

SESIÓN 1

MEDIDA DE FOCALES Y RADIOS DE CURVATURA DE ESPEJOS

TRABAJO PREVIO: MEDIDA DE FOCALES

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Aproximación paraxial**

Los ángulos con el eje óptico se aproximan por ángulos pequeños ($\sin \sigma \approx \sigma$, $\tan \sigma \approx \sigma$). En la aproximación paraxial hay estigmatismo para todos los pares objeto-imagen.

- **Lente**

Sistema formador de imágenes formado por la asociación de dos dioptrios.

- **Elementos cardinales**

Puntos del eje óptico y planos perpendiculares al eje óptico con características particulares: focos y planos focales, puntos y planos principales y antiprincipales, puntos y planos nodales y antinodales.

- **Puntos y planos principales (H,H')**

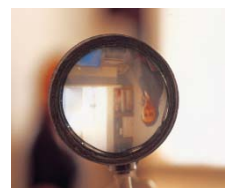
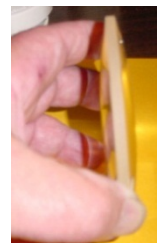
Puntos conjugados objeto e imagen con aumento lateral unidad ($\beta'=1$), y planos perpendiculares al eje que pasan por ellos.

- **Puntos y planos antiprincipales (h,h')**

Puntos conjugados objeto e imagen con aumento lateral negativo e igual a la unidad en valor absoluto ($\beta'=-1$), y planos perpendiculares al eje que pasan por ellos.

- **Focos**

Punto del eje óptico imagen del infinito (foco imagen) y punto del eje óptico cuya imagen está en el infinito (foco objeto) como se esquematiza en la figura 1.1.



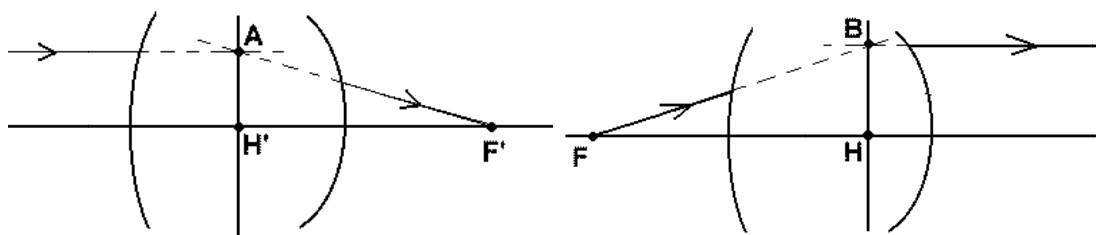


Figura 1.1. Foco imagen y foco objeto.

- **Distancias focales objeto e imagen**

Distancias $f = \overline{HF}$ (objeto) y $f' = \overline{H'F'}$ (imagen).

- **Relación entre distancias objeto e imagen**

$$\frac{n}{f} = -\frac{n'}{f'} \quad (1.1)$$

- **Sistemas convergentes y divergentes**

Consideramos un sistema óptico *convergente* cuando su foco imagen está a la derecha de la última superficie física del sistema. Será *divergente* si el foco imagen está a la izquierda de la última superficie física del sistema.

- **Lente delgada**

Lente de espesor muy reducido frente a los radios, aunque la aproximación de lente delgada depende también de la posición del objeto. Los puntos principales están en el centro de la lente, coincidentes con los nodales si la lente está inmersa en aire como se observa en la figura 1.2.

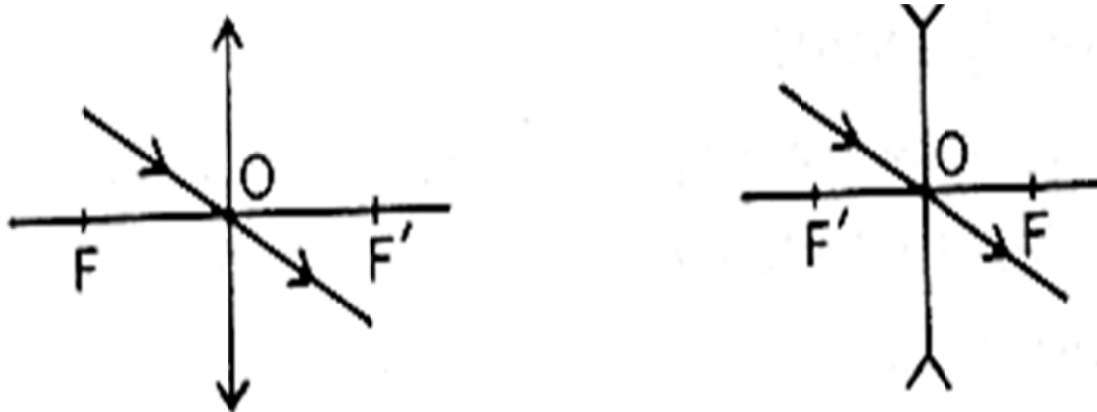


Figura 1.2. Lentes delgadas.

- **Lente gruesa**

Lente de espesor no despreciable, de forma que los puntos y los planos principales ya no coinciden con el centro de la lente. En la figura 1.3 podemos ver varios ejemplos de lentes gruesas, con la localización de sus respectivos planos principales.

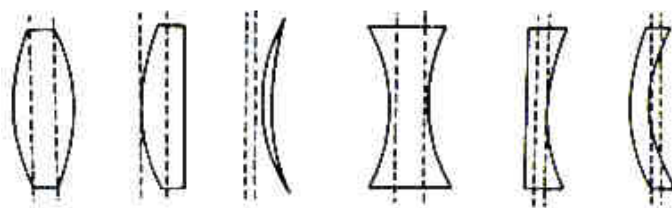


Figura 1.3. Lentes gruesas.

La potencia de una lente gruesa sumergida en aire en función de sus radios e índice viene dada por:

$$\varphi' = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + e \frac{(n-1)^2}{R_1 R_2} \quad (1.2)$$

• **Relaciones paraxiales más importantes**

- Ecuación de Newton (origen en los focos):

$$zz' = ff' \quad (1.3)$$

donde $z = \overline{FO}$ y $z' = \overline{F'O'}$.

- Ecuación de Gauss (origen en los puntos principales):

$$-\frac{n}{a} + \frac{n'}{a'} = \frac{n'}{f'} \quad (1.4)$$

donde $a = \overline{HO}$ y $a' = \overline{H'O'}$.

- Relaciones del aumento lateral:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{na'}{n'a} = \frac{f}{f-a} = \frac{f'-a'}{f'} \quad (1.5)$$

• **Lente delgada convergente**

La figura 1.4 muestra las distancias z , z' , a y a' en el caso de una lente delgada convergente.

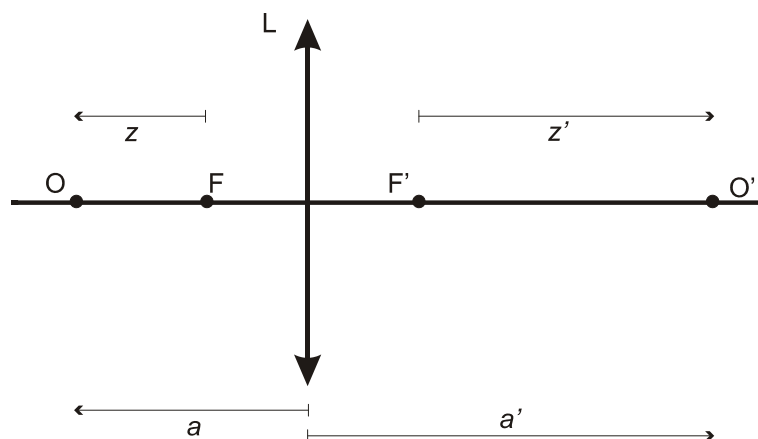


Figura 1.4. Distancias a , a' , z y z' para una lente delgada.

• Lente gruesa convergente

La figura 1.5 muestra las distancias z , z' , a y a' (con respecto a los planos principales, localizados en el interior de la lente y que no coinciden) en este caso.

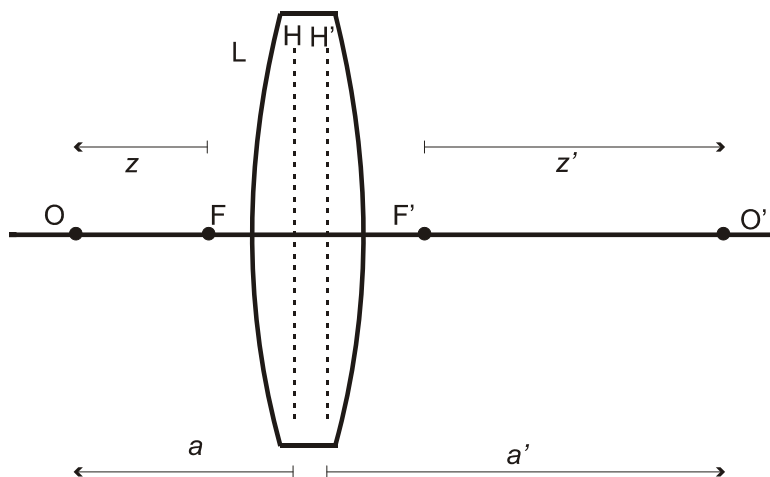


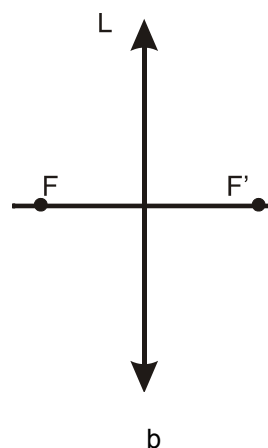
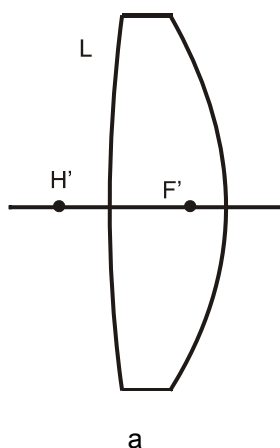
Figura 1.5. Distancias a , a' , z y z' para una lente gruesa.

• Construcción de un colimador

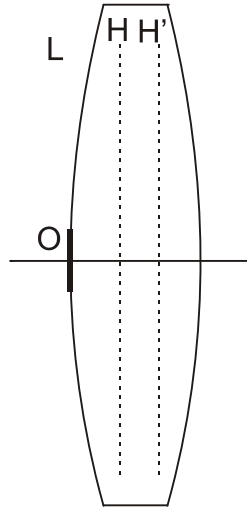
Coloque un objeto luminoso sobre el banco óptico, seguido de una lente convergente y un telescopio de banco enfocado al infinito. Desplace la lente sobre el banco hasta conseguir ver nítida la imagen del objeto a través del telescopio. En ese momento el objeto está sobre el foco objeto de la lente convergente, y los rayos que salen de la lente convergente son paralelos para formar la imagen en el infinito. Fije las posiciones del objeto y la lente convergente sobre el banco. Los sistemas ópticos que coloque a continuación recibirán un haz de rayos paralelo, como si su objeto estuviera en el infinito.

○ CUESTIONES

- Indique si los sistemas ópticos de las figuras son convergentes o divergentes, y el signo de sus distancias focales imagen.



- 2.- Si se cuenta con un colimador con un objeto luminoso, indique un método para localizar el foco imagen de un sistema óptico convergente. ¿Y el foco objeto del sistema?
- 3.- Para la lente gruesa convergente de la figura, si traza una línea sobre su primera cara, indique la distancia objeto aproximada a midiendo con una regla sobre la figura. Si la focal de la lente es 20 cm, calcular a' y situar aproximadamente la imagen del trazo sobre la figura. ¿Dónde estará la imagen de un trazo hecho sobre una lente delgada?



GUIÓN DE LA SESIÓN: MEDIDA DE FOCALES

○ OBJETIVO

Medida de la distancia focal de una lente convergente. Medida de la distancia focal de una lente divergente.

○ LENTES CONVERGENTES: MÉTODO DE CORNU



Marie Alfred Cornu (1841-1902). Físico francés. Estudió y fue profesor en la Escuela Politécnica de París. También fue miembro de la Comisión Internacional de Pesas y Medidas. Principalmente trabajó en Óptica Geométrica y Espectroscopia. Destacan sus trabajos en la determinación de la velocidad de la luz por el método de Fizeau, introduciendo numerosas mejoras en el instrumento. Por este trabajo recibió varios premios internacionales. Construyó un bi-prisma (prisma de Cornu) para corregir el defecto de la doble refracción. Es muy importante también su contribución al cálculo de la intensidad de la luz en la difracción de Fresnel, mediante una curva llamada espiral de Cornu.

Este método se basa en el uso de la relación paraxial de Newton $zz' = ff'$ (ecuación 1.3), que para lentes sumergidas en aire adopta la forma: $zz' = -f^2$. Vamos a medir z y z' para dos objetos diferentes, y a partir de estas medidas calcularemos dos distancias focales cuya media tomaremos como la distancia focal de la lente convergente.

Ya que $z = \overline{FO}$ y $z' = \overline{F'O'}$, para medir ambas distancias necesitamos localizar los focos objeto e imagen y también el objeto O y su imagen O' , lo que realizaremos con un microscopio de banco. Cuando consigamos ver nítido un determinado objeto o imagen a través del microscopio de banco, éste estará a una distancia fija de dicho objeto o imagen (distancia de enfoque del microscopio). Como debemos localizar los focos, necesitamos un objeto adicional que esté en el infinito, con el que localizaremos el foco imagen de la lente y utilizando la reversibilidad de las trayectorias luminosas también el foco objeto. El objeto en el infinito lo obtenemos mediante un colimador formado por una rendija, adosada a una fuente incandescente, que será el objeto y una lente convergente diferente de la lente problema.

Los dos objetos que vamos a utilizar son dos trazos con rotulador sobre cada una de las caras de la lente convergente L_1 , como se observa en la figura 1.6. Llamaremos O_a al trazo azul, O_r al trazo rojo. En la primera tanda de medidas, tras el colimador situaremos la lente con O_a por la parte del

colimador, como se ve en la figura 1.6.

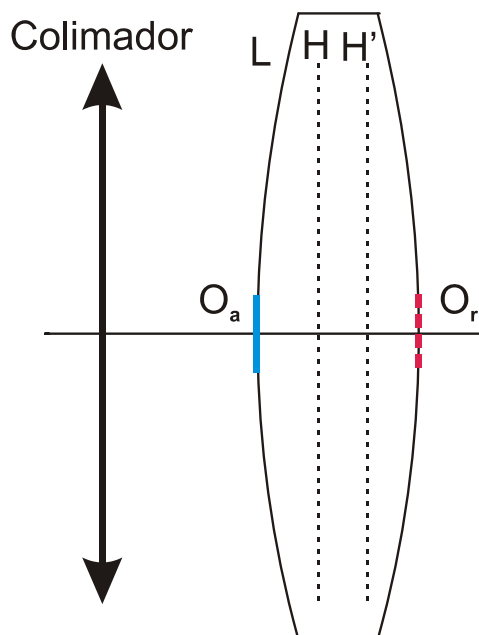


Figura 1. 6. Lente problema con los trazos azul y rojo.

La imagen de la rendija estará sobre F' , y situando el microscopio de banco a continuación de la lente podremos localizar F' (la imagen de la rendija), la imagen del trazo azul O'_a y el trazo rojo O_r . Anotamos estas tres medidas, es decir las posiciones del microscopio de banco en las que a través de él vemos nítida la rendija, el trazo azul y el trazo rojo, respectivamente. Realizamos 3 tandas para calcular el número de medidas necesarias (mediante el tanto por ciento de dispersión). Con estas medidas, sabiendo que el microscopio de banco enfocado siempre queda a una distancia fija del objeto que enfoca, podemos calcular la distancia entre O'_a y F' (z'_a) y la distancia entre F y O_r (z_r) aplicando la reversibilidad de las trayectorias, pues si la luz viniera de derecha a izquierda, el foco objeto de la lente estaría justo sobre F' .

Para las dos medidas que faltan (z_a y z'_r), necesitamos precisamente que la luz venga por la derecha, lo cual implicaría trasladar el colimador al otro lado de la lente. Podemos simplificarlo utilizando de nuevo la reversibilidad de las trayectorias y simplemente le damos la vuelta a la lente. De esta forma O_r queda del lado del colimador y O_a al lado del microscopio. Tomamos ahora la segunda tanda de medidas que nos permite medir F , O_a y O'_r , y calcular por diferencia de posiciones z_a y z'_r .

Teniendo en cuenta que z y z' son de signo contrario, y reflexionando sobre el signo correcto de cada una podemos aplicar la ecuación de Newton para determinar f' a partir del trazo azul (f'_a) y del trazo rojo (f'_r) con sus errores correspondientes. Veremos que ambas difieren ligeramente, y calcularemos la distancia focal imagen de la lente como la media de ambas.

○ LENTES DIVERGENTES: MÉTODO DE GALILEO



Galileo Galilei. Astrónomo y físico (Pisa, 1564 – Arcetri, cerca de Florencia, 1642). Desempeñó un papel fundamental en la introducción de las matemáticas para la explicación de las leyes físicas. Puede considerarse ante todo como uno de los fundadores de la Mecánica Clásica. En 1609 construyó un anteojo con un ocular divergente que lleva su nombre, e inició el estudio de los astros. Sus observaciones se efectuaron primero sobre la Luna, de la que midió la altura de las montañas y estudió las libraciones. Después descubrió, o redescubrió, los satélites de Júpiter, los anillos de Saturno, las manchas y la rotación del Sol sobre su eje, las fases de Venus, etc., novedades todas que corroboraban la presunción en favor del sistema de Copérnico.

Este método se basa en la construcción de un sistema afocal (anteojo de Galileo) utilizando como objetivo una lente convergente de focal conocida y como ocular una lente divergente cuya focal queremos conocer. Utilizaremos como objetivo la lente a la cual hemos medido su focal en el apartado anterior. Para construir el anteojo, el primer paso es montar un colimador para tener un objeto en el infinito. A continuación colocamos el objetivo (lente convergente) y el ocular (lente divergente) sobre el banco. Situamos a continuación el telescopio de banco que hemos empleado para construir el colimador (que debe estar puesto a punto). Alineamos convenientemente todos los elementos, y desplazamos el ocular sobre el banco hasta que se forme una imagen nítida del objeto a través del telescopio tras haber pasado el objeto por objetivo y ocular. Cuando veamos nítidamente el objeto a través del telescopio, si está correctamente puesto a punto, significa que la imagen que da el anteojo del objeto está en el infinito, y por tanto que objetivo y ocular están funcionando como sistema afocal. Si el sistema es afocal, es porque el foco imagen del objetivo (lente convergente) coincide con el foco objeto del ocular (lente divergente). Según el esquema que se muestra en la figura 1.7, midiendo la distancia objetivo-ocular y restándole la distancia focal del objetivo, podemos entonces hallar la distancia focal del ocular, a la cual asignaremos su signo correspondiente aproximando la posición de los planos principales por la aproximación de lentes delgadas.

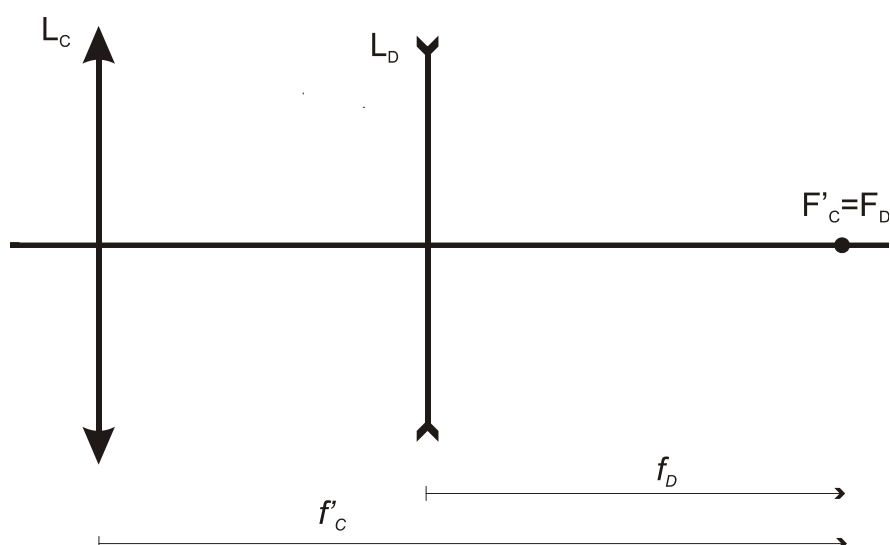


Figura 1.7. Esquema de un anteojo de Galileo.

TRABAJO PREVIO: MEDIDA DE RADIOS DE CURVATURA DE ESPEJOS

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

• Invariante de Abbe

La ecuación del invariante de Abbe proporciona la posición de la imagen de un objeto a través de un dioptrio esférico, ya sea un espejo o una superficie refractante. Viene dada por la expresión:

$$n\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{s}\right)=n'\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{s'}\right) \quad (1.6)$$

donde n y n' denotan, respectivamente, los índices de refracción objeto e imagen, R es el radio de curvatura de la superficie esférica, s es la distancia desde el vértice del dioptrio al objeto y s' es la distancia desde el vértice a la imagen. Dicha ecuación se aplica teniendo en cuenta el criterio de signos para distancias utilizado en óptica geométrica.



• Ecuaciones para un espejo

En el caso de un espejo esférico, la ecuación (1.6) adopta la expresión siguiente (sin más que aplicar que para los espejos $n=-n'$):

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{2}{R} \quad (1.7)$$

• Formación de imágenes por espejos cóncavos y convexos.

De la aplicación de la ecuación (1.7) se deducen fácilmente los siguientes resultados en cuanto a la posición y características de las imágenes formadas por un espejo convexo (radio positivo):

- Para objetos reales, la imagen es siempre virtual y derecha.
- El aumento ($\beta'=-s'/s$) crece cuando el objeto se acerca al espejo desde un punto alejado del mismo.

Para un espejo cóncavo, tenemos que:

- Para objetos reales, la imagen es real e invertida si el objeto está más allá del foco del espejo. Si está entre el foco y el espejo, la imagen es virtual y derecha.
- El aumento crece conforme acercamos el objeto al espejo desde un punto alejado del mismo.

• Elementos cardinales en espejos esféricos

De la aplicación de la ecuación (1.7) se deduce inmediatamente que los focos objeto e imagen de un espejo esférico coinciden en el punto medio entre su vértice y su centro de curvatura (rayos 1 y 2 en la figura 1.8).

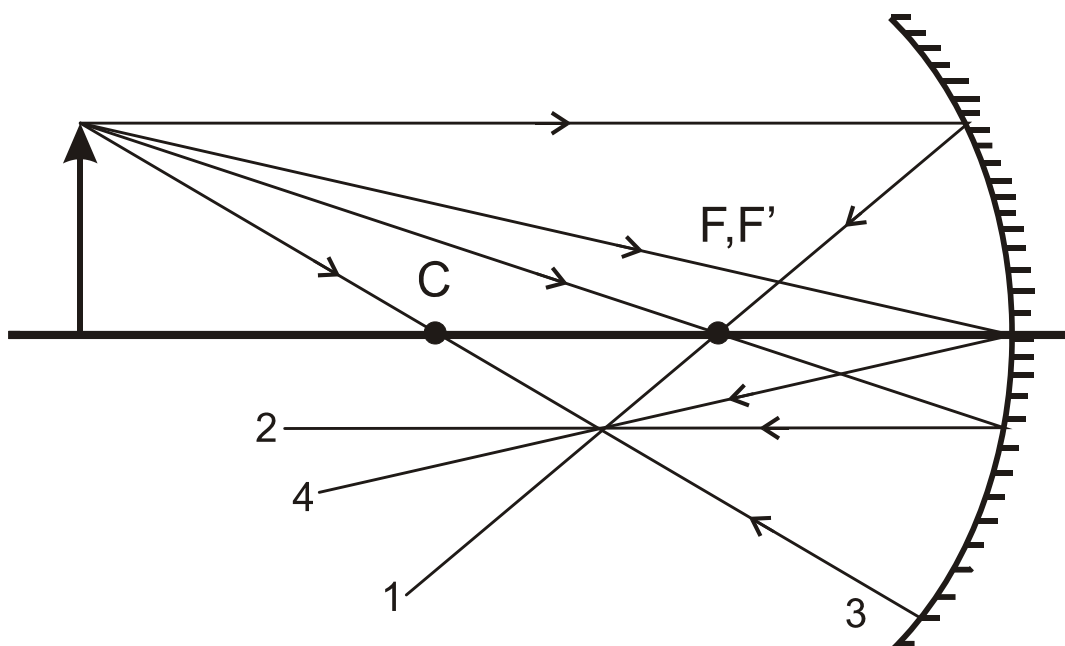


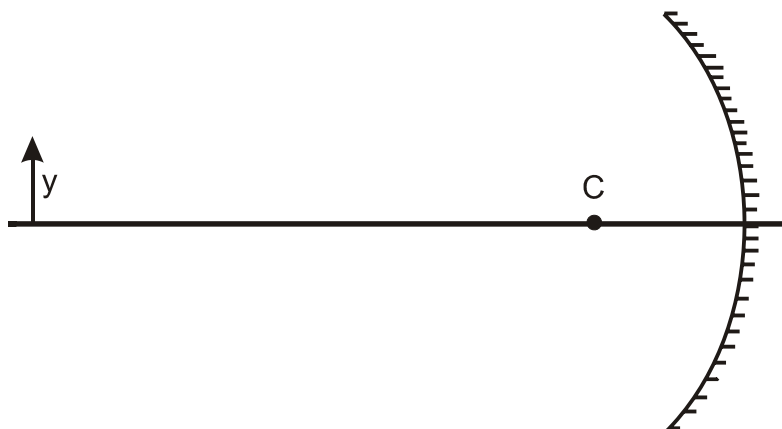
Figura 1.8. Marcha de rayos en un espejo cóncavo.

En cualquier espejo esférico, los puntos antiprincipales coinciden con los nodales, y se sitúan en el centro de curvatura. Los puntos antinodales coinciden con los principales, y se sitúan en el vértice. Esto puede comprobarse con la construcción gráfica usual para determinar la posición de los puntos nodales y antinodales de un sistema óptico utilizando su definición: (*“todo rayo que entre al sistema pasando por el punto nodal objeto sale del mismo paralelo al de entrada, pasando por el punto nodal imagen o antiparalelo al de entrada en el caso del punto antinodal”*) y las propiedades del plano focal objeto de todo sistema óptico (*“cualquier pareja de rayos que parta de un punto del plano focal objeto de un sistema óptico, salen paralelos entre sí del mismo”*).

○ CUESTIONES

- 4.- Calcular dónde formará la imagen de un objeto a 50 cm de su vértice, y el correspondiente aumento lateral:
 - a) Un espejo cóncavo de -25 cm de radio.
 - b) Un espejo convexo de 25 cm de radio.
- 5.- En un espejo de feria, se forman imágenes achatadas de las personas, de forma que parecen mucho más bajitas y anchas de lo que son. Razone si se trata de un espejo cóncavo o convexo.
- 6.- En un espejo de feria, se forman imágenes alargadas de las personas, de forma que parecen mucho más altas y delgadas de lo que son. Razones si se trata de un espejo cóncavo o convexo.

- 7.- Calcula gráficamente la posición de la imagen que da el siguiente espejo cóncavo del objeto y:



GUIÓN DE LA SESIÓN: MEDIDA DE RADIOS DE CURVATURA DE ESPEJOS

○ OBJETIVO

En esta práctica nos proponemos realizar la medida del radio de curvatura de un espejo cóncavo.

○ ESPEJO CÓNCAVO: EC. DE LOS ESPEJOS

Utilizaremos como objeto la imagen grabada en una pantalla semitransparente, iluminada por un foco. Si tenemos en cuenta la fórmula de los espejos (ecuación 1.7), conocida la posición del objeto con respecto al vértice del espejo, s , la posición de la imagen que el espejo da del objeto, s' , será la que nos permita calcular el radio de curvatura, R , del mismo.

Sin embargo, dado que el espejo es cóncavo, siendo el objeto real si lo situamos más lejos del vértice que el foco del espejo, la imagen será real. Por lo que podremos tener problemas para recoger la imagen sobre una pantalla. Utilizaremos entonces como pantalla para recoger la imagen la misma pantalla semitransparente sobre la que está grabado el objeto. Entonces tendremos que conseguir que la imagen esté en la misma posición que el objeto y en ese momento podremos determinar el radio de curvatura.

○ ESPEJO CÓNCAVO: MÉTODO ALTERNATIVO

Debes diseñar un experimento para medir de otra forma alternativa el radio de curvatura de un espejo cóncavo, ensayarlo con el material que se proporciona o solicitándolo al profesor si no lo tenemos en el puesto. Debes explicar el método utilizado, y comparar los resultados con los obtenidos anteriormente.