



GRADO EN FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016

1^{er} CUATRIMESTRE

LABORATORIO DE ÓPTICA

PRÁCTICA: Lentes delgadas y sistemas de lentes

1. Objetivos:

- Determinación de la distancia focal de lentes mediante diferentes métodos. Medida de aumentos laterales.
- Localización experimental de los focos de un sistema de lentes.
- Determinación de la distancia focal y de los planos principales de un sistema de lentes.

2. Fundamentos físicos:

2.1 Lentes delgadas

Las lentes y los espejos son elementos clave en sistemas de formación de imágenes tales como microscopios, telescopios, cámaras de fotos, proyectores, así como en muchos otros dispositivos utilizados en ciencia, tecnología y la vida cotidiana. Para poder utilizar una lente o un sistema (un conjunto de ellas) correctamente hace falta conocer sus características: distancias focales y planos principales.

Un sistema centrado de revolución en aproximación paraxial queda caracterizado por la posición de los focos F y F' y de sus planos principales [1(p.101-115), 2]. Se llama foco objeto, F , al punto del eje tal que cualquier rayo que pasa por él emerge del sistema paralelo al eje. El punto de intersección del rayo incidente que pasa por F y el rayo emergente del sistema o su prolongación pertenece al plano principal objeto, H , que es perpendicular al eje óptico, véase Fig. 1(a). Por otro lado, se denomina foco imagen, F' , al punto del eje donde convergen todos los rayos que entran en el sistema paralelos a dicho eje. Por tanto, el punto de intersección del rayo incidente paralelo al eje y el rayo emergente (que pasa por F') pertenece al plano principal imagen, H' , véase Fig. 1(b). Normalmente los planos principales son los orígenes de los sistemas de referencia asociados a los espacios objeto (H) e imagen (H'). Es importante reseñar que los planos principales no tienen por qué coincidir con elementos físicos del sistema óptico, sino que son dos planos útiles analíticamente para la determinación del sistema. La distancia entre el plano principal objeto H (imagen, H) y el plano focal objeto F (imagen, F) corresponde a la distancia focal objeto $f = HF$ (imagen, $f' = H'F'$) del sistema, véase Fig. 1(c).

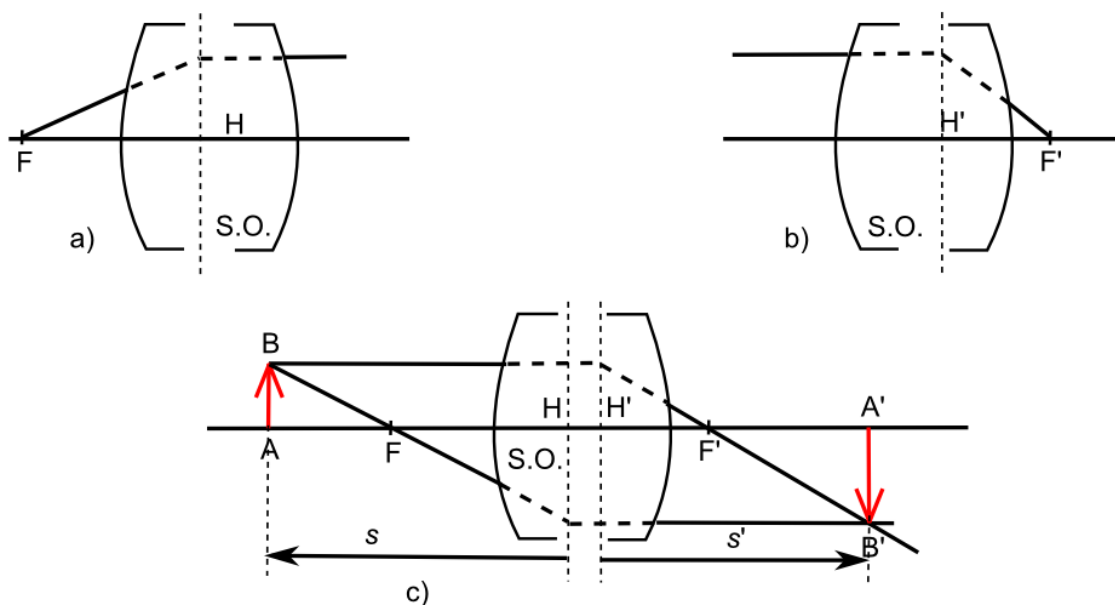


Figura 1. (a) Plano principal imagen, H' , y focal imagen F' ; (b) Plano principal objeto, H , y focal objeto, F ; (c) Planos principales de un sistema compuesto.

En la primera parte de esta práctica se estudia la formación de imagen en un sistema formado por una sola lente delgada, véase Fig. 2. Los dos planos principales coinciden con el plano de la lente en el caso de lente delgada. Si el sistema está en el aire, la relación de conjugación, esto es, la relación entre la posición del objeto, s , y de la imagen, s' , se puede expresar como [1(p.114), 2],

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (1)$$

donde f' es la distancia focal imagen de la lente. Todas estas distancias se miden desde los planos principales correspondientes y llevan signo. El signo de la distancia medida es positivo si el punto objeto (imagen) está a la derecha del plano principal correspondiente y es negativo en el caso contrario.

Se asume que el sistema está en el aire. La ecuación (1) constituye el punto de partida de nuestro análisis de los diferentes métodos que permiten medir la distancia focal de una lente delgada.

Además si y es el tamaño del objeto e y' el tamaño de la imagen, la relación entre ambos viene dada por el aumento lateral β definido como

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (2)$$

cuya magnitud informa de si la imagen es mayor o menor que el objeto y su signo de si está invertida o no respecto al objeto.

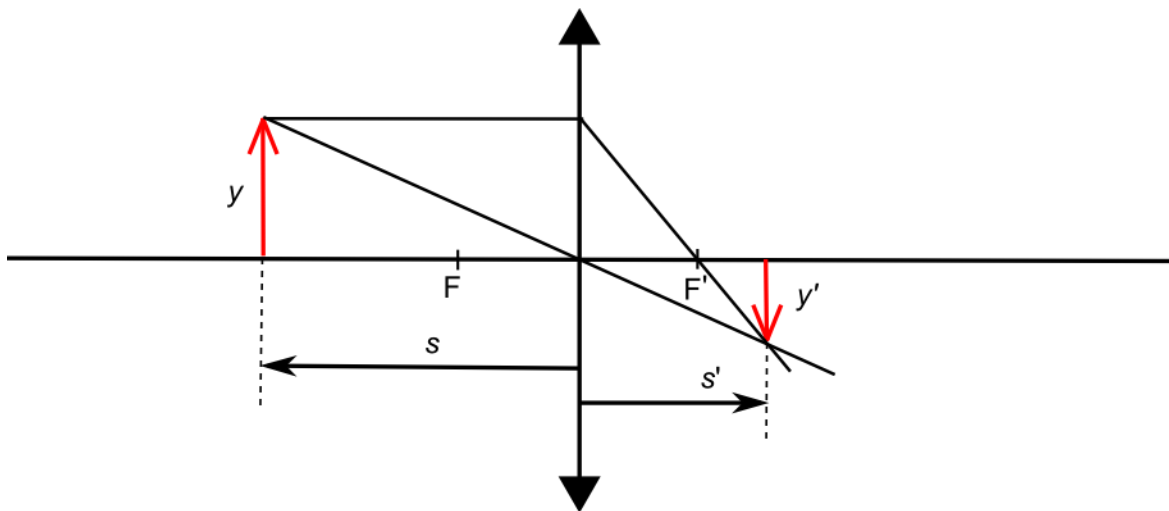


Figura 2. Formación de imagen a través de una lente delgada convergente.

2.2 Sistema de lentes

En la segunda parte de esta práctica se estudia la formación de la imagen a través de un sistema de dos lentes, semejante al presentado en la Fig. 3.

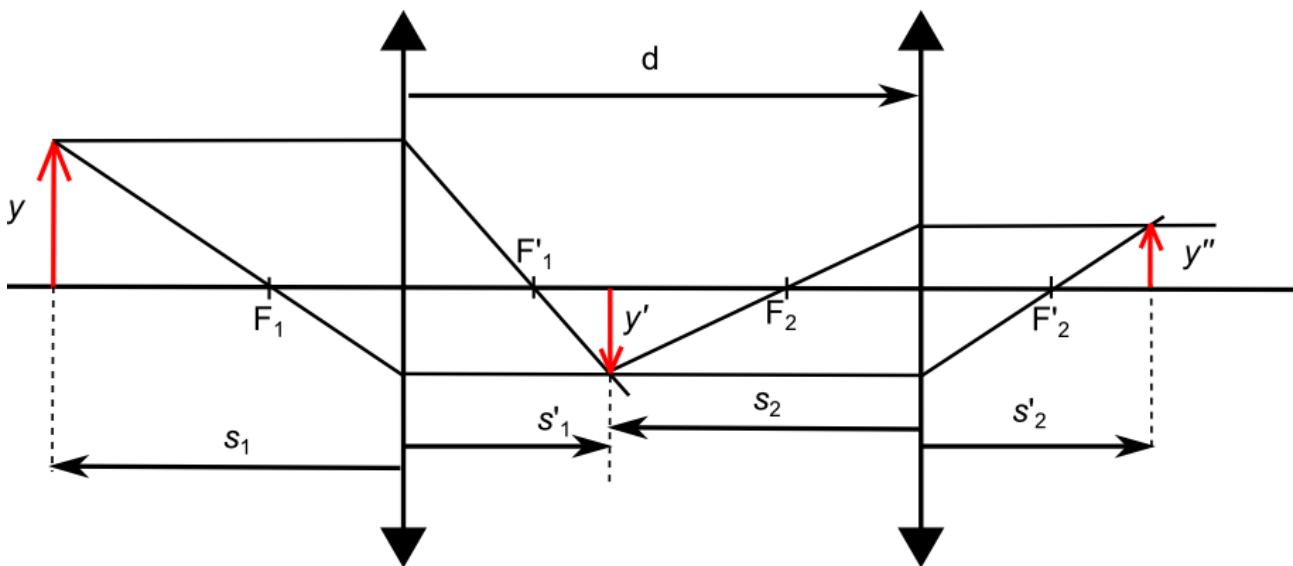


Figura 3. Formación de imagen a través de un sistema compuesto por dos lentes delgadas convergentes.

Una manera de tratar un sistema de dos lentes es considerar que las dos lentes forman un sistema compuesto. Por tanto podremos emplear la misma ecuación (1) que en el caso de la lente delgada, pero sin la simplificación que supone considerar que los planos principales H y H' coinciden entre sí y con el plano de la lente. La distancia focal imagen de un sistema óptico, f'_s , formado por dos lentes delgadas de distancias focales imágenes f'_1 y f'_2 y separadas una distancia $d > 0$ viene dada por la expresión [1 (p.112),2]:

$$\frac{1}{f'_s} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_2 f'_1} \quad (3)$$

Todas las distancias en la ecuación (2) van afectadas de su signo.

Hay que resaltar que en el caso de la ecuación (1) las distancias s y s' están referidas a los planos principales por lo tanto a menos que conozcamos la distancia focal y la posición de los planos principales, s y s' no son obtenibles de forma directa. Sin embargo las posiciones de los focos del sistema F y F' respecto a las lentes del sistema son fácilmente medibles, por ejemplo, mediante el método de autocolimación (se explicará más adelante). Sabiendo esos puntos podremos emplear la relación de Newton, que es equivalente a la relación de conjugación (1) [1,p.109]:

$$zz' = -f'^2, \quad (4)$$

donde z es la distancia del foco objeto al objeto y z' la distancia del foco imagen a la imagen.

Otra manera de tratar el problema es considerar que la primera lente forma una imagen que actuará de objeto para la segunda lente. Para calcular la posición de la imagen final basta aplicar la relación de conjugación para cada lente y las fórmulas de paso entre lentes $i, i+1$ separadas una distancia d_i .

$$\frac{1}{s'_i} - \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f'_i}, \quad (5)$$

$$s_{i+1} = s'_i - d_i, \quad (6)$$

donde el subíndice i denota que las medidas están referidas a la primera, $i=1$, o segunda lente, $i=2$.

Para sistemas de lentes el aumento lateral está definido de igual forma que en la ecuación (2), donde s es la distancia del plano principal objeto al objeto y s' la distancia del plano principal imagen a la imagen.

3. Método experimental:

Para la caracterización del sistema compuesto por dos lentes, la A (lente convergente) y la C (lente divergente) de focales desconocidas se dispone de: un objeto (una diapositiva) bien iluminado, un espejo, un metro y un banco óptico que permite desplazar fácilmente las lentes y la pantalla para observación de la imagen.

Para determinar la posición del foco y la distancia focal de un sistema se propone aplicar dos métodos, el de autocolimación y el de objeto-imagen.

El **método de autocolimación** es quizás el método más rápido y eficaz para estimar la posición del foco y la distancia focal de una lente o de un sistema de lentes que sea convergente. Se basa en las definiciones de los focos. Supongamos que sobre un banco óptico disponemos un objeto, O , y a continuación la lente convergente como en la Fig. 4.

Si el objeto estuviera en el foco objeto los rayos emergerían paralelos al eje óptico tras atravesar la lente. En este caso, si colocamos un espejo plano detrás de la lente y perpendicular al eje óptico, los rayos volverían por el mismo camino y convergerían de nuevo en O (Fig. 4(a)). Por otra parte, si el espejo estuviera ligeramente inclinado (Fig. 4(b)) los rayos reflejados serían paralelos entre sí y convergerían en un punto O' situado en el plano focal, por lo que podríamos ver la imagen del objeto nítidamente sobre ese plano.

Por lo tanto la realización experimental de este método consiste en lo siguiente:

Acerque o aleje la lente del objeto, con el espejo detrás de ella, hasta ver nítidamente la imagen en el mismo plano que el objeto. En esta situación la distancia entre el objeto y la lente es la distancia focal de la

misma. Si en lugar de la lente tenemos un sistema compuesto, sólo podemos identificar la posición del foco respecto a la lente más cercana. Recuérdese que la distancia focal es la distancia entre el plano principal y el foco correspondiente.

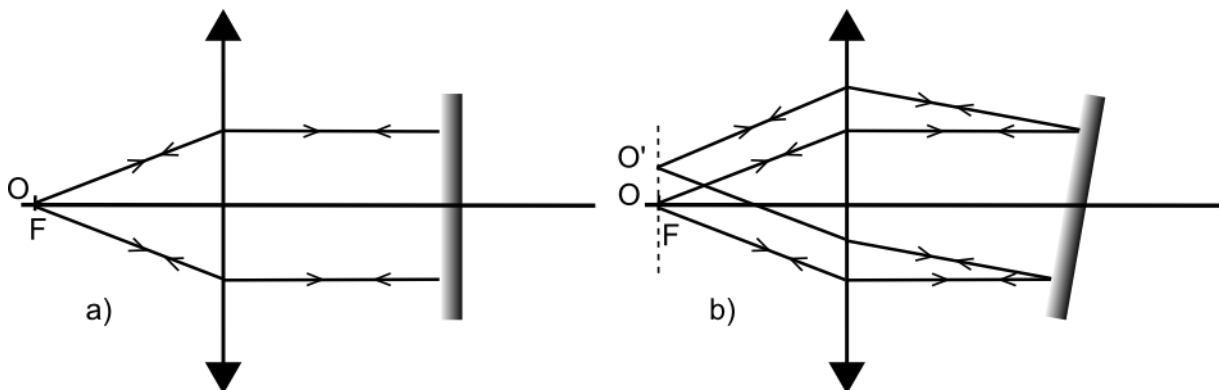


Figura 4. Esquema de realización del método de autocolimación, el objeto se sitúa en la focal objeto de la lente. El espejo se ubica (a) paralelo a la lente, (b) de manera oblicua a la lente.

Se aconseja que el objeto esté centrado en el eje y que el espejo esté muy cerca de la lente, prácticamente pegado a ella para recoger más luz. Hay que tener en cuenta que en determinadas condiciones se puede observar que sobre el objeto se forman imágenes de él mismo que no son de autocolimación, y que por tanto no nos interesan. A esas imágenes no deseadas se les denomina imágenes parásitas y en este caso son debidas a reflexiones que se producen en las superficies de las lentes en lugar de en el espejo. Para distinguirlas de las imágenes genuinas de autocolimación podemos retirar el espejo. Si la imagen persiste es que es parásita.

El **método objeto-imagen** consiste en encontrar la posición del plano de mejor imagen y la aplicación de las ecuaciones de conjugación (1), (4) o (5)-(6). Por ejemplo, en el caso de una lente convergente si se conoce la posición de un objeto, s , y su imagen, s' , respecto de la lente, se puede calcular la distancia focal imagen f' sin más que aplicar la relación de conjugación (1). Por otro lado, si utilizando el método de autocoliminación hemos encontrado la posición de los focos de un sistema compuesto y conocemos las distancias del objeto, z , y la imagen, z' , respecto a ellos podemos aplicar la ecuación (4) para estimar la distancia focal imagen del sistema.

Un sistema compuesto también se puede utilizar para medir la distancia focal de una lente divergente. El objeto de la lente divergente debe ser virtual para obtener una imagen real que se pueda medir, y poder aplicar el método objeto-imagen. Así, haciendo uso de las ecuaciones (5)-(6) observamos que si utilizamos una lente convergente auxiliar para formar el objeto virtual de la lente divergente obtendremos una imagen real del mismo, tal y como se indica en la Fig. 5.

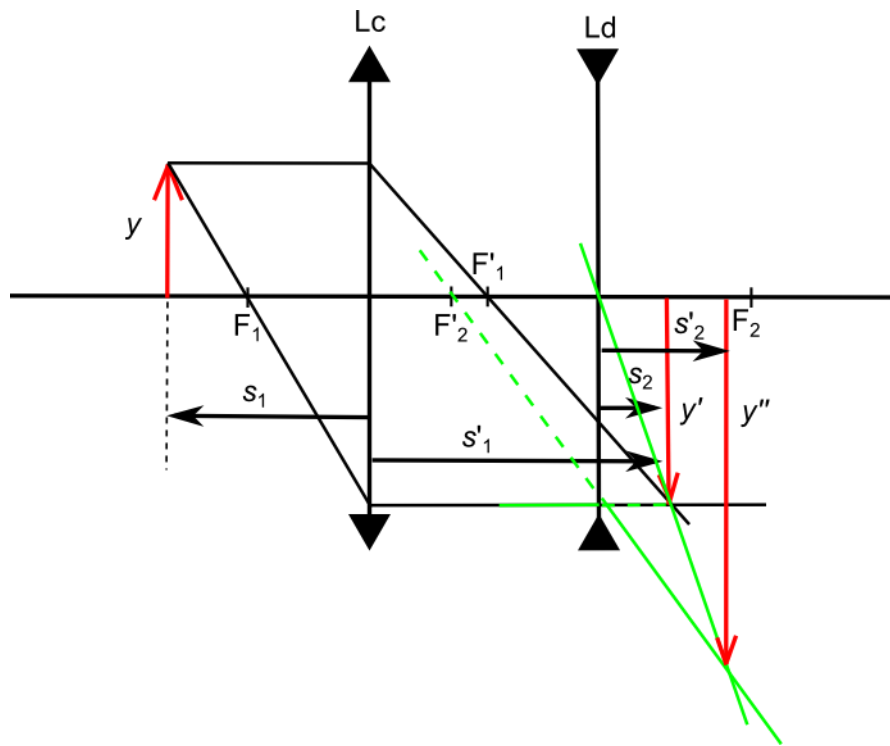


Figura 5. Formación de imagen a través de un sistema compuesto por dos lentes delgadas convergente y divergente.

4. Bibliografía:

1. P.M. Mejías Arias y R. Martínez Herrero, *Óptica Geométrica* (Síntesis, Madrid, 1999).
2. http://www.ub.edu/javaoptics/docs_applets/Doc_RayEs.html

PLANTILLA

El informe de esta práctica debe tener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en esta plantilla. En esta plantilla no debe calcular las incertidumbres de los resultados.

Medida de la distancia focal de la lente convergente A y medida de los aumentos laterales

- Mida la distancia focal de la lente A utilizando el método de autocolimación.
- Repítase la medida girando la lente 180°. ¿Se obtiene el mismo resultado? En caso negativo explíquese por qué y qué valor debería darse a la distancia focal.
- Encuentre la distancia objeto para la cual el aumento lateral es $\beta=-1$.
- Determine de rangos de distancias objeto para obtener imagen invertida menor o mayor que el objeto.
- Compruebe para una cierta distancia s que se cumple la ecuación (2).
- ¿Se le ocurre algún otro método para medir la focal de la lente A?

Medida de la distancia focal de la lente divergente C

- Determine la distancia focal de la lente C utilizando el método objeto-imagen con el uso de la lente A (apóyense en la Fig. 5 para la realización experimental). Especifique clara y brevemente los resultados experimentales obtenidos justificando cómo ha llegado a ellos.

Determinación de los focos y distancia focal de un sistema compuesto

El sistema es fijo para este apartado y está formado por la lente A y C separadas la distancia $d=6$ cm. Apunte esta distancia y fije los soportes de las lentes.

- A partir de las focales de las lentes A y C y de su separación determine con un trazado de rayos los elementos cardinales del sistema (planos focales y planos principales). El trazado de rayos tiene que hacerse a escala anotando los puntos característicos del sistema.
- Halle la posición de los focos del sistema por el método de autocolimación. Especifique clara y brevemente cómo ha realizado estas medidas. Tenga en cuenta que en el experimento pueden aparecer imágenes parásitas.
- Coloque los elementos en el orden objeto – lente A – lente C – pantalla. Forme la imagen de un objeto y tómense las medidas necesarias para obtener la focal del sistema a partir de la ecuación (4). Especifique clara y brevemente el procedimiento elegido.
- Con los resultados de los apartados anteriores determine la posición de los planos principales.

Debe añadir aquí algo que haya observado o ideado y que no esté incluido en lo anterior

Fenómenos interesantes para los curiosos

En esta apartado no se evaluarán las preguntas solicitadas

Sistema compuesto

- Compruebe que se cumple la relación de conjugación con los datos obtenidos en el sistema compuesto
- Compare los resultados (distancia focal imagen, posición de focos y planos principales) obtenidos con los diferentes métodos.

Imagen en el infinito

- ¿Dónde colocarías el objeto para que la lente A dé una imagen en el infinito?
- Compruébalo utilizando esa imagen como objeto en el infinito para la lente B y obteniendo una segunda imagen con la lente B, de distancia focal $f'=14$ cm.

5. Quiero saber más

La descripción de un sistema óptico por sus planos principales y distancias focales simplifica enormemente el uso de sistemas compuestos por una gran cantidad de lentes y espejos que utilizan muchos aparatos ópticos. Por ejemplo, un objetivo de microscopio (<http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/objectives.html>), telescopio o cámara de fotos está normalmente construido por un conjunto de lentes y/o espejos para evitar aberraciones y mejorar su rendimiento. Un sistema de lentes se utiliza no sólo para la formación de imágenes sino también para iluminación, concentración de energía luminosa, análisis y procesamiento de las señales ópticas, etc. [<http://www.youtube.com/watch?v=wcRB3TWIAXE>, http://www.ub.edu/javaoptics/docs_applets/Doc_Fourier_Es.html].

Existe otro método de descripción de sistemas de lentes, conocido como método matricial, [1(p.121-128), 3]. En este método un sistema se caracteriza por una matriz 2×2 , que depende de distancias entre las lentes (y/o espejos), sus focales y las posiciones de planos de entrada y salida del sistema. La matriz que describe el sistema compuesto se encuentran multiplicando las matrices correspondientes a sus elementos: matriz de propagación en un medio homogéneo, matriz de refracción en una superficie esférica o una lente delgada, matriz de reflexión de un espejo. El método no requiere el conocimiento de planos principales y focales del sistema compuesto, que aún es posible encontrar utilizando el mismo formalismo.

En esta práctica hemos considerado lentes esféricas, que tienen simetría de revolución y radio de curvatura de sus dos superficies constantes. En espectroscopía, caracterización y transformación de haces, entre otras aplicaciones, se usan también las lentes cilíndricas, que tienen un eje en lugar de un punto de simetría. Las superficies de lentes llamadas asféricas [<http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/optics/all-about-aspheric-lenses/>] tienen radio de curvatura variable. Por ejemplo el radio aumenta a medida que nos alejamos del centro. Otro tipo de lente es una lente tórica: curvatura de una de sus superficies es distinta en todos los meridianos [http://es.wikipedia.org/wiki/Lente_tórica]. Los últimos dos tipos de lentes son habituales en oftalmología.

El funcionamiento de la lente convencional está basado en el fenómeno de refracción. Sin embargo, los vidrios y otros materiales utilizados para su fabricación no son transparentes para radiación electromagnética fuera de la región del visible. Además, no existe material que produzca un cambio significativo de índice de refracción respecto al aire para los rayos X. En estos casos, en lugar de lentes se usan las placas zonales de Fresnel que consisten en un conjunto de anillos concéntricos opacos y transparentes cuyos radios siguen una ley.

(http://www.x-ray-optics.de/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=125&lang=es).

La luz difractada por los anillos opacos tiene comportamiento similar a luz refractada por la lente convencional (http://xdb.lbl.gov/Section4/Sec_4-4.html). Utilizando este método han conseguido diámetros focales de hasta 15 nm para los rayos X.