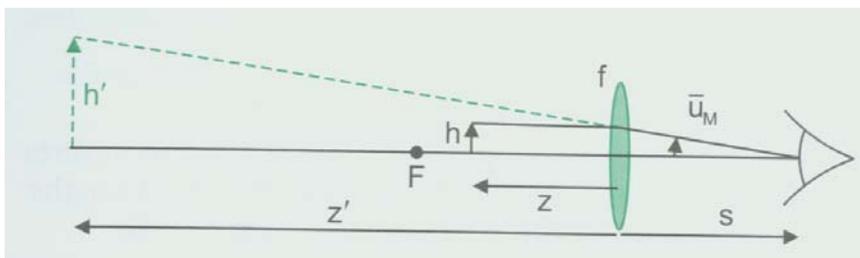
mientras que la **transmisividad** ( $T$ ) y la **densidad óptica** ( $D$ ) de una película o filtro se relacionan como

$$T = 10^{-D}$$

## Lupas (*magnifiers*)

Una lupa es una lente (individual) que proporciona una imagen directa y aumentada de un objeto cercano, para su observación visual. Su **poder de amplificación** o **potencia** (*magnifying power, MP*) se define en relación al máximo aumento visible por un ojo **sin ningún elemento auxiliar** (*unaided eye*), que tiene lugar cuando el objeto se sitúa en el punto cercano del ojo (situado a 250 mm del mismo,  $d_{NP} = -250$  mm), como

$$MP = \frac{\text{tamaño angular de la imagen (con lente)}}{\text{tamaño angular del objeto en el punto cercano}}$$



Considerando como pupila de entrada el ojo, la lente muy próxima a éste, y el ojo relajado ( $z' = \infty$ ), tenemos que

$$MP = \frac{\bar{u}_M}{u_U} = \frac{h'/(z'-s)}{h/d_{NP}} \quad d_{NP} = -250 \text{ mm}$$

$$MP = \frac{250 \text{ mm} (z'-f)}{f(z'-s)} \approx \frac{250 \text{ mm}}{f}$$

El ángulo  $\theta$  subtendido (*angular subtense*) por la imagen  $h'$  en el ojo es

$$\theta = \frac{h MP}{250 \text{ mm}}$$

y, como la resolución del ojo humano es, aproximadamente, 1 min arc, para distinguir un objeto de tamaño  $h$  el MP necesario es

$$MP \geq \frac{0.075 \text{ mm}}{h}$$

Un valor común de amplificación es del orden de 10X.

## Telescopios

Los telescopios son sistemas afocales utilizados para la observación visual de objetos distantes. Si están formados por elementos refractantes (lentes), se denominan genéricamente **telescopios refractores** (*refracting telescopes*) y si sus componentes (exceptuando, lógicamente, el ocular) son espejos son **telescopios reflectores** (*reflecting or mirror-based telescopes*).

## Telescopios refractores

La imagen a través del telescopio subtende un ángulo  $\theta'$  diferente del ángulo  $\theta$  subtendido por el objeto. Su **poder de amplificación** o **potencia** (*magnifying power, MP*) es

$$MP = \theta' / \theta$$

Si  $|MP| > 1$  el telescopio aumenta y si  $|MP| < 1$ , reduce.

Suele especificarse en la forma **A X B** donde

$$A = |MP|$$

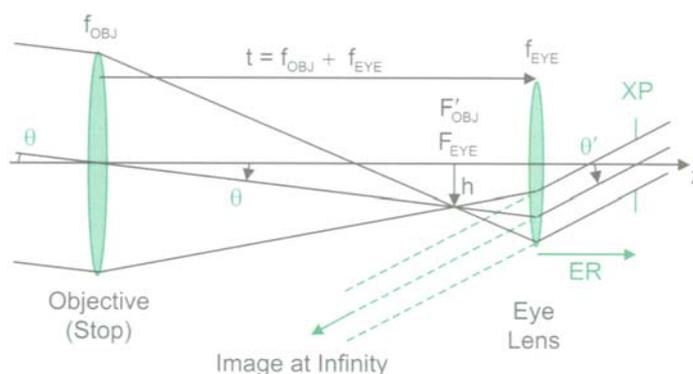
$$B = \text{Diámetro del objetivo en mm}$$

Por ejemplo: binoculares de 7x35

Debe tenerse en cuenta que aunque el término telescopio suele asociarse con cualquier sistema utilizado para visualizar objetos lejanos, estrictamente se refiere únicamente a un sistema afocal diseñado para ser usado en conjunto con el ojo humano, es decir, considerando los efectos de su lente. Los grandes telescopios astronómicos son objetivos (o cámaras) con una matriz (o array) de detectores en su plano focal.

Los tipos más comunes de telescopios son los siguientes:

- **Telescopio de Kepler** o **telescopio astronómico**: consta de una pareja de lentes convergentes (objetivo y ocular) separadas por la suma de sus distancias focales ( $f_{obj} + f_{eye}$ ). El diafragma de apertura del sistema está cercano (o en) la lente objetivo. La imagen formada está invertida y revertida (rotada  $180^\circ$ ), siendo el  $MP < 0$ . El ojo del observador debe situarse en la pupila de salida (XP) para que el ojo “observe” en la posición relajada (sin acomodación). Esa distancia se denomina así “*eye relief*”, ER.



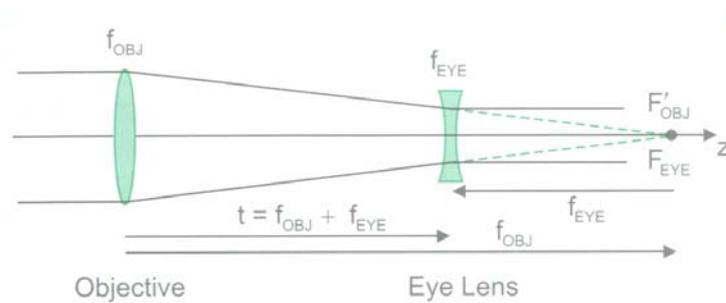
$$m = - f_{eye} / f_{obj}$$

$$MP = 1/m = - f_{obj} / f_{eye}$$

$$ER = (1 - m) f_{eye}$$

$$D_{XP} = |m| D_{EP} = D_{EP} / |MP|$$

- **Telescopio de Galileo**: consta de una lente convergente y una divergente. Forma una imagen directa con  $MP > 1$ . La XP es interna y no está accesible al ojo. El FOV del sistema es pequeño. Presenta la ventaja, frente al telescopio de Kepler, de que, para un MP dado, es un instrumento de menor longitud, aunque con menor FOV.



$$m = - f_{eye} / f_{obj}$$

$$MP = 1/m = - f_{obj} / f_{eye}$$

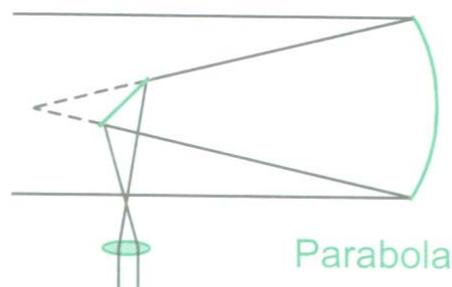
Puede ser utilizado como “telescopio terrestre” porque produce una imagen directa (no invertida).

- **Telescopio de Galileo revertido (*reversed Galilean telescope*)**: proporciona una imagen reducida directa ( $0 < MP < 1$ ) por lo que suele utilizarse en visores de cámaras y mirillas de puertas.
- **Binoculares (prismáticos)**: pareja de telescopios montados en paralelo (uno para cada ojo del observador).

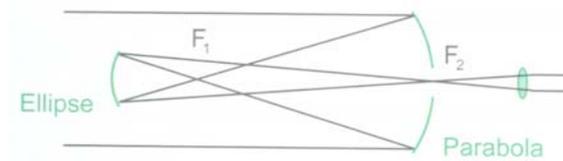
## Telescopios reflectores

Se fundamentan en las propiedades de reflexión de las superficies cónicas. Los tipos más importantes son:

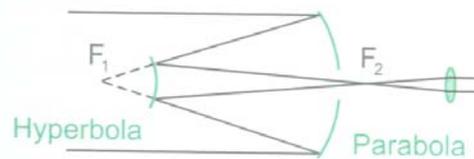
- **Telescopio de Newton**: compuesto por un espejo parabólico cóncavo y un espejo plano. La imagen formada es análoga a la obtenida por un telescopio refractor de Kepler.



- **Telescopio gregoriano:** compuesto por un espejo parabólico (primario) y un espejo elíptico que “transfiere” (*relay mirror*) la imagen intermedia. Como los telescopios refractores de Galileo, es utilizado como “telescopio terrestre” porque produce una imagen directa (no invertida).



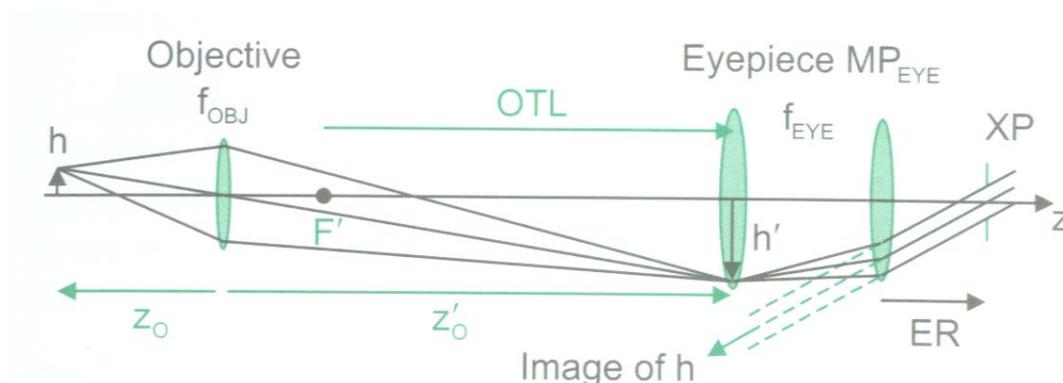
- **Telescopio de Cassegrain:** combina un espejo parabólico (primario) con uno secundario hiperbólico para reducir la longitud total del sistema y eliminar la aberración esférica, siendo equivalente a un objetivo telefoto.



- **Telescopio de Ritchey-Chretien:** como el telescopio de Cassegrain pero utilizando dos espejos hiperbólicos, de manera que, además de la aberración esférica, puede eliminar el coma.

## Microscopios

Los microscopios son sistemas sofisticados de aumento para la observación visual de objetos pequeños. Constan, básicamente, de una lente objetivo y una lente ocular.



El **aumento visual** (*visual magnification*,  $m_V$ ) es el producto de la magnificación que proporciona el objetivo y la MP del ocular:

$$m_{\text{obj}} = z_0' / z_0 \quad \text{MP}_{\text{eye}} = 250 \text{ mm}/f_{\text{eye}}$$

$$m_V = m_{\text{obj}} \text{MP}_{\text{eye}}$$

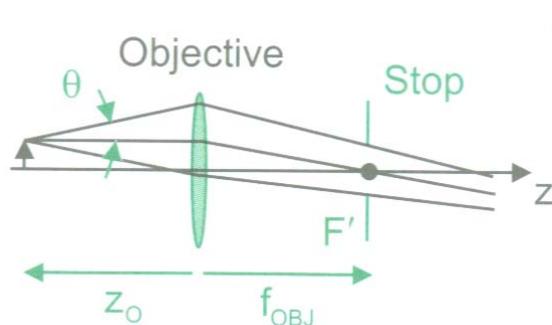
La **longitud óptica del tubo** (*optical tube length*, **OTL**) se define como la distancia desde el punto focal posterior del objetivo hasta el punto focal anterior del ocular (posición de la imagen intermedia). Es una “distancia de imagen newtoniana”, de manera que

$$m_{\text{obj}} = - \text{OTL}/f_{\text{obj}} \quad m_V = - (\text{OTL}/f_{\text{obj}}) (250 \text{ mm}/f_{\text{eye}})$$

y hay dos valores estandar:  $\text{OTL} = 160 \text{ mm}$  y  $\text{OTL} = 215 \text{ mm}$ .

La **apertura numérica** (NA) del objetivo de un microscopio se define como el semiángulo de entrada (de aceptación) de rayos en el espacio objeto y es un dato que viene impreso, junto con la magnificación, en el propio cuerpo de la lente objetivo.

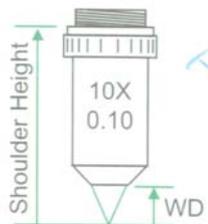
$$\text{NA} = n \sin \theta$$



Los objetivos de los microscopios suelen ser telecéntricos en el espacio objeto, estando situado el diafragma de apertura en el punto focal posterior (del objetivo), de manera que el aumento con que se visualiza el objeto observado no cambia con las variaciones de enfoque del mismo.

Terminología característica relacionada con los microscopios:

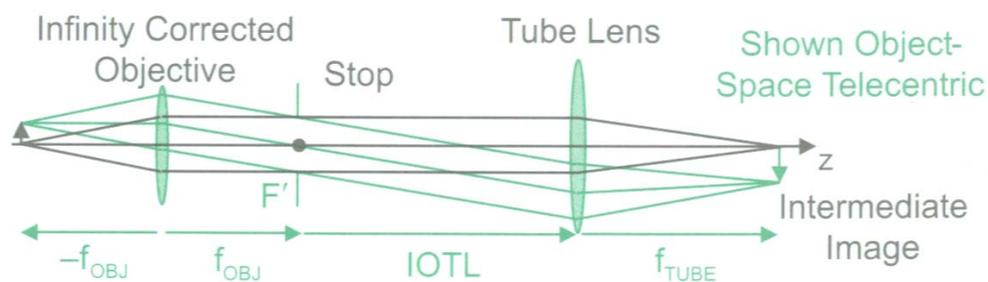
- **Distancia de trabajo (working distance, WD):** distancia del objeto observado al primer elemento del objetivo. En los objetivos de gran aumento puede ser menos de 1 mm. A veces se utiliza una gota de un aceite especial (de alto índice de refracción) entre el objetivo y la placa cubreobjetos de la muestra como “**medio de adaptación de índices**” para hacer que los rayos procedentes de la muestra “entren” en el cono de aceptación del objetivo.
- **Longitud mecánica del tubo:** separación entre el soporte de la montura roscada del objetivo y el extremo del tubo en el que se inserta el ocular. Los objetivos y los oculares se diseñan para su “uso conjugado” y pueden no ser intercambiables entre equipos de distintos fabricantes.
- **Longitud de montaje (*shoulder height*):** longitud (altura) desde el plano del objeto hasta la rosca de montaje del objetivo (suma de la WF y la longitud del objetivo).



- Un conjunto de objetivos se denomina “**conjunto de objetivos parfocales**” cuando tienen diferentes magnificaciones pero la misma longitud de montaje. Así, pueden ser intercambiados en la torreta soporte de objetivos del microscopio, cambiando el aumento de observación pero manteniendo el objeto enfocado.
- **Objetivos para uso biológico (*biological objectives*):** son objetivos diseñados corrigiendo las aberraciones, asumiendo que el objeto observado está cubierto por una placa de cristal (portaobjetos). Los **objetivos de uso metalúrgico (*metalurgical objectives*)** asumen que no hay lámina de cristal entre el objeto y el objetivo.

- **Objetivos con corrección de infinito (*infinity corrected objectives*):** son objetivos habitualmente diseñados para los microscopios de más alta calidad (de “**calidad de investigación**”, **research-grade**). El plano del objeto es el plano focal anterior del objetivo y, por tanto, de cada punto (iluminado) del objeto se obtiene un haz colimado. No tiene longitud de tubo específica y se utiliza una “lente de tubo” (*tube lens*) adicional para formar la imagen visualizada por el ocular. La magnificación de la combinación objetivo-lente de tubo es

$$m_{\text{obj}} = - f_{\text{tube}} / f_{\text{obj}}$$



Si el objetivo es telecéntrico en el espacio objeto y  $f_{\text{tube}}$  es igual a la longitud óptica del tubo (infinity-corrected, IOTL), entonces la combinación es afocal y doblemente telecéntrica, permitiendo el uso de retículas y escalas en el ocular.

## Visores (*viewfinders*)

Los visores son los dispositivos ópticos utilizados para enmarcar la escena “registrada” en las cámaras y otros tipos de instrumentación visual. Para que el sistema funcione adecuadamente, el FOV del visor debería coincidir con el FOV registrado por la cámara o superficie sensible. El **paralaje** (diferencia entre las imágenes observadas debido a las diferencias de perspectiva) entre ambos campos de visión es el principal inconveniente de estos dispositivos, especialmente relevante cuando se observan objetos cercanos.

Si el visor tiene un plano de imagen intermedia, se utiliza para situar una retícula con marcas, por ejemplo, de encuadramiento (para delimitar las áreas coincidentes de los FOVs) o escalas de medida. El diafragma de apertura suele estar situado en la posición del ojo del observador.

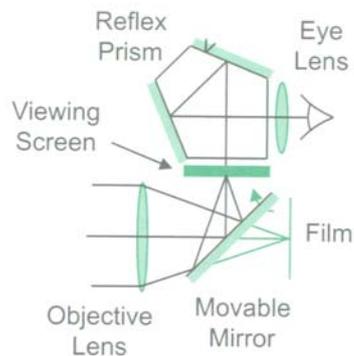
Los tipos más comunes de visores son:

- **Visor de reflexión (*reflex viewfinder*)**: utiliza un objetivo auxiliar para formar una imagen intermedia reducida sobre un espejo plano, que es redirigida hacia una cristal de superficie difusora (“ground glass”). Esta imagen es directa pero revertida.
- **Visor de reflexión brillante (*brilliant reflex viewfinder*)**: es similar, pero reemplaza el cristal difusor por una lente de manera que la imagen de la lente del visor es transferida a los ojos del observador, siendo mucho más brillante.
- **Visor de Galileo revertido**: Con  $MP < 1$ , es el más común en las cámaras simples (del tipo “mirar-y-disparar”), aunque la ausencia de un plano de imagen intermedia imposibilita el uso de una retícula de encuadramiento para delimitar el FOV.
- **Visor de tipo Van Albada**: permite visualizar las marcas de encuadre incorporando un recubrimiento parcialmente reflectante en la lente divergente de un visor de Galileo revertido que forma una imagen de las marcas (situadas alrededor de la lente convergente del ocular) en el plano focal anterior de esta lente. Así, estas marcas se superponen en la línea de visión directa de la escena observada.

## Visores Single Lens Reflex (SLR)

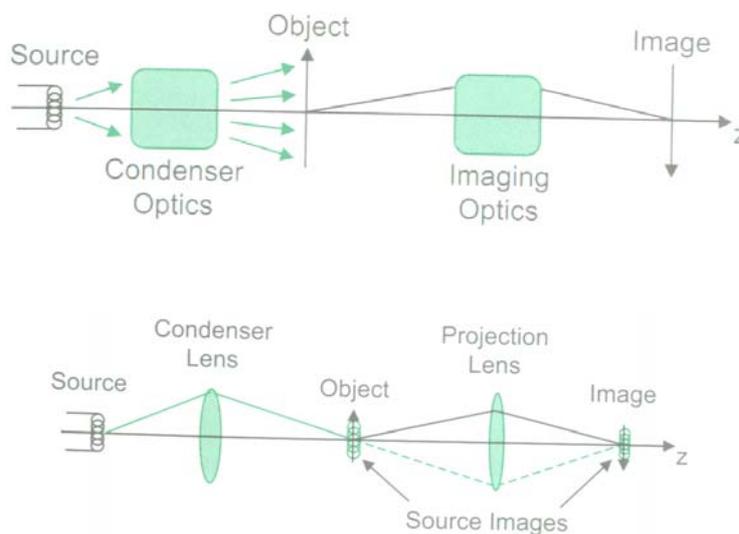
Los sistemas (visores) del tipo SLR resuelven el problema del paralaje entre los FOVs de la cámara y del visor utilizando el propio objetivo de la cámara para formar la imagen del visor. Un espejo móvil (abatible) dirige la trayectoria de los rayos luminosos hacia el plano de la película o sensor o hacia una superficie difusora de visión (*ground glass*) y un pentaprisma reflector (que corrige la paridad) y, desde él, a la lente ocular, que actúa como una lupa para permitir la observación de la escena. Para mejorar la eficiencia y, por tanto, la luminosidad, se

puede sustituir la pantalla difusora por una lente, frecuentemente del tipo *lente de Fresnel*. Los visores SLR son así los más adecuados para su utilización en cámaras con objetivos intercambiables.



## Sistemas de Iluminación

Los sistemas de iluminación/proyección se basan en dos conjuntos ópticos diferentes: el **sistema u óptica condensadora (*condenser optics*)** y el **sistema u óptica formadora de imagen (*imaging optics*)**.



Hay tres tipos principales de sistemas de iluminación:

- **iluminación difusa:** se obtiene cuando sobre el objeto incide luz con un gran rango angular. Se incluyen en este tipo la luz ambiente y las condiciones de iluminación natural. Es una iluminación simple (no se incluye la imagen de la fuente en el sistema de formación de imagen), uniforme pero de reducida eficiencia.

- **iluminación especular:** se obtiene cuando la imagen de la fuente se proyecta – mediante la óptica condensadora- en la EP de la óptica formadora de imagen. Debido a su superior eficiencia, es el tipo de iluminación habitualmente incluido en los sistemas ópticos que incluyen fuentes de luz integradas.
- **iluminación crítica:** se obtiene cuando la imagen de la fuente se proyecta –mediante la óptica condensadora- directamente sobre el objeto. Aunque su eficiencia es muy alta, no es muy utilizada porque al superponer la distribución de brillo de la fuente sobre el objeto se modula también su imagen. Requiere una fuente emisora muy uniforme (por ejemplo, un filamento de tungsteno) y el FOV del sistema es típicamente muy reducido.

## Iluminación difusa

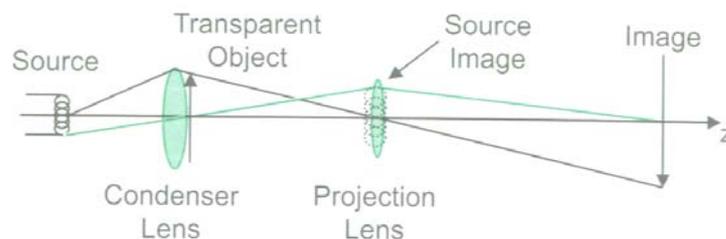
Las condiciones de iluminación difusa se suelen conseguir insertando un elemento difusor en el sistema óptico. Los difusores superficiales, como las láminas de **vidrio difusor (ground glass)** son más eficientes y menos uniformes que los difusores volumétricos, como los cristales de ópalo y las láminas plásticas translúcidas.

El efecto de los difusores es aumentar el tamaño aparente de las fuentes y, por tanto, proporcionar una iluminación mucho más uniforme. El aumento de los ángulos de iluminación también proporciona una “**supresión de irregularidades**” (*scratch suppression*) que reduce, incluso eliminando, los errores debidos a variaciones de fase en los objetos, como arañazos o pequeños defectos, en particular en los objetos transparentes, que, bajo iluminación especular o de pequeño ángulo aparecerían como zonas oscuras en la imagen (por desviación de los rayos luminosos procedentes de esas zonas).



## Óptica condensadora en los sistemas de proyección

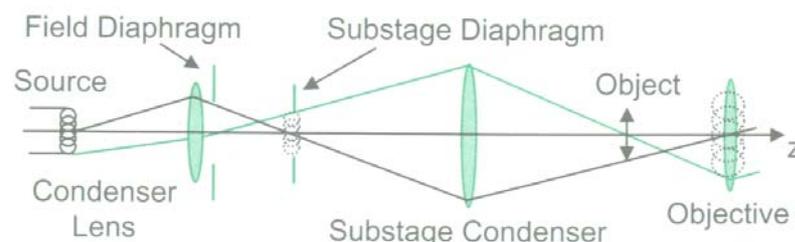
Los sistemas más comunes de iluminación especular son los sistemas (ópticas) condensadoras de los montajes de proyección, en los que el elemento condensador (lente) forma la imagen de la fuente en la pupila de entrada de la lente de proyección. Al ser así iluminado cada punto del objeto por (rayos procedentes de) todas las partes de la fuente, su iluminación es muy uniforme, siendo su limitación angular únicamente la derivada del tamaño angular de la fuente vista desde el objeto. La lente condensadora debe diseñarse tan luminosa (o “rápida”, es decir, con el número-f mínimo) posible,  $f/1$  o incluso inferior, y el diámetro de la lente de proyección debe ser mayor que el tamaño de la imagen de la fuente.



El sistema de proyección puede ser, por tanto, considerado como un sistema compuesto de dos sistemas ópticos acoplados, de manera que el rayo marginal (principal) del sistema condensador se convierte en el rayo principal (marginal) del sistema formador de imagen.

La **iluminación de Koehler** es un tipo de iluminación especular frecuentemente utilizada en microscopios, en los que la presencia de un

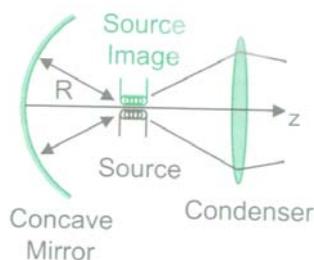
- diafragma regulable (en la imagen de la fuente) permite modificar el nivel global de iluminación y
- un diafragma de campo permite modificar la parte iluminada del objeto.



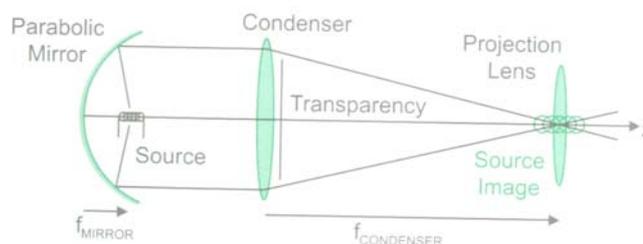
## Fuentes luminosas mediante espejos

Para incrementar los niveles de iluminación alcanzados con una fuente determinada suelen utilizarse espejos cóncavos dispuestos de manera que la

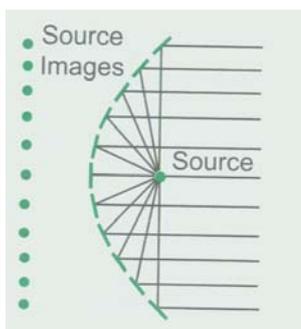
- si la fuente se encuentre situada en su centro de curvatura, se consigue un máximo aumento de intensidad menor de un factor dos, puesto que la imagen de la fuente se sitúa adyacente a la misma



- si la fuente se sitúa en el foco del espejo el aumento del nivel de iluminación es mucho mayor (de un orden de magnitud e incluso superior), puesto que al estar la imagen de la fuente en el infinito el ángulo sólido del espejo puede ser mayor de  $2\pi$  sr.



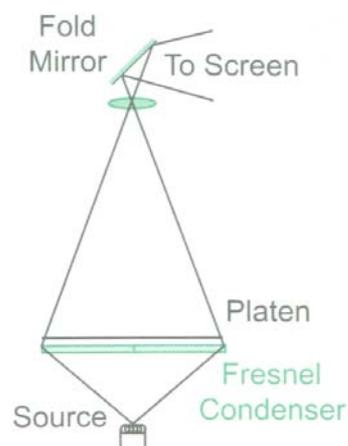
Para aumentar la difusión de la luz emitida, la superficie del espejo parabólico se segmenta en pequeños “fragmentos” planos de manera que el sistema es equivalente a un conjunto de fuentes virtuales situadas detrás de cada plano.



En la mayoría de los sistemas ópticos, la absorción de calor debe ser cuidadosamente considerada. Normalmente se utilizan láminas de **vidrios absorbentes del calor** (*heat absorbing glass*) intercaladas en los sistemas, **espejos reflectantes de infrarrojo** (*hot mirrors*) o **espejos fríos** (*cold mirrors*) –que transmiten el infrarrojo y reflejan la parte visible del espectro.

## Retroproyector (proyector de transparencias, *overhead projector*)

El retroproyector utiliza un sistema de iluminación mediante una lente condensadora para proyectar la imagen de un objeto transparente (transparencia) relativamente grande en una pantalla situada a una cierta distancia del dispositivo. El espejo plano, además de permitir dirigir la imagen en la dirección ortogonal al plano de la pantalla realiza la inversión de la paridad necesaria para que los observadores vean la imagen en la pantalla con la orientación adecuada. Al ser el objeto de gran tamaño, no es práctico utilizar una lente condensadora convencional y se emplean *lentes de Fresnel*.



## Sistemas Schlieren y de Campo Oscuro (*dark field*)

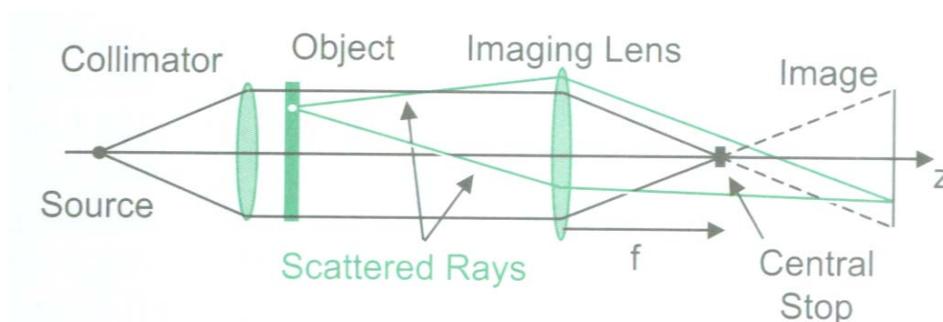
Son sistemas “especulares” o de “ángulo estrecho” de iluminación capaces de poner de manifiesto características pequeñas y/o defectos de objetos. Asimismo, permiten evaluar la

orientación y dirección de los mismos, es decir, las derivadas de la superficie de los objetos iluminados.

En un **sistema schlieren elemental**, la luz de una fuente pequeña se colima antes de hacerla pasar a través del plano del objeto. Como la lente formadora de imagen forma imágenes tanto de la fuente como del objeto, si se bloquea la imagen de la fuente mediante un obstáculo opaco (un filo o un disco),

- si no hay objeto en el sistema, el plano de observación aparecerá oscuro, pero
- si hay un objeto, cualquier imperfección en el mismo dispersará (o refractará o difractará) parte de los rayos incidentes, originando zonas localizadas brillantes en la imagen.

Esta técnica se utiliza para visualizar flujos aerodinámicos (por ejemplo, en las cámaras de viento) y en sistemas de control de calidad de cristales, vidrios y elementos ópticos.



Los **sistemas de campo oscuro (dark field)** son una variación de los anteriores utilizando iluminación direccional. Como se aprecia en la Figura, si el objeto fuese perfecto (un espejo), la reflexión de los rayos procedentes de una fuente anular no entrarían en el FOV de la lente objetivo y, por tanto, la imagen sería oscura. Las imperfecciones presentes en el objeto, por el contrario, dispersarán la luz incidente originando zonas brillantes en la imagen. Esta técnica es habitualmente utilizada en microscopía y en **sistemas de visión artificial (machine vision)**.

