

Visión general sobre óptica

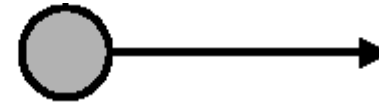
MIT 2.71/2.710
Clase de repaso p-1

¿Qué es la luz?

- La luz es una forma de **energía electromagnética**, detectada a través de sus efectos, como por ejemplo el calentamiento de objetos iluminados, la conversión de la luz en corriente eléctrica, la presión mecánica (“fuerza de Maxwell”), etc.
- La energía luminosa se transmite a través de las partículas: los “fotones”
 - comportamiento balístico, como por ejemplo las sombras.
- La energía luminosa se transmite a través de las ondas
 - comportamiento de las ondas, como por ejemplo la interferencia, la difracción.
- La mecánica cuántica concilia los dos puntos de vista a través de la aserción de la “dualidad partícula-onda”.

Propiedades de las partículas de la luz

Fotón = partícula elemental de luz

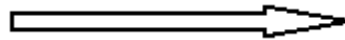


Masa = 0

Velocidad $c = 3 \times 10^8$ m/seg

Según la relatividad especial, ¿una partícula sin masa que viaja a la velocidad de la luz todavía puede transportar momentum!

Energía $E = h\nu$



relaciona la partícula dual y la naturaleza ondulatoria de la luz;

h = constante de Planck
 $= 6.6262 \times 10^{-34}$ J seg.

es la frecuencia temporal de oscilación de las ondas luminosas

Propiedades de onda de la luz

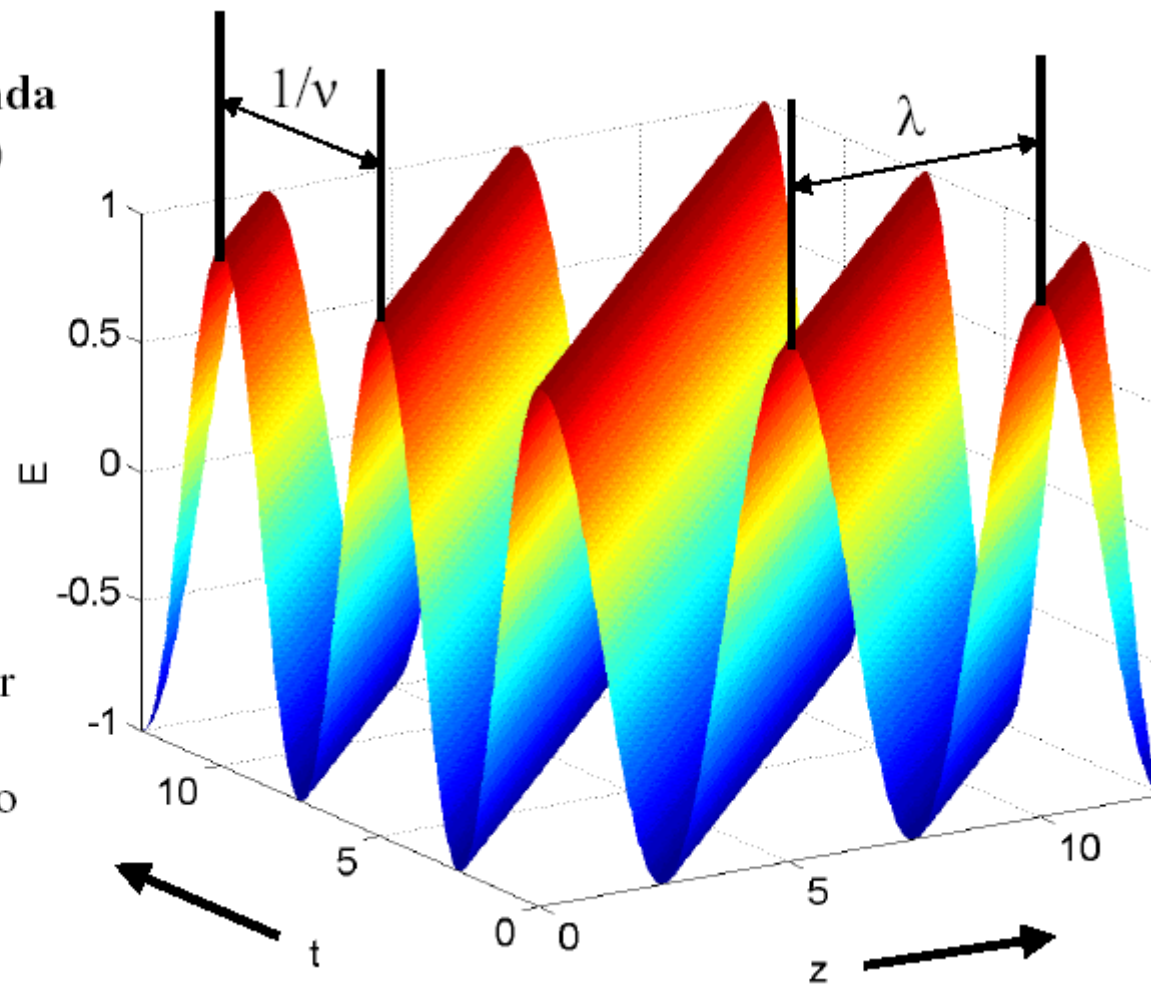
λ : longitud de onda
(periodo espacial)

$k=2\pi/\lambda$
número de ondas

ν : frecuencia
temporal

$\omega=2\pi\nu$
frecuencia angular

E: campo eléctrico



Dualidad onda-partícula para la luz

Fotón = partícula elemental de luz



Masa = 0

Velocidad $c = 3 \times 10^8$ m/seg

Energía $E = h\nu$

$$c = \lambda \nu$$

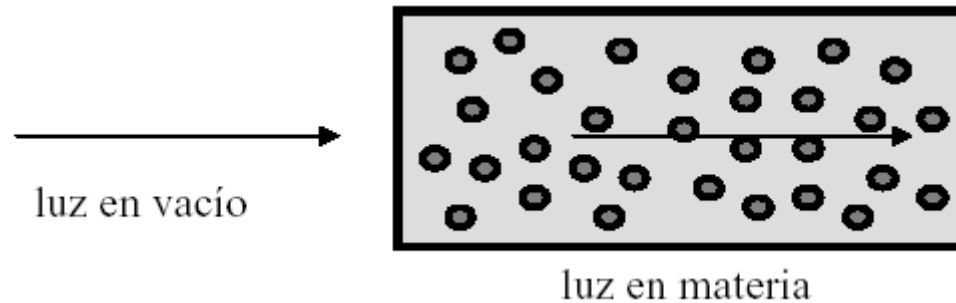
“Relación de dispersión”
(solamente se mantiene en el vacío)

h = constante de Planck
 $= 6.6262 \times 10^{-34}$ J seg.

ν = frecuencia (seg^{-1})

λ = longitud de onda (m)

La luz en materia



Velocidad $c = 3 \times 10^8$ m/seg.

Velocidad c/n
 n : índice de refracción

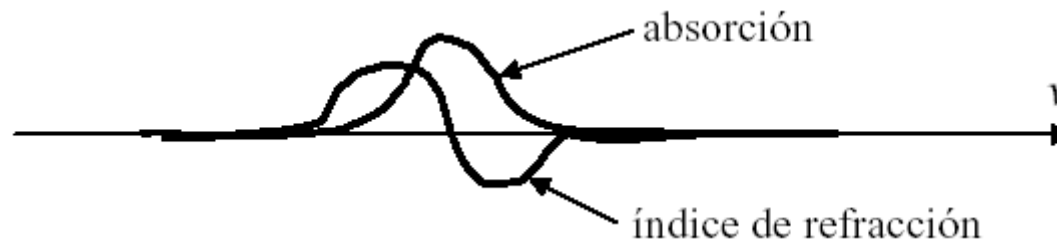
Coefficiente de absorción 0

coeficiente de absorción α
coeficiente de decaimiento de energía, después de una distancia L : $e^{-2\alpha L}$

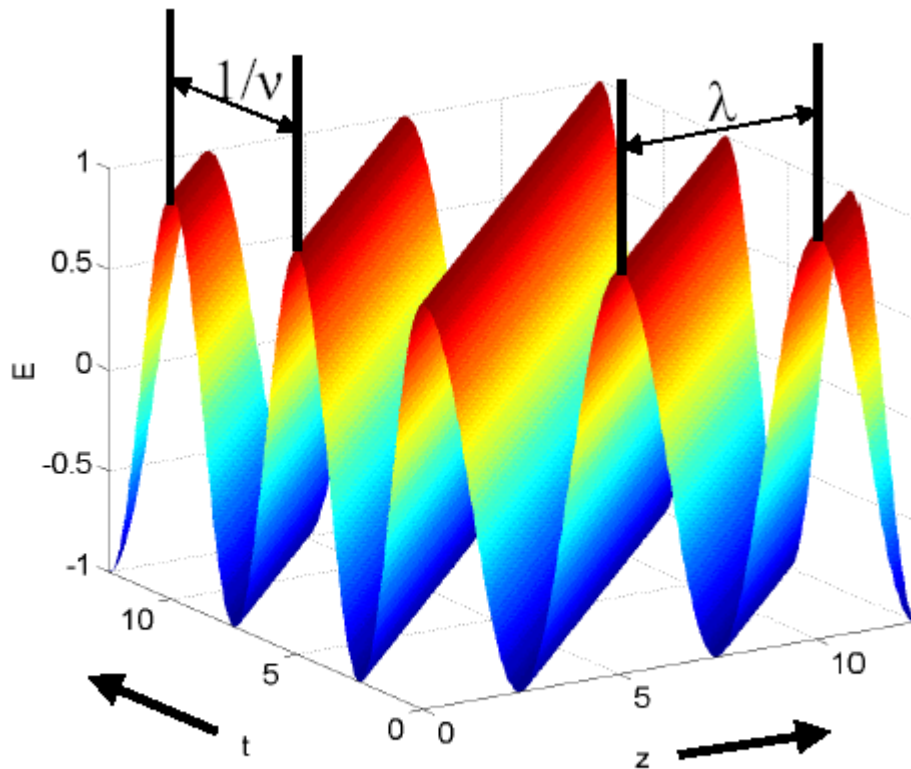
Ej.: vacío $n = 1$; aire $n \approx 1$; cristal $n \approx 1.5$; la fibra de cristal tiene $\alpha \approx 0.25 \text{ dB/Km.} = 0.0288/\text{Km.}$

Clasificación de materiales

- Dieléctricos:
 - aislantes generalmente eléctricos (ej., cristal, plásticos)
 - coeficiente bajo de absorción
 - índice de refracción arbitrario
- Metales:
 - conductividad \Rightarrow coeficiente amplio de absorción
- Muchas excepciones y casos especiales (ej., “dieléctricos artificiales”)
- Los índices de absorción y de refracción están relacionados a través de las relaciones de Kramers-Kronig (impuestas por la *causalidad*)



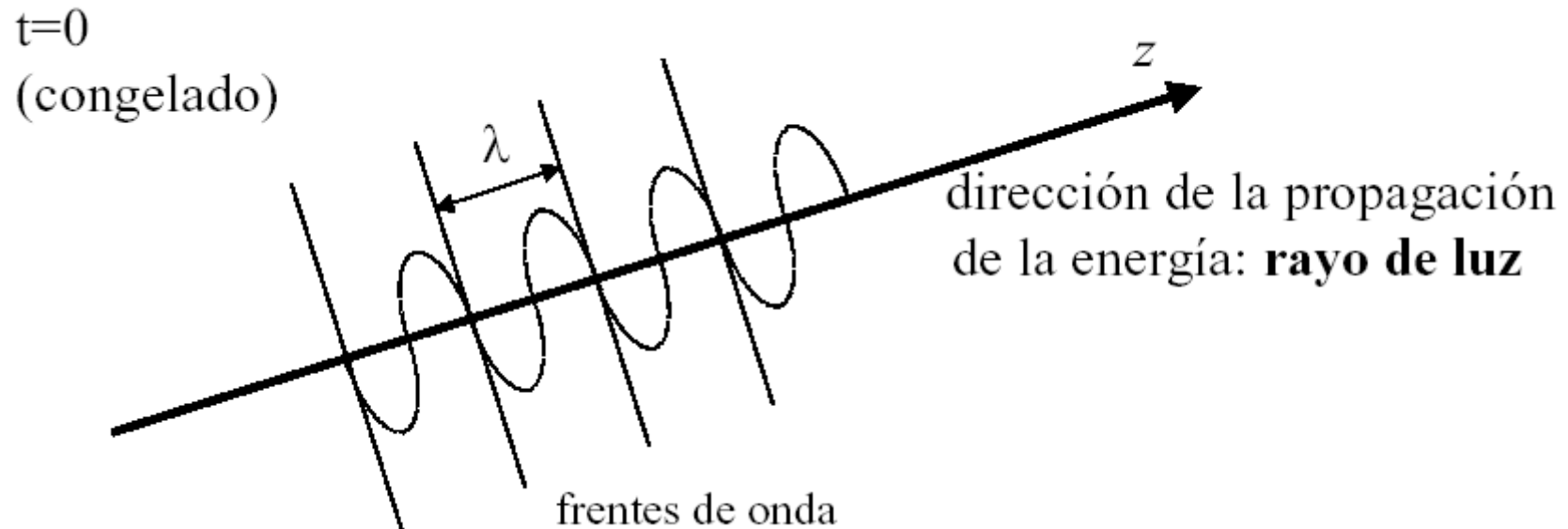
Luz monocromática espacialmente coherente



- luz sinusoidal regular y sutil
- λ , ν bien definidos
- buena aproximación del láser HeNe estabilizado
- aproximación bruta de la mayoría de los otros láseres cw
- los láseres de impulsos y las fuentes no láser requieren una descripción más complicada

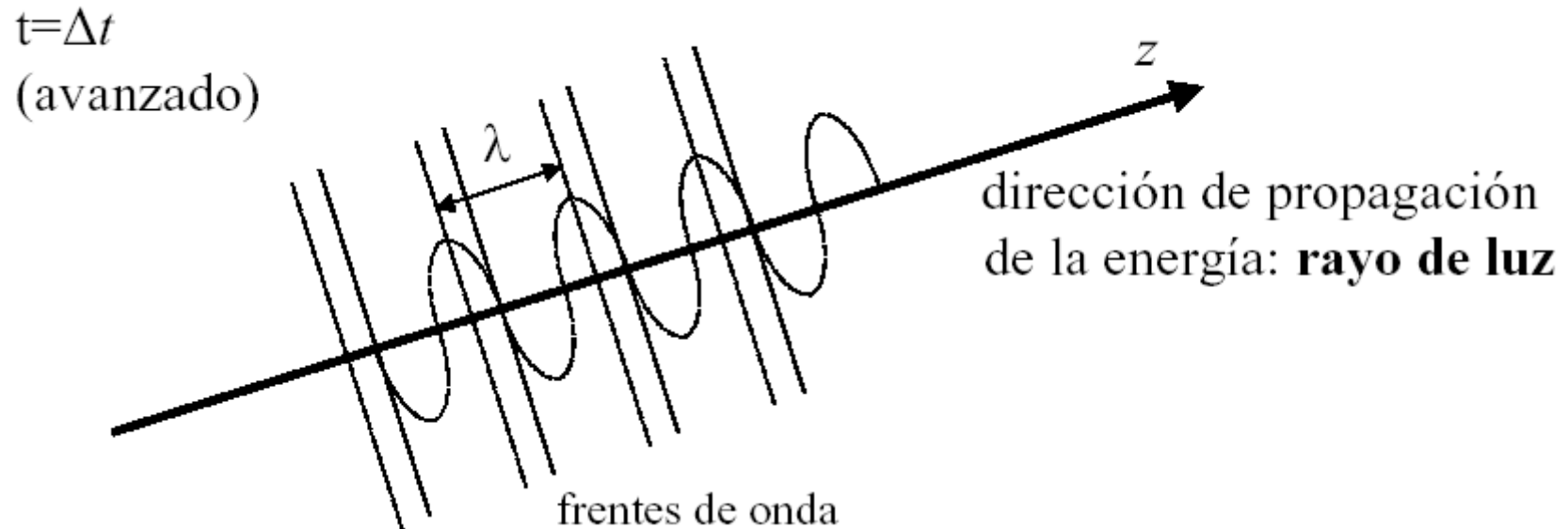
Incoherente: forma de onda aleatoria e irregular

El concepto de “rayo” monocromático



En un medio homogéneo, la luz se propaga en trayectorias rectilíneas

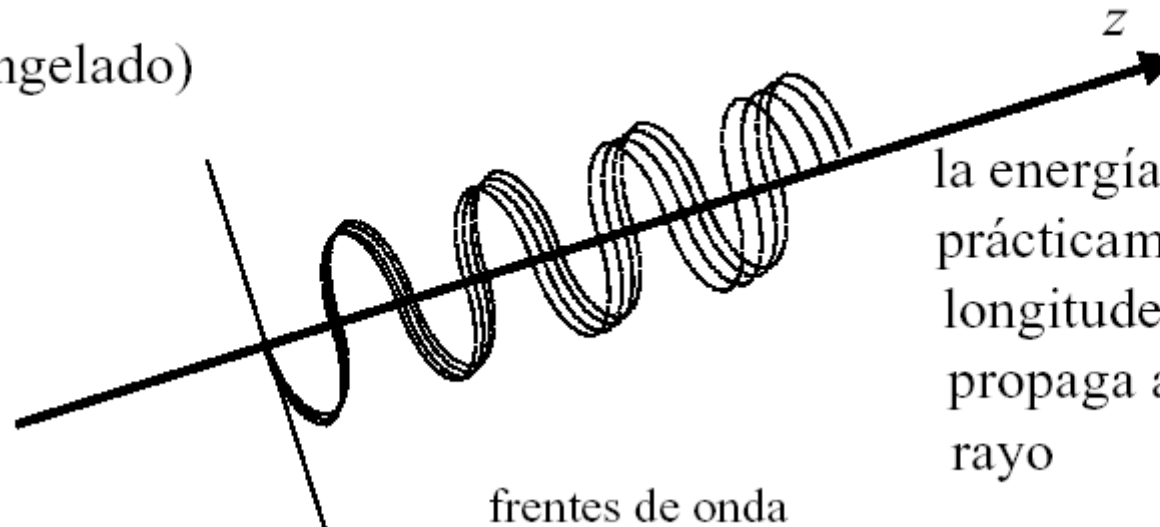
El concepto de “rayo” monocromático



En un medio homogéneo, la luz se propaga en trayectorias rectilíneas

El concepto de “rayo” policromático

$t=0$
(congelado)



En un medio homogéneo, la luz se propaga en trayectorias rectilíneas

El principio de Fermat

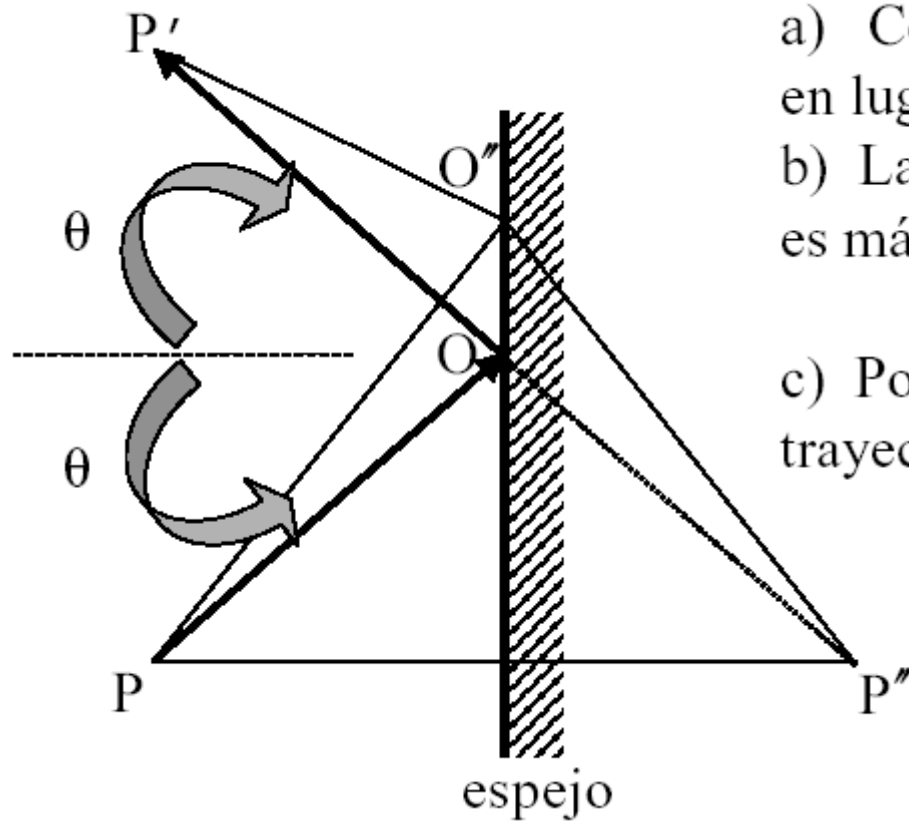


$$\int n(x, y, z) dl$$

Γ es seleccionado para minimizar este integral de “trayectoria”, comparado con otras trayectorias alternativas

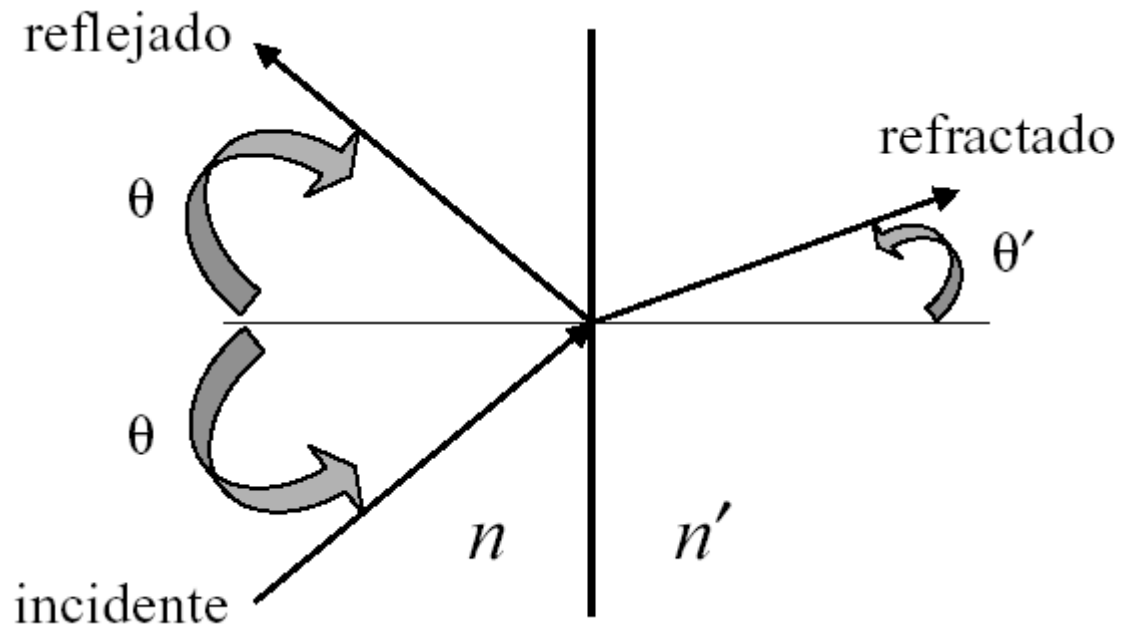
(también llamado principio de la **trayectoria mínima**)
Consecuencias: la ley de la reflexión y la ley de la refracción

La ley de la reflexión



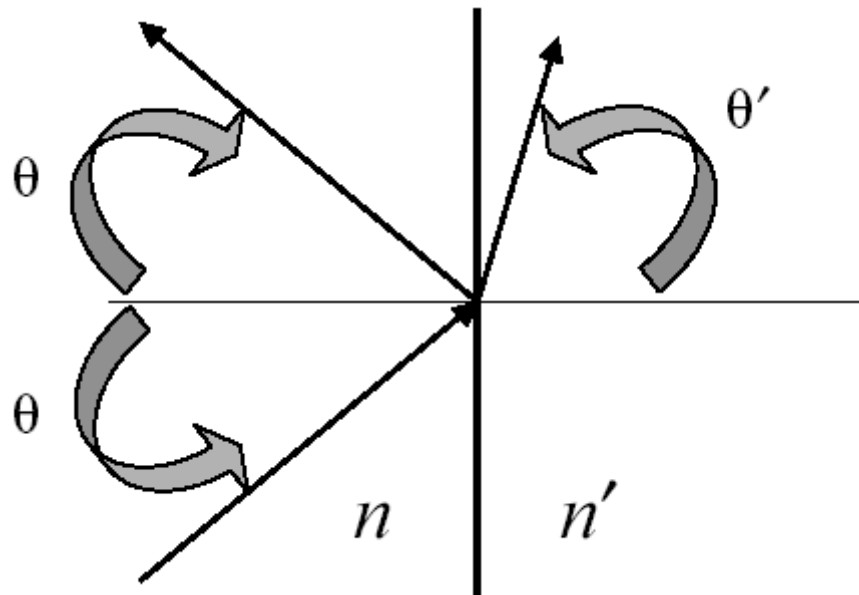
- Considerere la fuente virtual P'' en lugar de la P .
- La trayectoria alternativa $P''O''P'$ es más larga que la $P''OP'$.
- Por lo tanto, la luz sigue la trayectoria simétrica POP' .

La ley de la refracción



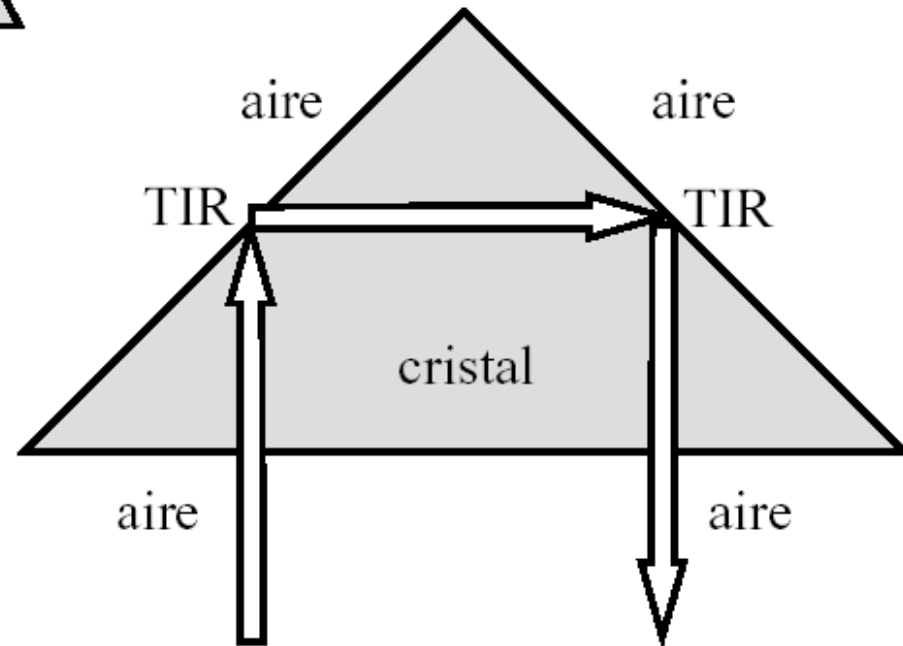
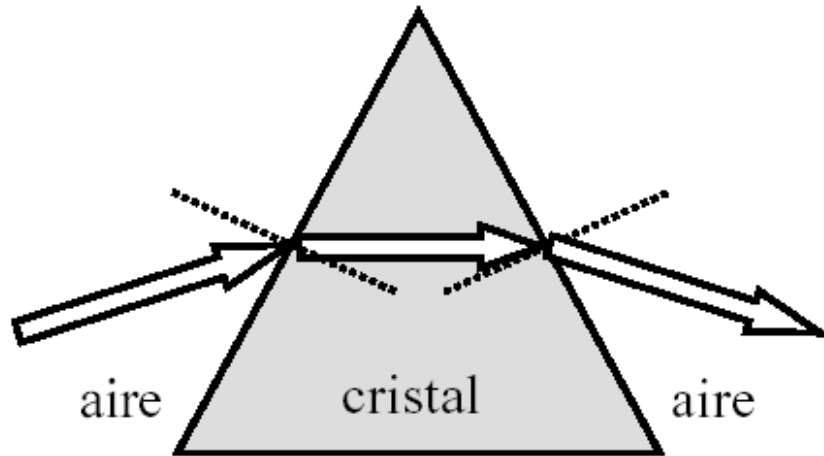
$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad \text{Ley de refracción de Snell}$$

Reflexión interna total (TIR)



$n > n' \Rightarrow \theta'$ se vuelve imaginaria cuando $\theta > \theta_{\text{crit}} = \text{sen}^{-1} \frac{n'}{n} \Rightarrow$ el haz refractado desaparece, toda la energía es reflejada.

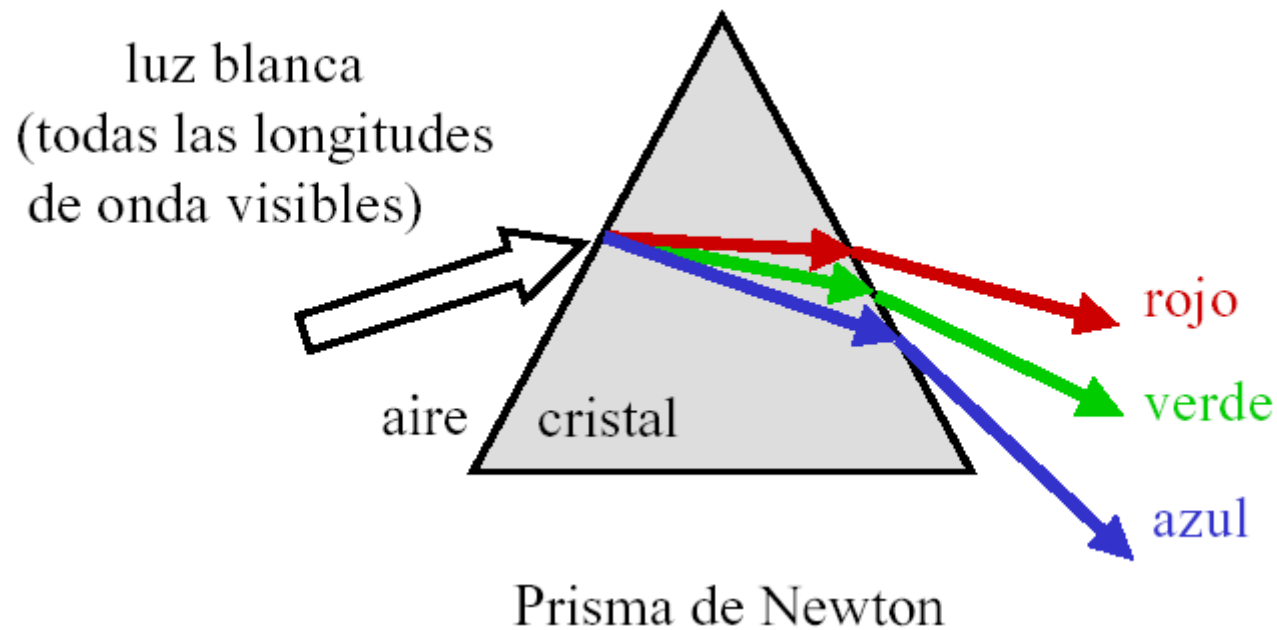
Prismas



MIT 2.71/2.710
Clase de repaso p-17

Prismas: dispersión

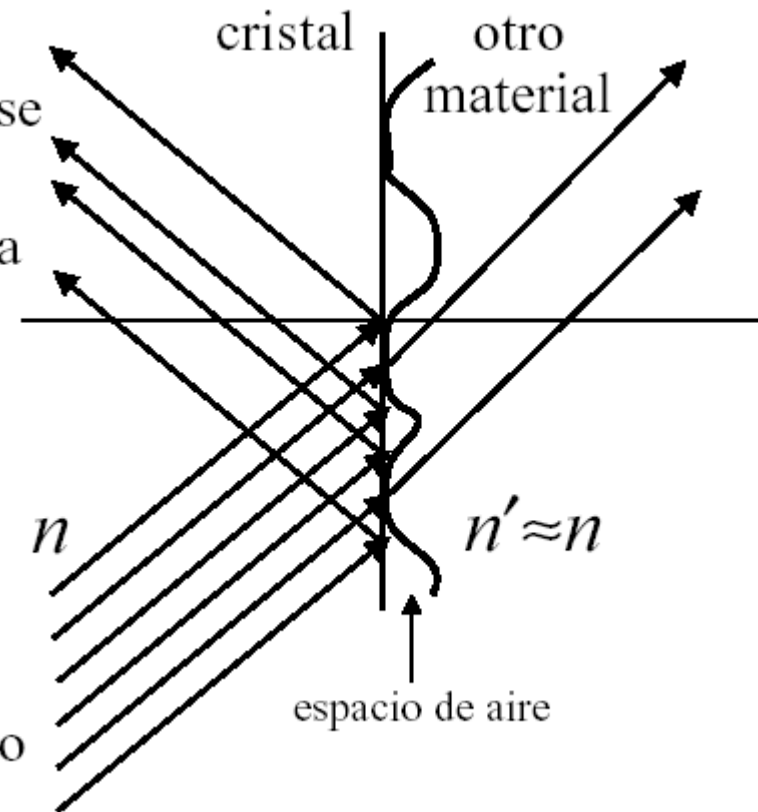
El índice de refracción n está en función de la longitud de onda



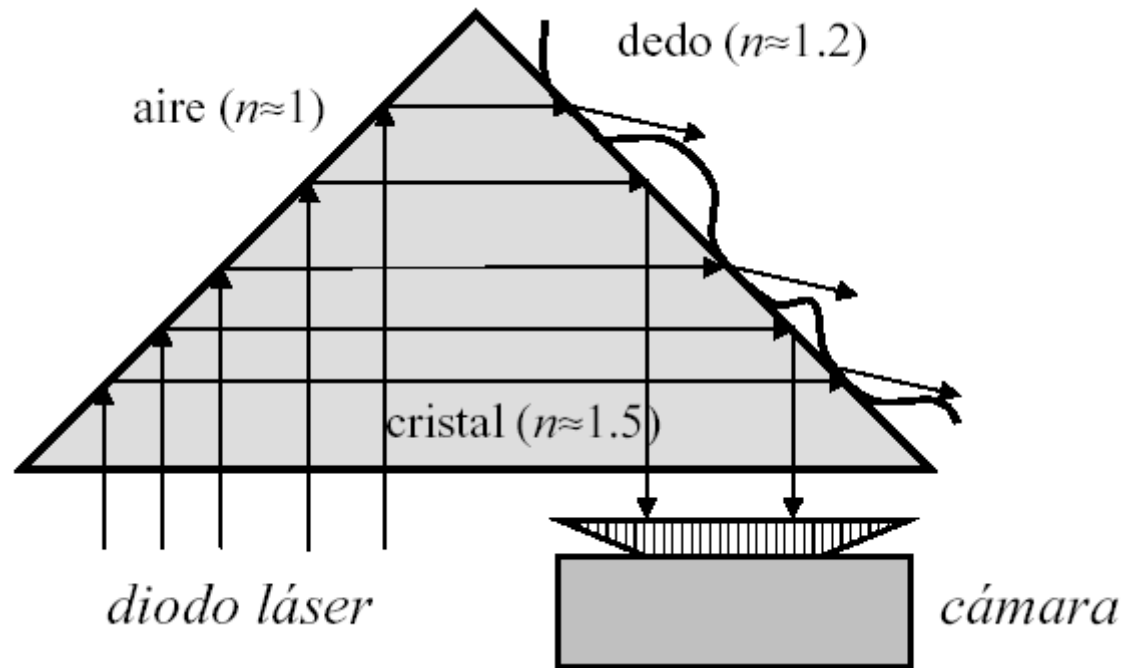
Reflexión interna total frustrada (FTIR)

Faltan los rayos reflejados donde se tocan las superficies de índice equiparable \Rightarrow se forma la sombra

El ángulo de incidencia sobrepasa el ángulo crítico



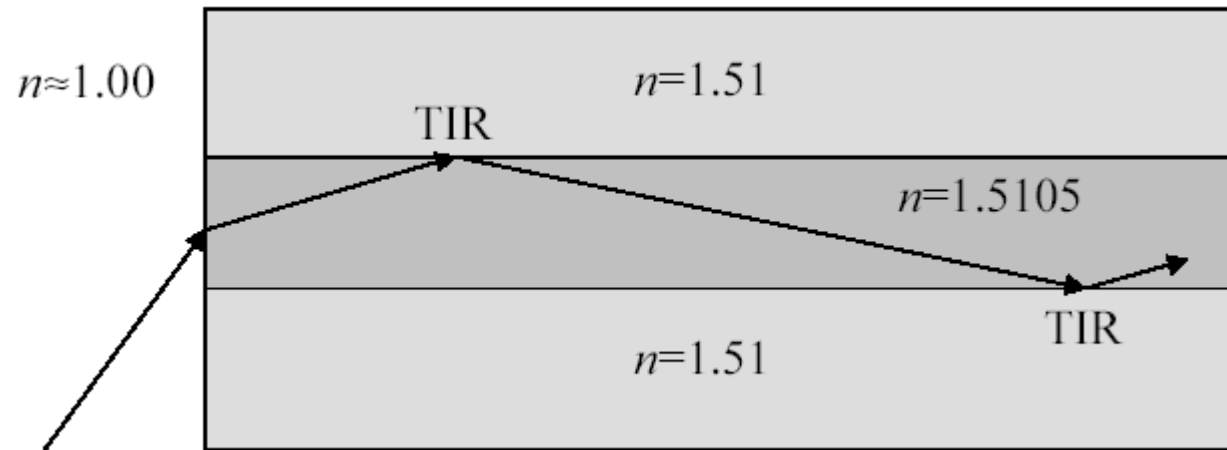
Sensor de huellas digitales



$\theta_{\text{crit}} (\text{cristal} | \text{aire}) \approx 42^\circ$
 La TIR se produce @ 45°

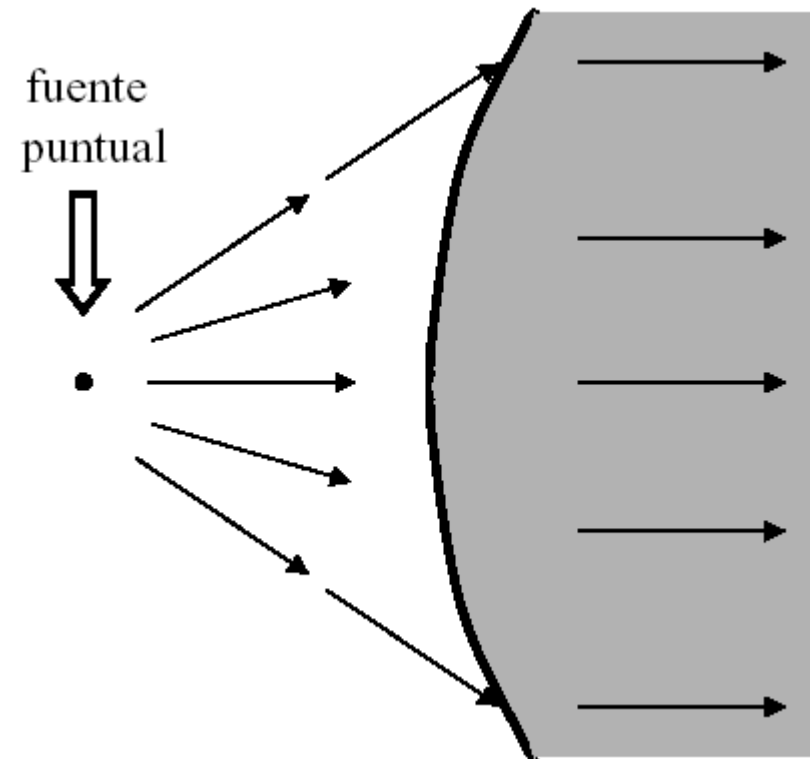
$\theta_{\text{crit}} (\text{cristal} | \text{dedo}) \approx 53^\circ$
 La TIR se produce @ 45°
 (FTIR)

Guía de ondas óptico

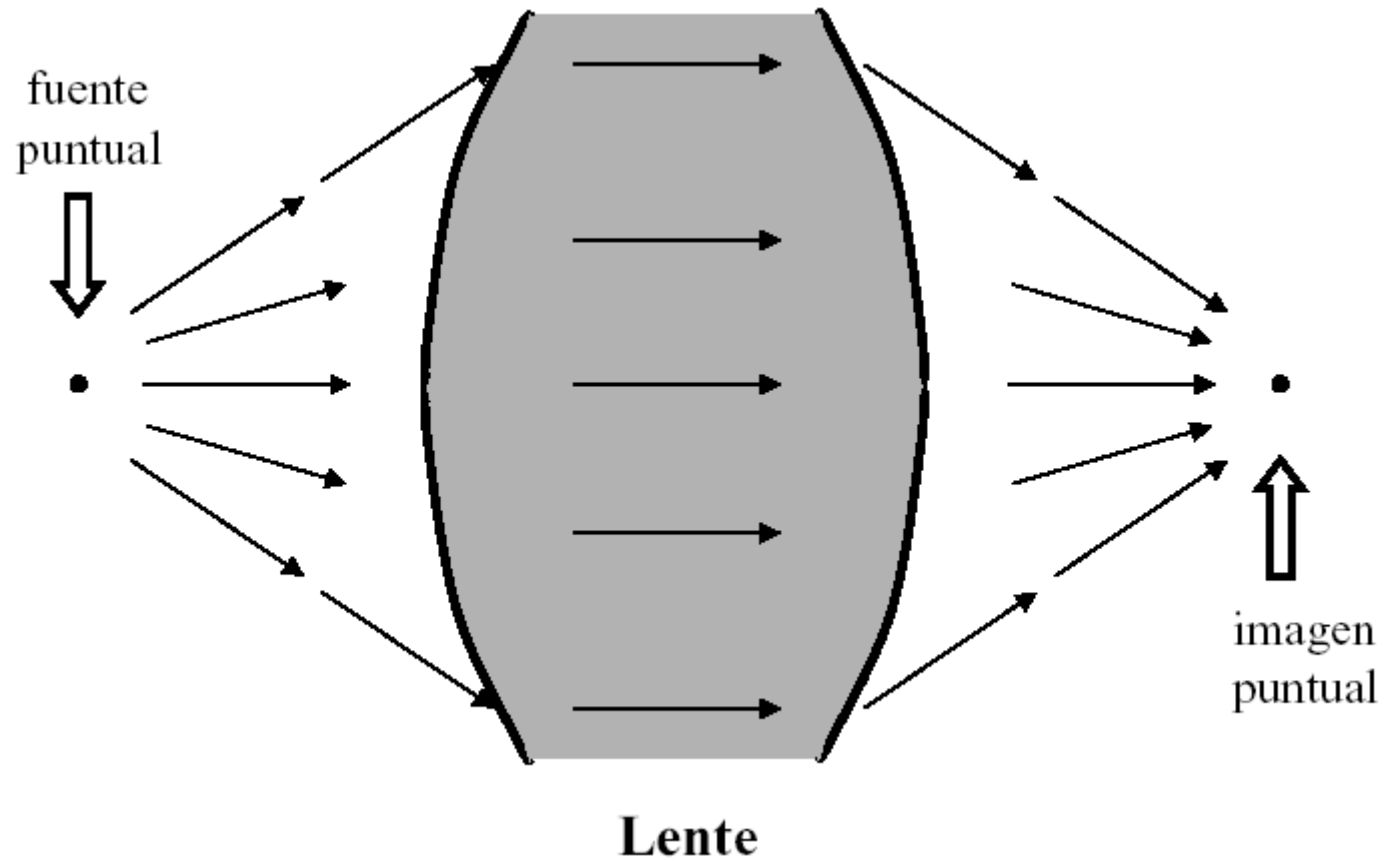


- Versión plana: *óptica integrada*.
- Versión cilíndricamente simétrica: *fibra óptica*.
- Permiten la creación de “segmentos de luz” y “cables de luz”, respectivamente, allí donde la luz se muestra con pocas restricciones.
- La investigación de materiales ha producido cristales con escasas pérdidas ($<0.25\text{dB/Km.}$).
- Base para las telecomunicaciones ópticas y algunos sistemas de formación de imágenes (ej., endoscopios) y de percepción (ej., presión).

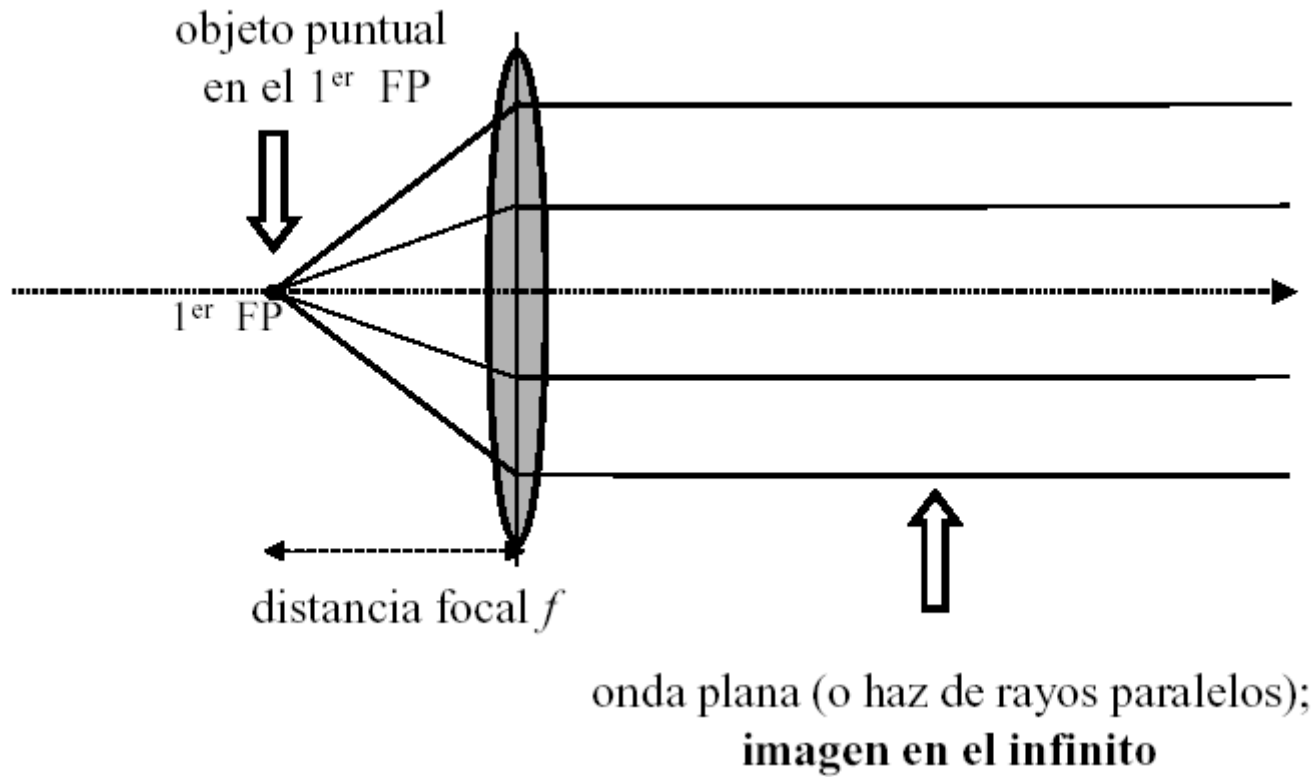
Refracción en una superficie esférica



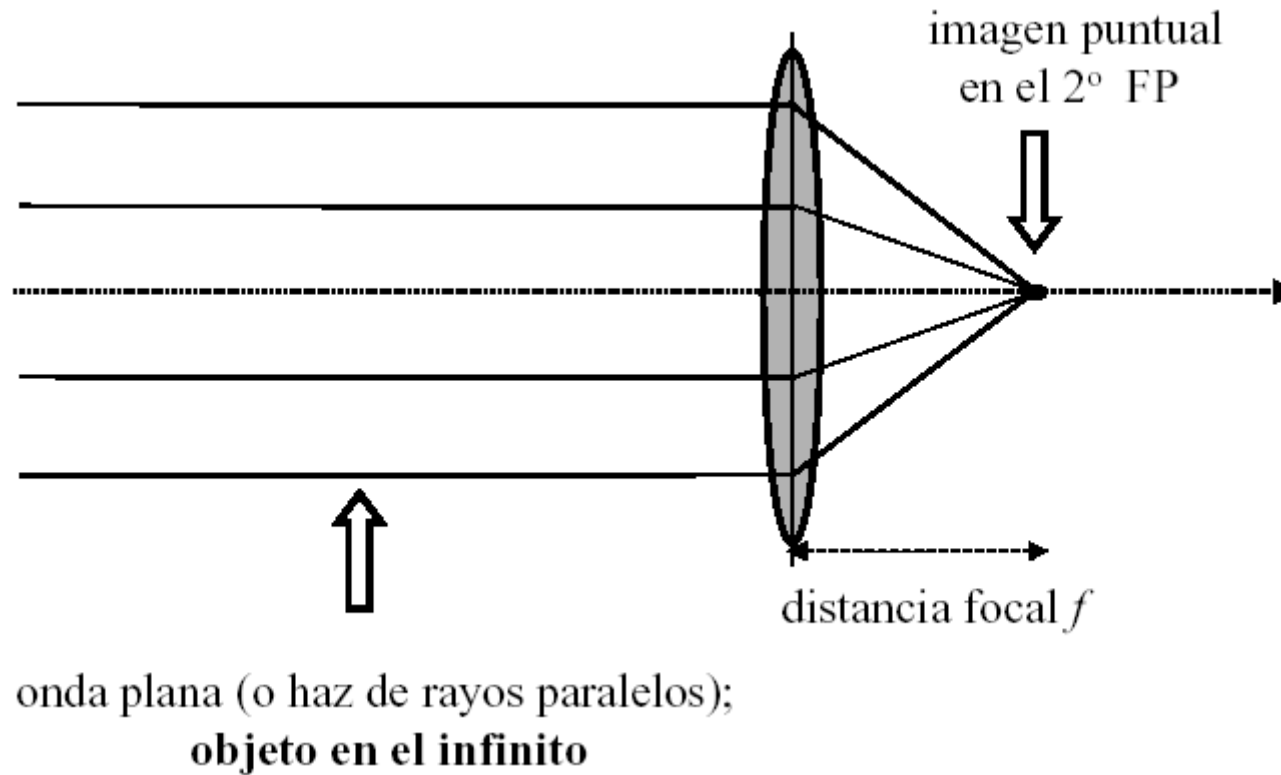
Creando la imagen de una fuente puntual



Modelo para una lente delgada

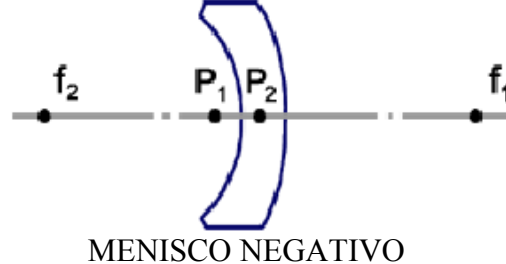
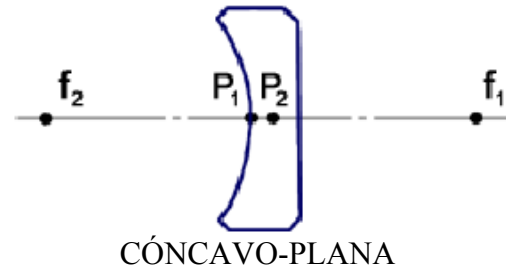
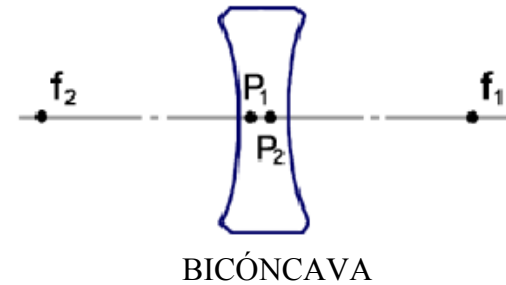
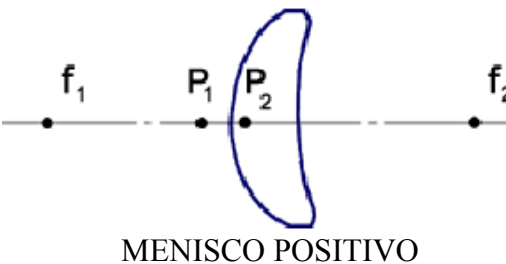
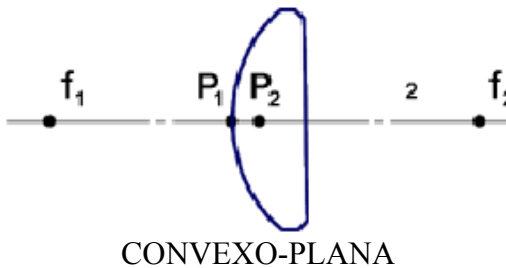
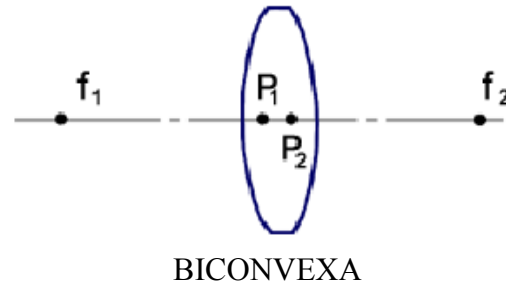


Modelo para una lente delgada



Diferentes tipos de lentes

positivo
($f > 0$)

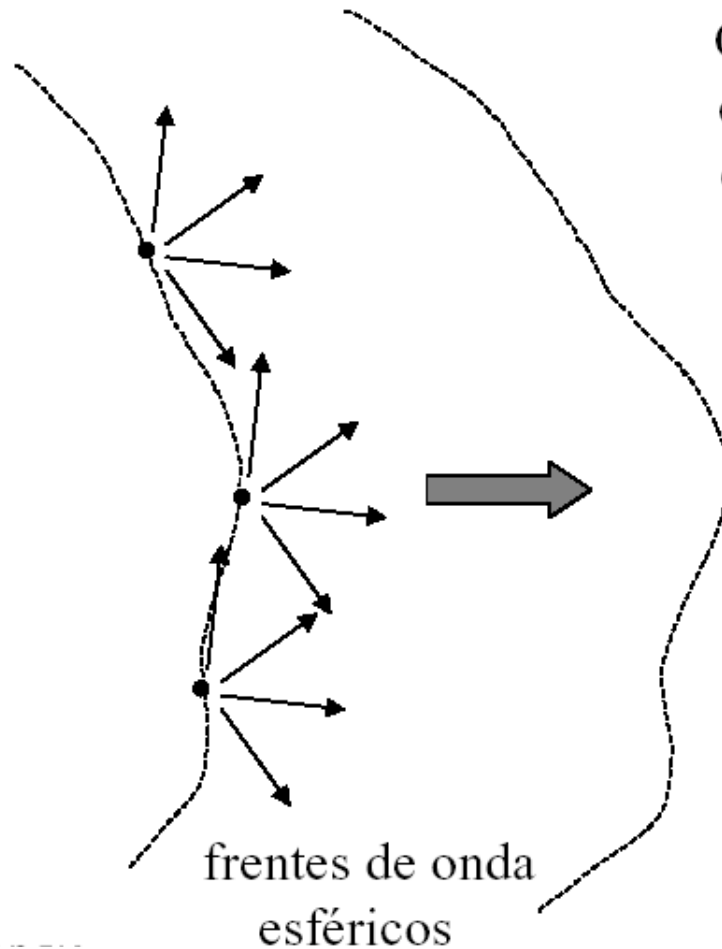


negativo
($f < 0$)

MIT 2.71/2.710
Clase de repaso p-26

Figura 2.12. Ubicación de los puntos focales y principales para varias formas de elementos convergentes y divergentes. (*Modern Optical Engineering*, W. Smith).

El principio de Huygens

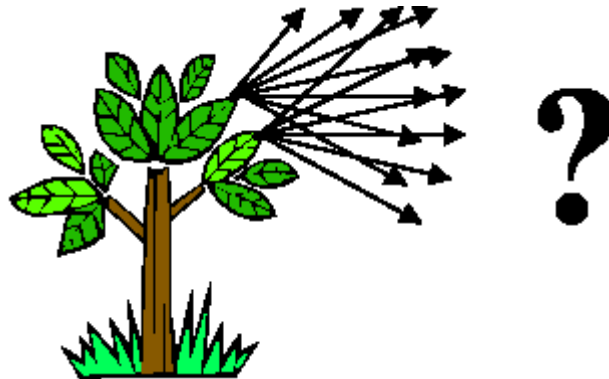


Cada punto en el frente de onda actúa como una fuente de luz secundaria que emite una onda esférica

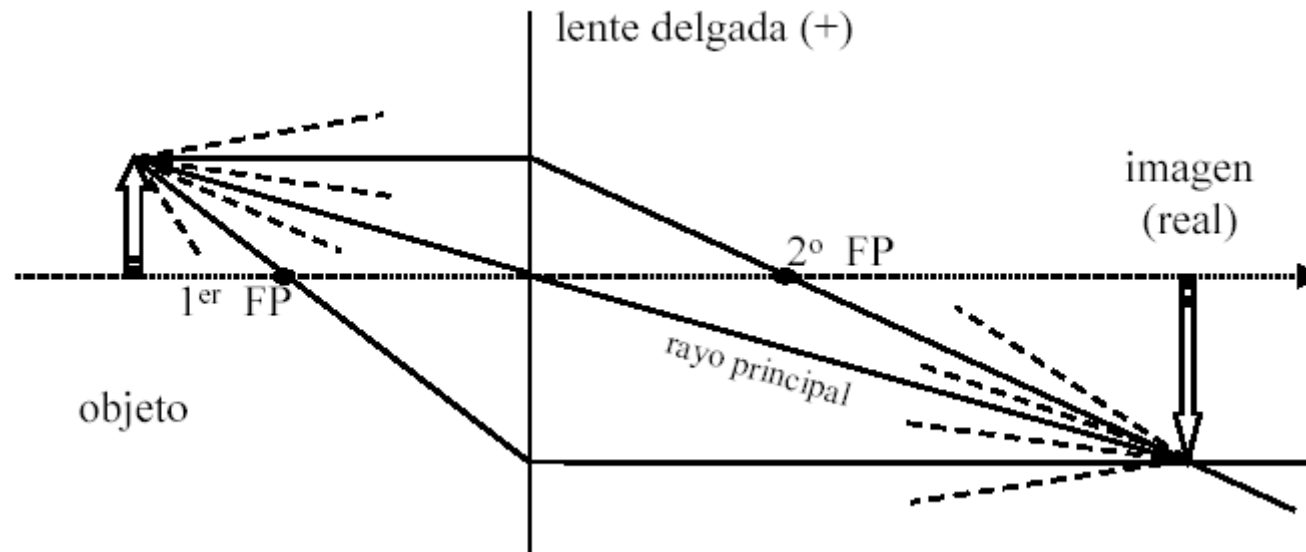
El frente de onda, después de una distancia corta de propagación, es el resultado de la superposición de todas estas ondas esféricas pequeñas

Por qué se necesitan sistemas de formación de imágenes

- Según Huygens, cada punto de un objeto dispersa la iluminación incidente en forma de onda esférica.
- A unas micras de distancia de la superficie del objeto, los rayos que emergen de todos los puntos del objeto se entrecruzan, impidiendo la localización de los detalles del objeto.
- Para localizar de nuevo los detalles del objeto se debe encontrar un método para reasignar (“enfocar”) todos los rayos que emergieron de un único punto del objeto a otro punto en el espacio (la “imagen”).
- Esta última función es el núcleo de la disciplina de Formación de imágenes ópticas.

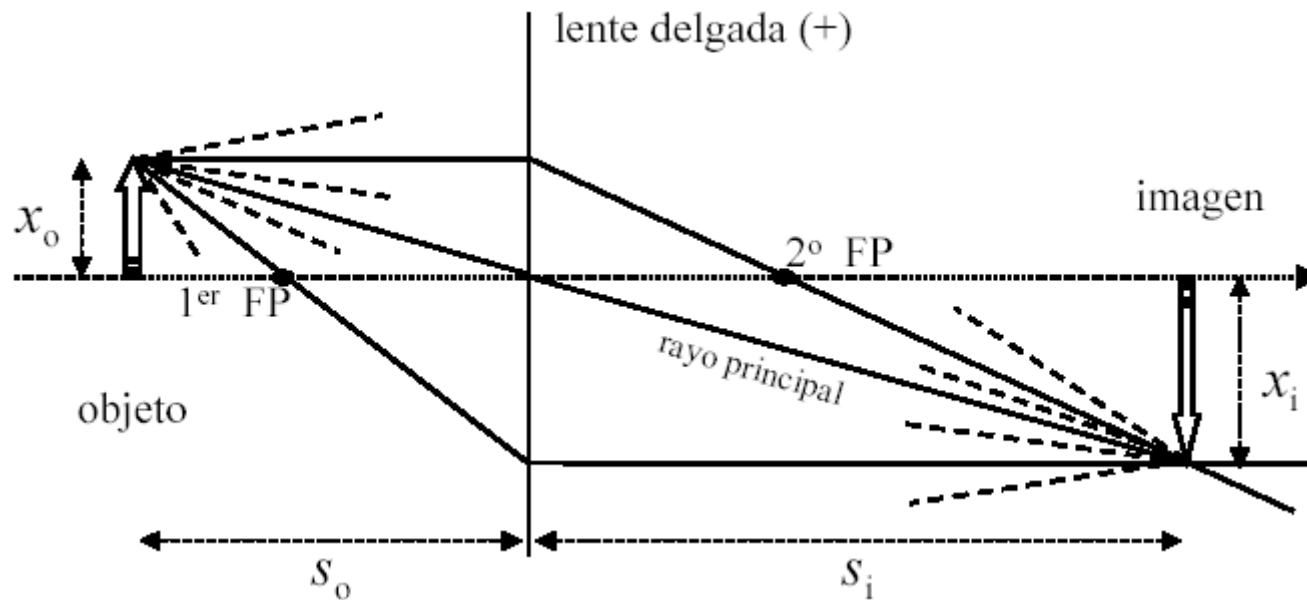


Condición de formación de imágenes: técnica de trazado de rayos



- El punto de referencia está ubicado en la intersección común de todos los rayos que emergen del punto del objeto correspondiente.
- Se puede realizar directamente un trazado del rayo principal y de los dos rayos que atraviesan los dos puntos focales.
- La imagen real formada por una lente delgada está **invertida** y se puede **aumentar** y **reducir**.

Condición de formación de imágenes: técnica de trazado de rayos



Ley de la lente

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}$$

Aumento lateral

$$M_x = \frac{x_i}{x_o} = -\frac{S_o}{S_i}$$

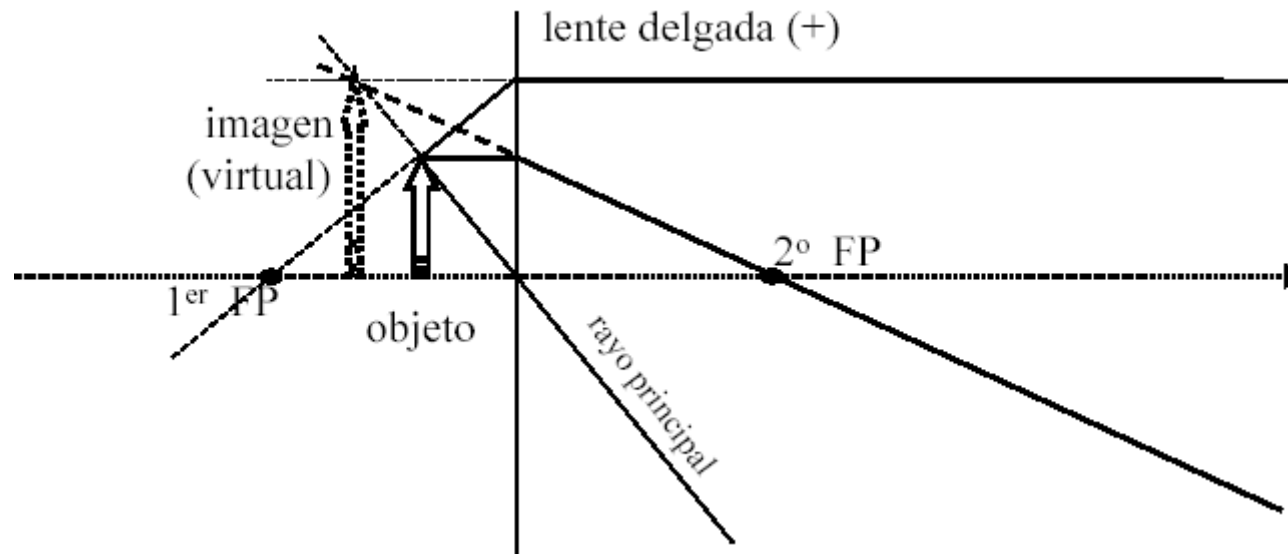
Aumento angular

$$M_a = -\frac{S_i}{S_o}$$

Conservación de energía

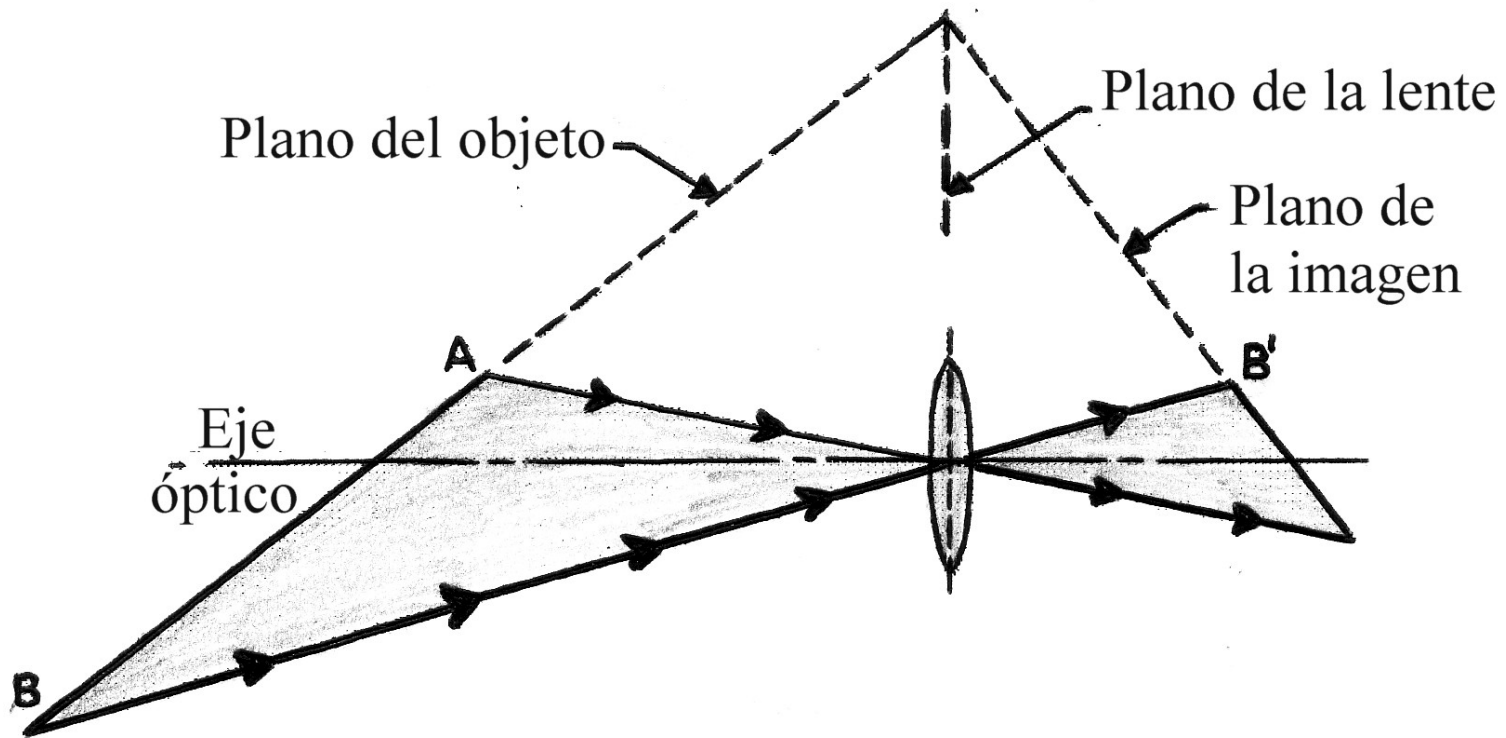
$$M_x M_a = 1$$

Condición de formación de imágenes: técnica de trazado de rayos



- El haz de rayos que emerge del sistema es divergente; la imagen virtual está ubicada en la intersección de los rayos extendidos hacia atrás.
- La imagen virtual está **erguida** y **aumentada**.
- Cuando se utiliza una lente negativa, la imagen es siempre virtual, está erguida y reducida.

Objeto inclinado: condición de Scheimpflug

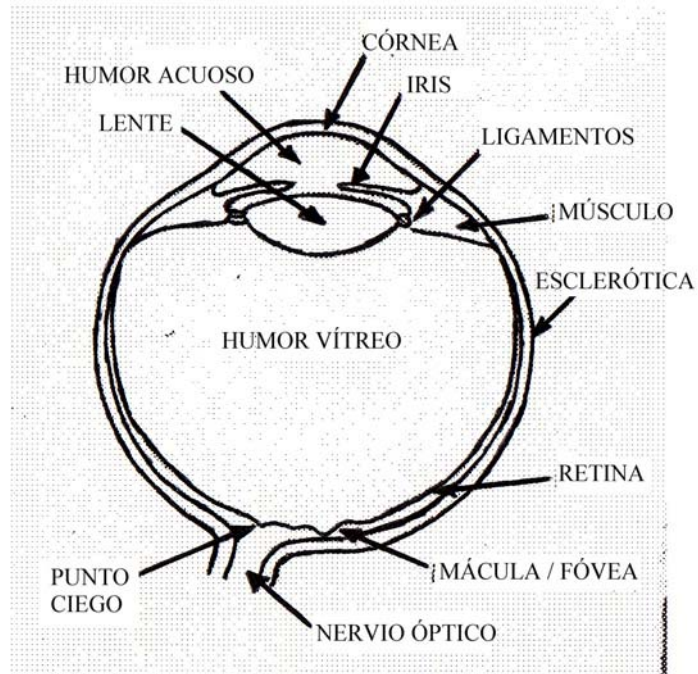


Los planos de la imagen y del objeto forman una intersección en ángulo recto en el plano de la lente delgada

Formación de imágenes basada en la lente

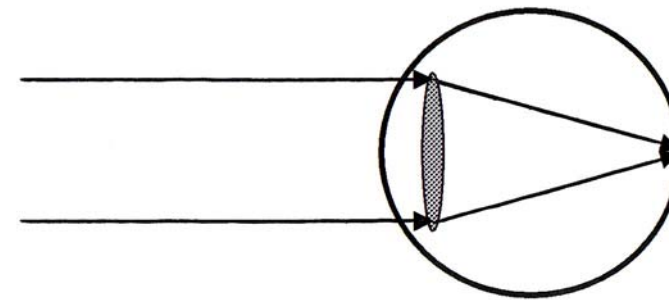
- Ojo humano
- Cámara fotográfica
- Magnificador
- Microscopio
- Telescopio

El ojo humano

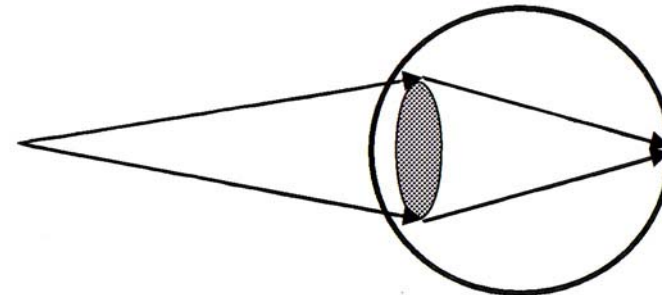


Punto próximo (visión óptima de confort)
~ 25cm. de la córnea

MIT 2.71/2.710
Clase de repaso p-34



Objeto remoto (ojo no adaptado)



Objeto próximo (ojo adaptado)

Defectos del ojo y su compensación

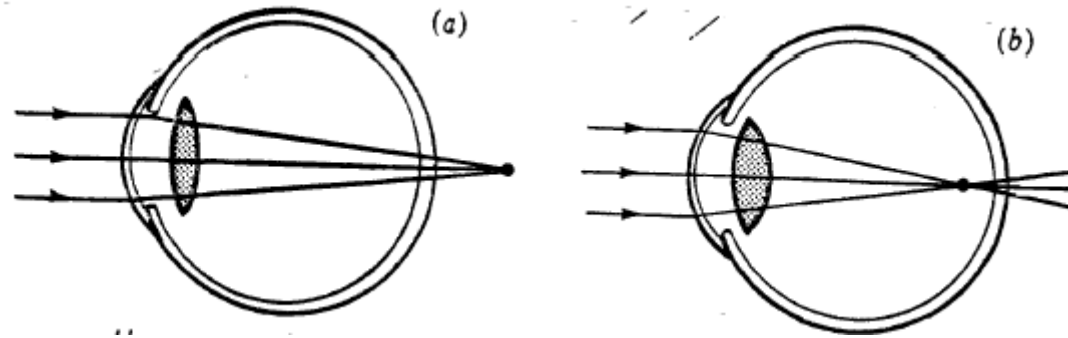


Figura 10K. Defectos comunes del ojo, presentes en su mayoría en la población adulta.

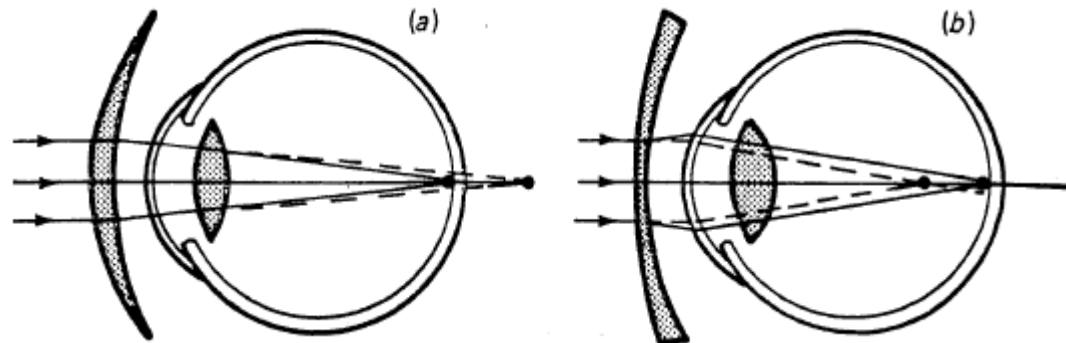
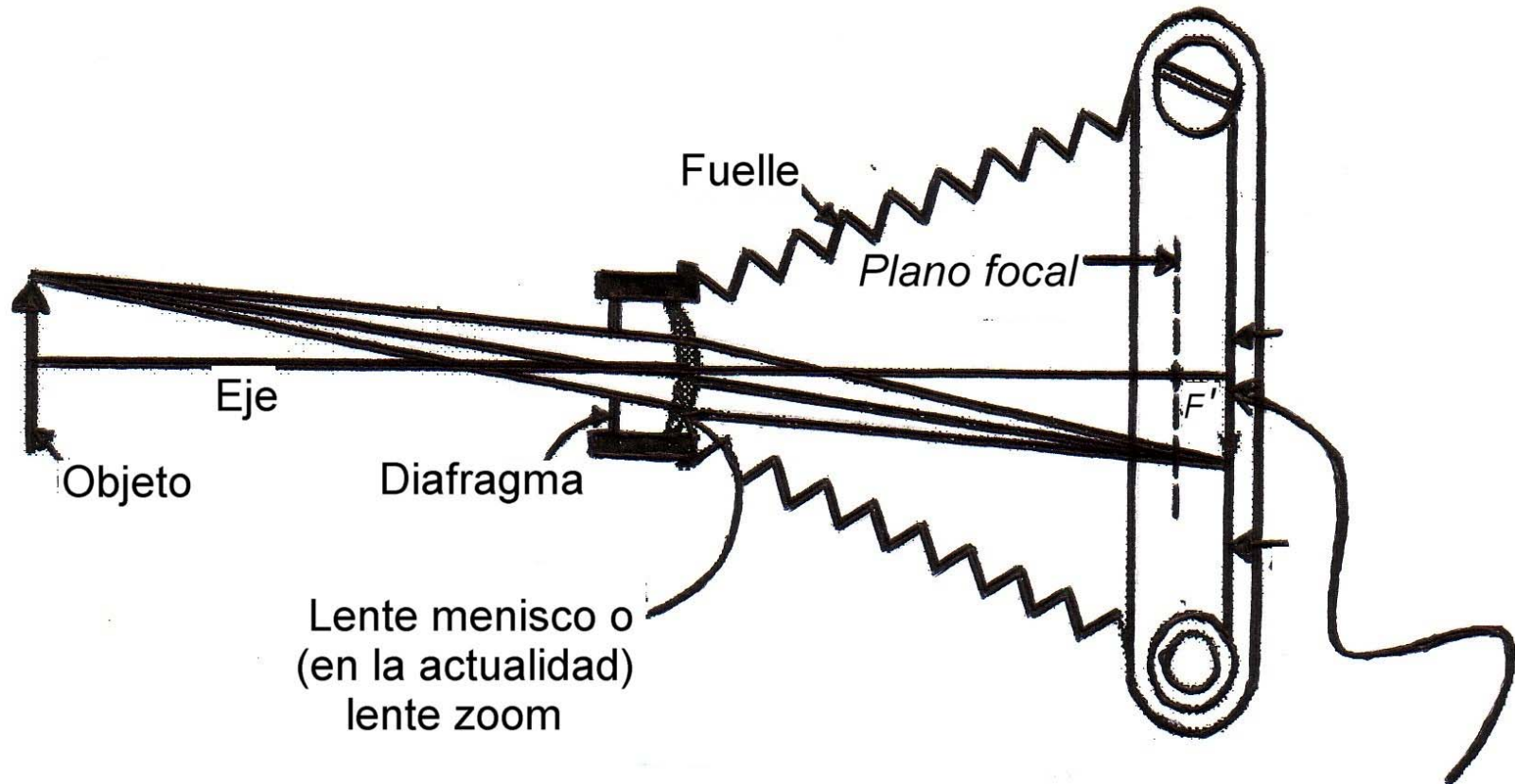


Figura 10L. Los defectos comunes del ojo pueden ser compensados por medio de cristales para lentes.
(F. Jenkins & H. White, *Fundamentals of Optics*)

La cámara fotográfica



“Creación de imágenes digitales” → ordenación de detectores (CCD o CMOS)

El magnificador

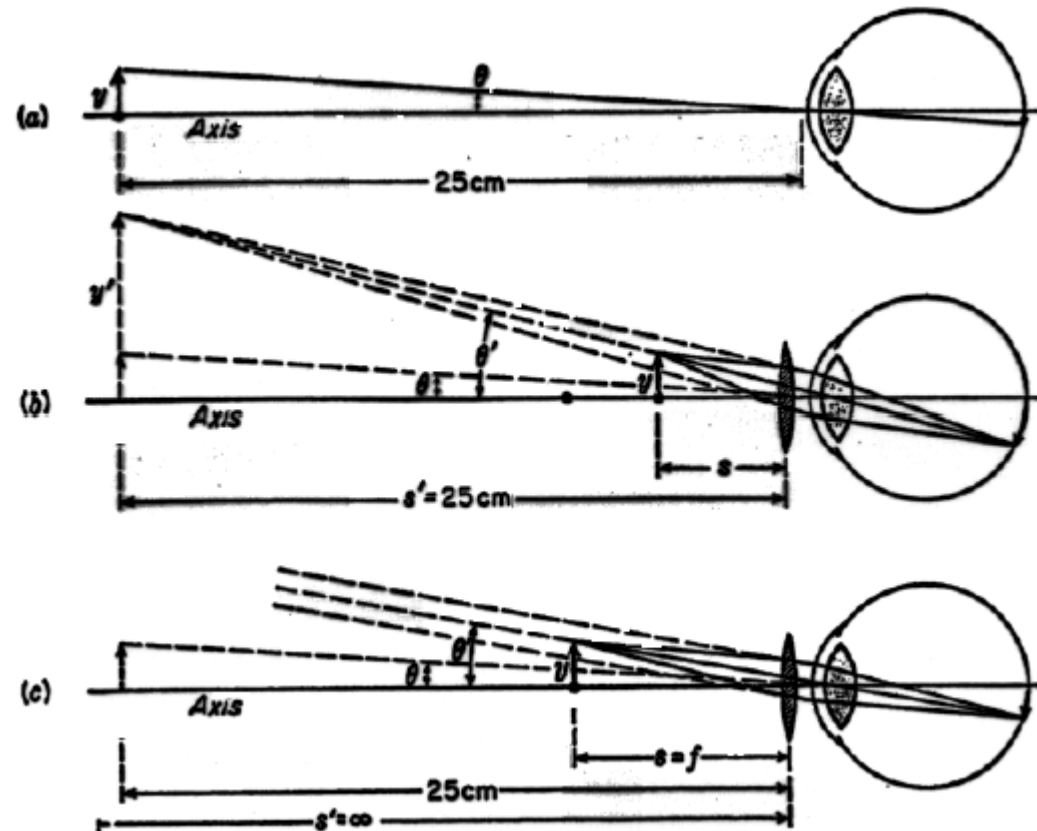
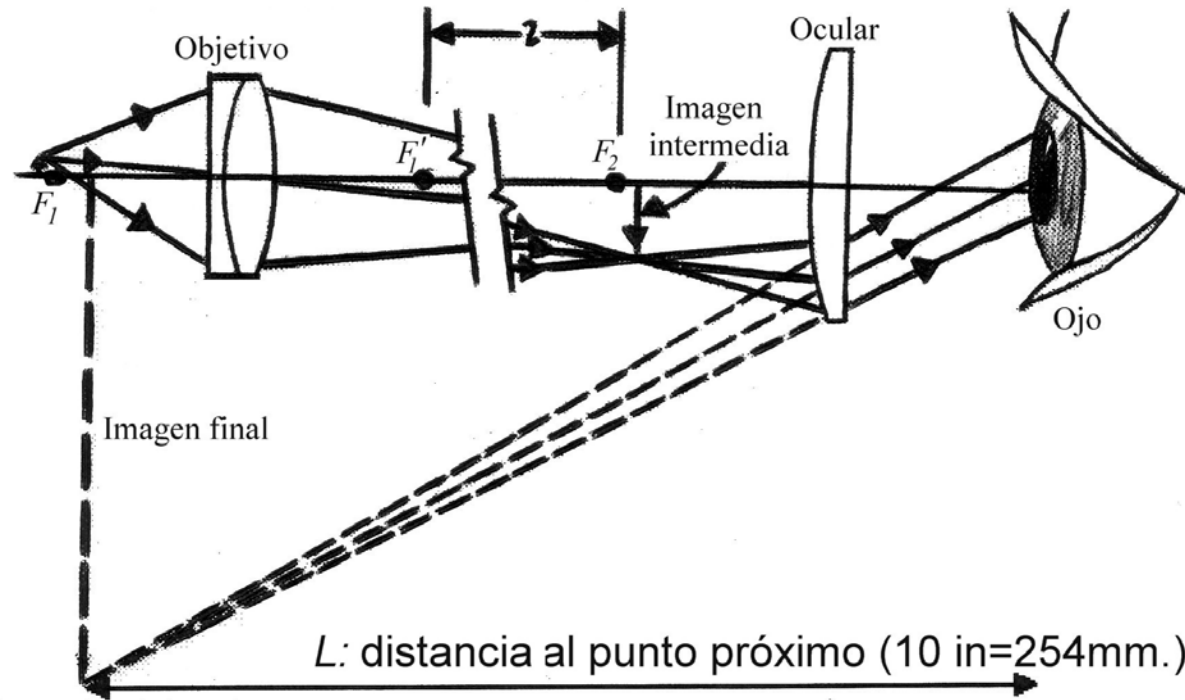


Figura 10I

Ángulo unido por: (a) un objeto situado en el punto próximo al ojo, (b) la imagen virtual de un objeto situado dentro del punto focal y, (c) la imagen virtual de un objeto situado en el punto focal.

(M. Klein & T. Furtak, *Óptics*)

El microscopio compuesto



$$\left. \begin{array}{l} \text{Aumento del objetivo } M_o \approx -\frac{l}{f_o} \\ \text{Aumento del ocular } M_e \approx \frac{L}{f_e} \end{array} \right\} \text{Aumento combinado } M = M_e M_o$$

(M. Klein & T. Furtak, *Óptics*)

El telescopio

(instrumento afocal – magnificador angular)

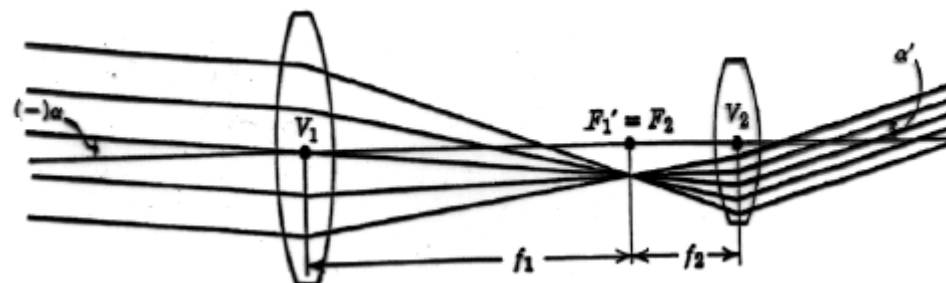


Figura 3.40. Telescopio astronómico.

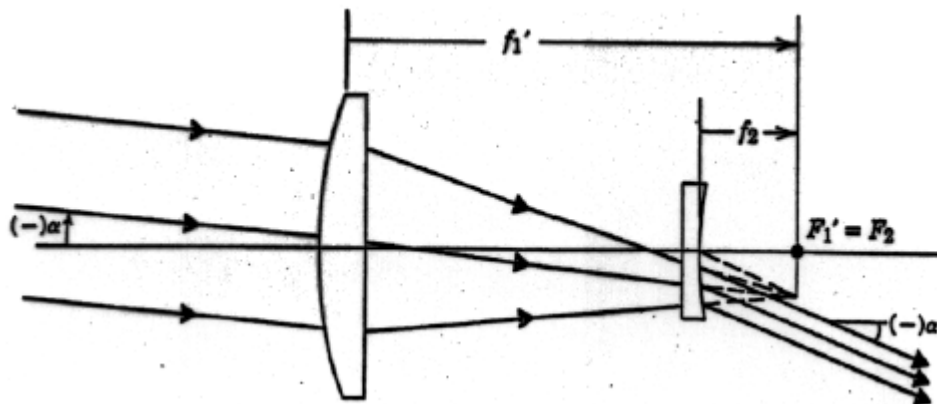
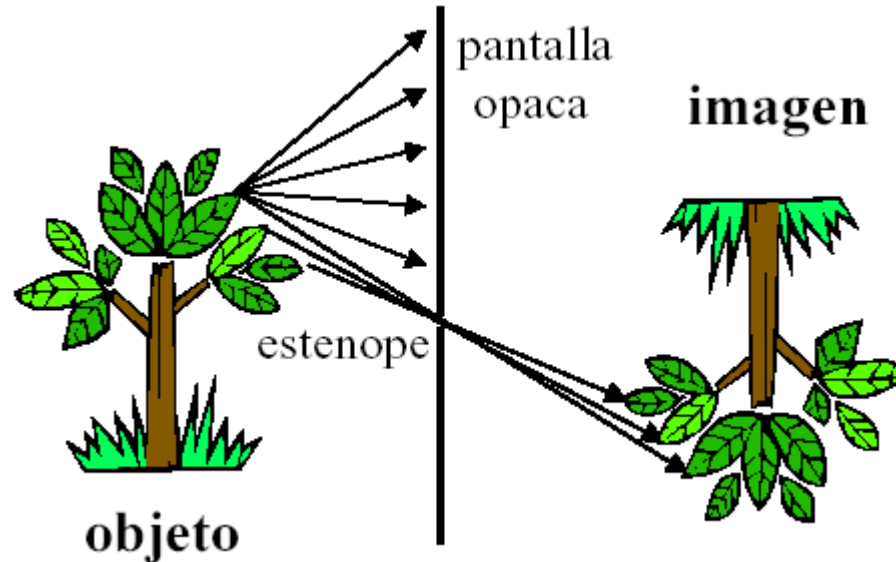


Figura 3.41. Telescopio galileano (modelado según el primer telescopio)

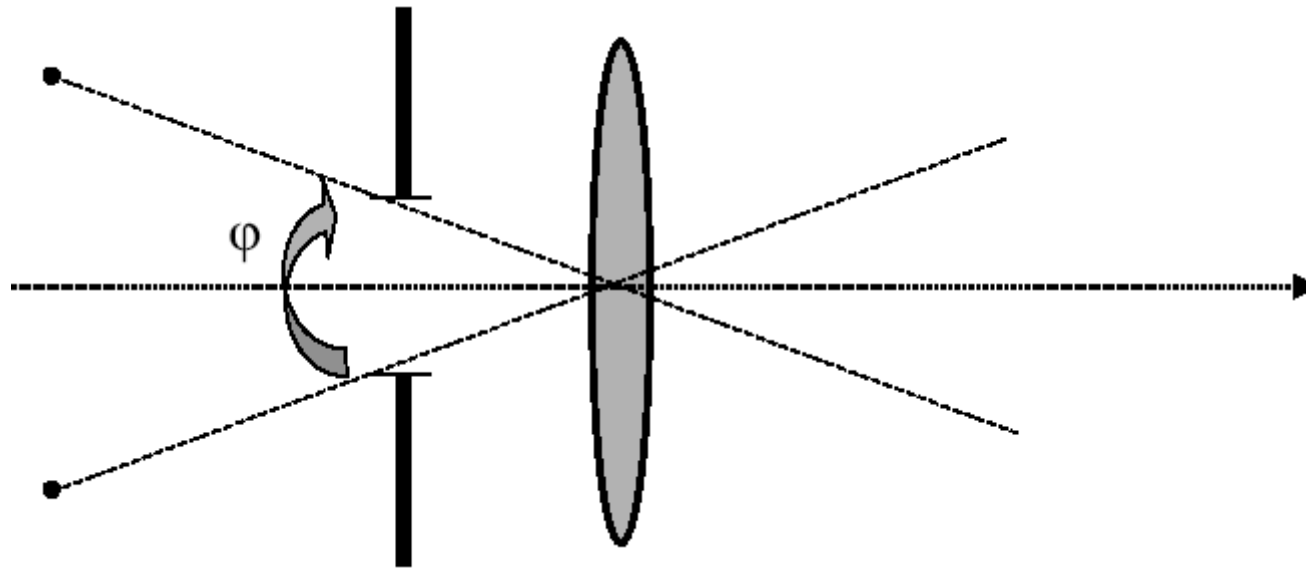
(M. Klein & T. Furtak, *Óptics*)

La cámara estenopeica



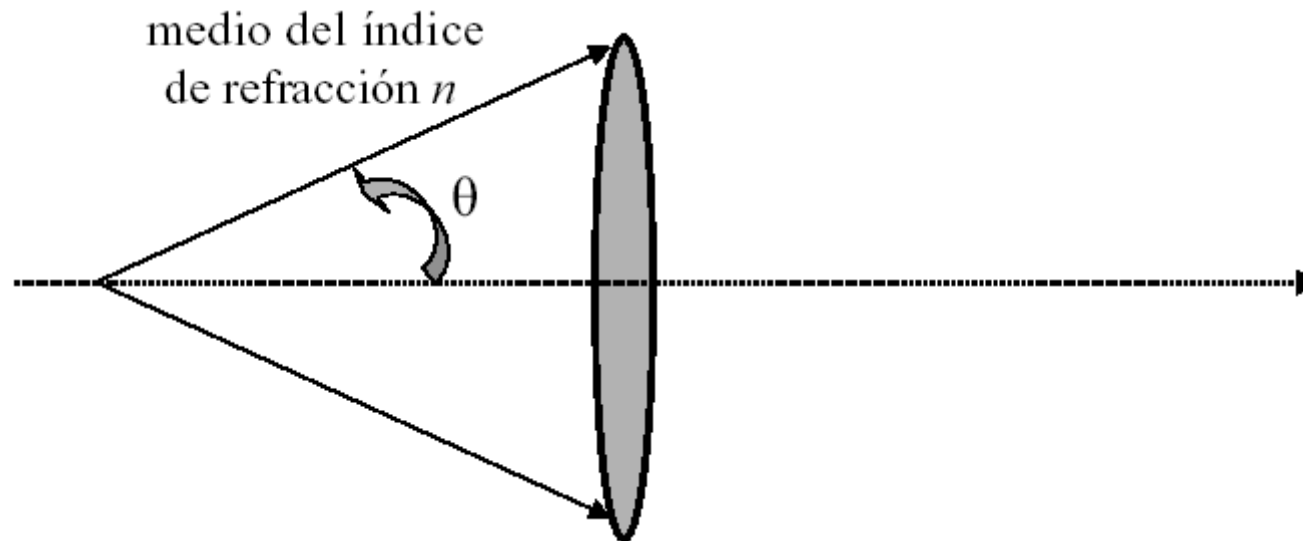
- La cámara estenopeica impide el paso al espacio imagen de todos los rayos procedentes del objeto, excepto a uno \Rightarrow se forma una imagen (es decir, cada punto en el espacio de la imagen corresponde a un único punto del espacio del objeto).
- Lamentablemente en este instrumento se desaprovecha la mayor parte de la luz.
- Además, la luz se difracta si tiene que atravesar pequeños estenopes, como veremos más adelante. La difracción introduce mecanismos para los que todavía no contamos con las herramientas necesarias para cuantificarlos.

Campo visual (FOV)



FOV = ángulo máximo que puede atravesar el *rayo principal* de un objeto en dirección hacia el sistema de formación de imágenes.

Apertura numérica

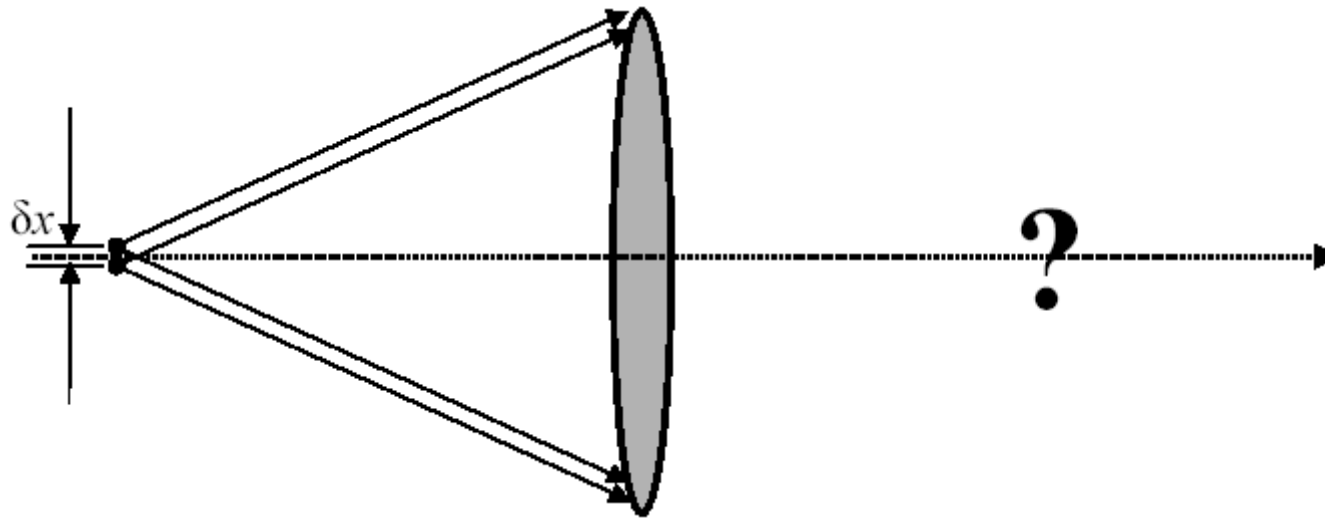


θ : medio ángulo atravesado por el sistema de creación de imágenes procedente de un objeto *axial*

Apertura numérica
(NA) = $n \sin\theta$

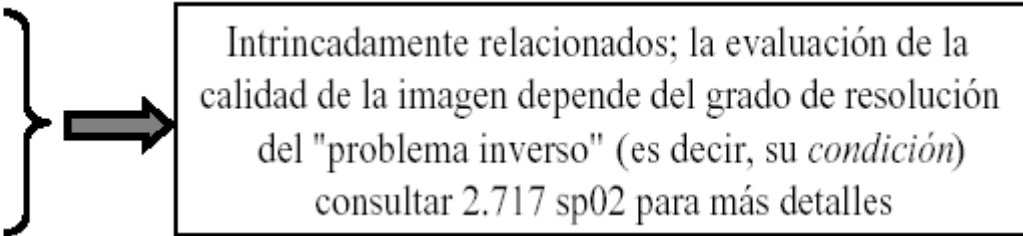
Velocidad (f/#) = $1/2$ (NA)
pronunciado número f. Ej.,
f/8 quiere decir (f/#) = 8

Resolución

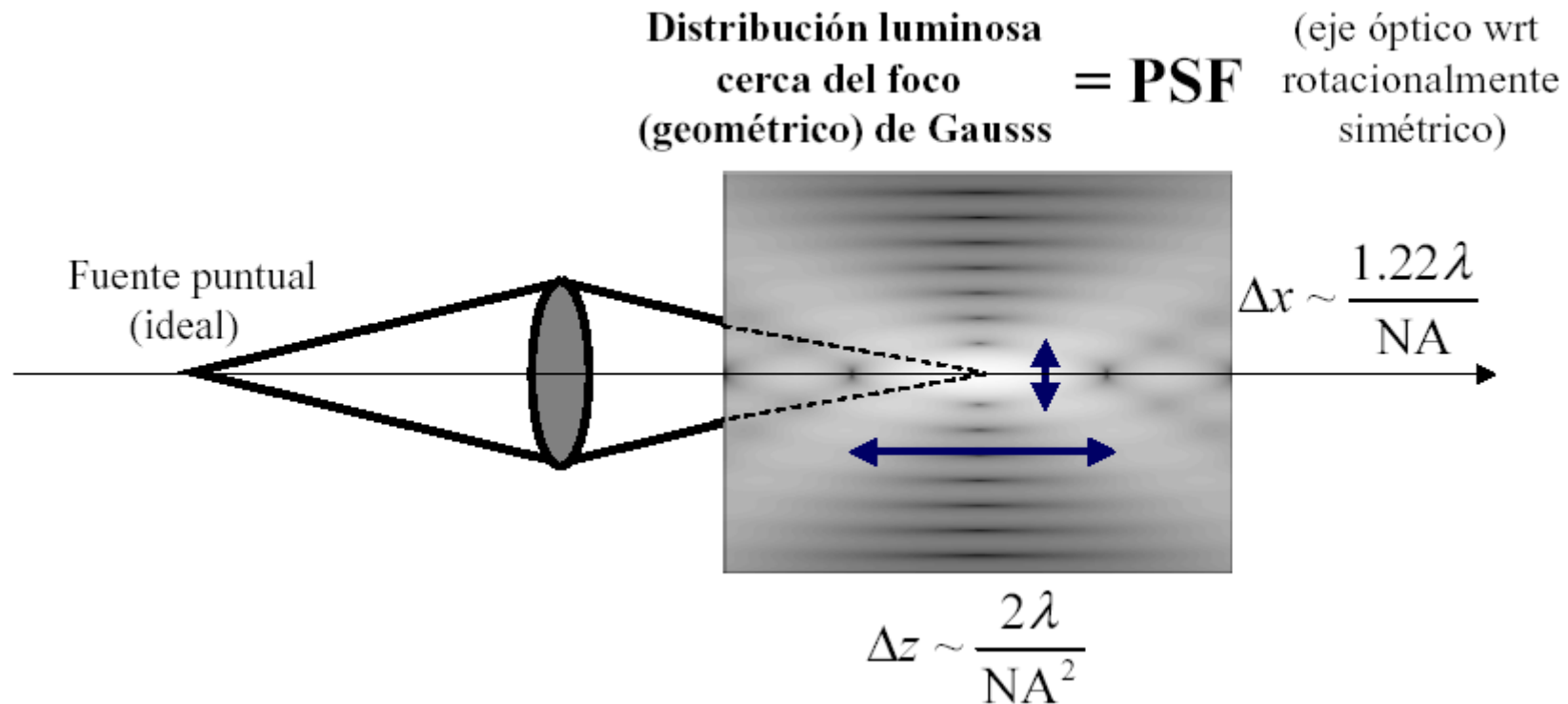


¿A qué distancia máxima pueden estar situados dos objetos puntuales separados para que puedan distinguirse independientemente?

Factores que limitan la resolución en un sistema de formación de imágenes

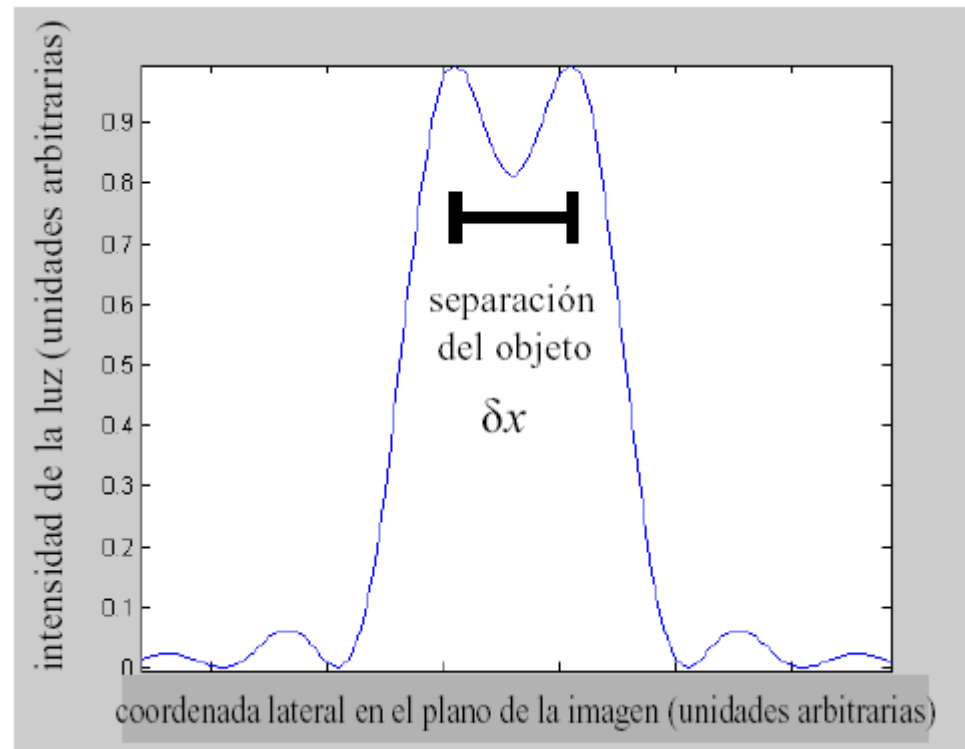
- Difracción
 - Aberraciones
 - Ruido
- 
- Intrincadamente relacionados; la evaluación de la calidad de la imagen depende del grado de resolución del "problema inverso" (es decir, su *condición*)
consultar 2.717 sp02 para más detalles
- ruido electrónico (térmico, de Poisson) en las cámaras
 - ruido multiplicativo en la película fotográfica
 - luz parásita
 - ruido intermitente
 - Muestreo en el plano de la imagen
 - tamaño del píxel de la cámara
 - tamaño de gránulo de la película fotográfica

Respuesta impulsional



La extensión finita de la PSF hace que la imagen sea borrosa

Resolución limitada por difracción

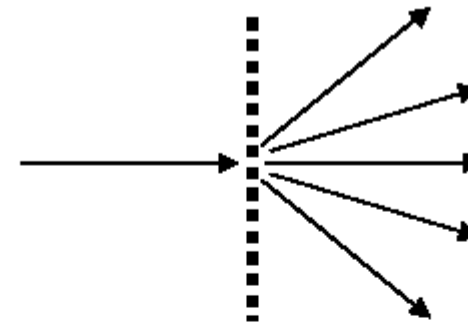
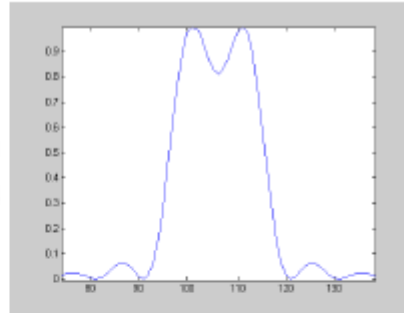


Los objetos puntuales } $\delta x \approx \frac{1.22\lambda}{(NA)}$ Criterio de resolución de Rayleigh
sólo son resolubles

Naturaleza ondulatoria de la luz

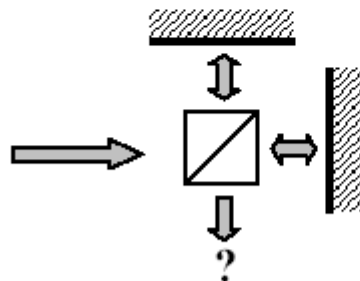
- Difracción

ensanchamiento de imágenes puntuales

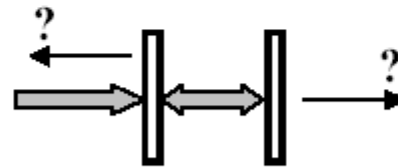


red de difracción

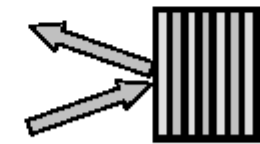
- Interferencia



Interferómetro de Michelson



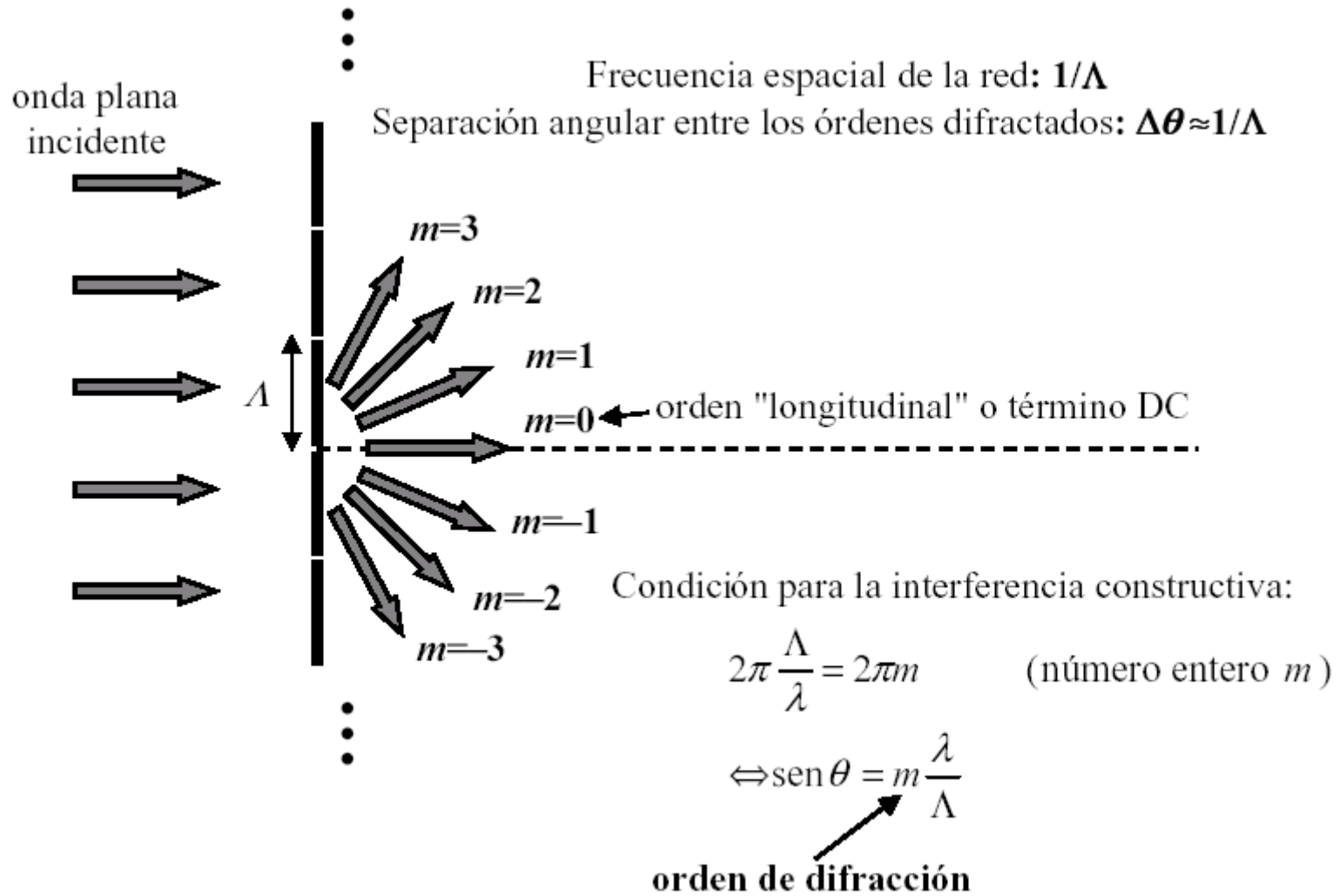
Interferómetro de Fabry-Perot



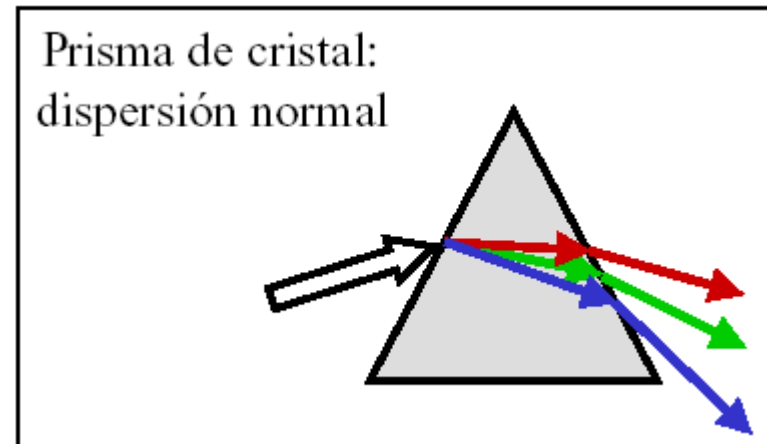
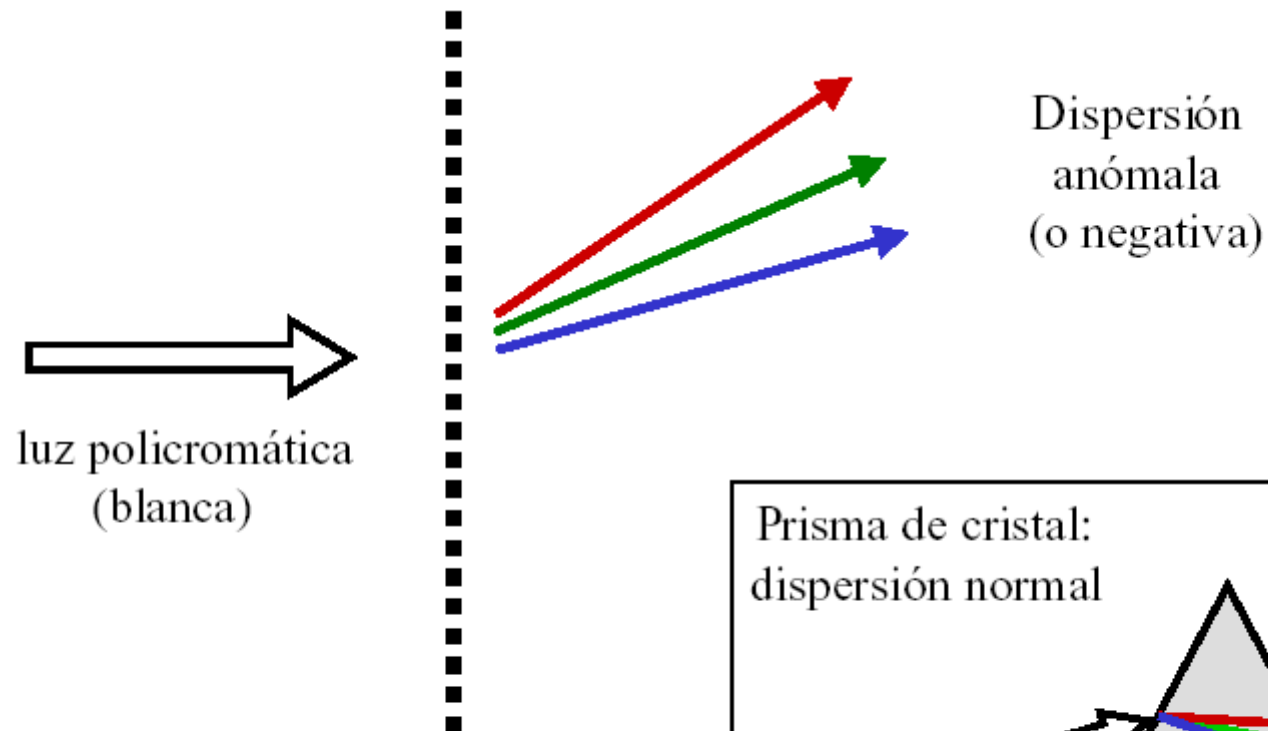
Filtro de interferencia (o espejo dieléctrico)

- Polarización: polaroids, dicroicos, cristales líquidos, ...

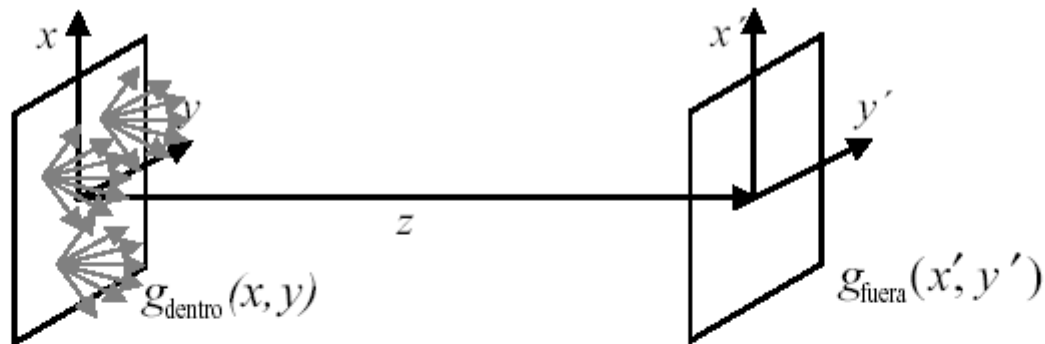
Redes de difracción



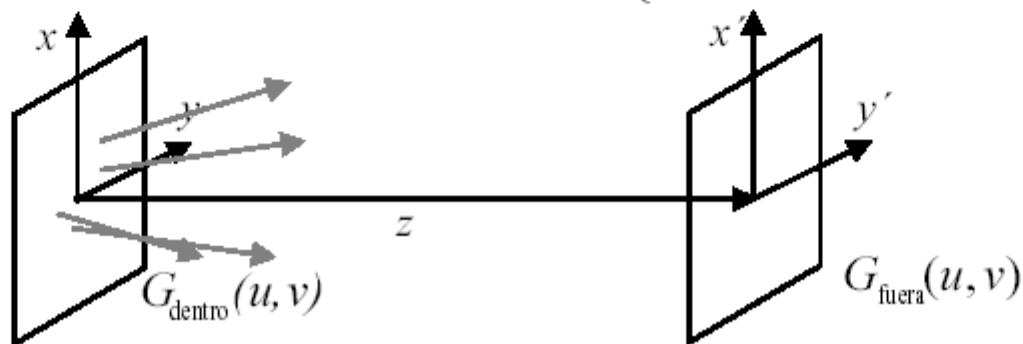
Dispersión de una red



Fórmulas de la difracción de Fresnel

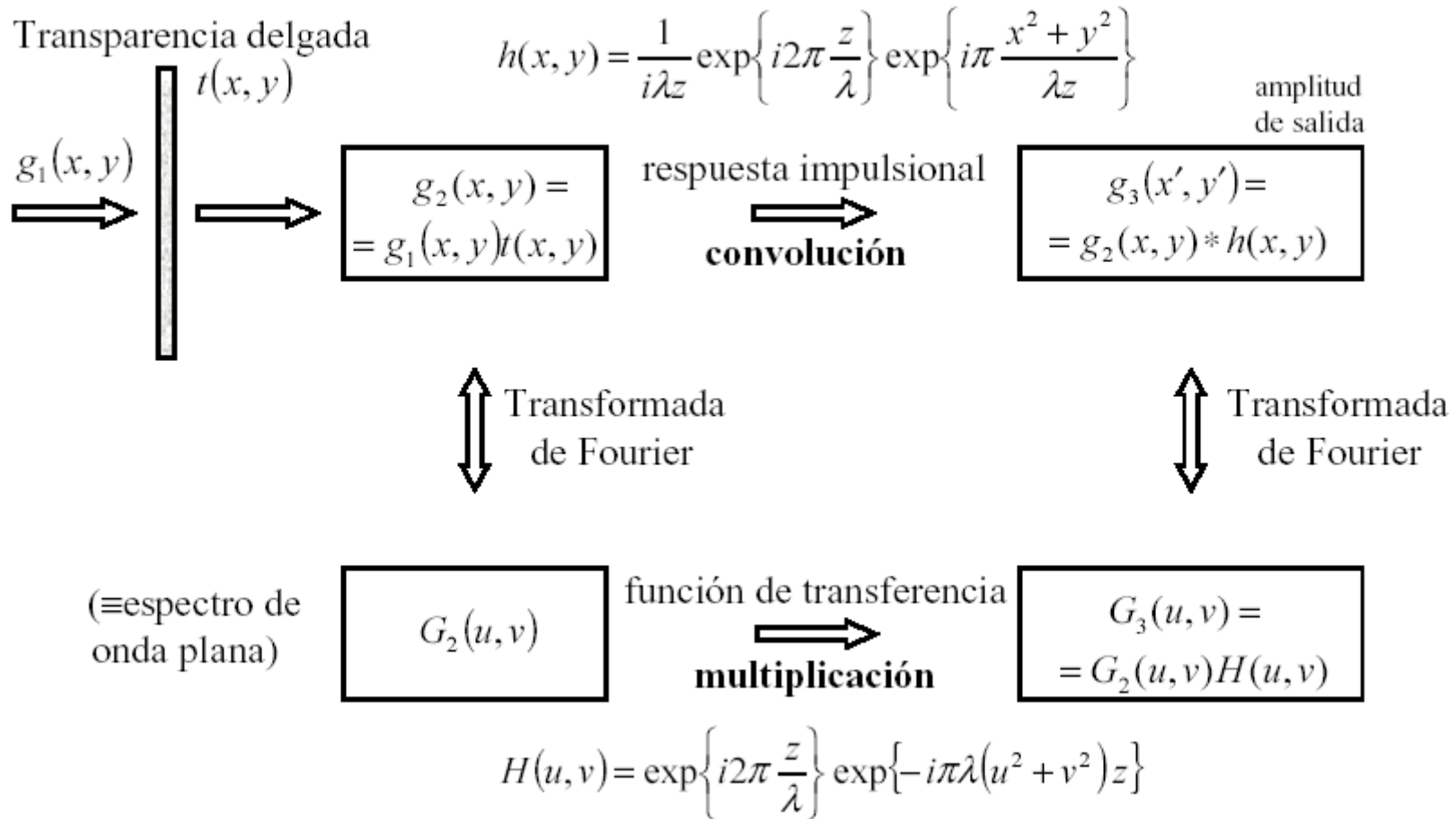


$$g_{\text{fuera}}(x', y'; z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left\{i2\pi \frac{z}{\lambda}\right\} \int g_{\text{dentro}}(x, y) \exp\left\{i\pi \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{\lambda z}\right\} dx dy$$

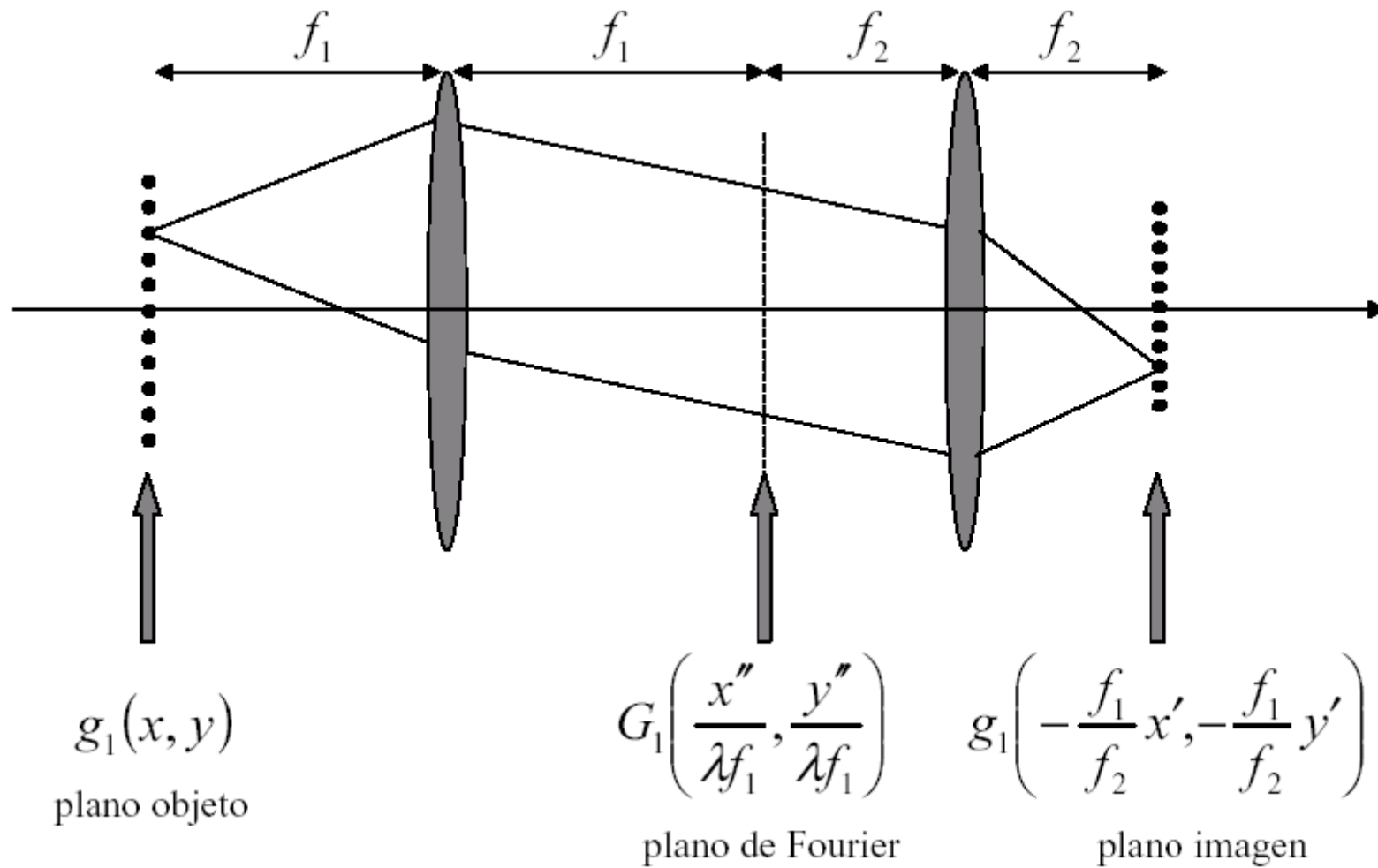


$$G_{\text{fuera}}(u, v; z) = \exp\left\{i2\pi \frac{z}{\lambda}\right\} G_{\text{dentro}}(u, v) \exp\left\{-i\pi\lambda z(u^2 + v^2)\right\}$$

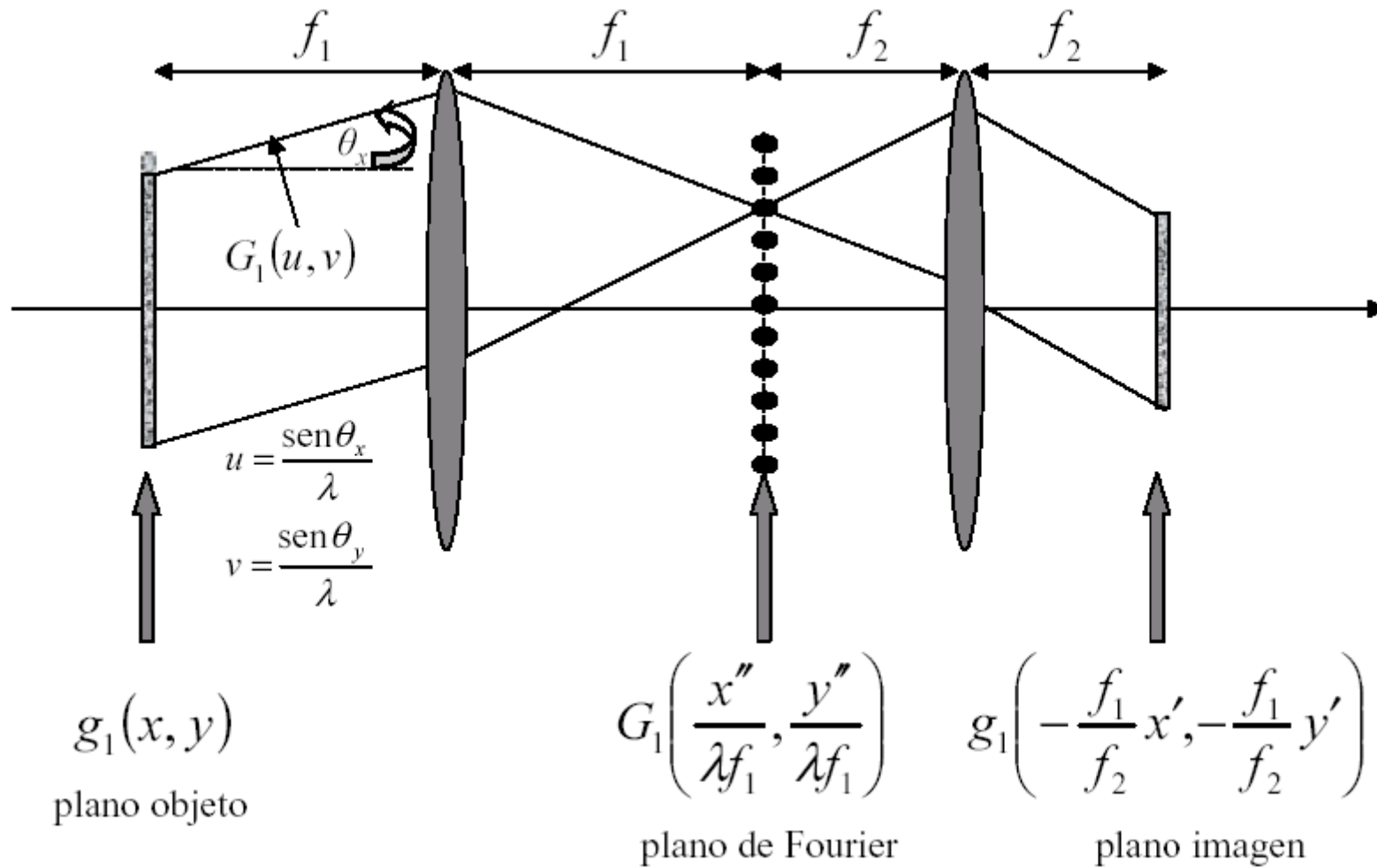
La difracción de Fresnel como sistema lineal invariante a desplazamientos



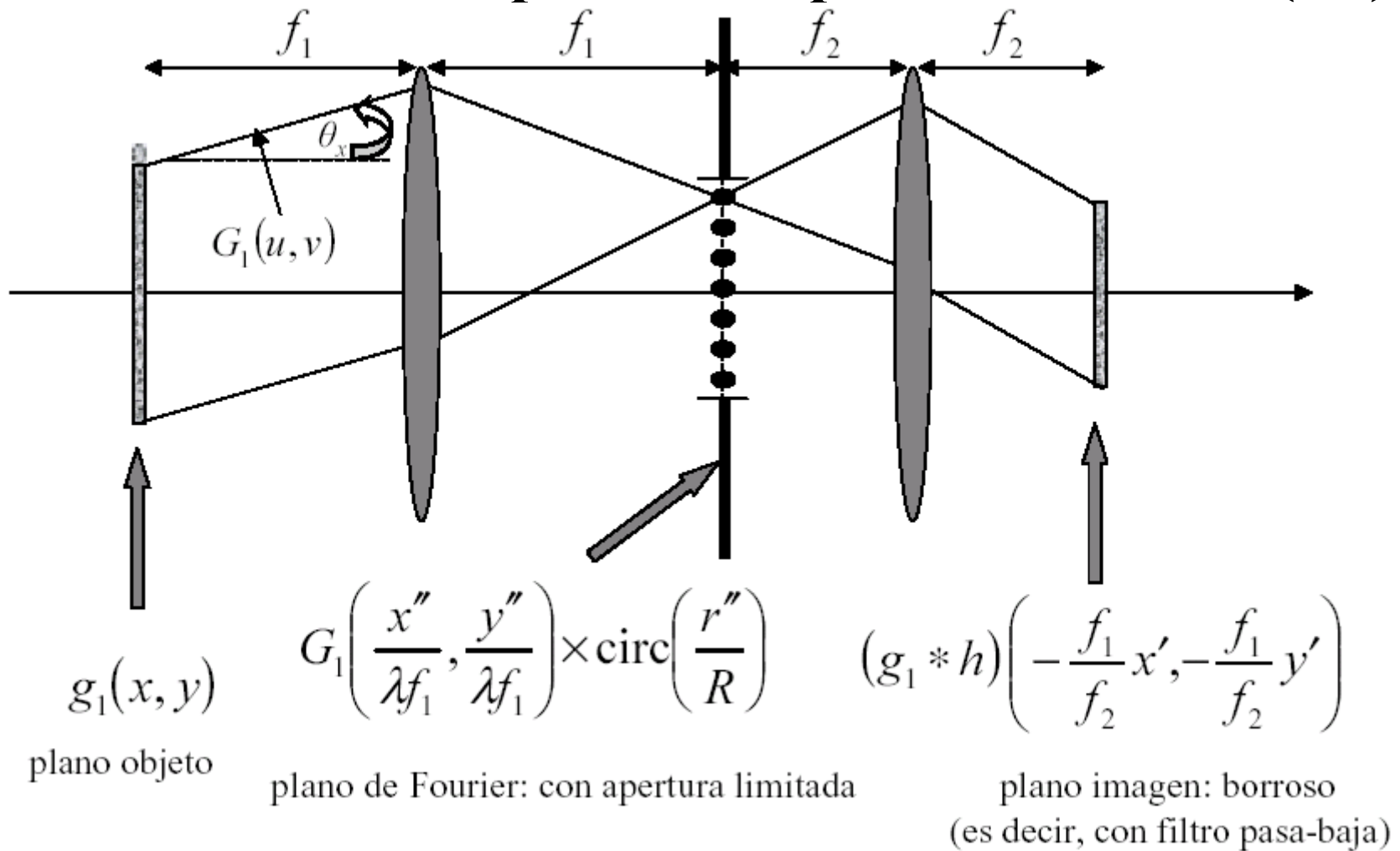
El sistema 4F



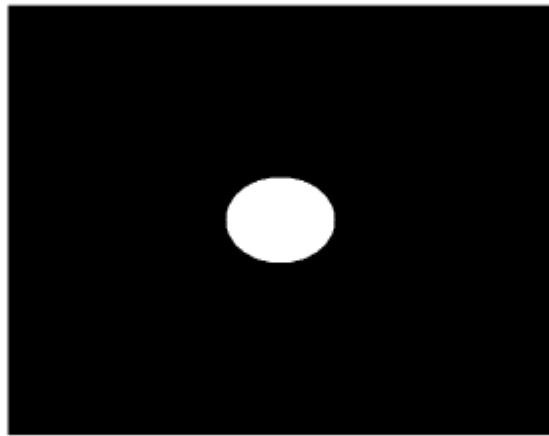
El sistema 4F



El sistema 4F con apertura de plano de Fourier (FP)

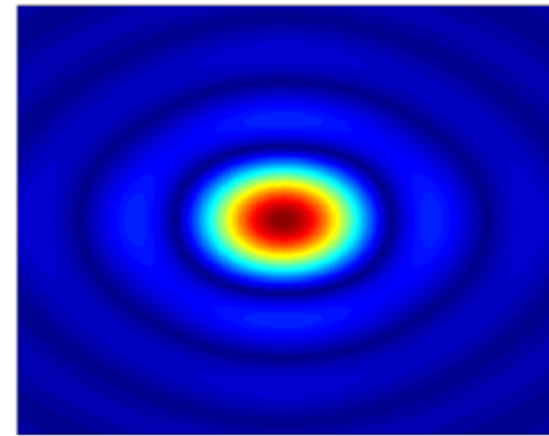


El sistema 4F con apertura de plano de Fourier (FP)



Función de transferencia:
apertura circular

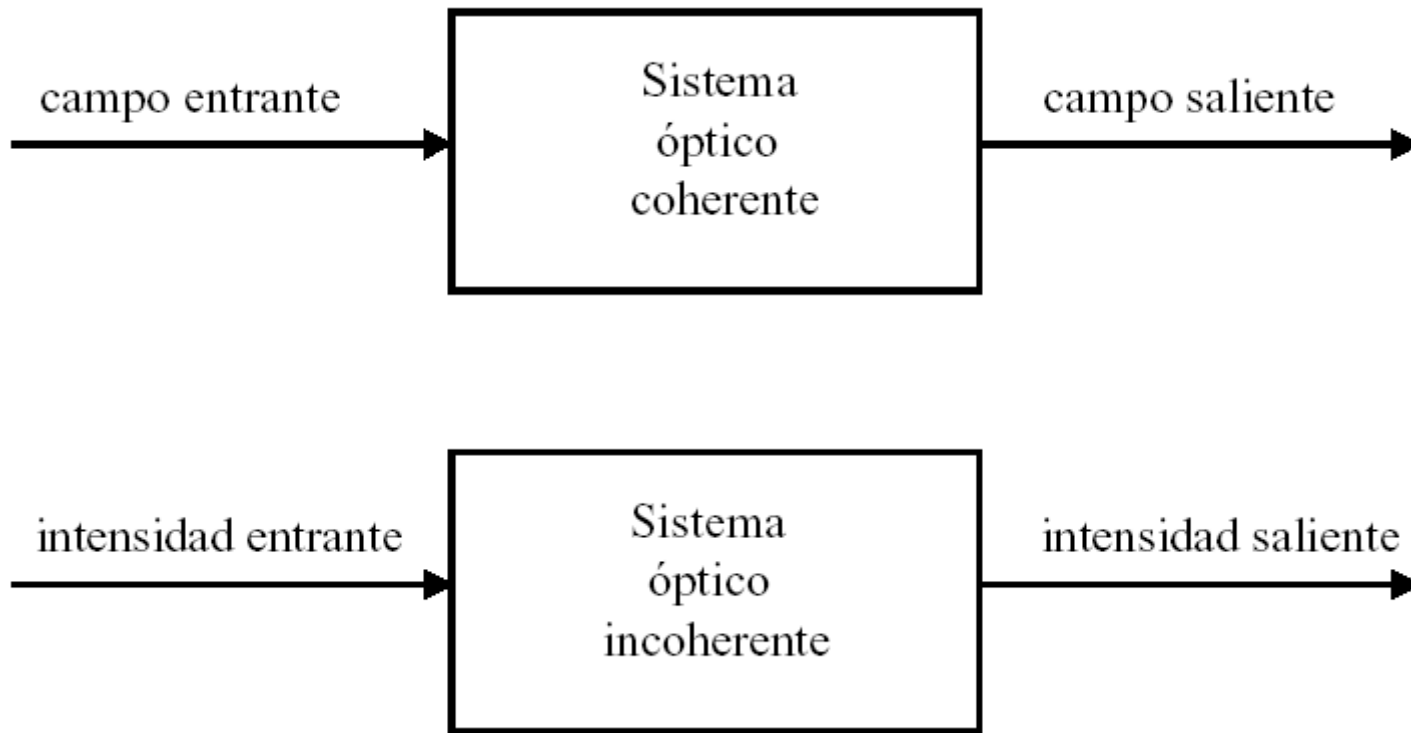
$$\text{circ}\left(\frac{r''}{R}\right)$$



Respuesta impulsional:
disco de Airy

$$\text{sinc}\left(\frac{r'R}{\lambda f_2}\right)$$

La formación de imágenes coherente frente a la formación de imágenes incoherente



La formación de imágenes coherente frente a la formación de imágenes incoherente

Respuesta impulsional coherente

$$h(x, y)$$

(campo entrante \Rightarrow campo saliente)

Función de transferencia coherente

$$H(u, v) = \text{FT} \{h(x, y)\}$$

(FT del campo saliente \Rightarrow FT del campo saliente)

Función de transferencia incoherente

$$\tilde{h}(x, y) = |h(x, y)|^2$$

(intensidad entrante \Rightarrow intensidad saliente)

Respuesta impulsional incoherente

$$\tilde{H}(u, v) = \text{FT} \{\tilde{h}(x, y)\}$$

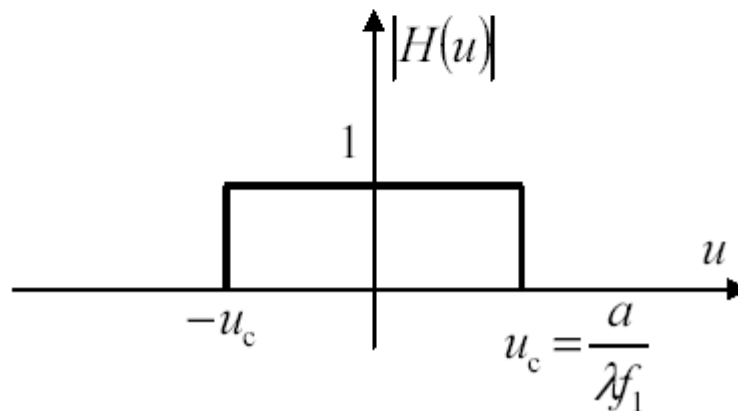
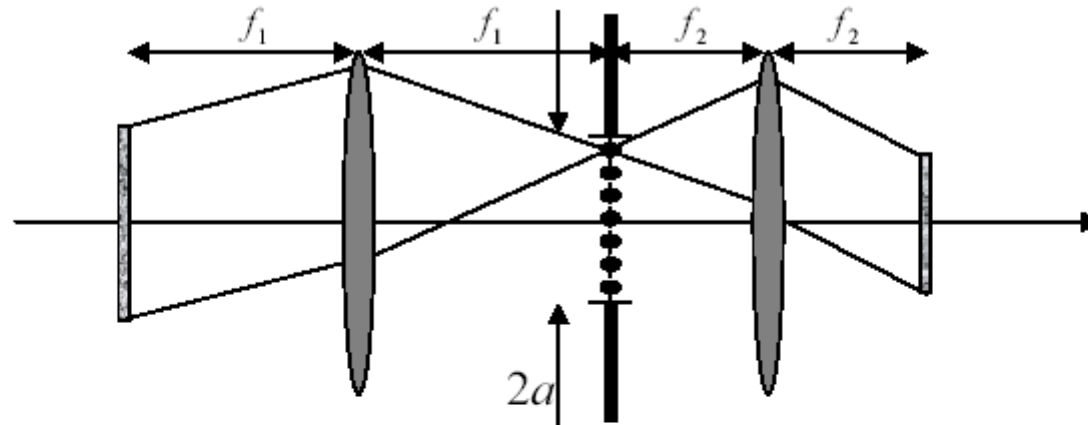
(FT de intensidad entrante \Rightarrow FT de intensidad saliente)

$$= H(u, v) \otimes H(u, v)$$

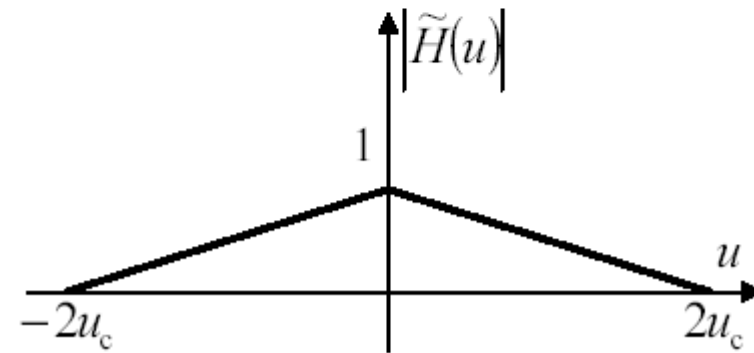
$|\tilde{H}(u, v)|$: función de transferencia de modulación (MTF)

$\tilde{H}(u, v)$: función de transferencia óptica

La formación de imágenes coherente frente a la formación de imágenes incoherente

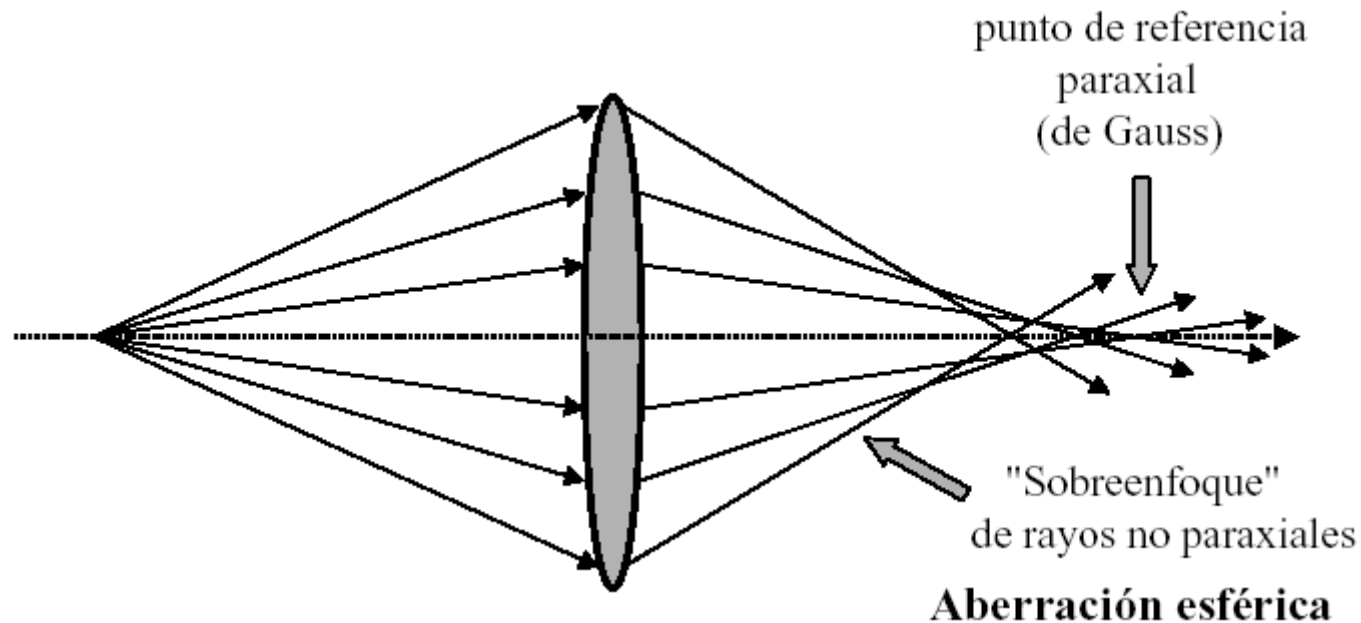


Iluminación coherente



Iluminación incoherente

Aberraciones: geométrica



- Origen de las aberraciones: la no linealidad de la ley de Snell ($n \sin\theta = \text{const.}$, mientras que la relación lineal hubiese sido $n\theta = \text{const.}$).
- Las aberraciones provocan que los sistemas prácticos actúen *peor* que los sistemas limitados por difracción.
- La mejor forma de resolver las aberraciones es utilizar un software de diseño óptico (Code V, Oslo, Zemax); los sistemas optimizados normalmente resuelven $\sim 3-5\lambda$ ($\sim 1.5-2.5\mu\text{m}$ en lo visible).

MIT 2.71/2.710

Clase de repaso p-59

Aberraciones de onda

Respuesta impulsional libre de aberraciones $h_{\text{limitados por difracción}}(x, y)$

Las aberraciones introducen un retardo de fase adicional a la respuesta impulsional

$$h_{\text{con aberración}}(x, y) = h_{\text{limitados por difracción}}(x, y) e^{i\varphi_{\text{aberración}}(x, y)}$$

