

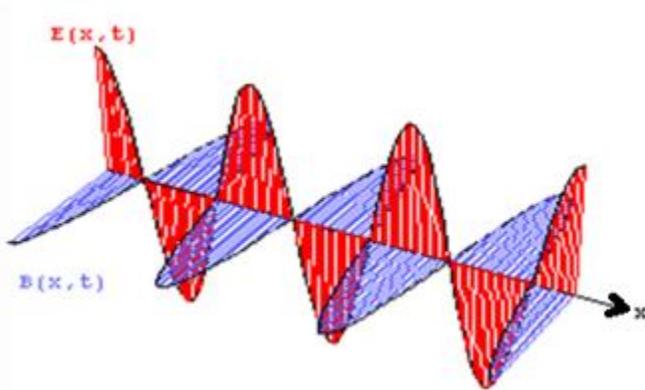
Óptica Geométrica

Ley de reflexión, ley de Snell, formación de imágenes con lentes delgadas convergentes

Alberto Lencina

Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata - CIC)
Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata

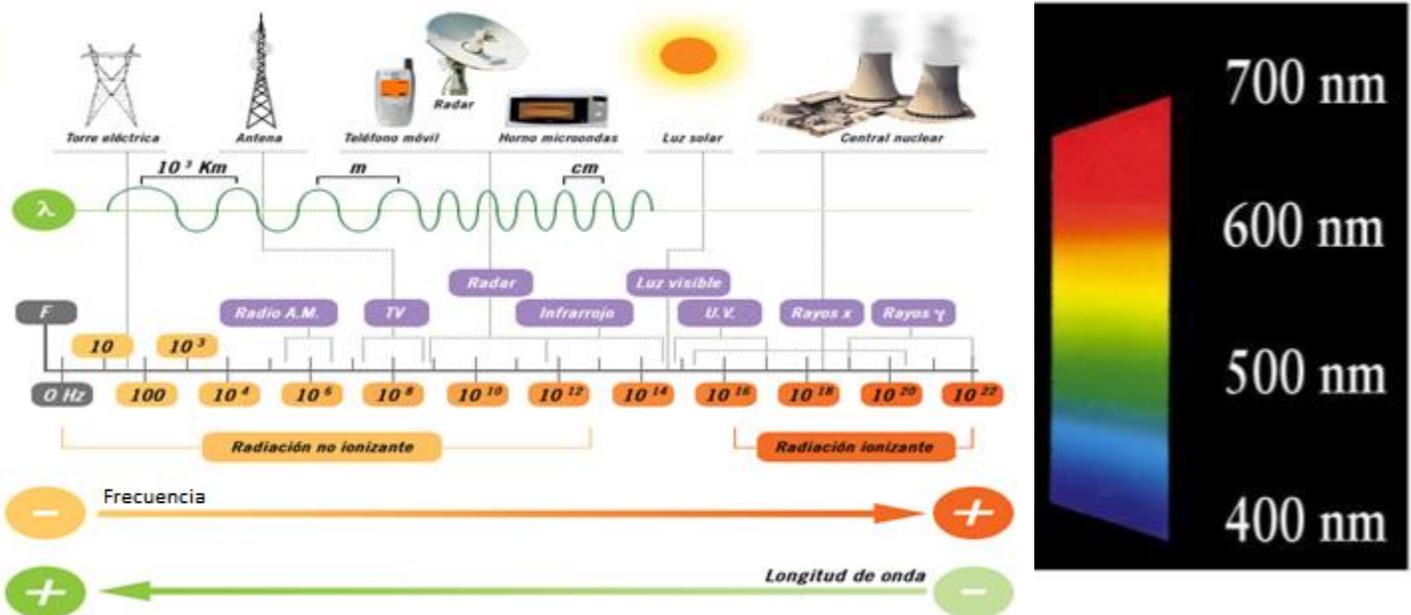
La luz, tal cual la vemos cotidianamente, es la manifestación macroscópica de un número *muy grande* de fotones¹. Esta manifestación macroscópica puede describirse desde un punto de vista clásico como una onda electromagnética. Las ondas electromagnéticas tienen algunas propiedades que las diferencian del resto de las ondas (mecánicas):



- 1) No precisan un medio material para propagarse.
- 2) Son siempre transversales con el campo eléctrico perpendicular al campo magnético y ambos perpendiculares a la dirección de propagación.
- 3) Se propagan en el vacío con una velocidad $c = 299.792.458\text{m/s}$

Como toda onda, la luz está caracterizada por una frecuencia de oscilación f y una longitud de onda λ_0 y satisfacen $\lambda_0 f = c$ (en el vacío). Cada frecuencia f (longitud de onda en el vacío) está relacionada, en el espectro visible, con un color, aunque el rango de frecuencias (longitudes de onda) del espectro electromagnético es mucho más amplio.

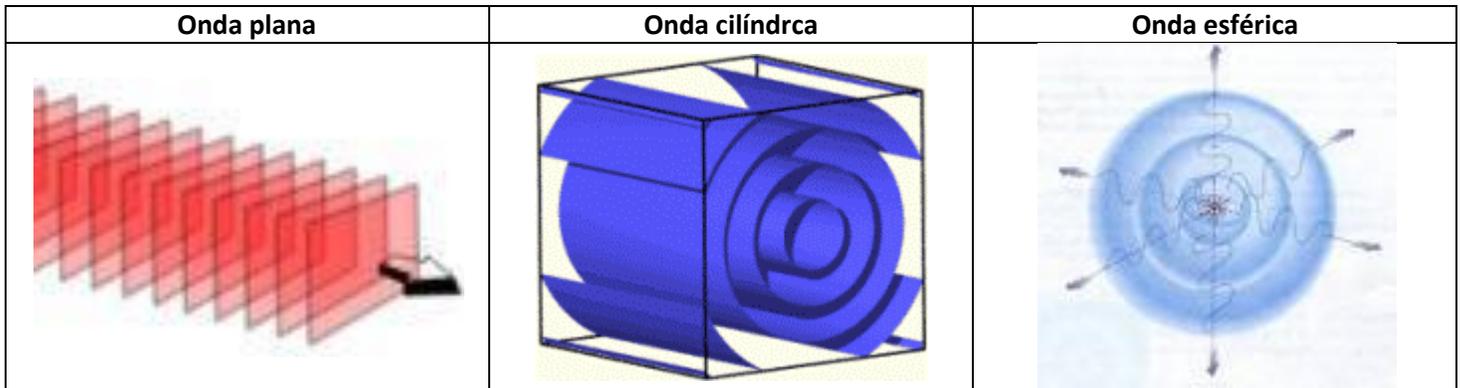
El espectro de frecuencias.



La velocidad de propagación (c en el vacío) es la que describe cómo avanza en el espacio-tiempo el *frente de onda*: superficie de fase constante, i.e. la superficie en el espacio que satisface (en una dimensión) $kx - \omega t = cte$, con $k=2\pi/\lambda_0$

¹ Esto puede entenderse de la misma manera que entendemos la materia como la compuesta por un número *muy grande* de átomos (que a su vez están compuestos de neutrones, protones y electrones. Los cuales a su vez...). Los fotones, así como los átomos, se describen en términos de la mecánica cuántica.

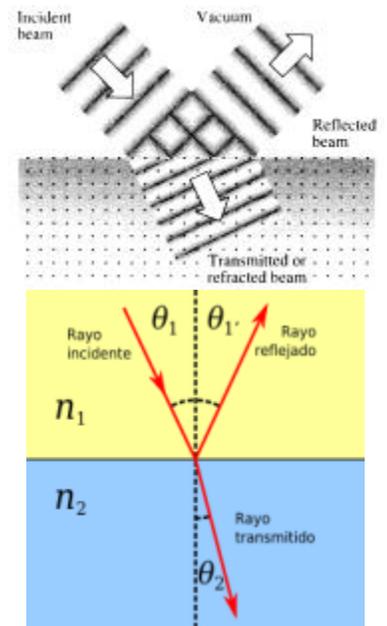
y $w=2\pi f$.² Por ejemplo, una onda plana es aquella en la que su frente de onda está definido por un plano. De la misma forma se define el frente de onda de las ondas cilíndricas, esféricas, etc. La dirección de propagación de la onda es la perpendicular a su frente de onda y está indicada por el vector de onda k . Bajo condiciones muy generales es posible describir a las ondas en términos de la dirección de propagación de su vector de onda. En ese caso se describe a la onda como una línea y se habla del *rayo* asociado a esa onda.



Cuando una onda se encuentra con un medio material, su velocidad de propagación v cambia debido a la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia. Una cantidad que da cuenta de ese cambio es el índice de refracción cuya definición es $n = c/v$. Obviamente, para el vacío $n = 1$. La superficie de separación entre un medio y otro se denomina *interfaz*. En la interfaz, la onda *incidente* se descompone en dos ondas: *reflejada* y *refractada*. Si la dirección de propagación de la onda incidente forma un ángulo ϑ_i con la normal a la interfaz, entonces las direcciones de las ondas (rayos) reflejados ϑ_r y refractados ϑ_t están dadas por:

- Ley de Reflexión $\vartheta_r = \vartheta_i$
- Ley de Snell (Refracción) $n_t \sin(\vartheta_t) = n_i \sin(\vartheta_i)$

Como puede observarse de la figura, la diferencia de índices de refracción genera un cambio en la dirección del rayo refractado. A partir de esta propiedad pueden construirse distintos elementos que permiten manipular la luz, uno de ellos son las lentes.

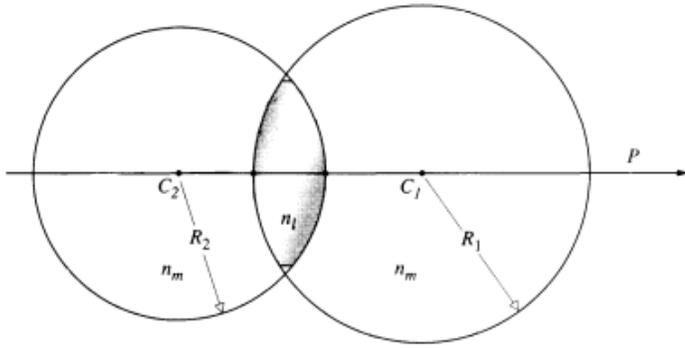


Las lentes convergentes pueden pensarse como el volumen resultante de la superposición de dos esferas. Ese volumen tiene la propiedad de desviar fuertemente la dirección de los rayos de luz incidentes. Una cantidad que describe ese efecto es la *distancia focal* f de la lente y se relaciona con sus parámetros constructivos mediante la siguiente expresión³:

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

² Es simple ver que ese frente de onda se propaga con velocidad c . Diferenciando a ambos lados se tiene $k dx - w dt = 0$, y despejando $dx/dt = w/k = \lambda_0 f = c$.

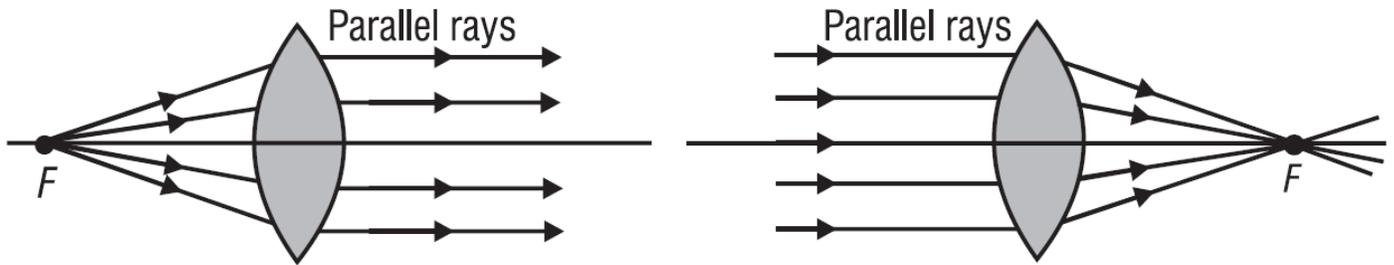
³ Válida para lentes delgadas.



Donde n_l es el índice de refracción del material con el cual está construida la lente, y R_1 y R_2 son los radios de las superficies que la definen. Se define como *eje óptico* al eje de simetría de la lente que atraviesa radialmente sus superficies. La distancia focal da cuenta de la distancia donde un conjunto de haces paralelos al eje óptico convergen luego de atravesar la lente. O, haciendo uso de la simetría "temporal" en la propagación de los haces, la distancia focal da cuenta de la distancia desde la cual un conjunto de rayos que emergen radialmente de un punto,

se transformen en rayos paralelos al eje óptico, luego de atravesar la lente.

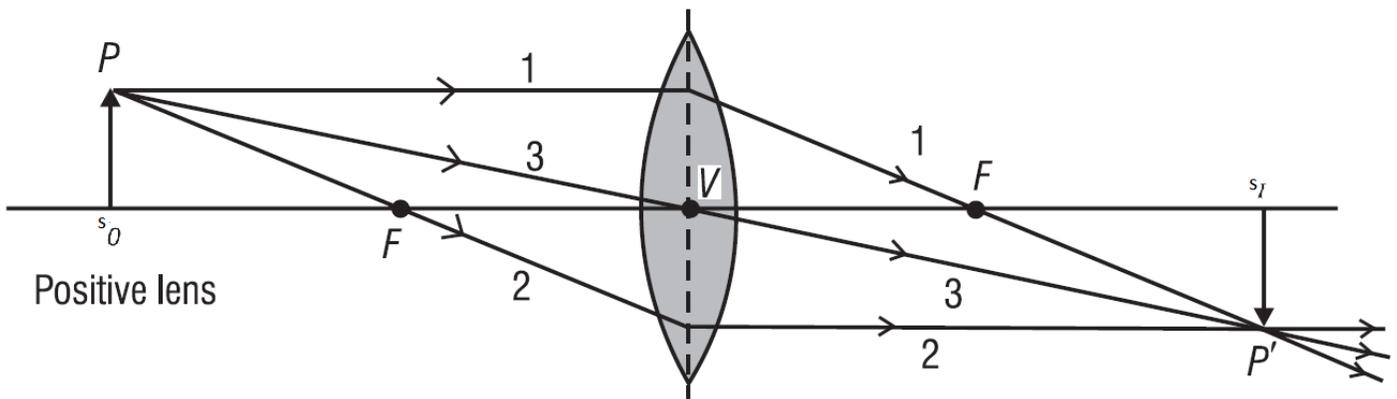
Positive lens



Este tipo de lentes permite formar imágenes de objetos. Puede demostrarse que la relación entre la *distancia objeto* s_o y la *distancia imagen* s_i , es de la forma

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Existe una forma gráfica para entender la formación de imágenes con lentes convergentes. Bastan solo tres rayos para determinar la posición de un objeto: 1) un rayo que sale paralelo al eje óptico y que luego de atravesar la lente se dirige hacia el foco; 2) Un rayo que atraviesa el foco y luego de la lente continúa paralelo al eje óptico; 3) Un rayo que atraviesa el vértice de la lente y continúa hacia la imagen formada.



Con este método, es fácil ensayar la formación de diferentes imágenes para diferentes posiciones objeto. Así puede verse fácilmente que variando la posición del objeto se obtiene una imagen invertida de variados tamaños. Se define como *aumento transversal* M al cociente entre los tamaños de la imagen respecto del objeto, teniendo en cuenta su sentido, $M = P'/P$. Como los ángulos OVP y IVP' son opuestos por el vértice, es fácil ver que $M = P'/P = -s_i/s_o$.