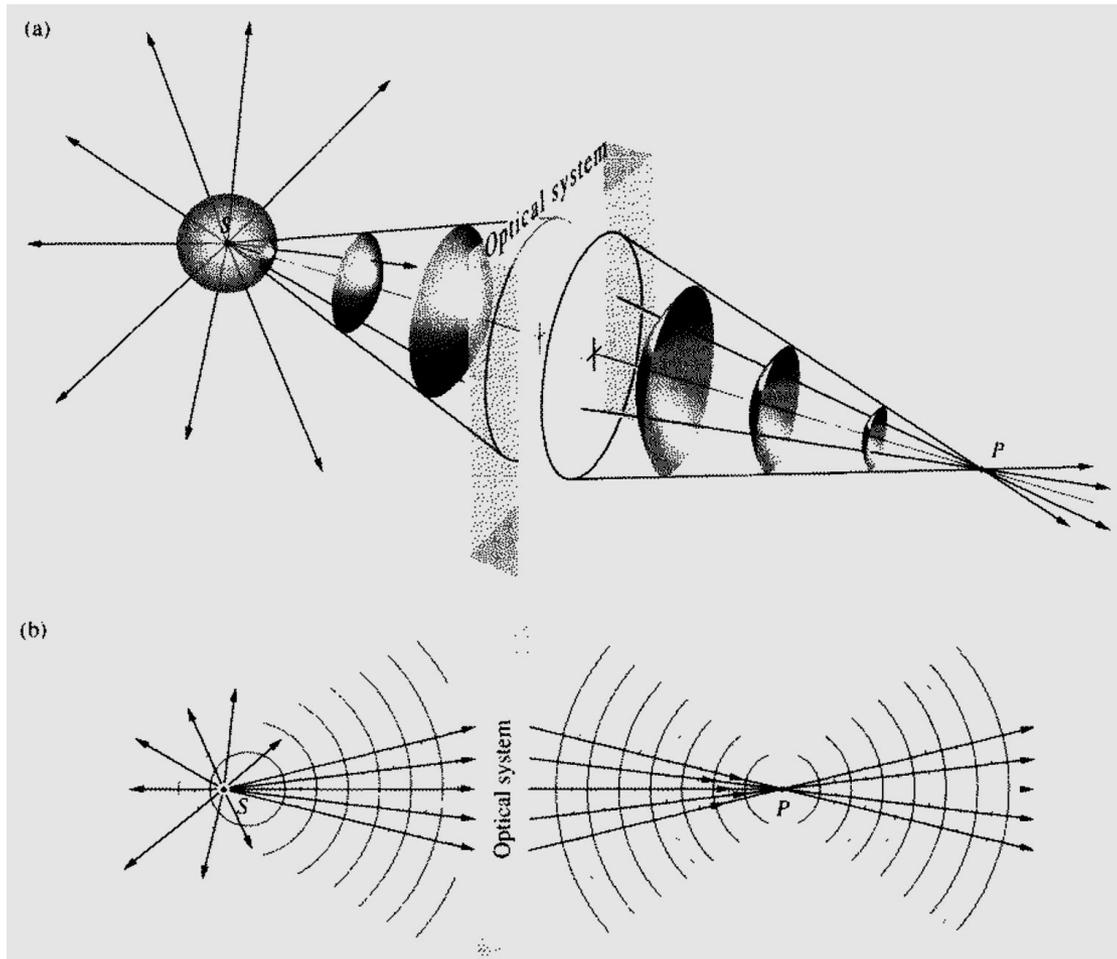
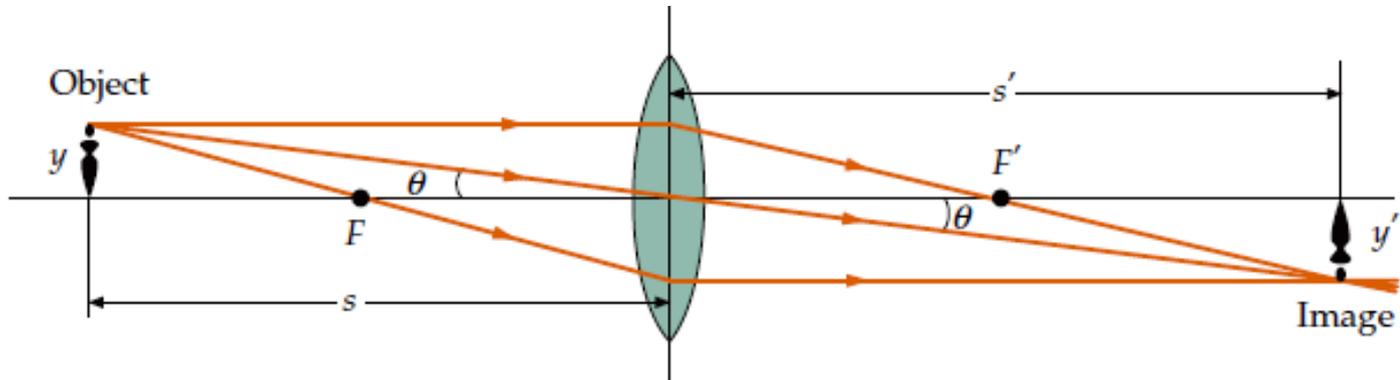


Óptica geométrica: conceptos generales

Para comprender las imágenes y su formación, sólo necesitamos el modelo de rayos de la luz, las leyes de reflexión y refracción, y un poco de geometría y trigonometría simples.

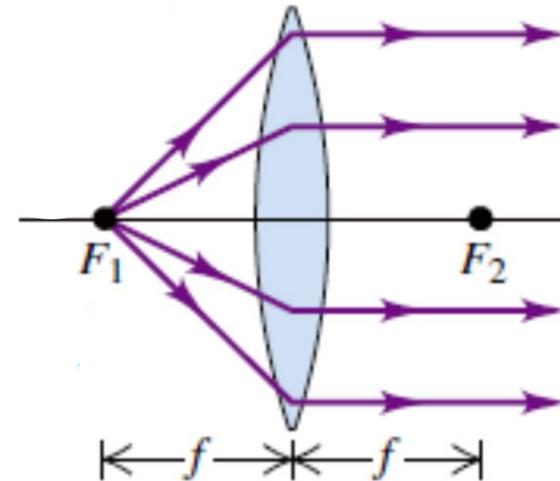
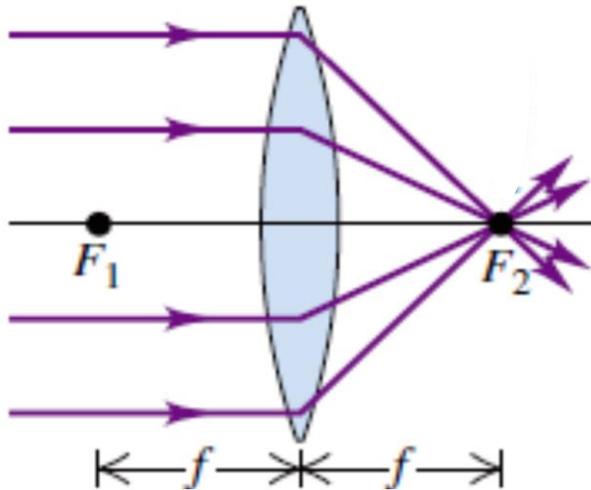


Lentes y formación de imágenes



Propiedades de las lentes delgadas

Una lente sencilla es un trozo circular y delgado de material transparente, normalmente de vidrio, cuyo espesor varía del centro al borde. **Lente**, sistema óptico con dos superficies refractivas.



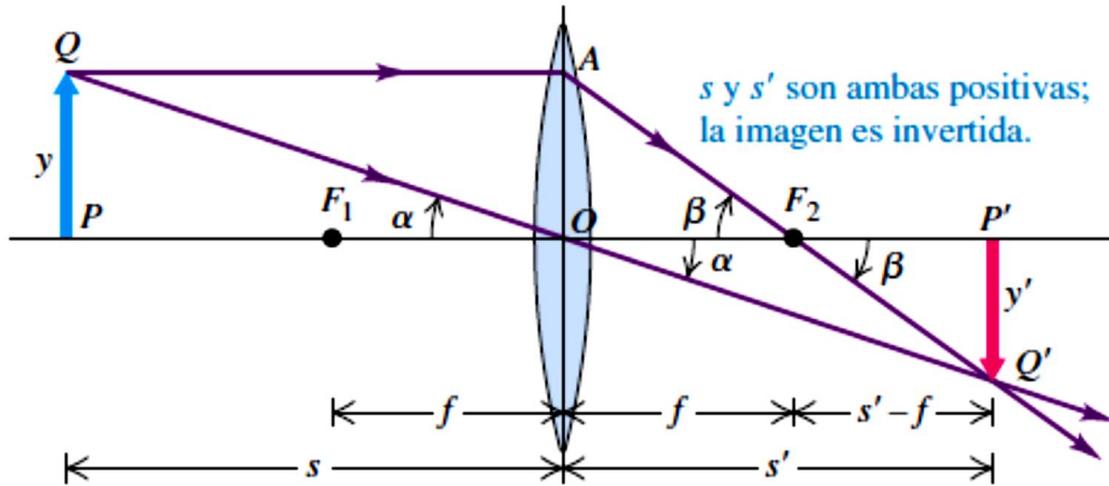
$$P = \frac{1}{f}$$

- lentes convergentes (**positivas**)
- imagen real

D, dioptras

Imagen de un objeto extenso: Lentes convergentes

Construcción para obtener la posición de la imagen que forma una lente delgada.



s y s' son ambas positivas;
la imagen es invertida.

- el rayo QAQ'
- el rayo QOQ'
- triángulos rectángulos QPO y $Q'P'O$ son semejantes

1 $\frac{y}{s} = -\frac{y'}{s'}$ o bien $\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$

Asimismo, los ángulos identificados como β son iguales, y los dos triángulos rectángulos AOF_2 y $Q'P'F_2$ son semejantes:

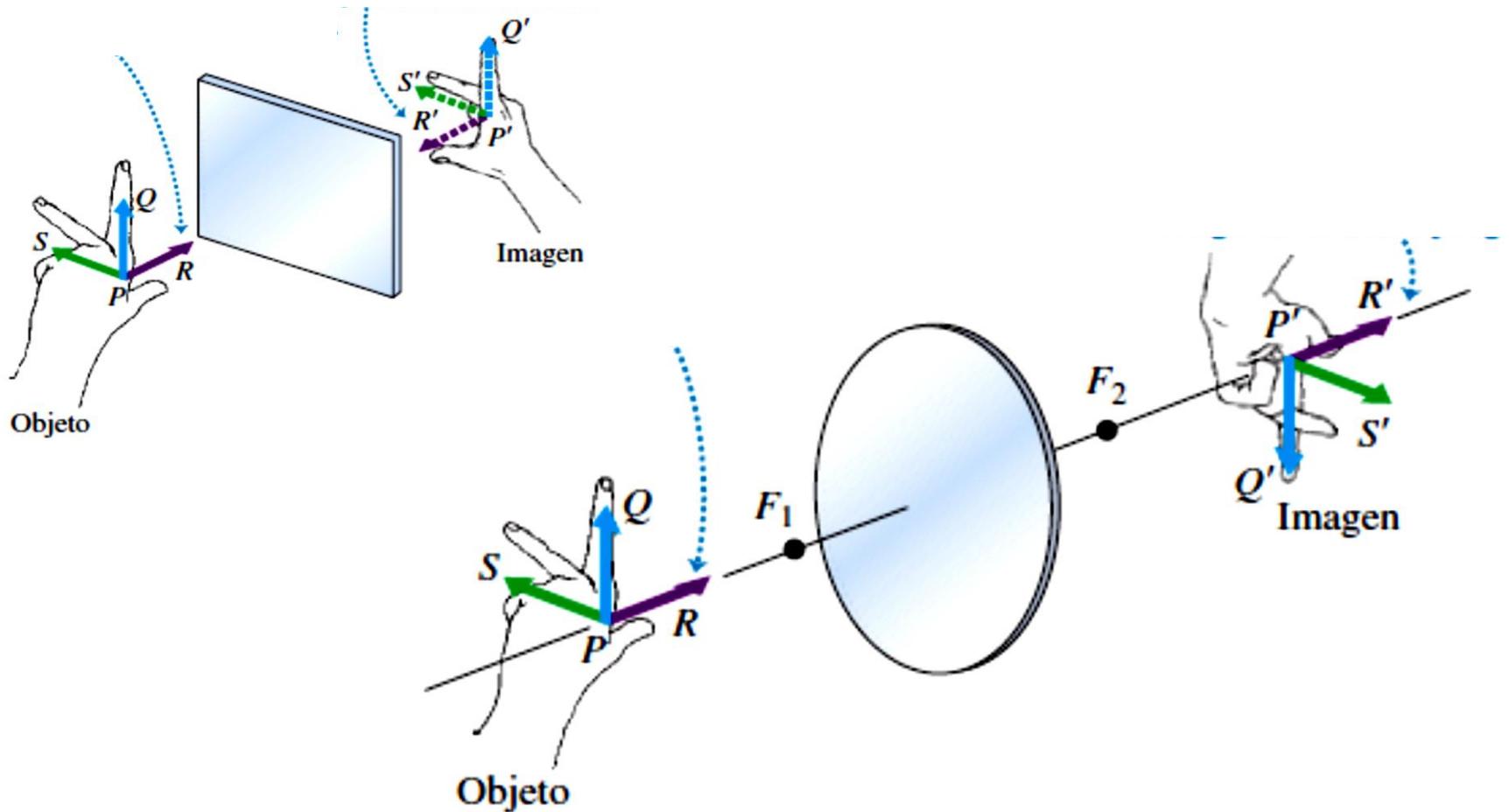
2 $\frac{y}{f} = -\frac{y'}{s'-f}$ o bien $\frac{y'}{y} = -\frac{s'-f}{f}$

Ahora igualamos las ecuaciones (1) y (2), dividimos entre s' y reorganizamos para obtener:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (\text{relación objeto-imagen, lente delgada})$$

$$m = -\frac{s'}{s} \quad (\text{aumento lateral, lente delgada})$$

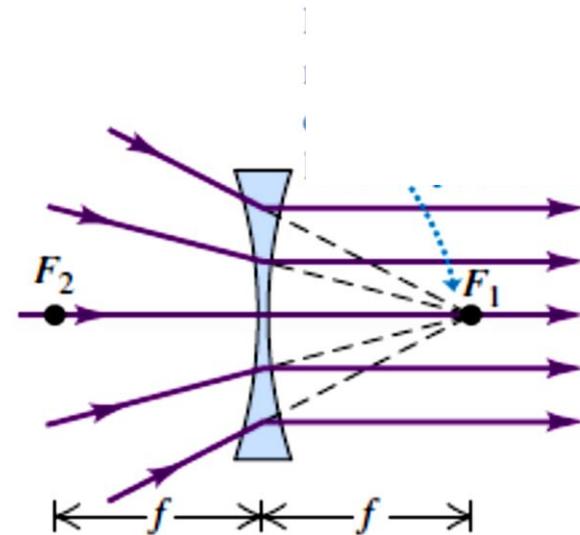
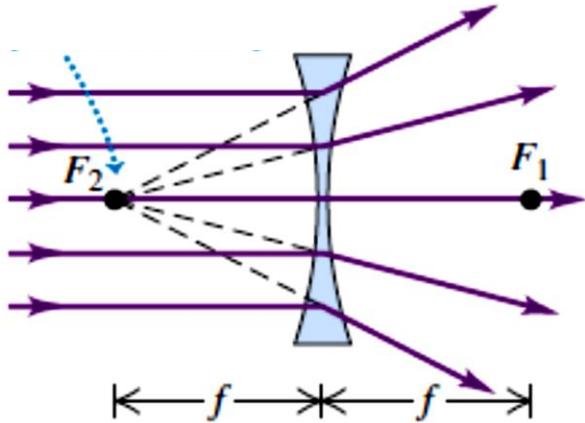
Imagen tridimensional de un objeto tridimensional



Una imagen *invertida* es equivalente a una imagen que se ha girado 180° en torno al eje de la lente.

Lentes divergentes

F_2 y F_1 son los puntos focales segundo y primero de una lente delgada divergente, respectivamente. El valor numérico de f es negativo.

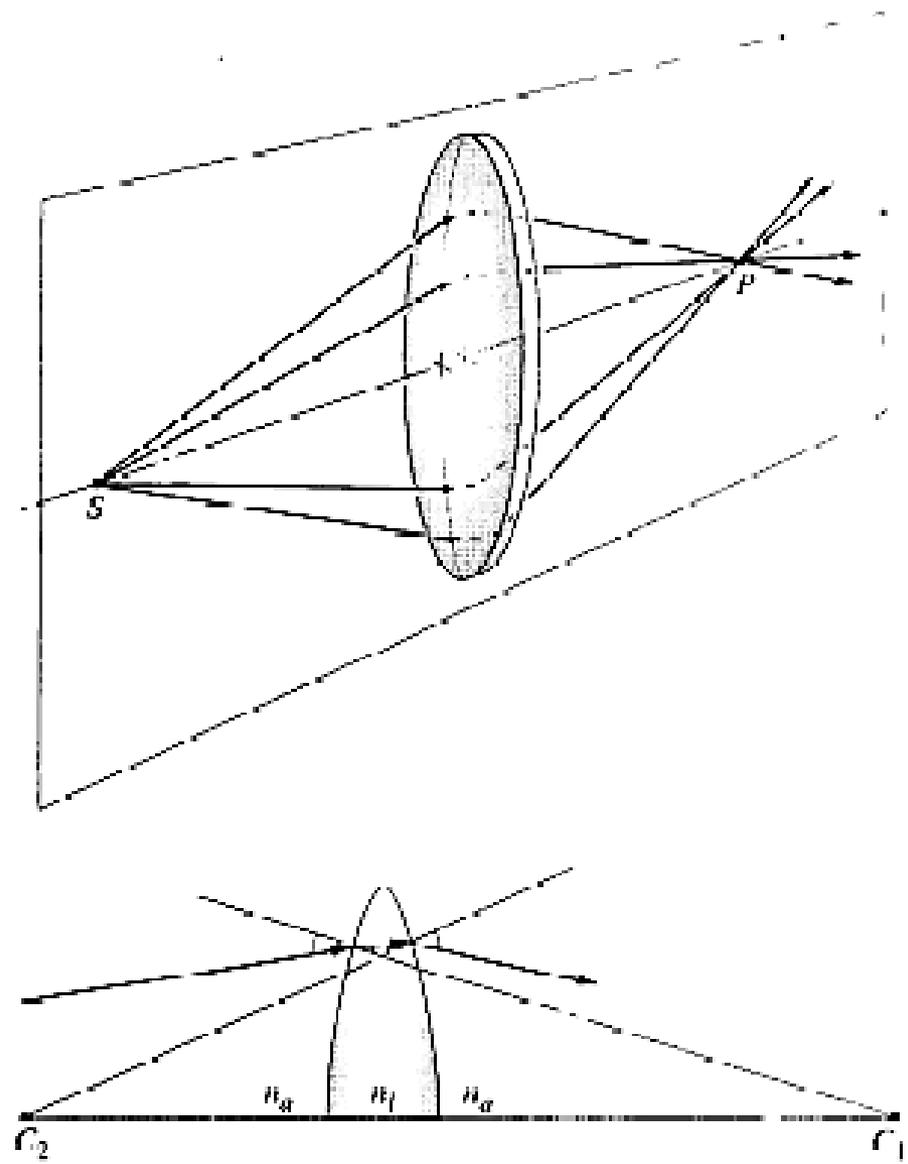
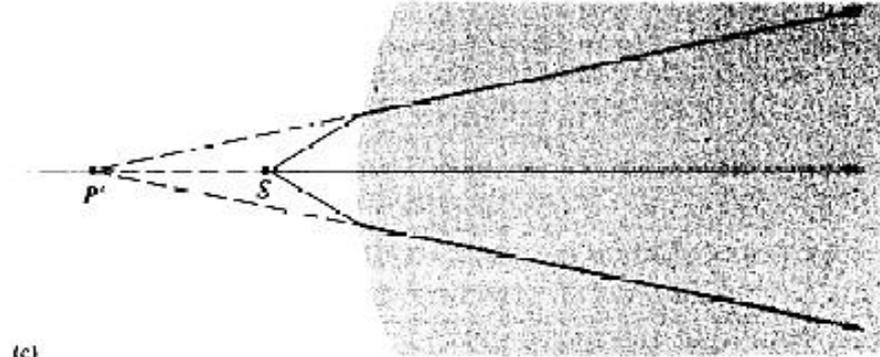
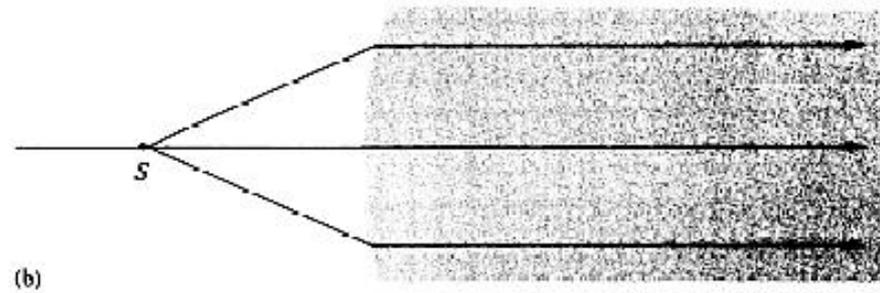
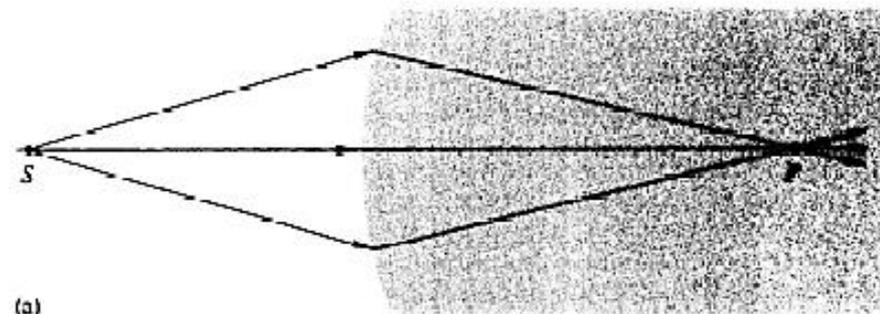


Para lentes delgadas divergentes, f es negativa.

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (\text{relación objeto-imagen, lente delgada})$$

$$m = -\frac{s'}{s} \quad (\text{aumento lateral, lente delgada})$$

Ecuación del fabricante de lentes

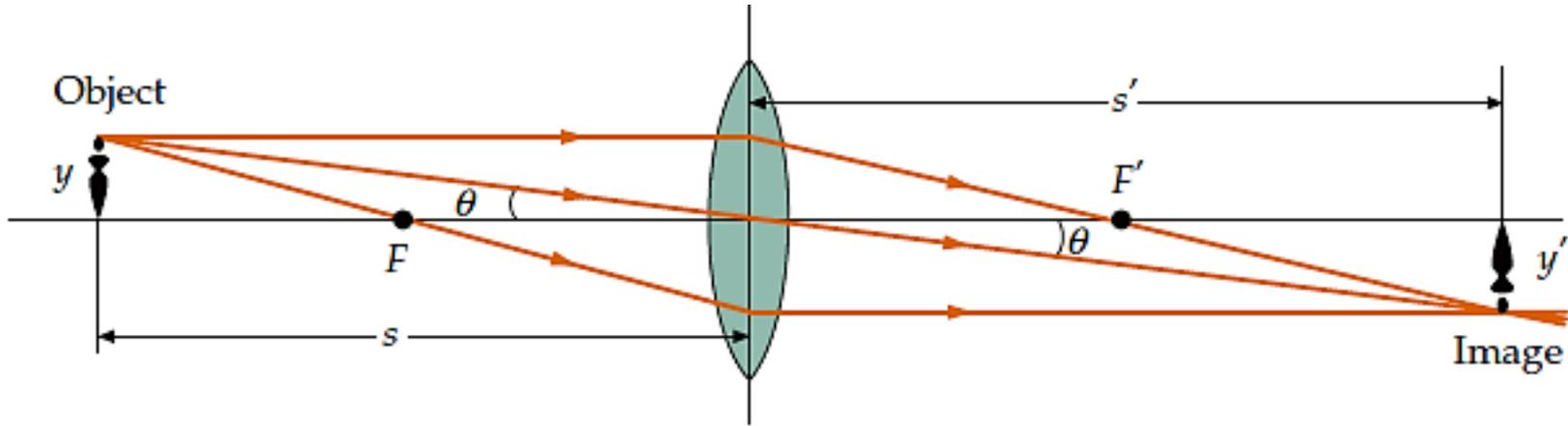


$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_f} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Métodos gráficos para lentes

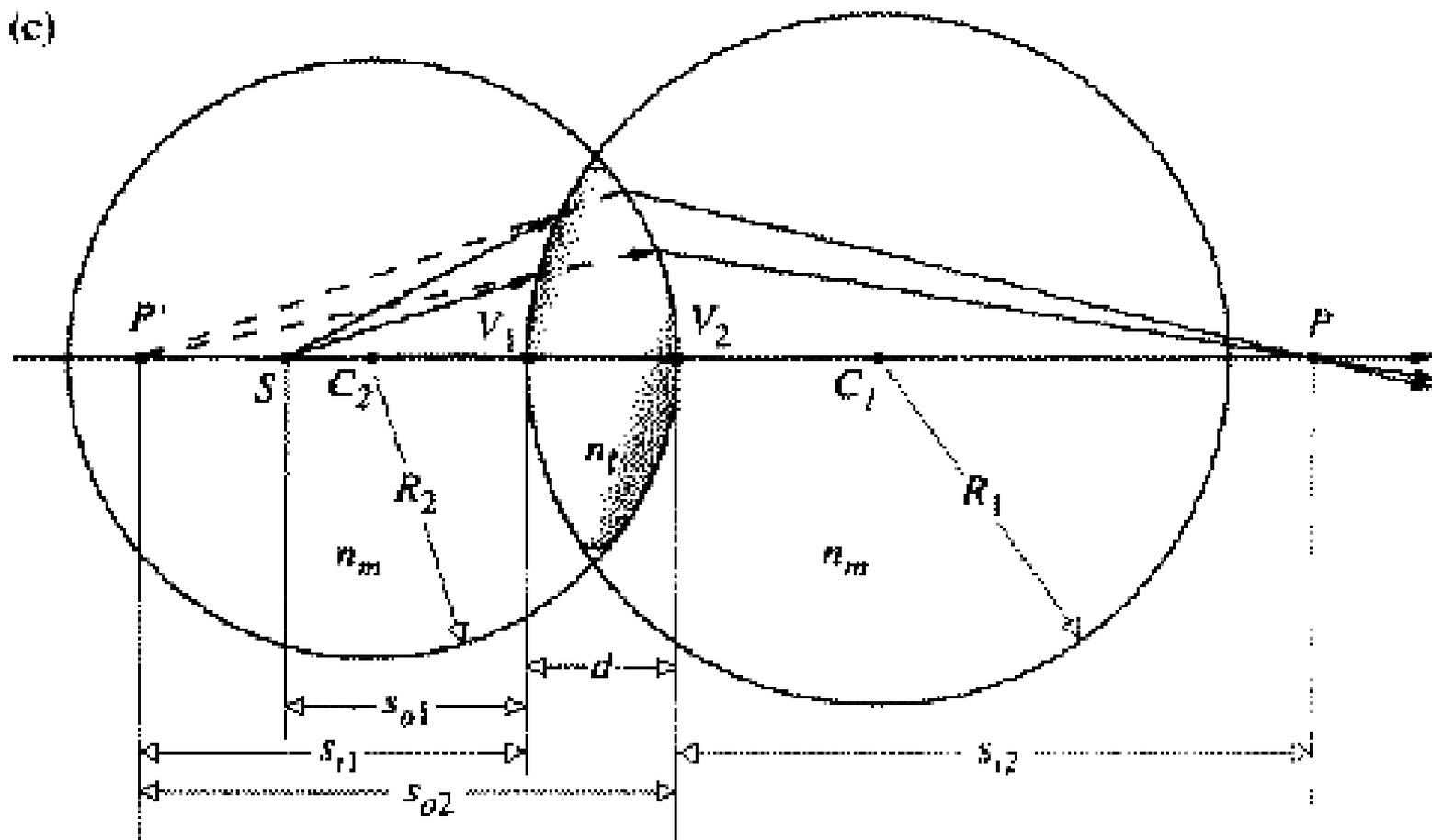
Se pueden hallar la posición y el tamaño de una imagen formada por una lente delgada usando un método gráfico. Los tres rayos principales cuyo trayecto es normalmente fácil de trazar serían:



1. *Un rayo paralelo al eje emerge de la lente en una dirección que pasa por el segundo punto focal F_2 de una lente convergente, o que parece provenir del segundo punto focal de una lente divergente.*
2. *Un rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía en grado apreciable; en el centro de la lente las dos superficies son paralelas; por lo tanto, este rayo emerge prácticamente con el mismo ángulo que tenía al entrar y a lo largo de la misma recta.*
3. *Un rayo que pasa por el primer punto focal F_1 (o avanza hacia éste) emerge paralelo al eje.*

Ecuación del fabricante de lentes

(c)

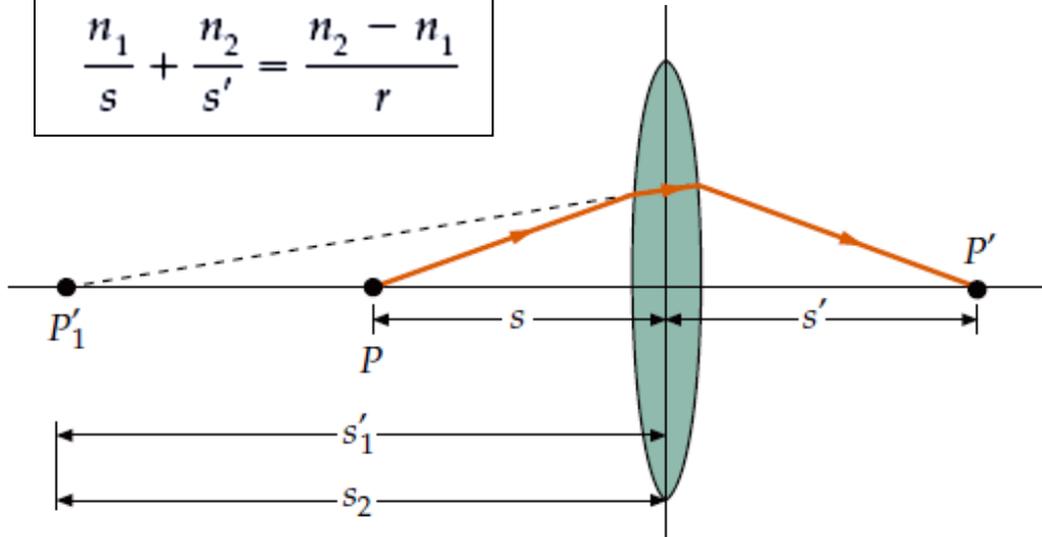


$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{(ecuación del fabricante de lentes para una lente delgada)}$$

Ecuación del fabricante de lentes

Deduciremos la *ecuación del fabricante de lentes*, que es la relación entre la distancia focal f , el índice de refracción n de la lente y los radios de curvatura R_1 y R_2 de las superficies de la lente.

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$



- refracción en dos superficies
- R_1, R_2 son los radios
- imagen virtual en P'_1 .

$$\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s'_1} = \frac{n - 1}{R_1}$$

Para la segunda superficie: $n_1 = n, n_2 = n_{\text{air}}, s_2 = -s'_1$

$$-\frac{n}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1 - n}{R_2}$$

La distancia imagen 2 es la distancia imagen final para la lente, s'

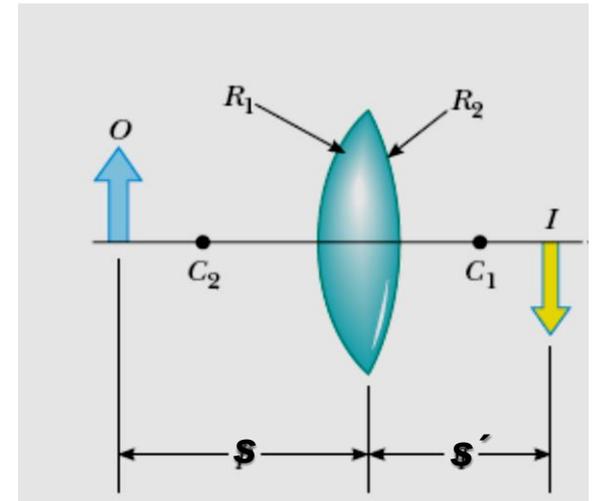
$$-\frac{n}{s'_1} + \frac{1}{s'} = \frac{1 - n}{R_2}$$

Se obtiene sumando,

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Ahora comparamos esto con la otra ecuación de lentes delgadas

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

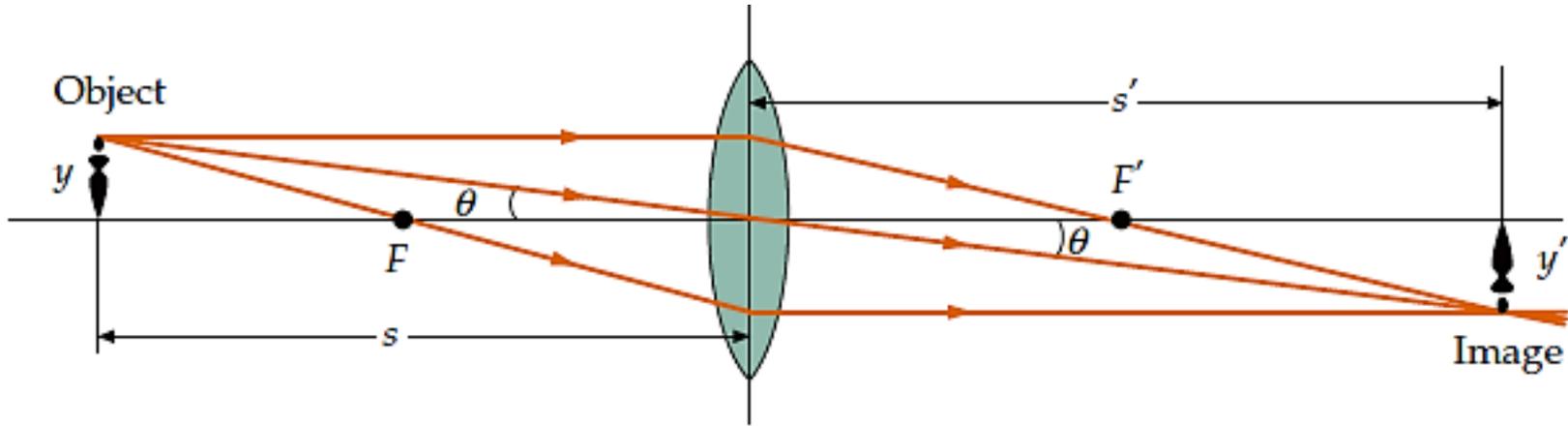


Sustituyendo en el primer miembro de la ecuación,

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{(ecuación del fabricante de lentes para una lente delgada)}$$

Métodos gráficos para lentes

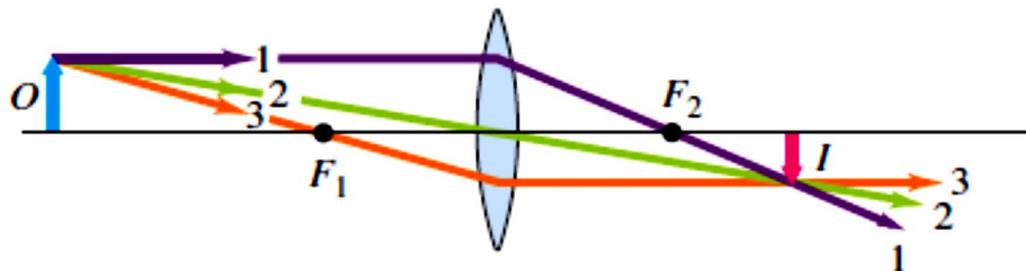
Se pueden hallar la posición y el tamaño de una imagen formada por una lente delgada usando un método gráfico. Los tres rayos principales cuyo trayecto es normalmente fácil de trazar serían:



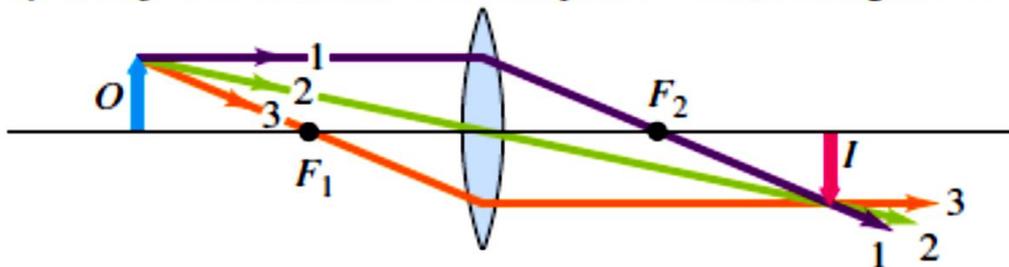
1. *Un rayo paralelo al eje emerge de la lente en una dirección que pasa por el segundo punto focal F_2 de una lente convergente, o que parece provenir del segundo punto focal de una lente divergente.*
2. *Un rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía en grado apreciable; en el centro de la lente las dos superficies son paralelas; por lo tanto, este rayo emerge prácticamente con el mismo ángulo que tenía al entrar y a lo largo de la misma recta.*
3. *Un rayo que pasa por el primer punto focal F_1 (o avanza hacia éste) emerge paralelo al eje.*

Formación de imágenes por una lente delgada convergente a diversas distancias de objeto.

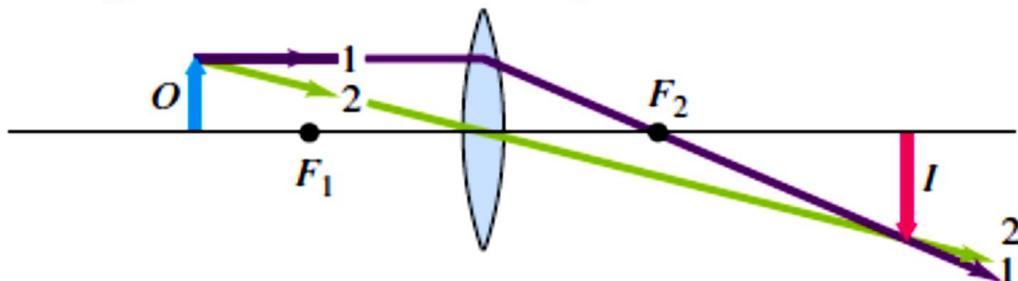
a) El objeto O está afuera del punto focal; la imagen I es real



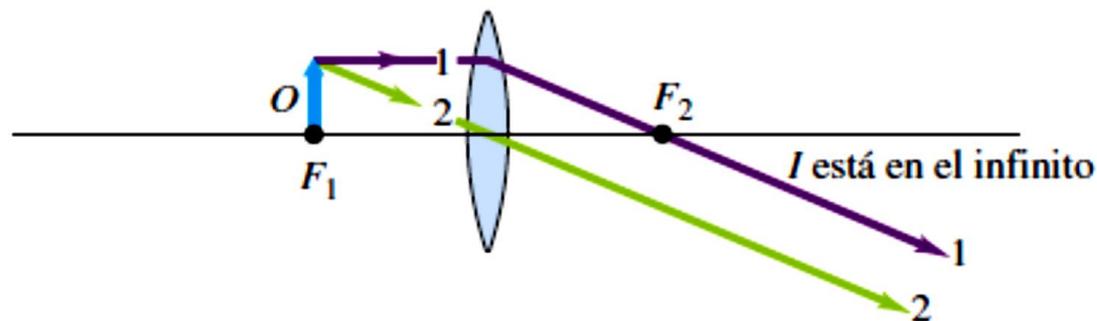
b) El objeto O está más cerca del punto focal; la imagen I es real y más lejana



c) El objeto O está aun más cerca del punto focal; la imagen I es real e incluso más lejana



d) El objeto O está en el punto focal; la imagen I está en el infinito



e) El objeto O está adentro del punto focal; la imagen I es virtual y más grande que el objeto

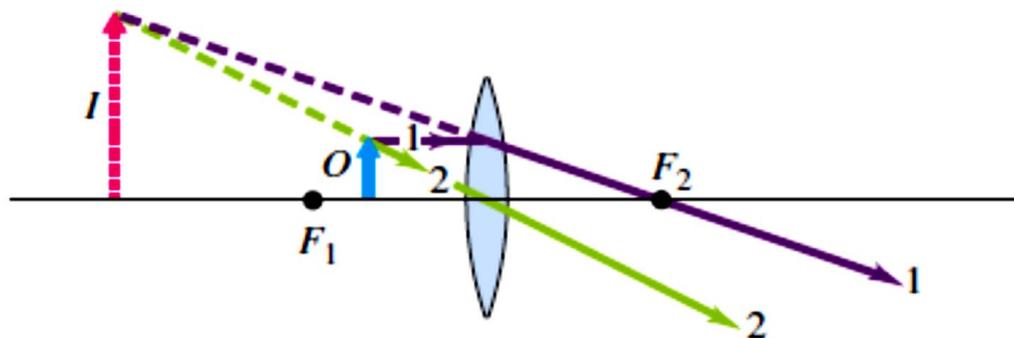
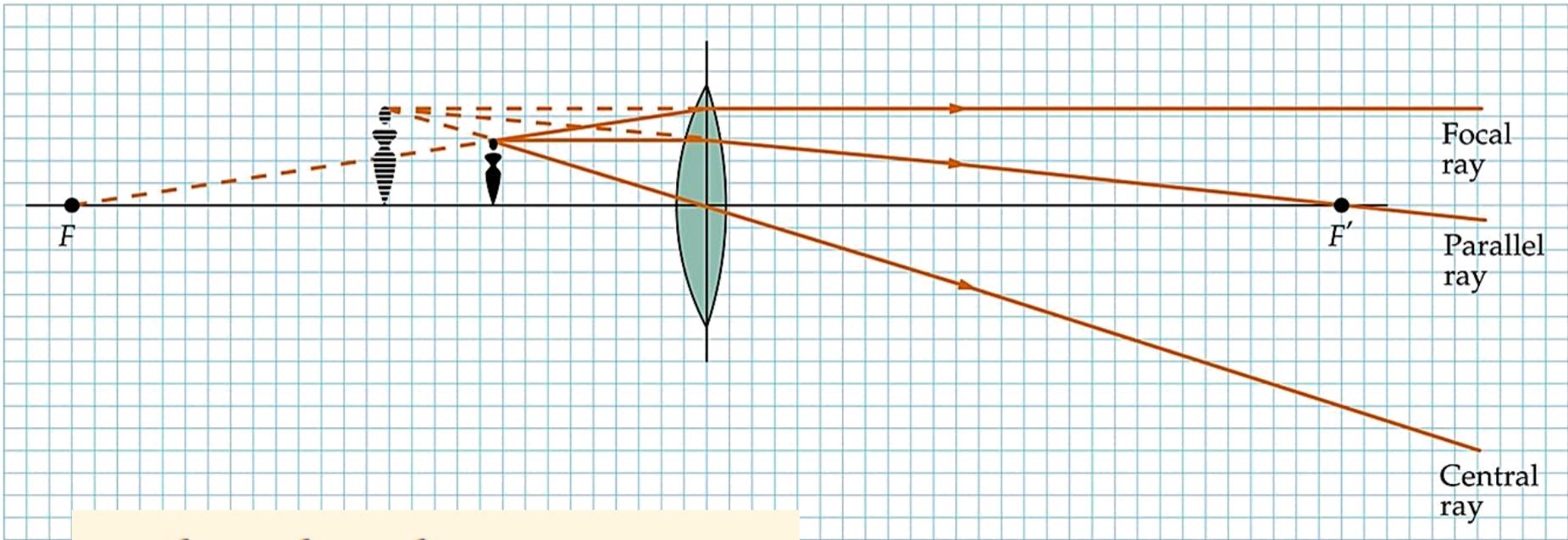


Imagen formada por una lente

Un objeto de 1.2 cm de alto se coloca a 4 cm de la lente biconvexa con una distancia focal de 12 cm. Localiza la imagen tanto gráficamente como algebraicamente, establecer si la imagen es real o virtual y calcular su altura.



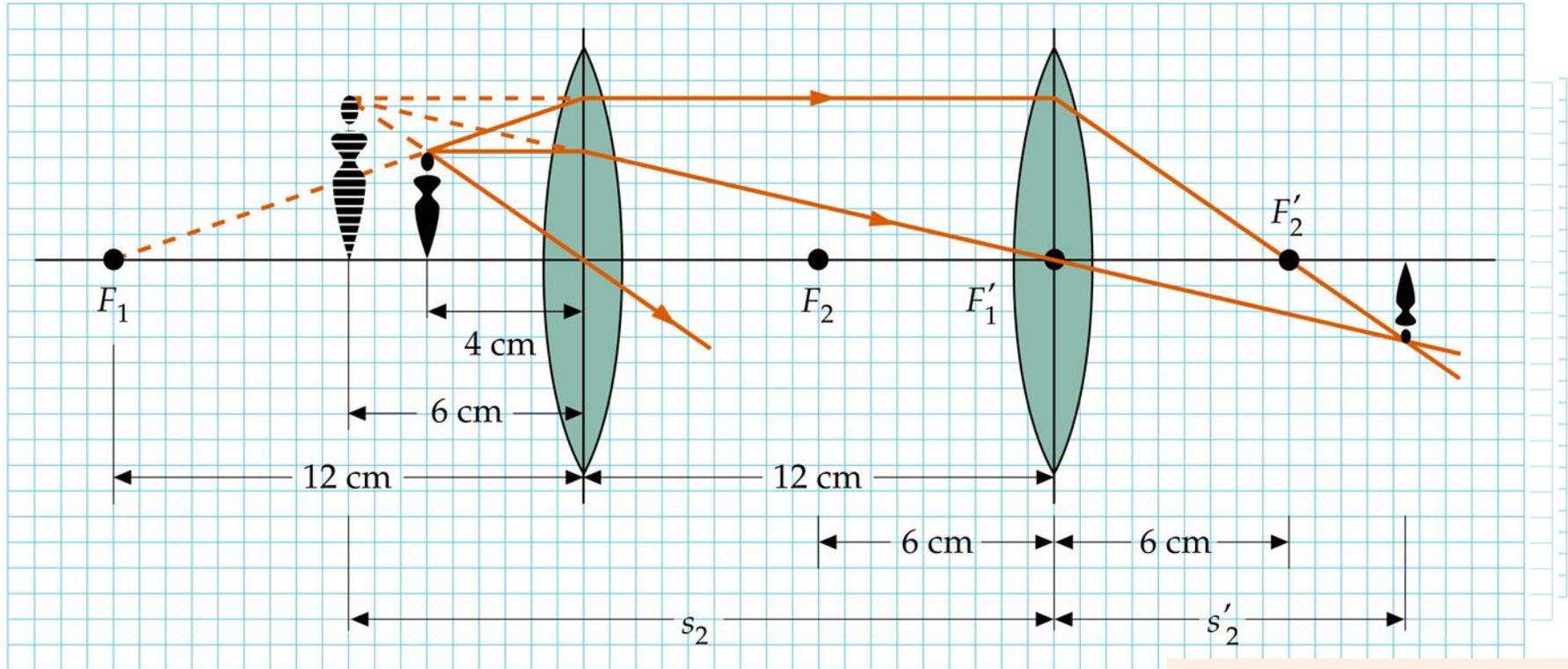
$$\frac{1}{4.0 \text{ cm}} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{12 \text{ cm}}$$
$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{12 \text{ cm}} - \frac{1}{4.0 \text{ cm}} = -\frac{1}{6.0 \text{ cm}}$$
$$s' = -6.0 \text{ cm}$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{-6.0 \text{ cm}}{4.0 \text{ cm}} = \boxed{+1.5}$$

$$h' = mh = (1.5)(1.2 \text{ cm}) = \boxed{1.8 \text{ cm}}$$

Imagen formada por una segunda lente

A la derecha de la lente del ejemplo anterior y a 12 cm de ella se coloca una segunda lente de distancia focal 6 cm. Localizar la imagen final.

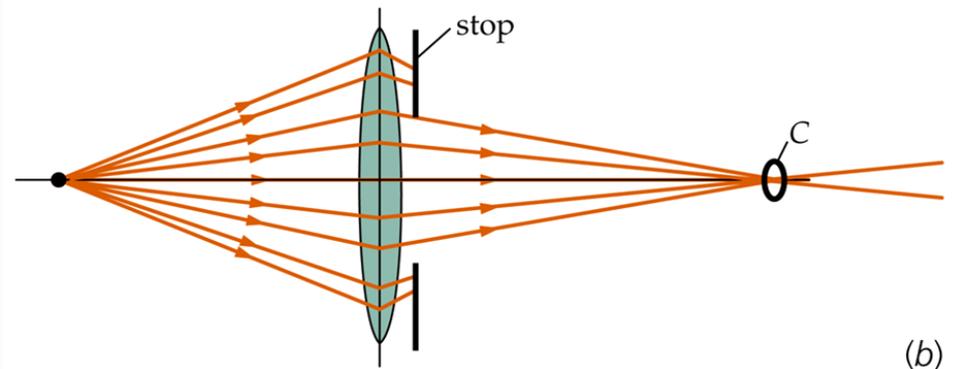


$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2}$$
$$\frac{1}{18 \text{ cm}} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{6 \text{ cm}}$$
$$s'_2 = 9 \text{ cm}$$

Aberraciones en una lente

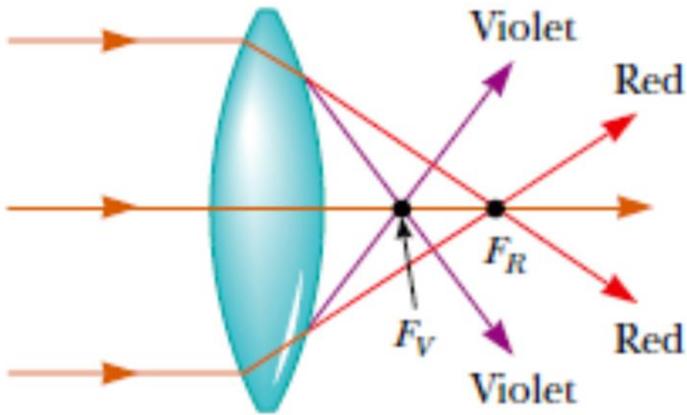
Cuando los rayos procedentes de un punto objeto no se enfocan todos en un solo punto imagen, la imagen borrosa resultante de la imagen se denomina **aberración**.

Aberración esférica en una lente

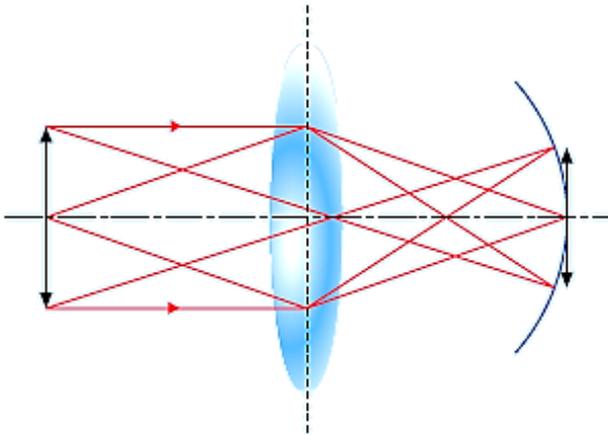


Aberración de esfericidad. Los rayos que inciden paralelamente al eje principal no convergen todos en un mismo punto.

Aberraciones en una lente



Aberración cromática. La luz blanca se descompone al atravesar la lente y las diversas longitudes de onda convergen en varios puntos focales diferentes.



Aberraciones geométricas:

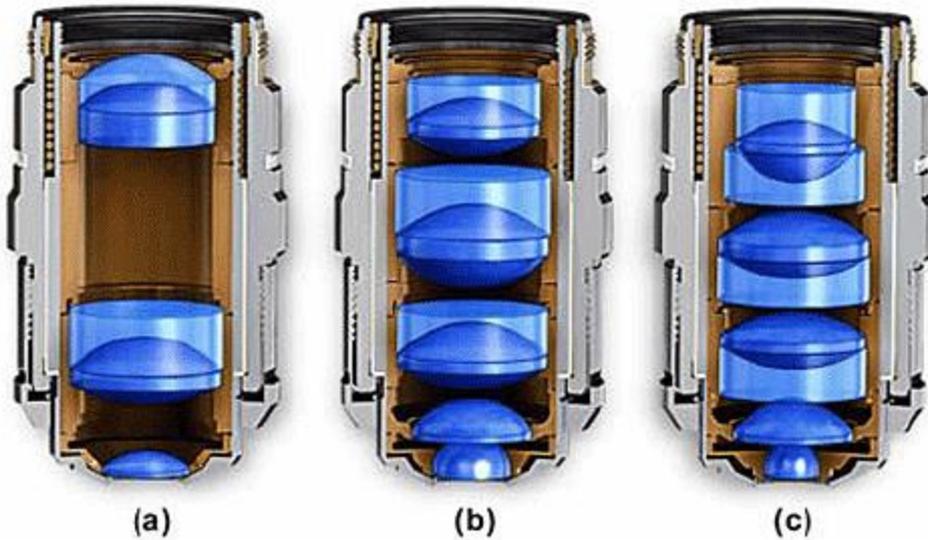
Astigmatismo

Coma

Distorsión

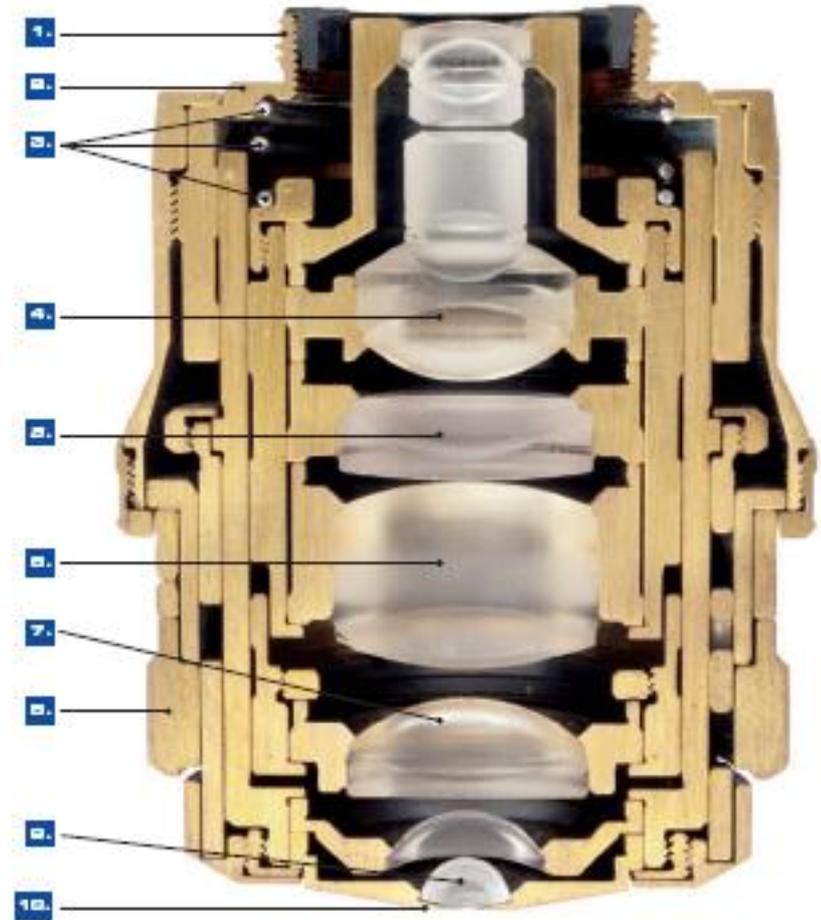
Curvatura del campo

Microscopio: lente objetivo



Tipos de objetivos. (a) Objetivo acromático que contiene una lente frontal y dos pares internos, (b) objetivo semi-apocromático o fluorita, con cuatro pares de lentes y (c) objetivo apocromático que contiene un triplete, dos pares, un menisco y una lente esférica frontal

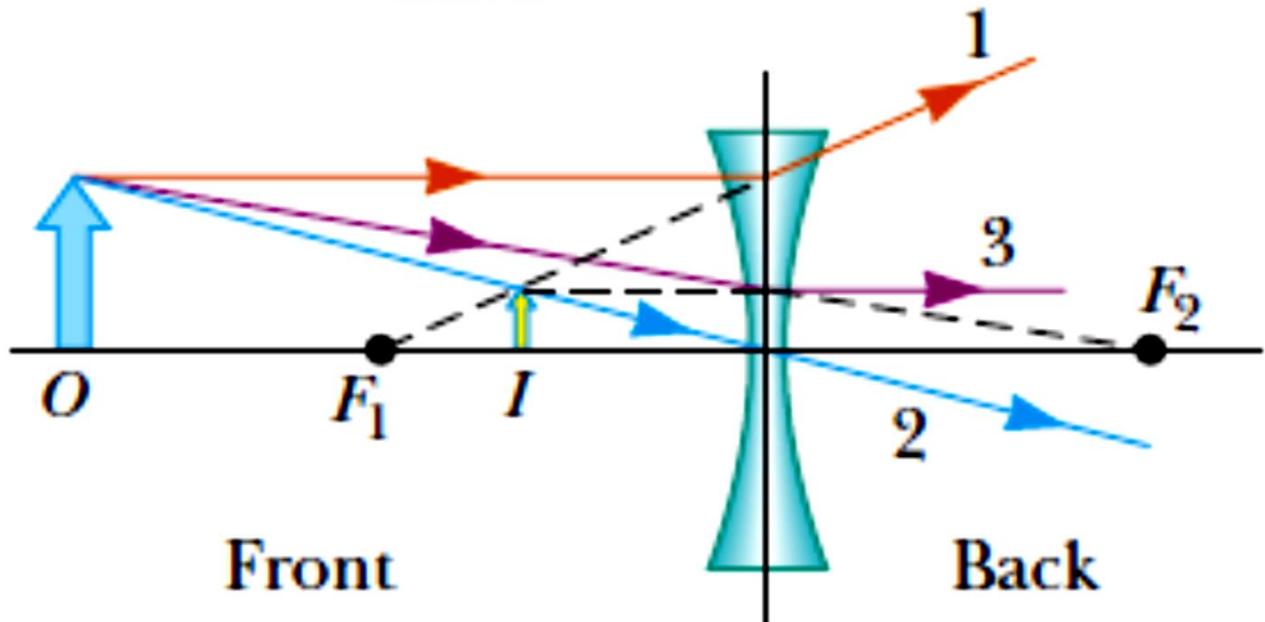
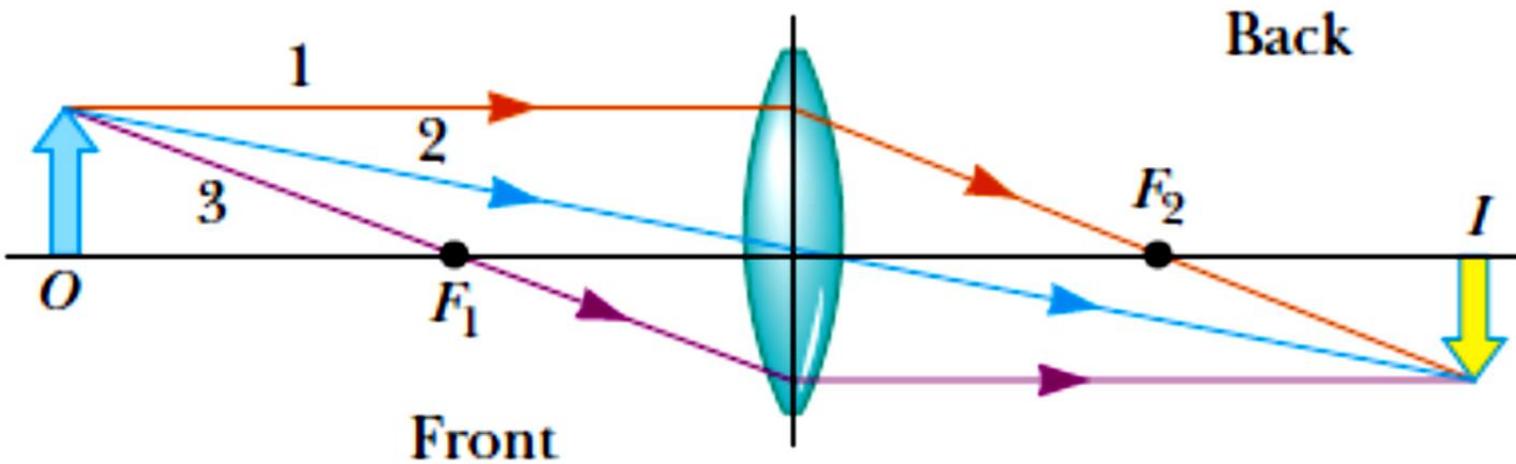
Estructura de los objetivos



Cross section of an objective

1. Objective thread
2. Stop face of the objective
3. Spring system for the specimen-protection mechanism
- 4 - 7. Lens groups for the correction of image errors
8. Correction collar for adapting to deviating cover glass thicknesses or temperatures
9. Front lens system
10. Front lens holder

Formación de la imagen en lentes



**Indique si los siguientes conceptos son verdaderos o falsos.
Justifique la respuesta**

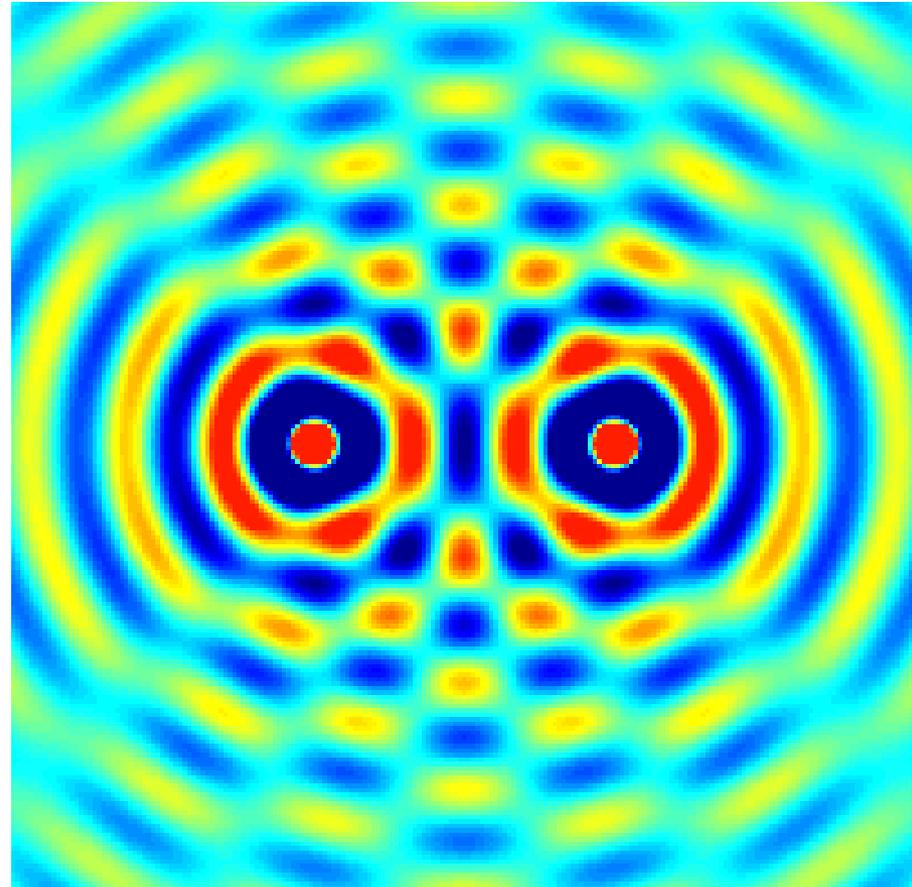
- a. Una imagen virtual formada por un espejo cóncavo es siempre menor que el objeto.

- b. Un espejo cóncavo siempre forma una imagen virtual.

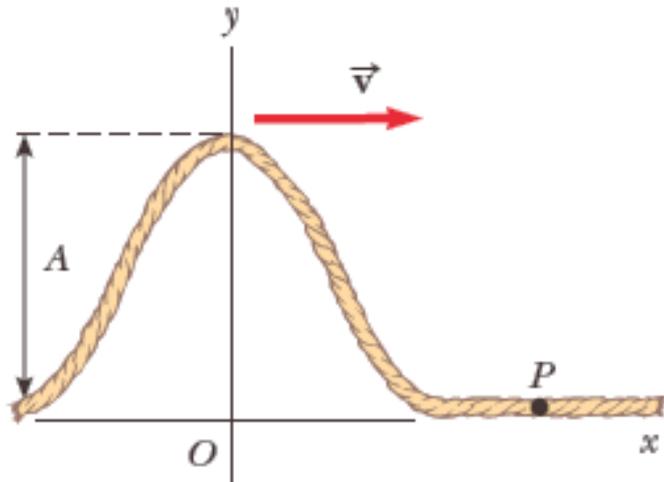
ÓPTICA FÍSICA: interferencia y difracción

La **interferencia** es la combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio.

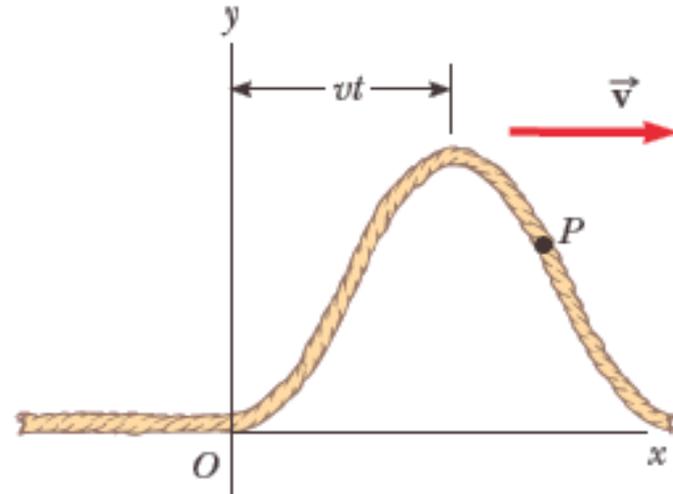
La **difracción** es la desviación que sufren las ondas alrededor de los bordes y esquinas cuando una porción de un frente de ondas se ve cortado o interrumpido por una barrera u obstáculo.



Pulsos de onda



(a) Pulse at $t=0$



(b) Pulse at time t

$$y(x, t) = y(x - vt, 0)$$

$$y(x, t) = f(x - vt)$$

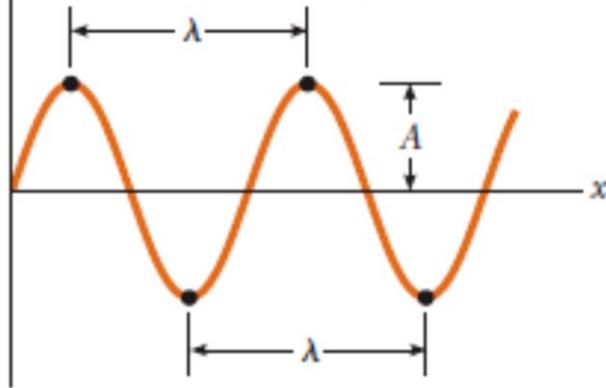
Onda moviéndose en el sentido positivo de x

$$y(x, t) = f(x + vt)$$

Onda moviéndose en el sentido negativo de x

Ondas periódicas

Si una onda periódica se mueve a lo largo de una cuerda estirada o en cualquier otro medio, cada punto del medio oscila con el mismo período.



(a)

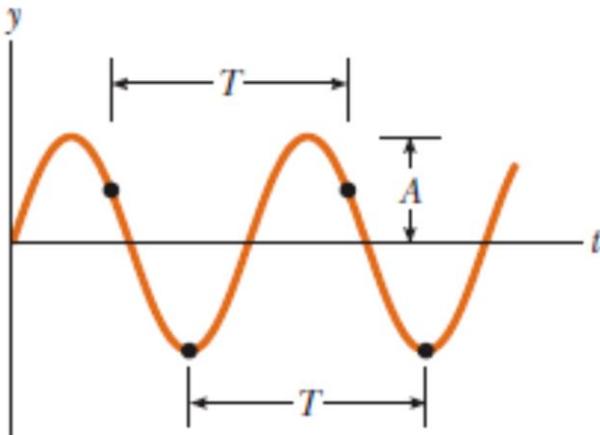
λ , la longitud de onda es la distancia mínima entre dos puntos cualesquiera en ondas adyacentes.

T , el período es el intervalo de tiempo requerido para que dos puntos idénticos de ondas adyacentes pasen por un punto

$$f = 1/T, \text{ Hz}$$

A , la amplitud de la onda es la máxima posición de un elemento del medio relativo a su posición de equilibrio

$$v = \lambda f \quad (\text{onda periódica})$$



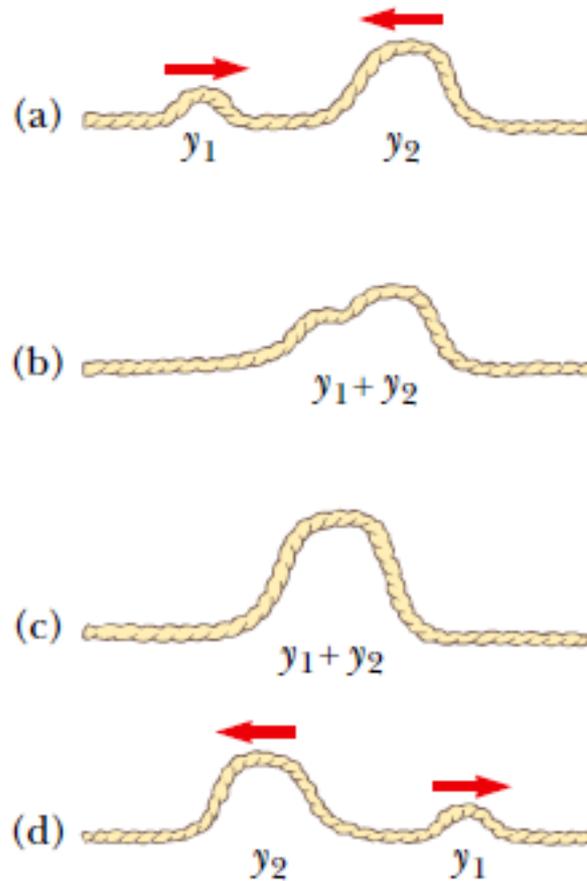
(b)

$$y(x, t) = A \text{ sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$

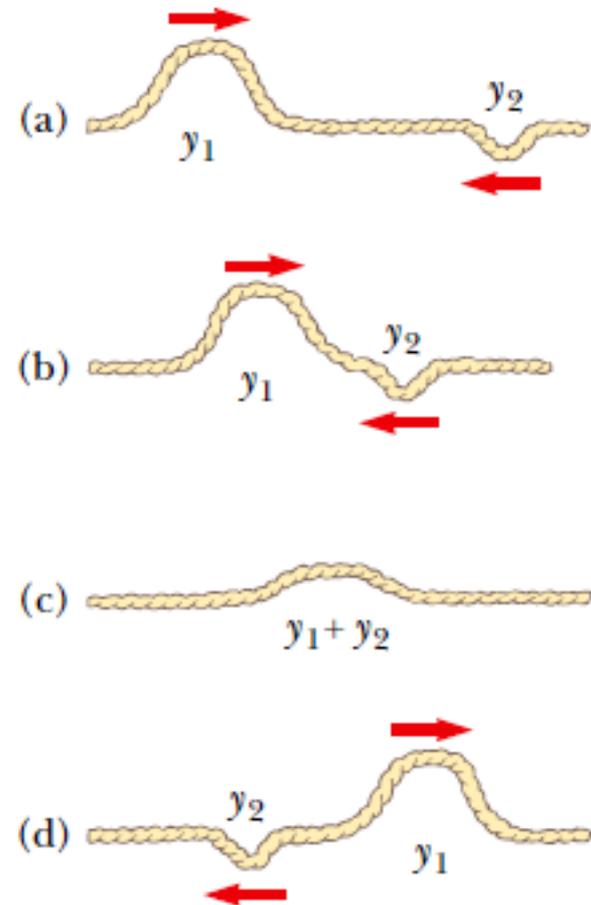
$$y = A \text{ sen} (kx - \omega t)$$

Función de onda para una onda sinusoidal

Superposición e interferencia



Dos pulsos que viajan en direcciones opuestas en una cuerda estirada pasan una a través de la otra. Cuando los pulsos se superponen, el desplazamiento neto de la cuerda es igual a la suma de los desplazamientos producidos por cada pulso. **Interferencia constructiva.**



Dos pulsos que viajan en direcciones opuestas en una cuerda estirada y tienen desplazamientos invertidos uno con respecto al otro. Cuando se superponen, sus desplazamientos se cancelan parcialmente uno a otro. **Interferencia destructiva.**

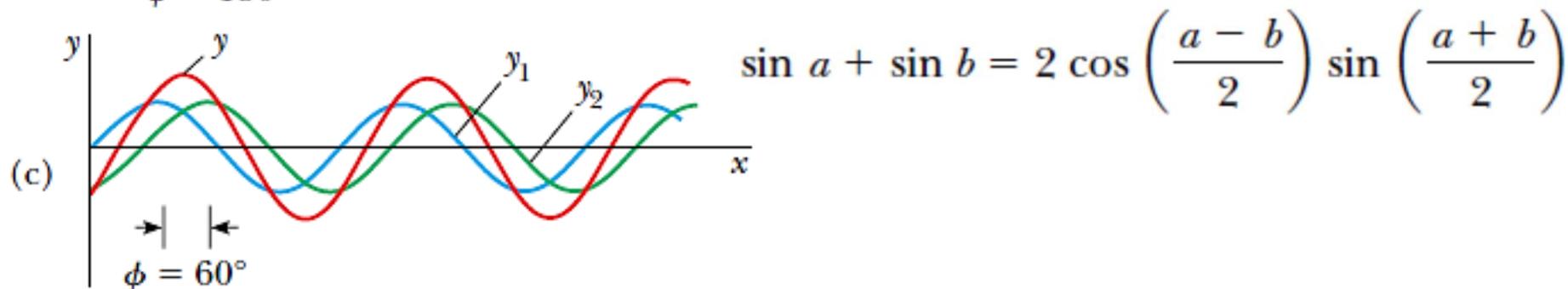
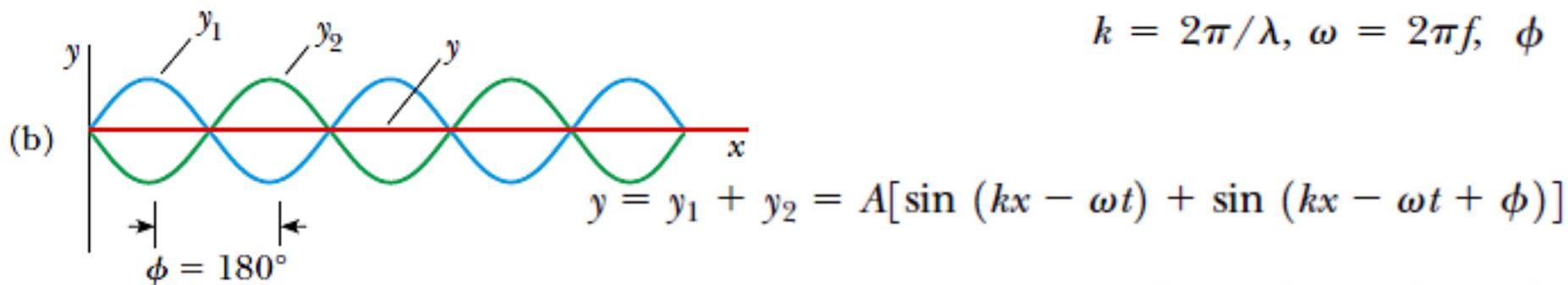
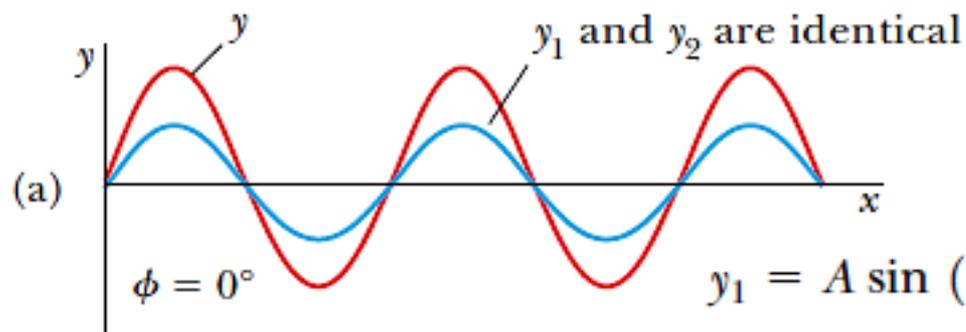
Superposición e interferencia

El principio de superposición establece lo siguiente:

Cuando dos o más ondas se superponen, el desplazamiento resultante en cualquier punto y en cualquier instante se encuentra sumando los desplazamientos instantáneos que producirían en el punto las ondas individuales si cada una se presentara sola.

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)$$

La combinación de ondas separadas en la misma región de espacio para producir una onda resultante se llama **interferencia**.

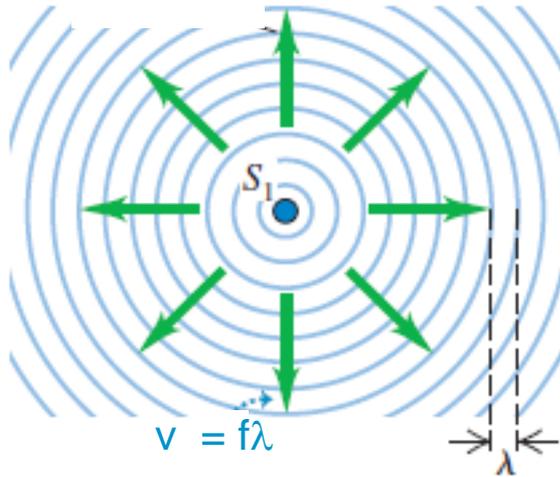


— onda resultante

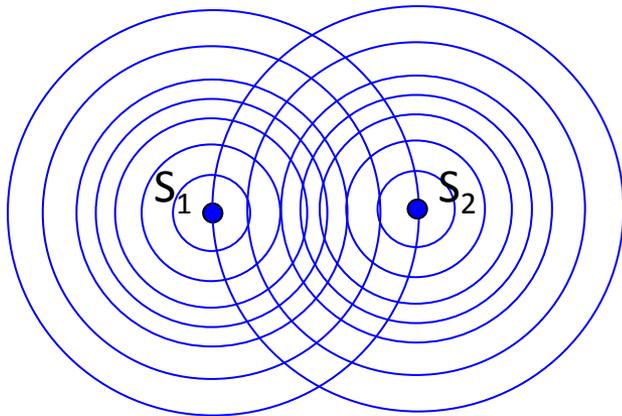
$$y = 2A \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin \left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2} \right)$$

SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO

Interferencia en dos o tres dimensiones

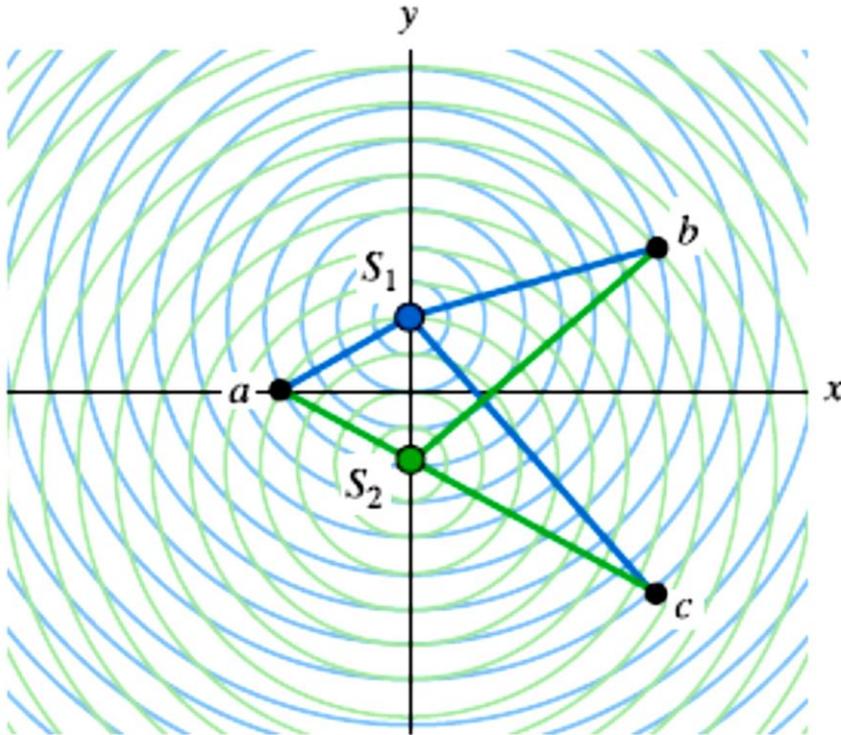


Una “instantánea” de ondas sinusoidales con frecuencia f y longitud de onda λ que se propagan en todas direcciones desde una fuente S_1 .



Una “instantánea” de ondas sinusoidales que se propagan a partir de dos fuentes coherentes S_1 y S_2 . Se dice que dos fuentes monocromáticas de la misma frecuencia y con una relación de fase constante definida son **coherentes**.

Dos fuentes de ondas coherentes separadas por una distancia 4λ



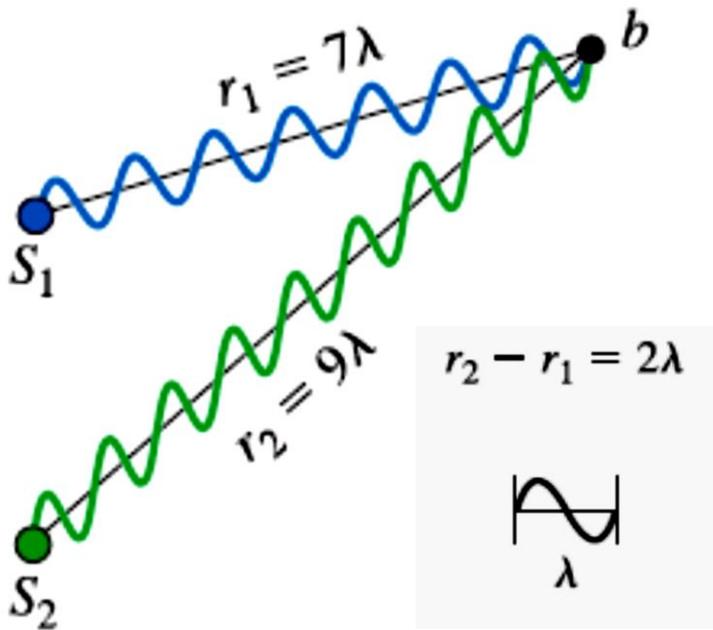
Considere un punto a en el eje x .

- las dos distancias de S_1 a a y de S_2 a a son iguales
- las ondas requieren tiempos iguales para viajar a a .
- las ondas que salen en fase de S_1 y S_2 llegan en fase a a

En general, cuando las ondas de dos o más fuentes llegan en fase a un punto, la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas individuales; éstas se refuerzan una a la otra: **interferencia constructiva**.

$a, m = 0$
 $b, m = \pm 2$

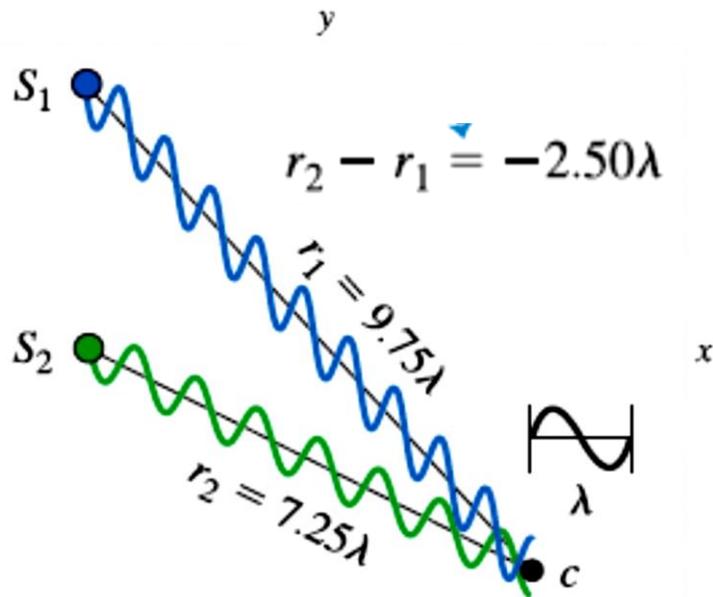
Sea r_1 la distancia que hay entre S_1 y cualquier punto P, y r_2 la distancia que hay entre S_2 y P. Para que en b ocurra la interferencia constructiva, la diferencia de las trayectorias ($r_2 - r_1$) para las dos fuentes debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda λ :



(interferencia constructiva, fuentes en fase)

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$

Algo diferente ocurre en el punto **c**, donde la diferencia de trayectorias, es la mitad de un número entero de longitudes de onda.



- las ondas provenientes de las dos fuentes llegan al punto **c** exactamente medio ciclo fuera de fase
- la cresta de una onda arriba al mismo tiempo que la cresta de una onda en sentido opuesto de la otra onda
- la amplitud resultante es la diferencia entre las dos amplitudes individuales.

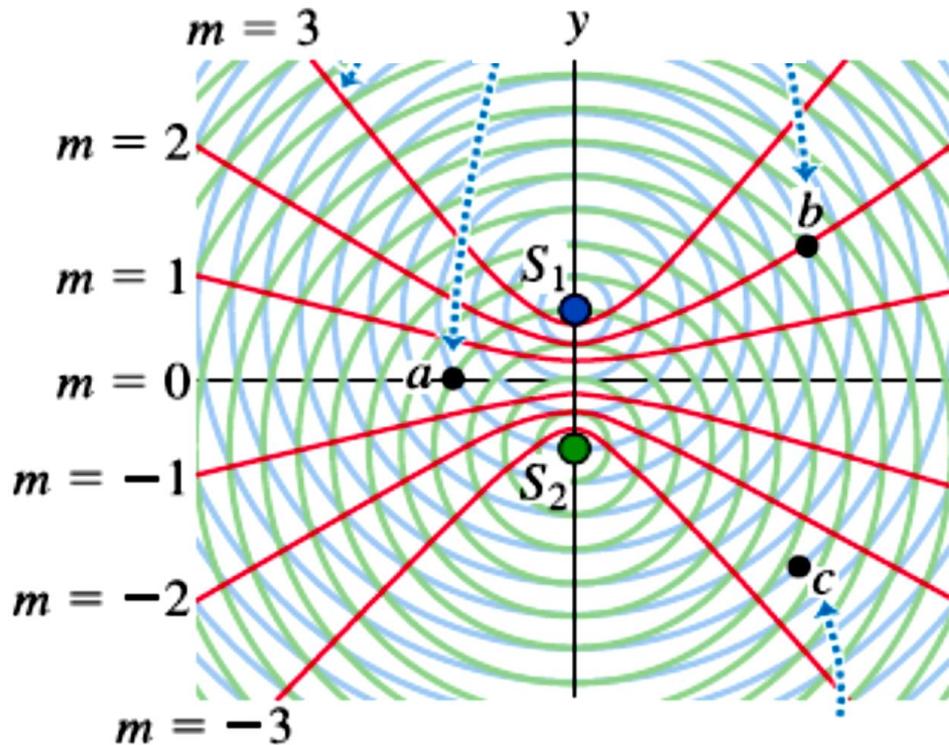
Esta cancelación o anulación parcial de las ondas individuales recibe el nombre de **interferencia destructiva**.

$$r_2 - r_1 = (m + \frac{1}{2}) \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$

(interferencia destructiva, fuentes en fase)

$m = -3$

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$



- la diferencia de trayectorias $r_2 - r_1$ es igual a la longitud de onda multiplicada por un entero m , **curvas antinodales**

- la amplitud de la onda es máxima a lo largo de las curvas antinodales

- entre dos curvas antinodales adyacentes se presenta una curva nodal; una de tales curvas, pasa a través del punto **c**.

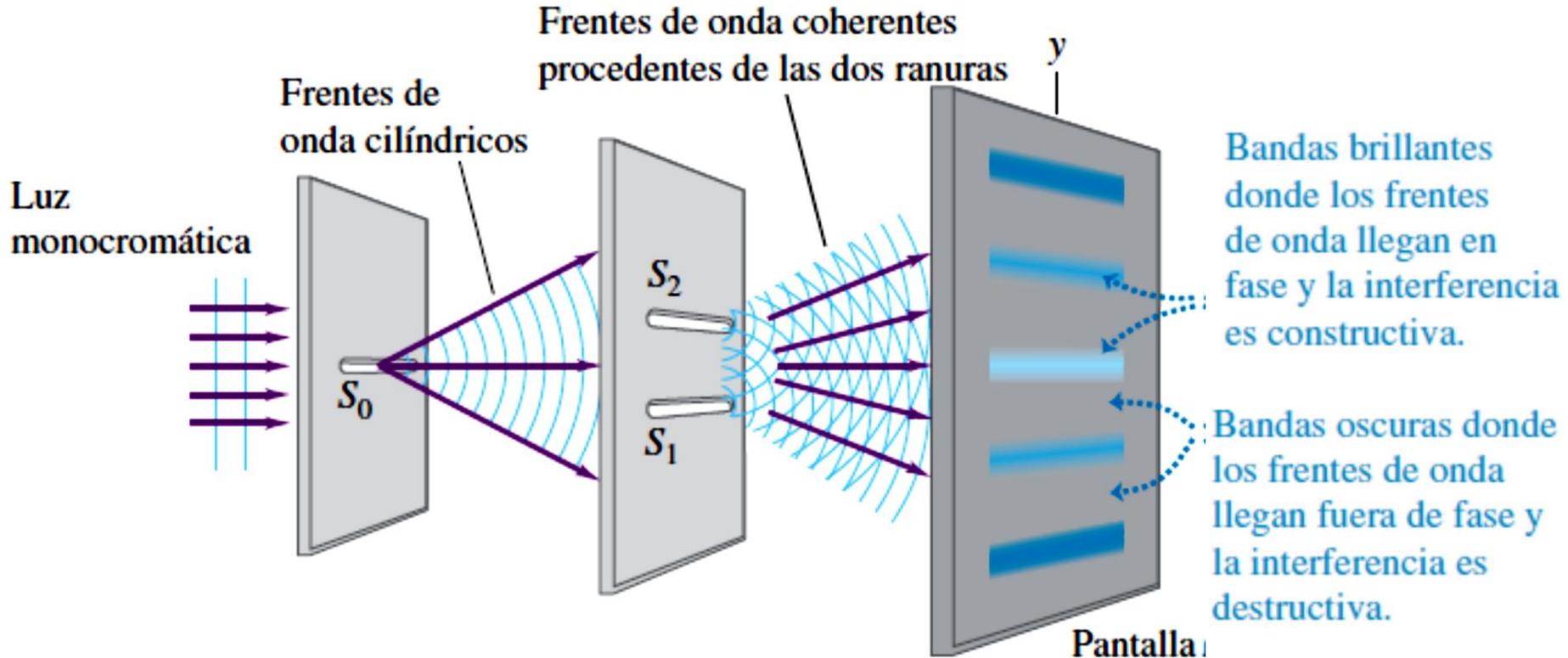
superficie

Condiciones para interferencia

- Las fuentes deben ser **coherentes**; es decir, deben mantener una fase constante
- las fuentes deben ser **monocromáticas**, es decir, ellas deberían ser de una longitud de onda

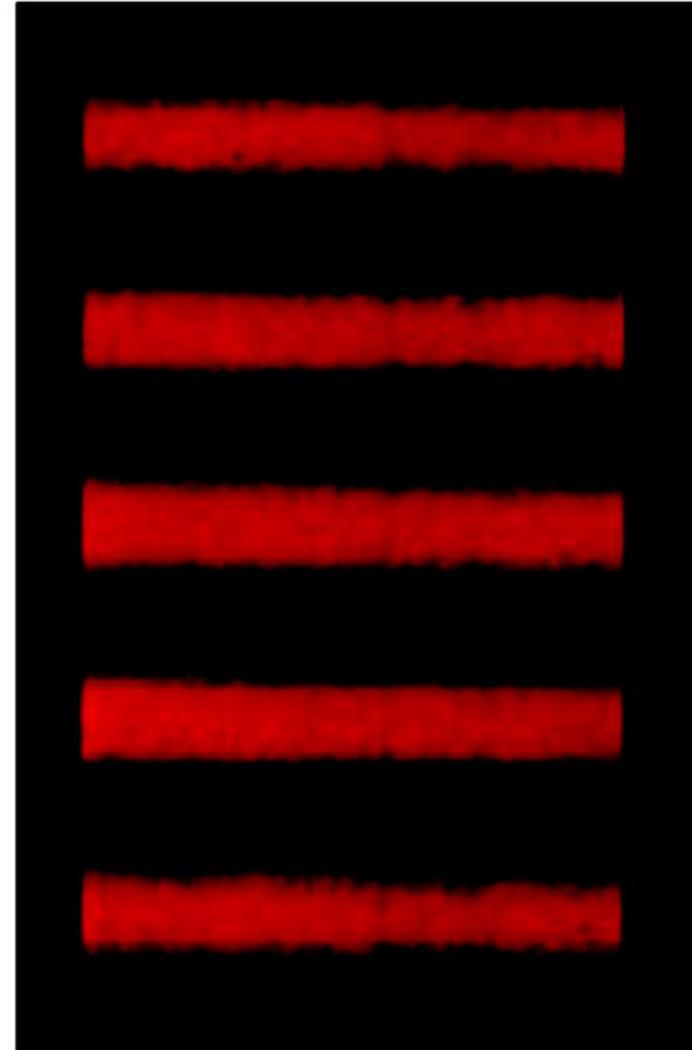
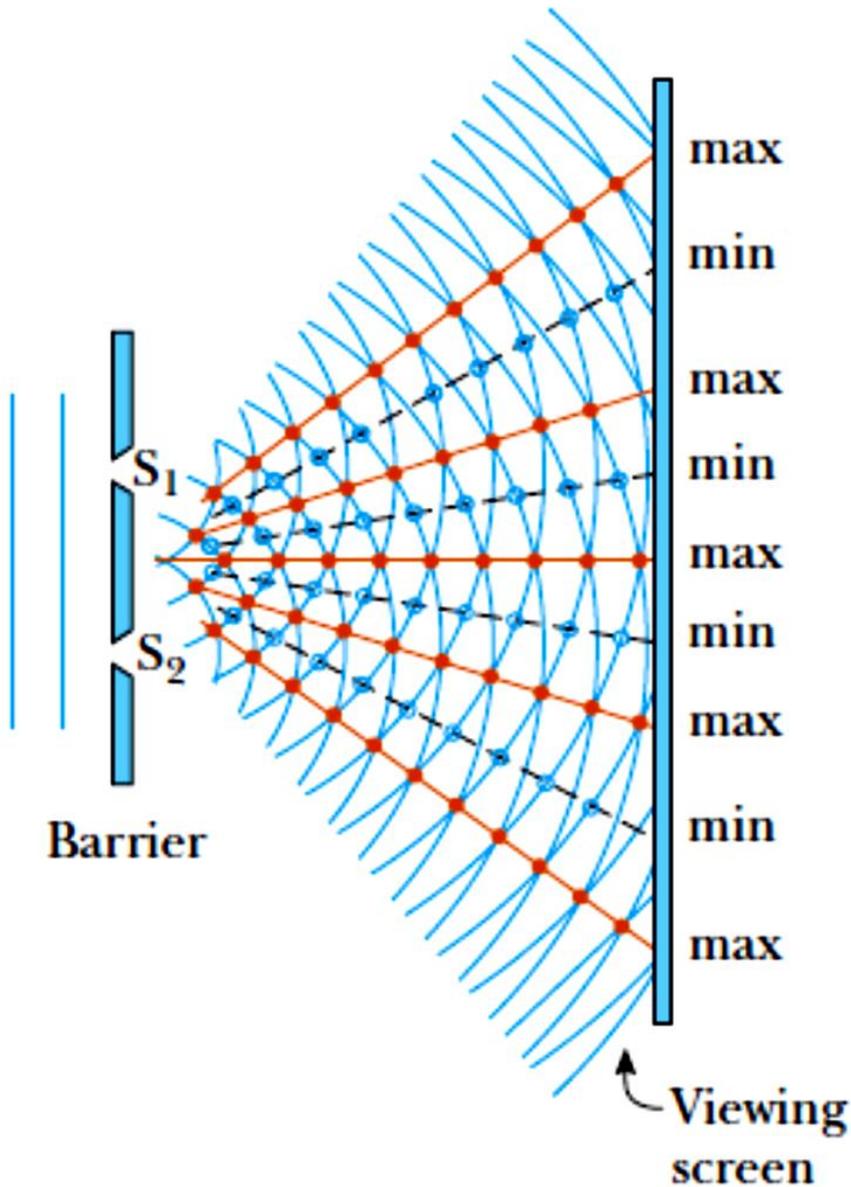
Experimento de Young

Uno de los primeros experimentos cuantitativos encaminados a poner de manifiesto la interferencia de la luz de dos fuentes estuvo a cargo del científico inglés Thomas Young en 1800.



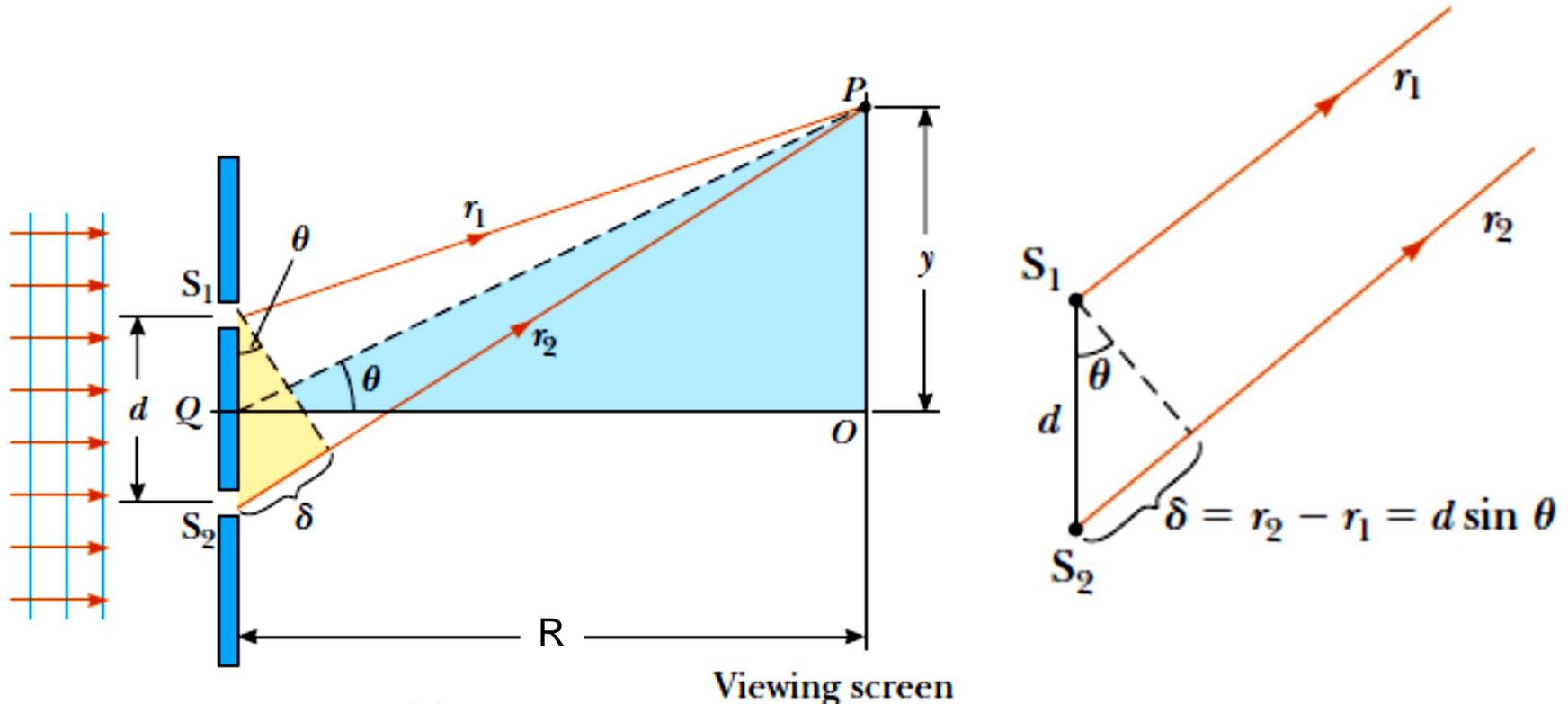
Experimento de Young para demostrar la interferencia de la luz que pasa por dos ranuras. En la pantalla aparece un patrón de áreas brillantes y oscuras

Experimento de Young para demostrar la interferencia de la luz que pasa por dos ranuras.



M. Cagnet, M. Françon, J. C. Thierri, *Atlas of Optical Phenomena*, Berlin, Springer-Verlag, 1962

Análisis geométrico del experimento de Young. Para el caso que se ilustra, $r_2 > r_1$ y tanto y como θ son positivos.



$$r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

Interferencia constructiva y destructiva con dos ranuras

Vimos que la **interferencia constructiva** ocurre en aquellos puntos donde la diferencia de las trayectorias es un número entero de longitudes de onda, $m\lambda$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Por lo tanto, las regiones brillantes en la pantalla en el experimento de Young se presentan en ángulos θ en los que:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

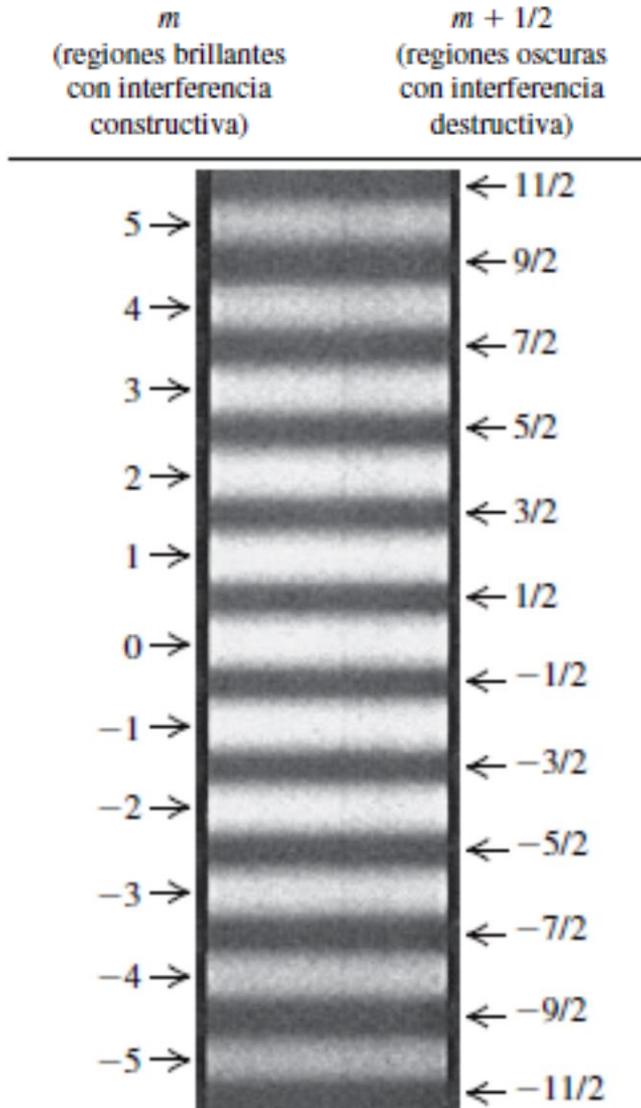
Interferencia constructiva, dos ranuras

De manera similar, ocurre la (**interferencia destructiva** que forma las regiones oscuras en la pantalla en los puntos para los que la diferencia de las trayectorias es la mitad de un número entero de longitudes de onda, $(m + \frac{1}{2})\lambda$:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Interferencia destructiva, dos ranuras

Así, el patrón en la pantalla del experimento de Young es una sucesión de bandas brillantes y oscuras, o **franjas de interferencia**, paralelas a las ranuras S_1 y S_2 .



- el centro del patrón es una banda brillante que corresponde a $m = 0$
- las posiciones de los centros de las bandas brillantes

Sea y_m la distancia entre el centro del patrón ($\theta = 0$) y el centro de la m -ésima banda brillante. Sea θ_m el valor correspondiente de θ ; por lo tanto,

$$y_m = R \tan \theta_m$$

θ_m es muy pequeño

$$y_m = R \sin \theta_m$$

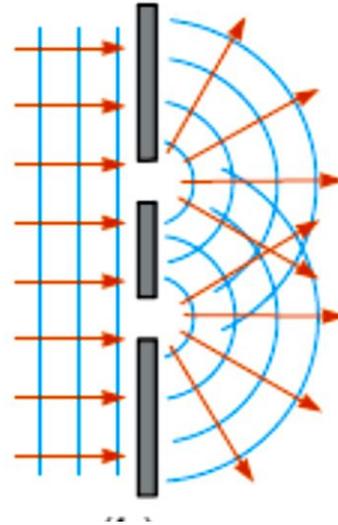
$$y_m = R \frac{m\lambda}{d}$$

interferencia constructiva en el experimento de Young

solamente para ángulos pequeños

λ

EL EXPERIMENTO EN EL LABORATORIO



- la distancia entre bandas brillantes adyacentes en el patrón es inversamente proporcional a la distancia d entre las ranuras.
- cuanto más cerca estén las ranuras, más disperso será el patrón.
- cuando las ranuras están muy separadas, las bandas del patrón están más próximas unas de otras.

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Interferencia constructiva, dos ranuras

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Interferencia destructiva, dos ranuras

$$y_m = R \frac{m \lambda}{d}$$

interferencia constructiva en el experimento de Young