

9. LA LUZ Y LA OPTICA GEOMETRICA

La óptica, o estudio de la luz, constituye un ejemplo de ciencia milenaria. Ya Arquímedes en el siglo III A.C. era capaz de utilizar con fines bélicos los conocimientos entonces disponibles sobre la marcha de los rayos luminosos a través de espejos y lentes. Sin planteamientos muy elaborados sobre cuál fuera su naturaleza, los antiguos aprendieron, primero, a observar la luz para conocer su comportamiento y, posteriormente, a utilizarla con diversos propósitos. Es a partir del siglo XVII con el surgimiento de la ciencia moderna, cuando el problema de la naturaleza de la luz cobra una importancia singular como objeto del conocimiento científico.

Fueron dos las primeras hipótesis que se formularon para explicar la naturaleza de los fenómenos luminosos: la hipótesis corpuscular, o de Newton, y la ondulatoria, sostenida por el holandés Cristian Huygens.

Según Newton, la luz estaba constituida por numerosos corpúsculos que emitían los cuerpos luminosos y que, al chocar con nuestra retina, la impresionaban, produciéndonos la sensación luminosa.

Huygens, por el contrario, opinaba que la luz no era otra cosa sino un fenómeno ondulatorio semejante al sonido y que su propagación era de la misma naturaleza que la de un frente de onda. Ambas teorías, podían explicar de igual manera los fenómenos luminosos entonces conocidos, esto es, la propagación rectilínea de la luz, la reflexión y la refracción de los rayos luminosos.

Pero, cuando más tarde se descubrió que, además de dichos fenómenos sencillos, la luz manifestaba otros más complejos, como los de interferencia y difracción, característicos de los movimientos ondulatorios, ya no se pudo seguir sosteniendo la teoría de la emisión de corpúsculos, a pesar de la tremenda influencia y autoridad de Newton, que la había supuesto y mantenido, pensándose entonces exclusivamente que la luz estaba compuesta por ondas.

Para poder entender, asimilar o comparar las ondas luminosas con otras ondas conocidas, el físico francés Fresnel pensó que el medio que las transmitía era una sustancia hipotética, elástica e imaginaria que, sin ser vista, llenaba el Universo, a la que se le dio el nombre de "éter". Las ondas luminosas serían pues, según esta teoría, ondas elásticas transversales del éter, con todas las propiedades características de este tipo de ondas. Claro está que este "éter" no tiene nada que ver con la sustancia que se conoce con el mismo nombre y que se usa como anestésico y disolvente.

Pero, aparte de lo forzado y poco natural de esta suposición, la consideración del éter como medio de propagación de la luz presentaba el grave inconveniente de que, para poder explicar el alto valor de la velocidad de propagación de la luz en dicho medio, y la transversalidad de las ondas, el éter debería presentar propiedades muy contradictorias, ya que tendría que ser, al mismo tiempo, de pequeñísima densidad y de enorme elasticidad, cosa difícil de imaginar.

Esta dificultad fue vencida finalmente, cuando Maxwell, no sólo demostró que la luz no era otra cosa que ondas electromagnéticas, con lo cual la hipótesis del éter ya no era necesaria. Maxwell no sólo demostró que la luz estaba formada por ondas electromagnéticas, sino que también tanto ella, como todas las demás, en el vacío se propagaban con la rapidez de 300000 km/s .

Fotometría:

Intensidad luminosa:

Si se observan los diferentes cuerpos luminosos se nota inmediatamente que la cantidad de luz que emiten no es la misma en todos ellos; así, es notable que el Sol emite más luz que un arco eléctrico, éste mas que un foco incandescente, este más que una vela, y ésta más que una luciérnaga.

Estas características de los cuerpos luminosos, recibe el nombre de intensidad luminosa (I) y para medirla la unidad usada en el Sistema Internacional de Unidades es la *candela*, que se define como:

Un cuerpo luminoso que tiene la intensidad de una candela (cd), emite 1/60 de la luz que produce un centímetro cuadrado de cuerpo negro, a la temperatura de fusión del platino.

Como se indicó, la intensidad varía mucho de unos cuerpos luminosos a otros, por ejemplo: la de un foco incandescente de 40 [watt] es de 40 candelas; la de una lámpara fluorescente de 40 [watt], de 350 candelas; la de una vela, de una candela; la del Sol, de $1,6 \cdot 10^5$ candelas por cada centímetro cuadrado, mientras que la de una luciérnaga es de unos cuantos milésimos de candela.

Iluminación:

En la práctica diaria, más importante que la intensidad luminosa, es la iluminación, esto es, la luz que reciben los cuerpos, ya que si se enciende un foco es para iluminar el libro que se lee, el entorno donde se trabaja, la mesa donde se escribe, etc.

Si se pone atención en el fenómeno de la iluminación, inmediatamente se nota que depende de dos factores: la intensidad del foco que ilumina y la distancia a que se encuentra del objeto iluminado.

Si se ilumina un cuerpo con diferentes focos luminosos, colocados a la misma distancia de él, se llega a la conclusión de que la iluminación que reciben los cuerpos es directamente proporcional a la intensidad luminosa del cuerpo que los ilumina; es decir, si la intensidad aumenta, la iluminación aumenta; mientras que si la intensidad disminuye, la iluminación disminuye. Observando los resultados experimentales, se notará que la misma cantidad de luz que emite $1[\text{cm}^2]$ a 10 [cm] de la fuente luminosa, se distribuye en una superficie de $4[\text{cm}^2]$, cuatro veces mayor, por lo que la iluminación es cuatro veces menor, cuando la superficie se encuentra a una distancia de 20 [cm]; lo mismo que en una superficie de $9[\text{cm}^2]$, nueve veces mayor, por lo que la iluminación es nueve veces menor, cuando la superficie se encuentra a una distancia triple, 30 [cm]. De lo anterior se deduce que la iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la cual comprueba la ley de Kepler de la iluminación:

La iluminación que recibe un cuerpo, es directamente proporcional a la intensidad del cuerpo luminoso que ilumina e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que se presenta entre el cuerpo luminoso y el cuerpo iluminado.

Si i representa la iluminación, I la intensidad luminosa y r la distancia del cuerpo luminoso al cuerpo iluminado:

$$i = \frac{I}{r^2} . \quad (9.1)$$

La unidad que se usa para medir la iluminación, es el lux ($[lx]$), que se define como:

Un lux es la iluminación que recibe una superficie colocada a un metro de un cuerpo luminoso, cuya intensidad es de una candela.

Para determinar la iluminación que reciben los cuerpos y la intensidad luminosa de las fuentes, se usan aparatos que reciben el nombre de *fotoímetros*.

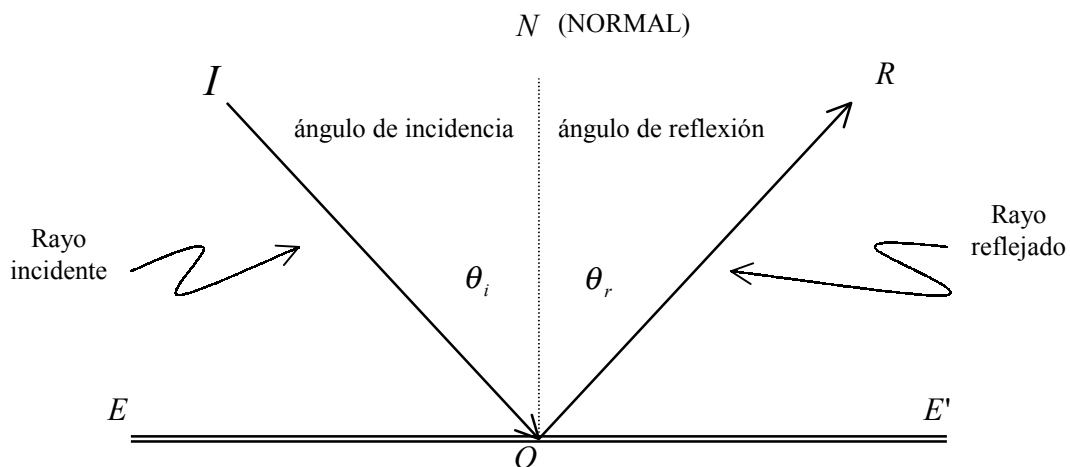
Reflexión de la luz:

La luz, por comportarse como una onda, al llegar a un obstáculo se refleja en él, es decir, regresa al lugar de donde provino. La reflexión de la luz puede efectuarse de dos maneras, a las que se les conoce con los nombres de: reflexión irregular o difusa, y reflexión regular o especular. Estas varían de acuerdo con las características de la superficie reflectora.

La *reflexión difusa* se da sobre los cuerpos de superficies más o menos rugosas. Este tipo de reflexión es muy importante porque hace posible que se vean los objetos que nos rodean, ya que, para que se vea algo, es necesario que se tengan rayos de luz entre el cuerpo de que se trate y el ojo que observa; así debido a la reflexión irregular, de todos los puntos luminosos e iluminados salen rayos en todas direcciones, algunos de los cuales van de dichos puntos a los ojos.

La *reflexión regular* tiene lugar cuando la superficie es perfectamente lisa. Un espejo o una lámina metálica pulimentada reflejan *ordenadamente* un haz de rayos conservando la forma del haz. La superficie reflectora se denomina superficie especular o espejo y se caracteriza porque los rayos que llegan en una dirección determinada se reflejan en otra dirección, también determinada. Claro está que las superficies especulares o espejos, en realidad no se ven; lo que se ve son las imágenes que producen.

Reflexión regular, Leyes de la reflexión de la luz:



La línea EE' representa un espejo plano. El rayo incidente, IO , es el rayo de luz que llega al espejo. El punto de incidencia, O , es el punto donde el rayo incidente llega al espejo y del que parte el rayo reflejado. El rayo reflejado, OR , es el rayo de luz que resulta del fenómeno. La normal, ON , es la línea imaginaria que, siendo perpendicular al espejo, pasa por el punto de incidencia.

El ángulo de incidencia, θ_i , es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal.

El ángulo de reflexión, θ_r , es el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal.

Se observa que, en todos los casos, los rayos y los ángulos verifican la ley de la reflexión de las ondas en general. Esta ley de la reflexión de la luz cuyo conocimiento es muy antiguo, casi tanto como las más antiguas leyes de la humanidad se puede enunciar en la forma:

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir:

$$\theta_i = \theta_r . \quad \text{ley de la reflexión)} \quad (9.2)$$

Imágenes:

Siempre que se observa un objeto por medio de un aparato de óptica, sencillo como un espejo plano, o complicado como un microscopio o un telescopio, lo que se ve no es el objeto sino su imagen con respecto a dicho aparato de óptica, imagen que puede ser del mismo tamaño que el objeto, más grande, pequeña, derecha, invertida y real o virtual.

Las imágenes se forman porque, cuando los rayos de luz que provienen de un objeto luminoso o iluminado llegan a un aparato de óptica, lo único que les sucede es que cambian de dirección.

Por convención, una imagen será real cuando los rayos reflejados tocan la imagen producida por el objeto y será una imagen virtual cuando no lo toque. Por ejemplo, cuando un individuo se coloca frente a un espejo plano, de todos sus puntos salen rayos de luz que llegan al espejo, cambian de dirección y se reflejan en direcciones divergentes por lo que no se cruzan, pero sus prolongaciones sí lo hacen precisamente donde se forma su imagen, la cual se encuentra detrás del espejo, y no se puede recibir en una pantalla, característica que distingue, como ya indicamos, a las imágenes virtuales.

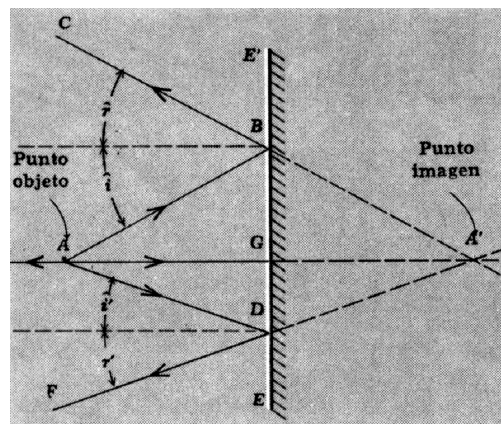


Fig. Imagen (A') de un objeto (A) en un espejo plano EE'.

A pesar de usar la palabra “virtual”, se sabe, por la experiencia cotidiana, qué tan “real” puede parecer una imagen virtual y qué tan definida es su localización en el espacio que se encuentra por detrás del espejo; aunque este espacio pueda, de hecho, estar ocupado por una pared de ladrillos. Las imágenes en un espejo plano defieren de los objetos en el hecho de que la izquierda se intercambia por la derecha. Así por ejemplo, si se hace girar un trompo en el mismo sentido de rotación de las manecillas de un reloj, su imagen vista a través de un espejo vertical plano, girará en contra de las manecillas del reloj.

En la figura anterior, la geometría elemental demuestra que los ángulos DAB y BA'D son iguales. Por lo tanto, los triángulos rectángulos DABD y DA'BD son congruentes. Llamando a la distancia AG, “distancia objeto o ”; a la distancia A'G, “distancia imagen i ” encontramos:

$$o = -i , \quad (9.3)$$

en la cual el signo menos se introduce arbitrariamente para indicar que A y A' se encuentran en los lados opuestos del espejo.

Espejos esféricos:

Entre los espejos que no son planos, los más importantes son los esféricos, es decir, aquellos cuya forma corresponde a un casquete esférico, o sea la superficie que resulta cuando una esfera se corta con un plano.

Los espejos esféricos pueden ser de dos clases: cóncavos, que reflejan la luz por dentro, y los convexos, que son los que lo hacen por fuera.

Para poder estudiar los fenómenos ópticos que se presentan en los espejos esféricos, se necesita considerar las características que se indicarán en seguida. Como estas características son las mismas para los espejos cóncavos y convexos, se indicarán en una sola figura.

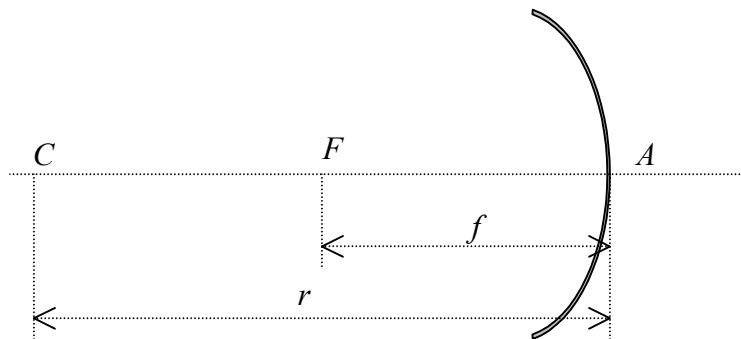


Fig.: Características de los espejos curvos.

El vértice: Es el centro A del espejo.

Centro de curvatura: Es el centro de la esfera de la que es parte el espejo considerado, C . La distancia entre el vértice A y el centro de curvatura es r .

Eje principal o eje del espejo: Es la recta CA que pasa por el centro de curvatura y el vértice.

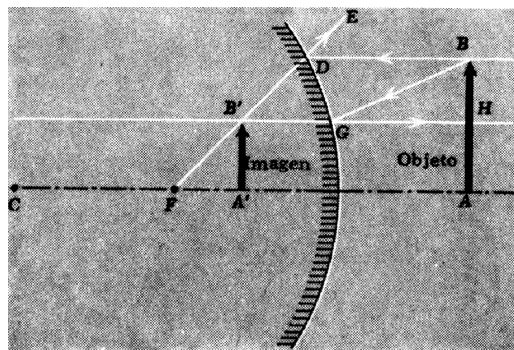
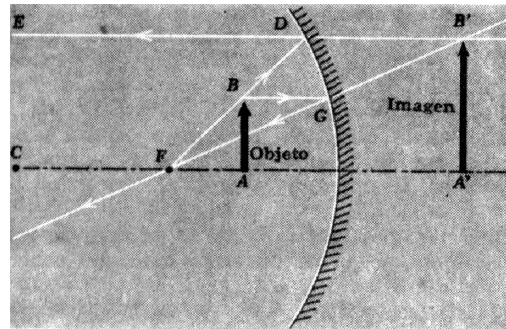
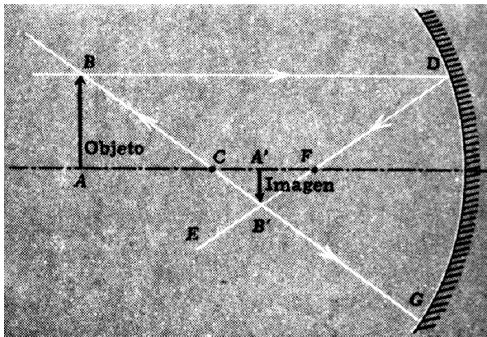
Foco F : es el punto que se encuentra a la mitad de la distancia entre el centro de curvatura y el vértice. Se define como el punto imagen cuando sobre un espejo incide luz paralela a su eje (objeto muy distante). La distancia entre el punto focal F y el vértice A se denomina distancia focal f .

Podemos encontrar gráficamente la imagen de cualquier punto fuera del eje, utilizando los siguientes procedimientos:

- Un rayo que incide en el espejo después de haber pasado (o su prolongación) a través del centro de curvatura C , regresa a través de su mismo camino. Esto se debe a que tal rayo es perpendicular al espejo y por la ley de la reflexión si el ángulo de incidencia es cero, el de reflexión también será nulo.
- Un rayo que incide en el espejo paralelo a su eje, pasa (o su prolongación) a través del punto focal F .

- Un rayo que incide en el espejo después de pasar (el rayo o su prolongación) a través del punto focal, emerge paralelo al eje.

Las figuras que a continuación se muestran indican las imágenes producidas por espejos cóncavos y convexos. Note que para uno cóncavo, si el objeto está entre delante del foco, la imagen será real, pero si el objeto está entre el foco y el espejo, la imagen será virtual. Un espejo convexo siempre produce una imagen virtual y de tamaño más pequeño que el objeto.



Figs: Imágenes de un cuerpo en espejos esféricos cóncavo y convexo.

Por otro lado, un cálculo más laborioso de la geometría producida por los rayos de luz que inciden y se reflejan a un espejo es posible encontrar una ecuación que relaciona las distancias objeto e imagen. La ecuación encontrada, conocida como la ecuación de los espejos es:

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}, \quad (9.4)$$

donde el convenio de signos utilizados es el siguiente:

Observamos primero el lado del espejo en la cual incide la luz. Debido que el espejo es opaco, la luz debe permanecer en este lado después de reflejarse y si se forma una imagen esta será real. Por lo tanto, el lado del espejo del cual proviene la luz se llama lado R (la R por imagen real). La parte posterior del espejo recibe el nombre de lado V (la V por imagen virtual) debido a que las imágenes formadas en ese lado del espejo deben ser virtuales, ya que no existe luz en ese lado.

1. La distancia imagen i es positiva si la imagen (real) se encuentra en el lado R del espejo; i es negativa si la imagen (virtual) se encuentra en el lado V del espejo.
2. El radio de curvatura r y la distancia focal f son positivas si el centro de curvatura C del espejo está en el lado R ; r y f negativos si el centro de curvatura se encuentra en el lado V .

De esta forma un espejo cóncavo posee un radio de curvatura y distancia focal positiva y para uno convexo estas cantidades son negativas.

Aumento Lateral (m):

La figura muestra a un rayo que se origina en la punta de una vela que sirve como objeto. Este se refleja en el punto v y pasa a través de la punta de la vela imagen. La ley de la reflexión implica que este rayo forma ángulos iguales con el eje del espejo, tal como se muestra. Para los triángulos semejantes de la figura se puede escribir,

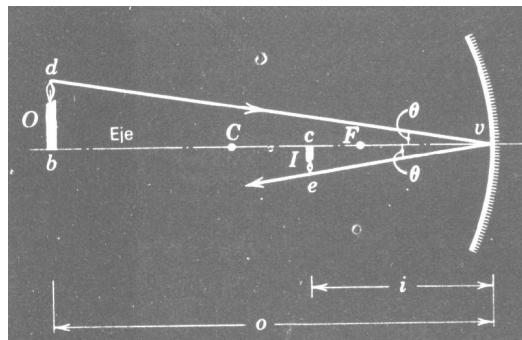


Fig. La posición de la imagen de un objeto extendido como el de una vela.

$$\frac{ce}{bd} = \frac{vc}{vb}.$$

La cantidad de la izquierda, sin considerar el signo, es el aumento lateral m del espejo. Como se desea representar una imagen invertida por un aumento negativo, en este caso se define arbitrariamente a m como $-(ce/bd)$. Como $vc = i$ y $vb = o$, se tiene de inmediato, que

$$m = -\frac{i}{o} . \quad (9.5)$$

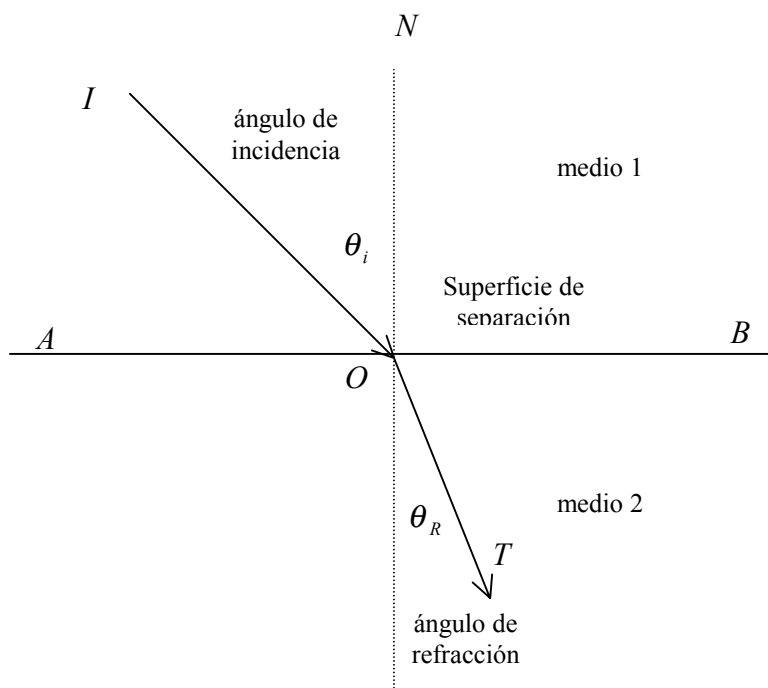
Esta ecuación determina, en todos los casos, el aumento producido por los espejos esféricos y planos. En un espejo plano, $o = -i$ y el aumento predicho es de +1, de acuerdo con nuestra experiencia, indica que la imagen será derecha y del mismo tamaño que el objeto.

Refracción de la luz:

Al observar cómo se comporta la luz, frecuentemente se producen fenómenos interesantes que se deben a la refracción. Por ejemplo, al introducir una varilla recta en el agua, parece que se quiebra donde se encuentra la superficie del líquido; en las lentes, las imágenes de los objetos se ven más grandes o más pequeñas, derechas o invertidas, según sea el caso.

El fenómeno de la refracción de la luz consiste en que cuándo la luz llega a la superficie de separación entre dos sustancias diferentes, cambia de dirección, con la excepción del caso en que la luz llega perpendicular a dicha superficie.

Para estudiar este fenómeno, es necesario tener en cuenta los factores que se indican gráficamente.



La superficie de separación o interfase AB, es la que se presenta entre las dos sustancias que intervienen.

El rayo incidente IO , es el rayo de luz que se estudia y llega a la superficie de separación.

El punto de incidencia O , es el punto en que el rayo incidente llega a la superficie de separación.

El rayo refractado o transmitido OT , es el rayo de luz que resulta del fenómeno.

La normal NO , es la recta, perpendicular a la superficie de separación y que pasa por el punto de incidencia, la cual como la luz pasa al otro lado de la superficie de separación, se prolonga hacia dicho lado.

El ángulo de incidencia θ_i , es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal.

El ángulo de refracción o transmitido θ_R es el ángulo que forma el rayo refractado con la normal.

La razón por la que los rayos de todos los movimientos ondulatorios cambian de dirección al refractarse se debe al cambio de velocidad al pasar de un medio o sustancia a otro. Al considerar los valores de los ángulos de incidencia y de refracción correspondientes, se comprueban las reglas de la refracción de la luz:

Cuando la luz pasa de un medio “menos denso” a otro “más denso”, se acerca a la normal, es decir, el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción.

Cuando la luz pasa de una sustancia más densa a otra menos densa, se aleja de la normal, es decir, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de refracción.

Si se observan las condiciones en que se realizan los fenómenos de la refracción de la luz, junto con los valores de los coeficientes del seno del ángulo de incidencia, entre el seno del ángulo de refracción correspondiente, se comprueban las leyes de la refracción de la luz, que se pueden indicar en la forma siguiente:

1. *El rayo incidente, la normal y el rayo refractado, se encuentran sobre el mismo plano.*
2. *Ley de Snell). El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, es constante para cada par de sustancia, y recibe el nombre de índice de refracción relativo.*

De esta forma, si el rayo de luz incide en un medio 1, con índice de refracción absoluto n_1 , refractándose en un medio 2, con índice de refracción absoluto n_2 , la ley de Snell se escribe como:

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{\text{sen}(\theta_R)} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (\text{ley de Snell}) \quad (9.6)$$

donde n_{21} es el índice de refracción del medio 2 relativo al medio 1.

Observación:

Para toda clase de ondas, la velocidad de propagación depende de las propiedades que posea el medio. Por ejemplo, para ondas producidas en una cuerda elástica, la velocidad de propagación depende de la tensión aplicada a la cuerda, su masa y largo. Para una onda electromagnética, como es el caso de la luz, la velocidad de propagación depende de 2 cantidades físicas llamadas permitividad eléctrica ϵ y la permeabilidad magnética μ donde,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}. \quad (9.7)$$

Si el medio por el cual se propaga la luz es el vacío, donde $\varepsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} [C^2/N \cdot m^2]$ y $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [T \cdot m/A]$,

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right],$$

que corresponde a la velocidad de la luz en el vacío. Para cualquier otro medio, $v < c$ ya que las respectivas permitividades eléctricas y permeabilidad magnética aumentan de valor en otro medio con respecto al vacío.

En óptica se suele comparar la velocidad de la luz en un medio transparente con la velocidad de la luz en el vacío, mediante el llamado *índice de refracción absoluto* n del medio: se define como el cociente entre la velocidad c de la luz en el vacío y la velocidad v de la luz en el medio, es decir:

$$\frac{c}{v} = n.$$

De esta forma si un medio 1 tiene un índice de refracción absoluto n_1 , y otro medio 2 uno n_2 , el índice de refracción relativo será:

$$\frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (9.8)$$

La tabla que a continuación se da, contiene los índices de refracción absolutos, es decir, el cociente c/v para algunas sustancias o medios. Por ejemplo, como $n_{\text{agua}} = 1,33 = c/v$, resulta que la velocidad de propagación de la luz en el agua es $v = c/1,33 = 2,26 \cdot 10^8 [m/s]$, en el diamante, $v = c/2,42 = 1,24 \cdot 10^8 [m/s]$, etc.

MEDIO	n
Vacío	1
Acetona	1,36
Agua	1,33
Alcohol	1,36
Benceno	1,5
Cloruro(deSodio)	1,53
Cuarzo(fundido)	1,46
Diamante	2,42
Lucita	1,51
Sulfuro(deCarbono)	1,63
Vidrio(óptico)	1,52
Yoduro(deMetileno)	1,74

Tabla: Índices de refracción absolutos para algunas sustancias