

Capítulo 6. Óptica Geométrica

6.1 Naturaleza de la Luz. Esbozo Histórico.

La óptica es la parte de la física que estudia la naturaleza de la luz, las leyes de los fenómenos luminosos y la interacción de la luz con la sustancia.

Siglo XVII

Las primeras teorías conocidas acerca de la naturaleza de la luz datan de este siglo. Se destacan las teorías de Huyghens, que consideraba la luz como una onda, y la de Newton, que en 1704 la describió como un flujo de partículas, explicando la reflexión de la luz como los “choques” de esas partículas en un espejo. No estaba claro qué era lo que vibraba en las ondas de Huyghens, ni tampoco como estaban constituidas las partículas de Newton. La reputación que ya poseía éste último en la época hizo que mayoritariamente se aceptara la luz como un flujo de partículas.

Siglo XIX

En este siglo se logra dar explicación a fenómenos tales como la interferencia, la difracción y la polarización de la luz sobre la base del modelo ondulatorio. Fueron importantes las aportaciones de Young y Fresnel. En 1860 aparece la teoría de Maxwell del campo electromagnético, que relaciona la óptica con el magnetismo. Según esta teoría, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío tiene el valor

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sim 300\,000 \text{ km/s}$$

que concuerda admirablemente con los resultados experimentales. A partir de este momento el modelo ondulatorio gana una preponderancia absoluta sobre el modelo corpuscular.

James Clerk Maxwell. Se considera, junto a Newton y Einstein, uno de los pilares fundamentales de la física moderna, a causa de sus muchas contribuciones a la física. La más importante es que introdujo el concepto de radiación electromagnética junto con las ecuaciones del campo (1873), que condujeron posteriormente la teoría especial de la relatividad de Einstein. Su obra más importante es el *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Tratado sobre electricidad y magnetismo*, 1873) donde, por primera vez, publicó su conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales en las que describe la naturaleza de los campos electromagnéticos en términos de espacio y tiempo.



Fines del siglo XIX, Principios del XX

Se detectan fenómenos que no se pueden explicar sobre la base del modelo ondulatorio, tales como:

- la distribución de intensidades de los espectros de radiación de los sólidos a alta temperatura (radiación del cuerpo negro)
- el efecto fotoeléctrico
- el efecto Compton

Estos fenómenos lograron explicarse posteriormente sobre la base de modelos que no consideraban el carácter ondulatorio de la luz, sino que más bien lo rechazaban:

- la teoría cuántica de la luz (Planck, 1900)
- la teoría de los fotones de Einstein (1905)

Según este último modelo, la luz es un flujo de partículas, que Einstein denominó fotones, de energía $\epsilon = h\nu$ donde ν es la *frecuencia* asociada al flujo de partículas.

Y el lector se preguntará ¿Qué frecuencia? ¿No ha escrito Ud. que según el modelo de Einstein la luz es un flujo de partículas y no una onda? ¿Qué es lo que oscila entonces? Esta ambigüedad es precisamente la característica esencial de esta teoría, que le atribuye a la luz conjuntamente propiedades de onda y

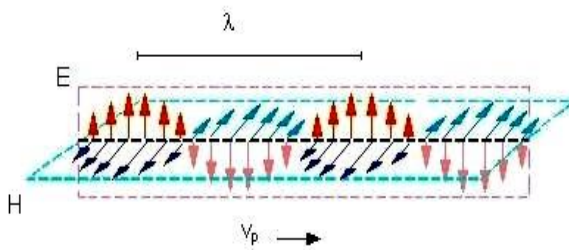
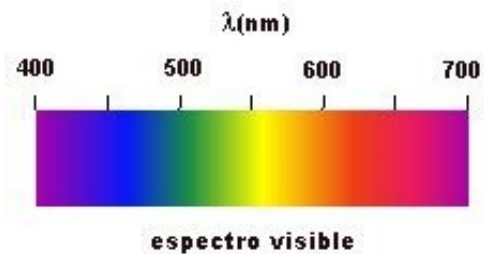
de partícula. (A veces se habla de “la onda asociada al flujo de partículas”, lo que no esclarece en absoluto el problema).

Esta particularidad de la luz se conoce como *dualidad partícula-onda*.

Hasta el momento no existe una teoría unificada capaz de explicar todos los fenómenos conocidos en que interviene la luz. Las teorías ondulatoria y corpuscular se complementan. Algunos fenómenos se explican correctamente utilizando la teoría ondulatoria, mientras que otros necesitan de la teoría corpuscular para ser analizados satisfactoriamente. El punto de vista moderno es considerar que la luz no es partícula ni es onda; se manifiesta como una o como otra en dependencia de la interacción específica que se esté considerando, y se trabaja para encontrar una teoría que represente mejor sus propiedades.

6.2 Espectro Visible

El intervalo de longitudes de onda comprendido aproximadamente entre los 400 y 700 nm en el vacío se conoce como *espectro visible*, porque el ojo humano tiene la capacidad de detectar la radiación electromagnética en ese intervalo de longitudes de onda. Las longitudes más pequeñas (y las frecuencias más altas) corresponden a los tonos violetas, mientras que las longitudes mayores corresponden a los tonos rojos. Por encima del violeta, en frecuencia, se encuentra la región del *ultravioleta* (UV) y por debajo del rojo el *infrarrojo* (IR).



La expresión analítica de una onda *monocromática* (una sola λ) puede expresarse como

$$E = E_0 \text{sen}(kx - \omega t)$$

donde $\omega = 2\pi f$ y $k = 2\pi/\lambda$. La luz natural o “blanca” proveniente del sol está compuesta por un continuo de frecuencias (o longitudes de onda) que contiene prácticamente todos los colores del espectro.

6.3 Óptica Geométrica

Existe un conjunto de fenómenos que se pueden describir satisfactoriamente utilizando el concepto de onda electromagnética, pero sin necesidad de tomar en cuenta las propiedades de los campos E y H que la componen (por ej., sus relaciones de fase y amplitud). Estos fenómenos son:

- la reflexión, refracción y dispersión de la luz
- las propiedades de las lentes

Para estudiar las leyes que rigen estos fenómenos solo es necesario el concepto de *rayo luminoso*. Un rayo luminoso es simplemente la representación de la onda por un vector a lo largo de la dirección de propagación. Usualmente representa luz monocromática, pero también puede representar varias frecuencias o luz blanca.

En general, la velocidad de propagación de la radiación electromagnética depende del medio considerado. Cuando el medio de propagación no es el vacío, la teoría de Maxwell proporciona el siguiente valor (y la realidad experimental lo confirma):

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (6.2.1)$$

El valor máximo se obtiene en el vacío, cuando $\mu_r = \epsilon_r = 1$, y es aproximadamente 300 000 km/s.

La velocidad de la luz es una velocidad increíblemente alta, capaz de dar unas 8 vueltas a nuestro planeta por el ecuador en 1 segundo. No obstante, actualmente existen medios adecuados para medir la velocidad de la luz con extraordinaria precisión. Tan precisas han llegado a ser estas mediciones que, en 1983, se redefinió nuevamente el patrón de longitud (metro) y junto con el se le asignó un valor *exacto* a la velocidad de la luz en el vacío. Así,

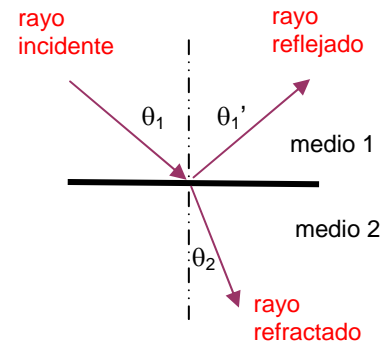
$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s exactamente}$$

Este valor es el mismo en cualquier sistema de referencia que se mida, tanto si está en reposo como en movimiento (éste es precisamente uno de los postulados de Einstein que condujo a la teoría especial de la relatividad, comprobado innumerables veces en la práctica).

El metro se redefinió en 1983 como la longitud que la luz viaja en el vacío durante $1/(299\,792\,458)$ de segundo, mientras que el segundo se definió en 1967 como el tiempo que tardan en ser emitidas 9 192 631 770 vibraciones de la radiación de los átomos de Cs 133 en determinadas condiciones.

6.4 Leyes de la Reflexión y la Refracción

Cuando un rayo luminoso atraviesa la superficie de separación de dos medios, aparece un rayo reflejado y otro refractado (ver figura). Una parte de la luz se refleja y la restante pasa al otro medio, desviándose de la dirección original. Considere que el medio 1 es aire, y que el medio 2 es vidrio.



Para el vidrio ϵ_r y μ_r son mayores que la unidad, mientras que para el aire $\epsilon_r \sim \mu_r \sim 1$. Por tanto, según (6.2.1), la velocidad de propagación de la luz en el vidrio será menor que su velocidad en el aire, y el comportamiento de la propagación será en general diferente.

Para caracterizar las particularidades de la propagación de la luz en los medios se introduce el índice de refracción $n = c/v$, donde:

- c: velocidad de la luz en el vacío
- v: velocidad de la luz en el medio considerado

Como consecuencia de la definición, $n \geq 1$ siempre, y sólo será igual a 1 en el vacío. En la tabla siguiente se muestran algunos valores típicos de n . Note que n , cociente de dos velocidades, es *adimensional*.

medio	n (medido con luz de sodio $\lambda = 589 \text{ nm}$)
aire	1.003
H ₂ O	1.33
etanol	1.36
NaCl (sólido)	1.53
polietileno	1.50 – 1.54

La frecuencia de la radiación no varía al pasar de un medio a otro, pero como la velocidad varía, la longitud de onda $\lambda = c/v$ si variará.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda v}{\lambda' v}$$

por tanto: $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$. La longitud de onda de la radiación se reduce al pasar a un medio de mayor n (mayor densidad óptica). Una vez establecidas las propiedades del índice de refracción, las leyes de la óptica geométrica, obtenidas a partir de la evidencia experimental, y que también pueden ser deducidas a partir de las ecuaciones de Maxwell, se expresan de la forma siguiente:

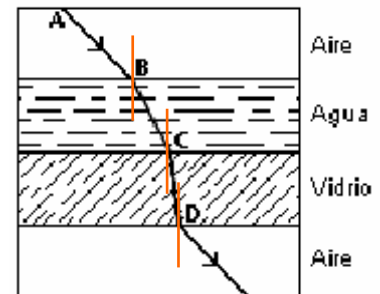
- El rayo incidente, el reflejado y el refractado siempre están en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ($\theta_1 = \theta_1'$)
- El ángulo de incidencia y el de refracción cumplen la *ley de Snell*: $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$.

En la refracción, cuando $n_2 > n_1$ el rayo refractado se acerca a la normal. Efectivamente, según Snell,

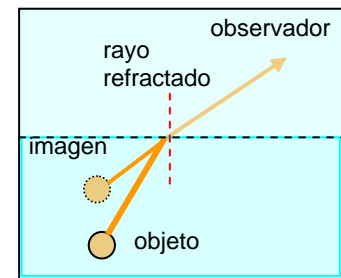
$$\text{sen} \theta_2 = (n_1/n_2) \text{sen} \theta_1$$

y si $n_2 > n_1$ entonces $\text{sen} \theta_2 < \text{sen} \theta_1$, y de aquí sigue que $\theta_2 < \theta_1$. En caso contrario, cuando la luz pasa de un medio de mayor índice a otro de menor índice, $n_1 > n_2$ y el rayo refractado se aleja de la normal.

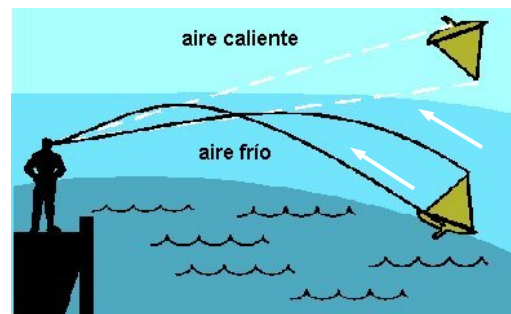
En la figura se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es superior al del aire, y más bajo que el del vidrio, por lo que el rayo refractado se acerca cada vez más a la normal. Al pasar del vidrio al aire el rayo se pasa de un medio con mayor índice a otro de menor índice, y tiende a alejarse de la normal. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente AB , pero resulta desplazado.



La refracción de la luz hace que los objetos sumergidos se vean más cercanos a la superficie cuando se observan desde el exterior. El rayo de luz que sale del objeto en el fondo del recipiente se aleja de la normal al atravesar la separación de los medios ($n_{\text{agua}} > n_{\text{aire}}$). Un observador fuera del recipiente verá venir la luz de un punto (imagen) que se encuentra más cercano a la superficie que el objeto.



Espejismos. Un espejismo *no* es una ilusión óptica como a veces se afirma. Es un fenómeno físico que consiste en que un objeto distante se observa desplazado de su verdadera posición. Tiene su origen en la reflexión y refracción de la luz en capas atmosféricas que presenten grandes gradientes de temperatura.



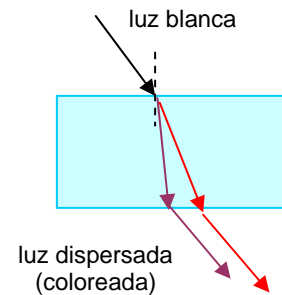
La imagen puede aparecer derecha, invertida, o haciendo ondulaciones. Usualmente los espejismos se presentan en los lugares muy fríos o en la arena caliente de los desiertos, y se caracterizan porque aparece al menos una imagen invertida de algún objeto, aunque pueden aparecer dos, tres o más imágenes derechas e invertidas.

Un espejismo muy común es el *espejismo de las carreteras*, cuando en días soleados se observa a lo lejos el pavimento aparentemente mojado, aunque la humedad aparente siempre desaparece antes que logremos alcanzar el punto en cuestión.

6.5 Dispersión de la Luz

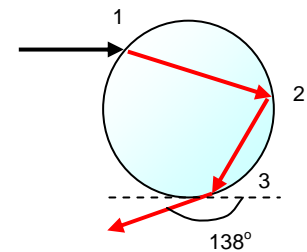
Se llama dispersión de la luz al fenómeno que tiene lugar cuando la luz blanca se refracta en un medio tal que su índice de refracción varía apreciablemente con la frecuencia ($n = n(\nu)$). En este caso, de acuerdo a la ley de Snell, el ángulo refractado variará ligeramente de una a otra frecuencia, obteniéndose la separación de los correspondientes rayos luminosos. En la figura adjunta, la luz se dispersa al pasar por un medio donde el valor del índice de refracción es diferente para cada frecuencia. Suponiendo que la luz incide desde el aire, $n_1 \approx 1$, y de acuerdo a la ley de Snell,

$$\text{sen}\theta_2 = (1/n_2)\text{sen}\theta_1$$



Como n_2 depende de la frecuencia, θ_2 también variará con ν , y el ángulo de refracción será ligeramente diferente para cada frecuencia. La dispersión se llama *normal* cuando n aumenta con ν , mientras que cuando n disminuye con ν la dispersión es *anómala*. La dispersión normal es característica de la mayoría de los medios transparentes incoloros, mientras que la anómala se presenta en algunos medios coloreados.

El **arco iris** se origina cuando llueve por la refracción de la luz solar en las minúsculas gotas de agua que quedan en la atmósfera. Lo que da belleza al fenómeno es la dispersión de la luz blanca dentro de las gotas de agua, ya que el índice de refracción del agua no es el mismo para todas las longitudes de onda ($n = n(\nu)$). En la figura se ha representado la refracción correspondiente a una sola frecuencia. Al ocurrir dos refracciones (en 1 y 3) el ángulo dispersado se hace mayor. El efecto combinado de los procesos de refracción – reflexión – refracción que tienen lugar en cada gota respecto a un observador colocado en posición favorable (el sol debe estar siempre detrás del observador) da lugar a la formación del arco iris.

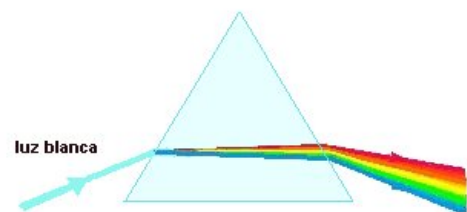


Es posible demostrar que, de acuerdo a la geometría de los procesos involucrados en el fenómeno, el ángulo entre la dirección del observador al sol y la dirección entre éste y cualquier punto del arco iris siempre será igual 138° . Usualmente es posible observar un segundo arco iris, más tenue y mayor que el primero, con los colores invertidos, que se origina por los rayos que son reflejados doblemente dentro de la gota.



Los **halos** son anillos de color blanco o de una tonalidad pálida que se forman alrededor del Sol o de la Luna. El mecanismo que los produce tiene que ver con procesos de reflexión y refracción en los pequeños cristales de hielo que constituyen las nubes altas de tipo cirros. El tipo más común es el generado por procesos de refracción en cristales de hielo hexagonales. En este caso el diámetro del círculo que forma el halo es tal que, si uno apunta con un brazo en la dirección del Sol (o de la Luna) y con el otro en la dirección de cualquier punto del halo, el ángulo entre los brazos será siempre de 22° .

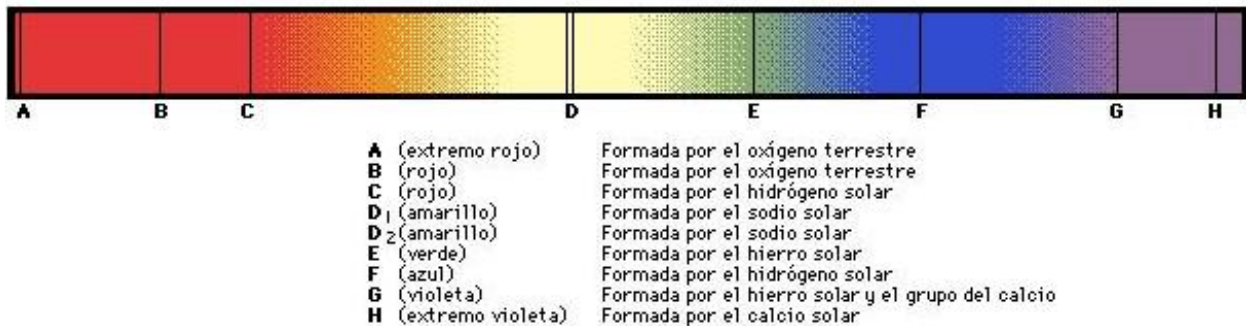
Los *espectrógrafos* son instrumentos que sirven para analizar la distribución de longitudes de onda proveniente de objetos luminosos. Para dispersar la luz y obtener su espectro se hace que la luz proveniente del objeto pase por un *prisma*, donde la doble refracción que tiene lugar en las fronteras ocasiona una mayor dispersión del haz. En óptica, un prisma es un bloque de vidrio u otro material transparente que tiene la misma sección transversal (generalmente un



triángulo) en toda su longitud. Los dos tipos de prisma más frecuentes tienen secciones transversales triangulares con ángulos de 45° ó 60° .

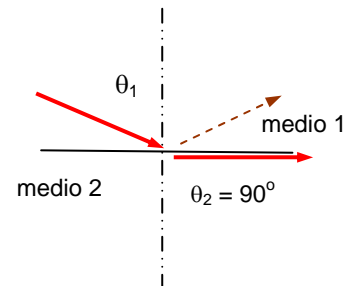
El análisis de los espectros permite obtener información de las características internas de la sustancia que emite la radiación. Por ejemplo, es posible obtener información acerca de la composición de las estrellas analizando la luz que nos llega de ellas, incluyendo la radiación proveniente del sol. En el espectro solar que aparece a continuación, las líneas oscuras se denominan *líneas de absorción*, y se deben a la absorción de la radiación por elementos presentes en la atmósfera solar. Comparando esas líneas con las de los espectros obtenidas en el laboratorio bajo condiciones controladas es posible identificar los elementos que existen en el Sol.

La línea intensa en el extremo del rojo del espectro es una de las líneas del hidrógeno, y el doblete amarillo corresponde al sodio. Las líneas del hierro y el calcio aparecen en el extremo violeta.



6.6 Reflexión Total Interna

Analicemos en detalle el caso en que la luz pasa de un medio ópticamente más denso a uno menos denso, donde el rayo refractado se aleja de la normal ($n_1 > n_2$ según la notación anterior). Si el ángulo de incidencia θ_1 es lo suficientemente grande, es posible lograr que $\theta_2 = 90^\circ$. El valor de θ_1 que hace $\theta_2 = 90^\circ$ se puede calcular a partir de la ley de Snell. Ese ángulo se denomina *ángulo crítico* (θ_c)

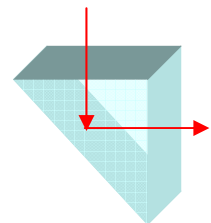


$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin(90^\circ) = n_2$$

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1$$

Cuando $\theta_1 > \theta_c$ el rayo refractado desaparece, y toda la luz incidente es reflejada en la superficie. El fenómeno se conoce como *reflexión total interna*, y tiene muchas aplicaciones. Las más importantes están relacionadas a los *prismas* y a la transmisión de señales por *fibra óptica*.

Prisma. Cuando un rayo de luz incide sobre el prisma con un ángulo adecuado, el ángulo de incidencia sobre la cara interna del prisma es mayor que el ángulo crítico, por lo que el rayo experimenta una reflexión total interna y no hay pérdidas de energía. Esto hace que el prisma actúe como un espejo muy eficiente, un efecto que se utiliza en muchos instrumentos ópticos como periscopios y binoculares o prismáticos (de ahí este último nombre).



Fibra óptica: fibra o varilla de vidrio u otro material transparente con un índice de refracción alto que se emplea para transmitir luz. Cuando la luz entra por uno de los extremos de la fibra, se transmite con muy pocas pérdidas incluso aunque la fibra esté curvada. El principio en que se basa la transmisión de luz es la reflexión total interna; la luz que viaja por el centro de la fibra incide sobre la superficie externa con un ángulo mayor que el ángulo

crítico, de forma que se refleja sin pérdidas hacia el interior. Así, la luz se transmite a largas distancias, reflejándose miles de veces en el interior de la fibra.

La aplicación más sencilla de la fibra óptica es la transmisión de luz a lugares que serían difíciles de iluminar de otro modo, como la cavidad perforada por el rotor de un dentista. También puede emplearse para transmitir imágenes. En este caso se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lupa o en una pantalla. Este procedimiento es muy utilizado en instrumentos médicos para examinar el interior del cuerpo humano y para efectuar cirugía láser. También se han desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales.

La fibra óptica se emplea cada vez más en las comunicaciones, debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia muy alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia. En las últimas décadas se han ido sustituyendo las líneas de transmisión que utilizan conductores metálicos por redes de fibra óptica, que proporcionan conexiones telefónicas, correo electrónico e Internet transcontinentales y transoceánicas.

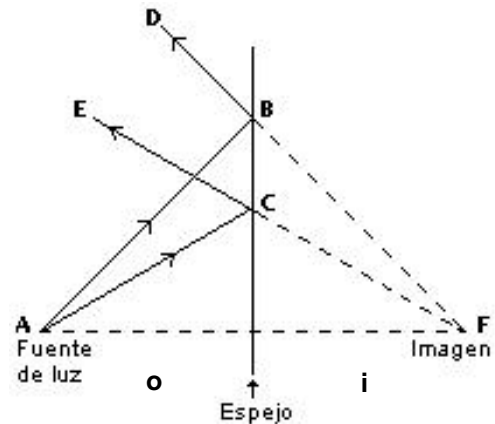


Una ventaja de los sistemas de fibra óptica es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un repetidor para recuperar su intensidad. En la actualidad, los repetidores de fibra óptica están separados entre sí unos 100 km, frente a aproximadamente 1.5 km en los sistemas eléctricos convencionales. En la figura se observa una porción de fibra óptica compuesta de muchas hebras delgadas de vidrio o plástico con diámetro de 50 a 125 micras cada una. El conjunto de núcleo y revestimiento está a su vez rodeado por un forro o funda de plástico u otros materiales que lo resguardan contra la humedad, el aplastamiento, los roedores, y otros riesgos del entorno.

6.7 Espejo Plano

Un espejo ideal es cualquier superficie plana capaz de reflejar la mayor parte de la luz incidente. En la figura, construyendo los rayos reflejados en el espejo a partir de las leyes de la reflexión ($\theta_1' = \theta_1$), se ve inmediatamente que un observador en E ó D verá el reflejo de A en el punto F, ya que los rayos de luz *parecen* salir de allí. Mediante consideraciones geométricas se llega fácilmente a la conclusión de que la distancia objeto (o) y la distancia imagen (i), definidas como las perpendiculares desde el objeto y la imagen hasta el espejo, respectivamente, cumplen la condición

$$i = -o$$

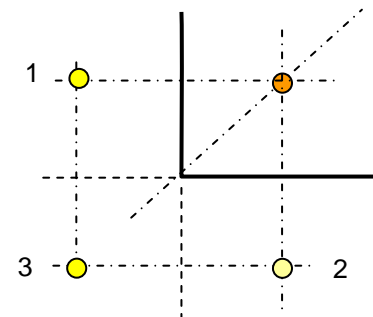


La imagen que se forma en el espejo es una imagen aparente o imagen *virtual*, pues detrás del espejo no hay ninguna fuente de luz. La imagen aparenta estar allí, pero no está en realidad. Utilizando esta simple ecuación es posible analizar la formación de imágenes en espejos complejos.

Ejemplo

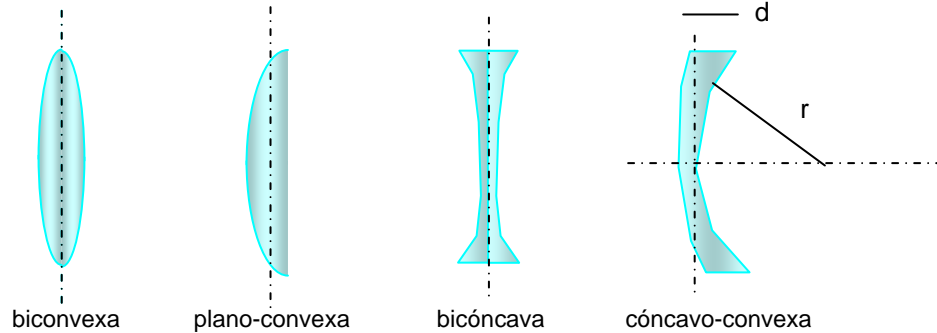
Dos espejos planos están colocados perpendicularmente. Se coloca un punto luminoso P en la bisectriz. Localice las imágenes que se forman.

Respuesta. Se forman 3 imágenes. La tercera se puede considerar formada a partir de las imágenes virtuales 1 y 2, tomándolas como objeto respecto a la prolongación de los espejos (señaladas con línea de puntos en la figura).



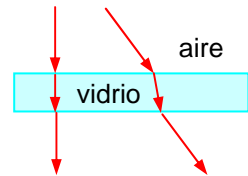
6.8 Lentes Delgadas

Una lente es un dispositivo óptico transparente (vidrio, plástico) limitado por dos superficies esféricas, que pueden ser cóncavas o convexas respecto al plano que pasa por el centro de la lente. En la figura se muestran algunos ejemplos:



Llamaremos d al espesor de la lente, y r al radio de curvatura de su superficie. Una *lente delgada* es aquella en que $d \ll r$. En las lentes delgadas el análisis de la trayectoria de los rayos luminosos se simplifica grandemente. En lo que sigue se considera solamente este tipo de lentes.

Las lentes hacen uso de la refracción para concentrar o dispersar los rayos de luz. Si la luz atraviesa un vidrio plano, es posible comprobar, aplicando la ley de Snell, que el rayo emergente sale paralelo al rayo incidente (ver figura). Sin embargo, si la inclinación de las superficies varía, se puede lograr la concentración o dispersión de los rayos luminosos.



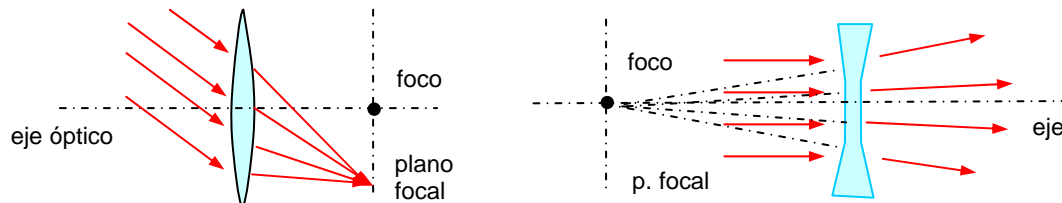
En la figura se muestran los esquemas para una lente convergente y otra divergente.



Propiedades de las Lentes

Llamaremos eje óptico de la lente a la recta perpendicular que pasa por el centro de la lente. Es posible comprobar en la práctica las siguientes propiedades:

- Cuando un grupo de rayos paralelos inciden sobre la lente, éstos (o sus prolongaciones) se concentran en un punto del espacio. El plano formado por el conjunto de esos puntos es el *plano focal*. La intersección del eje óptico con el plano focal es el *foco* de la lente (ver figuras).

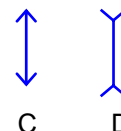


- Cada lente posee dos focos, situados a igual distancia de la lente. La distancia del foco al

centro de la lente es la *distancia focal*.

- El rayo de luz que pasa por el centro de la lente no se desvía, cualquiera sea su ángulo de incidencia.
- El rayo que incide perpendicular la lente pasa por uno de los focos.
- El rayo que pase por un foco sale perpendicular a la lente.

Estos rayos se conocen como *rayos notables*, y se pueden utilizar para analizar la formación de imágenes, como se verá en los ejemplos a continuación. Representaremos las lentes convergentes y divergentes por los siguientes símbolos.

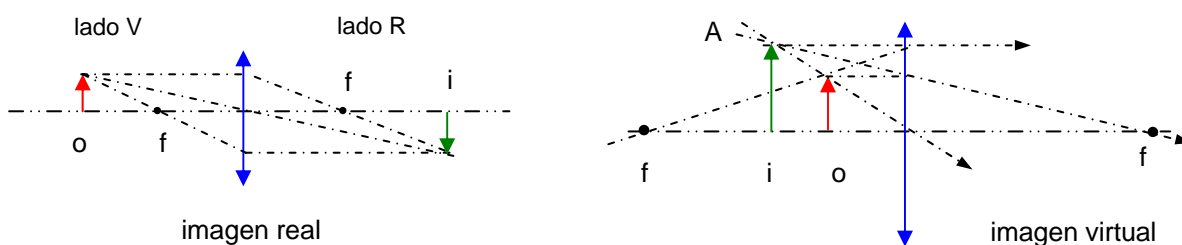


Imágenes Reales y Virtuales

La propiedad más importante que poseen las lentes es que permiten obtener imágenes reales y virtuales de los objetos, aumentados o disminuidos.

La imagen es *real* cuando se forma del lado contrario a donde incide la luz. Si se forma del mismo lado, entonces la imagen es *virtual*.

Considere en la figura la formación de una imagen real a partir de los *rayos notables*



La imagen de la izquierda es real porque los rayos de luz llegan verdaderamente a ese punto. Si se coloca una pantalla, es posible ver la imagen. La imagen de la derecha es virtual porque un observador situado a la derecha y mirando hacia la lente ve salir los rayos del punto A, donde no hay nada en realidad.

Sea o : distancia del objeto a la lente; i : distancia de la imagen a la lente. Mediante consideraciones geométricas es posible demostrar que estos dos parámetros se relacionan con la distancia focal f de la lente por la *fórmula de Gauss*

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

El *aumento* m de la lente se define por la relación (tamaño imagen)/(tamaño objeto) y resulta ser igual a:

$$m = -\frac{i}{o}$$

Estas expresiones son válidas para todas las lentes delgadas, siempre y cuando se considere el siguiente convenio de signos:

- o es siempre positivo
- i es (+) si la imagen está en el lado R, y (-) si está en el lado V
- f es (+) para lentes convergentes y (-) para lentes divergentes.

Ecuación del Fabricante de Lentes

La siguiente expresión relaciona la distancia focal de una lente con el índice de refracción del material con que está hecha y los radios de curvatura de sus superficies. Se conoce como *la ecuación del fabricante de lentes*.

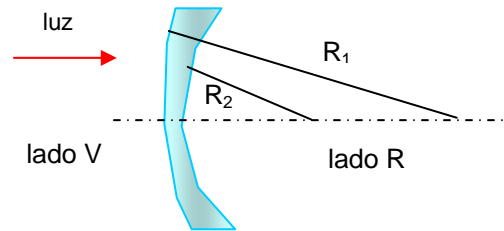
$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

En esta expresión,

- n : índice de refracción
- f : distancia focal
- R_1 : radio de curvatura de la superficie de la lente *más cercana al origen de luz*
- R_1 y R_2 son (+) si el centro de curvatura está en el lado R, y (-) si está en el lado V.
- En el ejemplo que se muestra, R_1 y R_2 son positivos. Además $R_1 > R_2$. Por tanto,

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} < 0$$

y, según la ecuación del fabricante, $f < 0$. Significa que la lente del ejemplo es una lente *divergente*.



Aberraciones de las Lentes

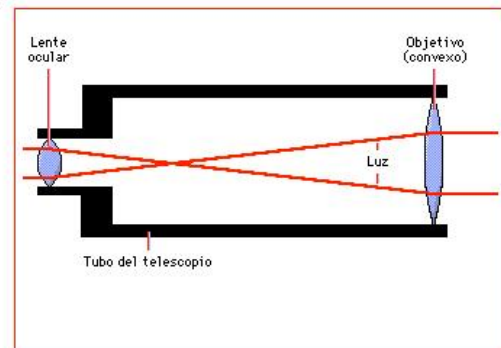
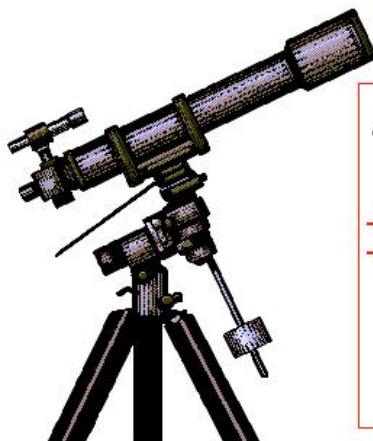
Se denominan así a las deformaciones de las imágenes que forman las lentes a causa de determinadas imperfecciones en su construcción. Se destacan dos tipos fundamentales de aberraciones: la aberración esférica y la aberración cromática.

Aberración esférica. Causada por la falta de esfericidad de la superficie (las superficies de la lente no son perfectamente esféricas). En este caso los rayos que pasan por una parte de la lente, digamos, por los bordes, se desvían más que los que pasan por el centro. Trae por consecuencia que las imágenes se ven borrosas o “desenfocadas”.

Aberración cromática. Se debe al hecho de que el índice de refracción no es el mismo para diferentes longitudes de onda; $n = n(\lambda)$. La luz proveniente de un objeto iluminado con luz blanca se descompone al atravesar la lente, y los bordes se ven difusos, con una cierta coloración.

Para corregir las aberraciones de las lentes se utilizan comúnmente combinaciones de lentes convergentes y divergentes, usualmente bastante complejas. Entre las aplicaciones más comunes de las lentes se encuentran los binoculares, microscopios, periscopios y telescopios.

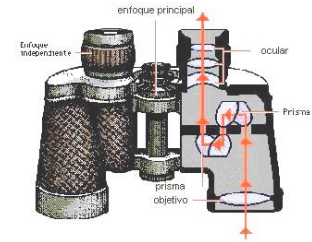
Telescopio astronómico refractor. El tipo de telescopio astronómico más sencillo tiene dos lentes. Ambas lentes son



convexas. La lente más cercana al objeto se llama *objetivo*. La luz de una fuente distante pasa por esta lente y llega a un foco como una imagen 'real' e invertida dentro del tubo del telescopio. La lente del *ocular* aumenta la imagen formada por el objetivo. En un telescopio astronómico, la imagen 'virtual' formada por el ocular queda invertida. Los oculares incluyen a menudo varias lentes, pero su acción es esencialmente la misma que la de las lentes convexas sencillas.

En un telescopio para observación terrestre se inserta una tercera lente para invertir la imagen por segunda vez, de modo que se pueda ver un objeto distante de forma correcta.

Binoculares. Los binoculares o prismáticos presentan una visión distinta para cada ojo; sus dos elementos funcionan de forma independiente, permitiendo al usuario una percepción profunda. En cada antejo se utilizan frecuentemente dos prismas para desviar el recorrido de la luz. Esto impide la inversión de la imagen que se formaría con la utilización única de dos lentes, y permite que el antejo pueda ser más pequeño. La percepción de profundidad aumenta cuando aumenta la distancia entre los objetivos



6.9 Curva de Sensibilidad Espectral

El ojo humano no posee la misma sensibilidad para todas las frecuencias de la radiación electromagnética visible. Tiene un máximo para el verde de longitud de onda 555 nm.

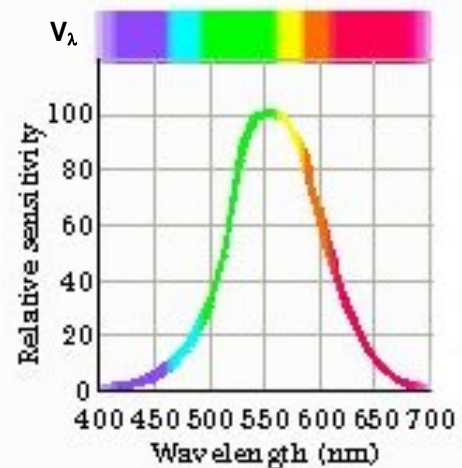
En la figura se muestra la *curva de sensibilidad espectral* del ojo humano. El *coeficiente de visibilidad* V_λ se define por la expresión

$$V_\lambda = \frac{W_m}{W_\lambda} \cdot 100$$

donde:

W_λ : potencia emitida por una fuente monocromática de longitud de onda λ .

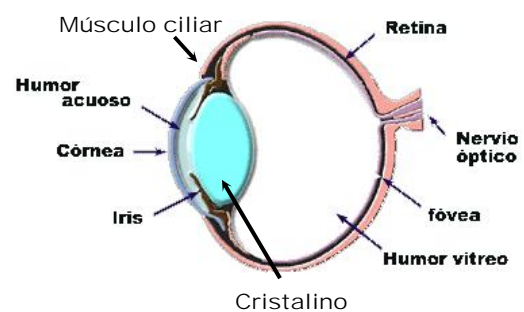
W_m : potencia emitida por una fuente con $\lambda = 555$ nm que produce en el ojo la misma sensación de brillantez.



El coeficiente de visibilidad es una magnitud subjetiva, pues depende directamente de las sensaciones psicofisiológicas del observador. Y algunas personas poseen un rango de visión más amplio que otras. Por esta razón la curva se calcula no para una, sino para muchas personas, y se toma un promedio estadístico. Las curvas que usualmente se reportan en los textos son el resultado de este procedimiento, llevado a convenios internacionales.

La curva de sensibilidad del ojo humano difiere bastante de la de muchos animales. Por ej., las abejas no distinguen la luz roja, pero son capaces de ver el ultravioleta, mientras que los pájaros son más sensibles a la luz roja.

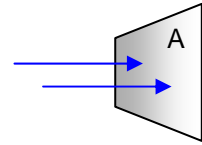
El ojo humano es un sistema complejo que permite la formación de imágenes en la retina con el auxilio de un lente convexa capaz de variar automáticamente su distancia focal (cristalino), haciendo uso de los músculos ciliares. También posee un diafragma (iris + pupila) que regula la entrada de luz, también en forma automática.



El ojo es un instrumento muy sensible. Se ha señalado que el ojo humano en condiciones óptimas es capaz de detectar, en una noche oscura y sin estrellas, la luz de una vela a 100 km de distancia.

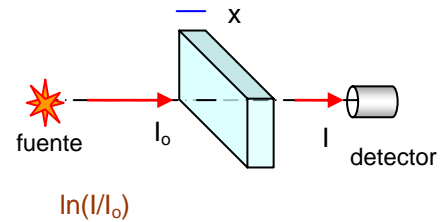
6.10 Absorción de la Luz

Cuando la luz atraviesa un medio semi-transparente, una parte se difunde (sección 6.11) y la restante es parcialmente absorbida por el medio. Para determinar las características de este proceso, definamos la *intensidad de la luz* como la energía que atraviesa la sección de área transversal en la unidad de tiempo (también conocido como *flujo luminoso ó flujo de energía*). En notación analítica:



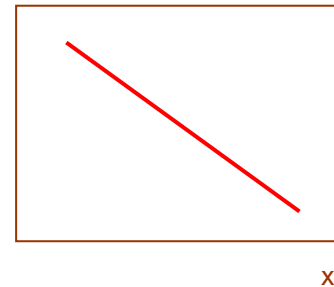
$$I = \frac{\epsilon}{At} \quad \text{Unidades: [J]/[m}^2\text{][s].}$$

Una vez definida la intensidad de la luz, consideremos el siguiente experimento. Si se calcula la relación entre la intensidad transmitida y la incidente (I/I_0) en función del espesor de la lámina (añadiendo láminas de diferentes espesores), se encuentra que el cociente disminuye exponencialmente. Cuando se grafica el logaritmo del cociente (I/I_0) en función de x , se obtiene una dependencia lineal como la que se representa en la figura.



Es posible expresar esta dependencia en forma analítica según

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = -kx$$



La expresión se conoce como *Ley de Lambert – Beer*. El parámetro k se denomina *coeficiente de absorción lineal*, y tiene dimensiones de longitud inversa (L^{-1}). Usualmente se expresa en cm^{-1} . La ley de Lambert-Beer puede ser escrita en forma exponencial. En ese caso se obtiene

$$I = I_0 e^{-kx}$$

La expresión se cumple para cualquier tipo de radiación luminosa, incluyendo los rayos X y los rayos γ . En la tabla siguiente aparecen algunos valores típicos de k para radiación visible (en realidad, el coeficiente k varía en dependencia de la frecuencia de la radiación. Usualmente la penetración de la radiación aumenta con la frecuencia.

Sustancia	$k(cm^{-1})$
aire	10^{-5}
vidrio	10^{-2}
metal (capa delgada)	10^4

Los metales en capas muy delgadas, del orden de μm , dejan pasar la luz. En los sólidos se cumple que $k = \alpha\rho$, donde ρ es la densidad de la sustancia. El parámetro α es el *coeficiente de absorción másico* y se usa comúnmente para caracterizar la absorción a los rayos X y la radiación γ de alta energía.

Absorción en Disoluciones

En una disolución no electrolítica suficientemente diluida, de forma tal que las moléculas del soluto prácticamente no interaccionen entre sí, se encuentra en la práctica que

$$k = \beta C$$

donde C es la *molaridad* de la disolución y β un coeficiente que depende de la frecuencia y del tipo de disolución. La ley de Beer es la base de muchos métodos de análisis para determinar la concentración de solutos en disoluciones de composición desconocida, utilizando luz visible o ultravioleta.

Efectos de la Absorción de la Luz

- **En la piel humana**

La luz visible e infrarroja causan el calentamiento superficial. La ultravioleta da origen a una reacción fotoquímica superficial, formando *melanina*, un pigmento oscuro que actúa como protección al absorber los rayos UV. La radiación UV es benéfica en dosis moderadas, pero es muy perjudicial en exceso. Tiene efecto acumulativo a lo largo de toda la vida.

- **Acción bactericida**

La radiación UV con $\lambda < 290$ nm mata las bacterias. Se usa en lámparas de cuarzo para descontaminar el aire, ya que el vidrio común absorbe fuertemente el UV en esa región de frecuencias. La componente de la radiación solar con $\lambda < 290$ nm es muy nociva para el organismo, pero es absorbida totalmente por la capa de ozono, y de ahí la importancia de la protección de esa capa.

- **Fotosíntesis**

La fotosíntesis es una reacción de oxidación-reducción de varios pasos o etapas, que puede representarse simbólicamente de la siguiente forma:



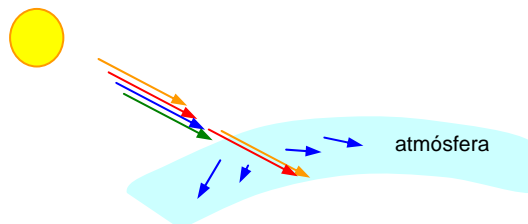
donde n es un número entero que se corresponde con la fórmula de algún hidrato de carbono (por ejemplo, para la glucosa, $n = 6$). La clorofila es el catalizador de la reacción.

La absorción de la luz en las plantas es muy selectiva. Prácticamente no se absorbe radiación en la región correspondiente a $520 < \lambda < 600$ nm (verde-amarillo-naranja) ni tampoco para $\lambda > 700$ nm (infrarrojo). Los máximos de absorción en la fotosíntesis se observan para $\lambda = 410\text{-}450$ nm (violeta) y para $\lambda = 640\text{-}680$ nm (rojo). La absorción en la fotosíntesis también depende de la temperatura. La temperatura óptima es de 25 a 28° C. El proceso se detiene totalmente a los 45°C.

6.11 Difusión de la Luz

Cuando la luz atraviesa cualquier medio, conjuntamente con la absorción tiene lugar el fenómeno de difusión (*scattering*¹).

Consiste en que al atravesar un medio sólido, líquido o gaseoso, la radiación electromagnética se esparce o difunde en todas direcciones, en mayor o menor grado. El fenómeno se debe a que la radiación incidente es capaz de excitar los átomos y moléculas que forman el medio en cuestión; los átomos excitados son capaces entonces de emitir ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias en todas direcciones.



Parte de la energía de la radiación incidente pasa así a ser radiada en otras direcciones, con la correspondiente disminución de la intensidad de la radiación incidente. Los modelos matemáticos basados en la teoría electromagnética de la luz, cuando se aplican a sustancias en fase gaseosa, muestran que *la intensidad de la luz difundida en la región visible del espectro aumenta con la frecuencia de la radiación incidente*. Si I_D es la intensidad difundida por unidad de longitud a lo largo de una dirección deter-

¹ En los textos en español a veces se traduce "scattering" como "dispersión", lo cual es totalmente correcto desde el punto de vista del idioma, pero tiende a confundir el fenómeno de difusión con el de la dispersión de la luz, estudiada en 6.5.

minada e I_0 la intensidad incidente a lo largo de esa dirección, entonces:

$$\frac{I_D}{I_0} \propto \omega^4$$

De aquí que en la atmósfera, por ejemplo, la radiación de alta frecuencia (tonos verdes y azules) se difunde mucho más que los tonos rojos y naranjas. Esta particularidad es la que hace que el sol se vea rojizo al amanecer y al atardecer. Cuando el sol está cercano al horizonte, los rayos emitidos deben recorrer una gran distancia a través de la atmósfera, y un observador en tierra, al mirar hacia el sol o hacia una nube donde incida la luz solar, no verá los tonos azules fuertemente atenuados por la difusión.

Si no existiera la difusión, en un día claro sin nubes el cielo se vería negro, tal como se ve en un vehículo orbital, y no azul como se ve comúnmente. Este color azul también tiene su origen en la difusión, pues mientras que la radiación de baja frecuencia viaja esencialmente en línea recta, un observador casual verá la radiación de mayor frecuencia incidiendo desde cualquier dirección.