

INTRO.LA LUZ Y LA ÓPTICA GEOMETRICA

La óptica se ocupa del estudio de la luz, de sus características y de sus manifestaciones. La reflexión y la refracción por un lado, y las interferencias y la difracción por otro, son algunos, de los fenómenos ópticos fundamentales. Los primeros pueden estudiarse siguiendo la marcha de los rayos luminosos. Los segundos se interpretan recurriendo a la descripción en forma de onda. El conocimiento de las leyes de la óptica permite comprender cómo y por qué se forman esas imágenes, que constituyen para el hombre la representación más valiosa de su mundo exterior.

«Una casa o un árbol proyectando sombra en un día soleado, un espejo o la superficie de un estanque devolviendo nuestra propia imagen, la apariencia quebrada de una varilla parcialmente sumergida en el agua, la ilusión de presencia de agua sobre el asfalto recalentado, el arco iris cruzando el cielo después de una tormenta, son parte de las incontables experiencias visuales que responden a tres simples leyes empíricas» (B. Rossi).

La óptica, o estudio de la luz, constituye un ejemplo de ciencia milenaria. Ya Arquímedes en el siglo III antes de Cristo 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.

La orientación de este capítulo respetará, en cierta medida, la sabia indicación de la evolución histórica sobre el estudio de la luz, y dará prioridad a lo que es la óptica geométrica: el estudio del comportamiento de haces y rayos luminosos ante espejos o a su paso por medios transparentes como láminas, prismas o lentes. El problema de lo que es la luz, o dicho de otra forma, las descripciones de su naturaleza mediante modelos científicos, se planteará en la última parte.

LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La luz emitida por las fuentes luminosas es capaz de viajar a través de materia o en ausencia de ella, aunque no todos los medios permiten que la luz se propague a su través.

Desde este punto de vista, las diferentes sustancias materiales se pueden clasificar en *opacas*, *transparentes* y *traslúcidas*. Aunque la luz es incapaz de traspasar las opacas, puede atravesar las otras. Las sustancias transparentes tienen, además, la propiedad de que la luz sigue en su interior una sola dirección. Éste es el caso del agua, el vidrio o el aire. En cambio, en las translúcidas la luz se dispersa, lo que da lugar a que a través de ellas no se puedan ver las imágenes con nitidez. El papel vegetal o el cristal esmerilado constituyen algunos ejemplos de objetos translúcidos.

En un medio que además de ser transparente sea homogéneo, es decir, que mantenga propiedades idénticas en cualquier punto del mismo, la luz se propaga en línea recta. Esta característica, conocida desde la antigüedad, constituye una *ley fundamental* de la óptica geométrica. Dado que la luz se propaga en línea recta, para estudiar los fenómenos ópticos de forma sencilla, se acude a algunas simplificaciones útiles. Así, las fuentes luminosas se consideran *puntuales*, esto es, como si estuvieran concentradas en un punto, del cual emergen *rayos de luz* o líneas rectas que representan las direcciones de propagación. Un conjunto de rayos que parten de una misma fuente se denomina *haz*. Cuando la fuente se encuentra muy alejada del punto de observación, a efectos prácticos, los haces se consideran formados por rayos paralelos. Si por el contrario la fuente está próxima la forma del haz es cónica.

Velocidad e índice de refracción

La velocidad con que la luz se propaga a través de un medio homogéneo y transparente es una constante característica de dicho medio, y por tanto, cambia de un medio a otro. En la antigüedad se pensaba que su valor era infinito, lo que explicaba su propagación instantánea.

Debido a su enorme magnitud la medida de la velocidad de la luz c ha requerido la invención de procedimientos ingeniosos que superarán el inconveniente que suponen las cortas distancias terrestres en relación con tan extraordinaria rapidez. Métodos astronómicos y métodos terrestres han ido dando resultados cada vez más próximos. En la actualidad se acepta para la velocidad de la luz en el vacío el valor $c = 300\,000$ km/s. En cualquier medio material transparente la luz se propaga con una velocidad que es siempre inferior a c . Así, por ejemplo, en el agua lo hace a 225 000 km/s y en el vidrio a 195 000 km/s.

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:

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

(14.1)

Dado que c es siempre mayor que v , n resulta siempre mayor o igual que la unidad. Conforme se deduce de la propia definición *cuanto mayor sea el índice de refracción absoluto de una sustancia tanto más lentamente viajará la luz por su interior*.

Si lo que se pretende es comparar las velocidades v_1 y v_2 de dos medios diferentes se define entonces el *índice de refracción relativo del medio 1 respecto del 2* como cociente entre ambas:

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2}$$

(14.2)

o en términos de índices de refracción absolutos,

$$n_{12} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

(14.3)

Un índice de refracción relativo n_{12} menor que 1 indica que en el segundo medio la luz se mueve más rápidamente que en el primero.

La reflexión de la luz

Al igual que la reflexión de las ondas sonoras, la reflexión luminosa es un fenómeno en virtud del cual la luz al incidir sobre la superficie de los cuerpos cambia de dirección, invirtiéndose el sentido de su propagación. En cierto modo se podría comparar con el rebote que sufre una bola de billar cuando es lanzada contra una de las bandas de la mesa.

La visión de los objetos se lleva a cabo precisamente gracias al fenómeno de la reflexión. Un objeto cualquiera, a menos que no sea una fuente en sí mismo, permanecerá invisible en tanto no sea iluminado. Los rayos luminosos que provienen de la fuente se reflejan en la superficie del objeto y revelan al observador los detalles de su forma y su tamaño.

De acuerdo con las características de la superficie reflectora, la reflexión luminosa puede ser regular o difusa. 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 *reflexión difusa* se da sobre los cuerpos de superficies más o menos rugosas.

En ellas un haz paralelo, al reflejarse, se dispersa orientándose los rayos en direcciones diferentes. Ésta es la razón por la que un espejo es capaz de reflejar la imagen de otro objeto en tanto que una piedra, por ejemplo, sólo refleja su propia imagen.

Sobre la base de las observaciones antiguas se establecieron las leyes que rigen el comportamiento de la luz en la reflexión regular o especular. Se denominan genéricamente *leyes de la reflexión*.

Si S es una superficie especular (representada por una línea recta rayada del lado en que no existe la reflexión), se denomina *rayo incidente* al que llega a S , *rayo reflejado* al que emerge de ella como resultado de la reflexión y punto de incidencia O al punto de corte del rayo incidente con la superficie S . La recta N , perpendicular a S por el punto de incidencia, se denomina *normal*.

El *ángulo de incidencia* e es el formado por el rayo incidente y la normal. El *ángulo de reflexión* e' es el que forma la normal y el rayo reflejado. Con la ayuda de estos conceptos auxiliares pueden anunciarse las leyes de la reflexión en los siguientes términos:

1.^a Ley. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran sobre un mismo plano.

2.^a Ley. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ($e = e'$).

La refracción de la luz

Se denomina refracción luminosa al cambio que experimenta la dirección de propagación de la luz cuando atraviesa oblicuamente la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza. Las lentes, las máquinas fotográficas, el ojo humano y, en general, la mayor parte de los instrumentos ópticos basan su funcionamiento en este fenómeno óptico.

El fenómeno de la refracción va, en general, acompañado de una reflexión, más o menos débil, producida en la superficie que limita los dos medios transparentes. El haz, al llegar a esa superficie límite, en parte se refleja y en parte se refracta, lo cual implica que los haces reflejado y refractado tendrán menos intensidad luminosa que el rayo incidente. Dicho reparto de intensidad se produce en una proporción que depende de las características de los medios en contacto y del ángulo de incidencia respecto de la superficie límite. A pesar de esta circunstancia, es posible fijar la atención únicamente en el fenómeno de la refracción para analizar sus características.

Las leyes de la refracción

Al igual que las leyes de la reflexión, las de la refracción poseen un fundamento experimental. Junto con los conceptos de rayo incidente, normal y ángulo de incidencia, es necesario considerar ahora el rayo refractado y el ángulo de refracción o ángulo que forma la normal y el rayo refractado.

Sean 1 y 2 dos medios transparentes en contacto que son atravesados por un rayo luminoso en el sentido de 1 a 2 y e_1 y e_2 los ángulos de incidencia y refracción respectivamente. Las leyes que rigen el fenómeno de la refracción pueden, entonces, expresarse en la forma:

1.^a Ley. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.

2.^a Ley. (ley de Snell) Los senos de los ángulos de incidencia e_1 y de refracción e_2 son directamente proporcionales a las velocidades de propagación v_1 y v_2 de la luz en los respectivos medios.

$$\frac{\text{sen } e_1}{\text{sen } e_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

(14.4)

Recordando que índice de refracción y velocidad son inversamente proporcionales (ecuación 14.1) la segunda ley de la refracción se puede escribir en función de los índices de refracción en la forma:

$$\frac{\text{sen } e_1}{\text{sen } e_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

o en otros términos:

$$n_1 \cdot \text{sen } e_1 = n_2 \cdot \text{sen } e_2 = \text{cte} \quad (14.5)$$

Esto indica que el producto del seno del ángulo e por el índice de refracción del medio correspondiente es una cantidad constante y, por tanto, los valores de n y $\text{sen } e$ para un mismo medio son inversamente proporcionales.

Debido a que la función trigonométrica seno es creciente para ángulos menores de 90° , de la última ecuación (14.5) se deduce que si el índice de refracción n_1 del primer medio es mayor que el del segundo n_2 , el ángulo de refracción e_2 es mayor que el de incidencia e_1 y, por tanto, *el rayo refractado se aleja de la normal*.

Por el contrario, si el índice de refracción n_1 del primer medio es menor que el del segundo n_2 , el ángulo de refracción e_2 es menor que el de incidencia e_1 y *el rayo refractado se acerca a la normal*.

Estas reglas prácticas que se deducen de la ecuación (14.5) son de mucha utilidad en la representación de la marcha de los rayos, operación imprescindible en el estudio de cualquier fenómeno óptico desde la perspectiva de la óptica geométrica.

La refringencia de un medio transparente viene medida por su índice de refracción. Los medios más refringentes son aquellos en los que la luz se propaga a menor velocidad; se dice también que tienen una mayor *densidad óptica*. Por regla general, la refringencia de un medio va ligada a su densidad de materia, pues la luz encontrará más dificultades para propagarse cuanta mayor cantidad de materia haya de atravesar para una misma distancia. Así pues, a mayor densidad, menor velocidad y mayor índice de refracción o grado de refringencia.

LA PRIMERA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

En el año 1672 el astrónomo danés Olaf Roëmer consiguió realizar la primera determinación de la velocidad de la luz, considerando para ello distancias interplanetarias. Al estudiar el periodo de revolución de un satélite (tiempo que emplea en describir una órbita completa) del planeta Júpiter, observó que variaba con la época del año entre dos valores extremos. Roëmer interpretó este hecho como consecuencia de que la Tierra, debido a su movimiento de traslación en torno al Sol, no se encontraba siempre a la misma distancia del satélite, sino que ésta variaba a lo largo del año. Los intervalos medidos representaban realmente la suma del periodo de revolución más el tiempo empleado por la luz en recorrer la distancia entre el satélite y la Tierra. Por esta razón la luz procedente del satélite tardaría más tiempo en llegar al observador cuando éste se encontrase en la posición más alejada, lo que se traduciría en un intervalo de tiempo algo más largo.

La diferencia entre los correspondientes tiempos extremos sería, entonces, el tiempo empleado por la luz en recorrer el diámetro de la órbita terrestre en torno al Sol. Dado que en su época éste se estimaba en 300 000 000 km y el resultado de dicha diferencia resultó ser de 1 320 segundos, Roëmer, mediante el siguiente cálculo cinemática sencillo,

$$c = \frac{s}{t} = \frac{300 \cdot 10^6 \text{ km}}{1\,320 \text{ s}} \approx 227\,000 \text{ km/s}$$

obtuvo una primera medida del valor de la velocidad c de la luz en el vacío. El valor más preciso obtenido por este método es de 301 500 km/s.

APLICACIÓN DE LA LEY DE SNELL

Cálculo de la velocidad de la luz en un medio

Un haz luminoso incide sobre la superficie de un medio cristalino en contacto con el aire formando un ángulo de 30° con la normal a la superficie. Si el ángulo de refracción resultante es de 22° , ¿cuál es la velocidad de la luz en ese medio? (velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

De acuerdo con la ley de Snell:

$$n_1 \cdot \sin e_1 = n_2 \cdot \sin e_2$$

o en función de las velocidades:

$$\frac{c}{v_1} \cdot \sin e_1 = \frac{c}{v_2} \cdot \sin e_2$$

En este caso el medio 1 es el aire y, por tanto, $v_1 = c$, de modo que

$$v_2 = c \frac{\sin e_2}{\sin e_1} = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,75 = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

ÁNGULO LÍMITE Y REFLEXIÓN TOTAL

Cuando un haz luminoso alcanza la superficie de separación de dos medios transparentes, en parte refracta y en parte se refleja. Si el sentido de la propagación es del medio más refringente al medio menos refringente, el rayo refractado, de acuerdo con la ley de Snell, se alejará de la normal. Eso implica que si se aumenta progresivamente el ángulo de incidencia, el rayo refractado se desviará cada vez más de la normal, aproximándose a la superficie límite hasta coincidir con ella. El valor del ángulo de incidencia que da lugar a este tipo de refracción recibe el nombre de ángulo límite e_L .

La determinación del ángulo límite e_L puede hacerse a partir de la ley de Snell. Dado que el ángulo de refracción que corresponde al ángulo límite vale 90° , se tendrá:

$$n_1 \sin e_L = n_2 \sin 90^\circ = n_2 ; \sin e_L = (n_2/n_1)$$

$$e_L = \arcsen (n_2/n_1)$$

La expresión anterior pone de manifiesto que sólo cuando n_2 sea menor que n_1 tiene sentido hablar ángulo límite, de lo contrario ($n_2 > n_1$) el cociente n_2/n_1 sería mayor que la unidad, con lo que e_L no podría

definirse, ya que el seno de un ángulo no puede ser mayor que uno.

Para ángulos de incidencias superiores al ángulo límite no hay refracción, sino sólo reflexión, y el fenómeno se conoce como reflexión interna total. También la reflexión total puede ser explicada a partir de la ley de Snell, Puesto que $\sin e_2 \leq 1$

1, la segunda ley de la refracción se podrá escribir en la forma:

$$\frac{n_1}{n_2} \sin e_1 = \sin e_2 \leq 1$$

o lo que es lo mismo:

$$\sin e_1 \leq \frac{n_2}{n_1}$$

pero n_2/n_1 es precisamente $\sin e_L$ y, por tanto:

$\sin e_1 \leq \sin e_L$, lo que supone que $e_2 \leq e_L$

o en otros términos, la ley de Snell sólo se satisface, si n_2 es mayor que n_1 , para ángulos de incidencia menores o iguales al ángulo límite. Para ángulos de incidencia mayores, la refracción no es posible y se produce la reflexión interna total.

OBJETOS E IMÁGENES

En ocasiones los rayos de luz que, procedentes de un objeto, alcanzan el ojo humano y forman una imagen en él, han sufrido transformaciones intermedias debidas a fenómenos ópticos tales como la reflexión o la refracción. Todos los aparatos ópticos, desde el más sencillo espejo plano al más complicado telescopio, proporcionan imágenes más o menos modificadas de los objetos.

La determinación de las relaciones existentes entre un objeto y su imagen correspondiente, obtenida a través de cualquiera de estos elementos o sistemas ópticos, es uno de los propósitos de la óptica geométrica. Su análisis riguroso se efectúa, en forma matemática, manejando convenientemente el carácter rectilíneo de la propagación luminosa junto con las leyes de la reflexión y de la refracción. Pero también es posible efectuar un estudio gráfico de carácter práctico utilizando *diagramas de rayos*, los cuales representan la marcha de los rayos luminosos a través del espacio que separa el objeto de la imagen.

Espejos

Formación de imágenes en espejos planos: conforme se deduce de las leyes de la reflexión, la imagen P' de un punto objeto P respecto de un espejo plano S' estará situada al otro lado de la superficie reflectora a igual distancia de ella que el punto objeto P . Además la línea que une el punto objeto P con su imagen P' es perpendicular al espejo. Es decir, P y P' son simétricos respecto de S ; si se repite este procedimiento de construcción para cualquier objeto punto por punto, se tiene la imagen simétrica del objeto respecto del plano del espejo.

Dicha imagen está formada, no por los propios rayos, sino por sus prolongaciones. En casos como éste se dice que la imagen es *virtual*. Sin embargo, la reflexión en el espejo plano no invierte la posición del objeto. Se

trata entonces de una imagen directa. En resumen, la *imagen formada en un espejo plano es virtual, directa y de igual tamaño que el objeto*.

Formación de imágenes en espejos esféricos: Los espejos esféricos tienen la forma de la superficie que resulta cuando una esfera es cortada por un plano. Si la superficie reflectora está situada en la cara interior de la esfera se dice que el espejo es *cóncavo*. Si está situada en la cara exterior se denomina *convexo*. Las características ópticas fundamentales de todo espejo esférico son las siguientes:

Centro de curvatura C: Es el centro de la superficie esférica que constituye el espejo.

Radio de curvatura R: Es el radio de dicha superficie.

Vértice V: Coincide con el centro del espejo.

Eje principal: Es la recta que une el centro de curvatura *C* con el vértice *V*.

Foco: Es un punto del eje por el que pasan o donde convergen todos los rayos reflejados que inciden paralelamente al eje. En los espejos esféricos se encuentra en el punto medio entre el centro de curvatura y el vértice.

Cuando un rayo incidente pasa por el centro de curvatura, el rayo reflejado recorre el mismo camino, pero en sentido inverso debido a que la incidencia es normal o perpendicular.

Asimismo, cuando un rayo incide paralelamente al eje, el rayo reflejado pasa por el foco, y, viceversa, si el rayo incidente pasa por el foco el reflejado marcha paralelamente al eje. Es ésta una propiedad fundamental de los rayos luminosos que se conoce como *reversibilidad*.

Con estas reglas, que son consecuencia inmediata de las leyes de la reflexión, es posible construir la imagen de un objeto situado sobre el eje principal cualquiera que sea su posición. Basta trazar dos rayos incidentes que, emergiendo del extremo superior del objeto discurren uno paralelamente al eje y el otro pasando por el centro de curvatura *C*; el extremo superior del objeto vendrá determinado por el punto en el que ambos rayos convergen. Cuando la imagen se forma de la convergencia de los rayos y no de sus prolongaciones se dice que la imagen es *real*.

En la construcción de imágenes en *espejos cóncavos* y según sea la posición del objeto, se pueden plantear tres situaciones diferentes que pueden ser analizadas mediante diagramas de rayos:

- a) El objeto está situado respecto del eje más allá del centro de curvatura *C*. En tal caso la imagen formada es real, invertida y de menor tamaño que el objeto.
- b) El objeto está situado entre el centro de curvatura *C* y el foco *F*. La imagen resulta entonces real, invertida y de mayor tamaño que el objeto.
- c) El objeto está situado entre el foco *F* y el vértice *V*. El resultado es una imagen virtual, directa y de mayor tamaño que el objeto.

Para espejos convexos sucede que cualquiera que fuere la distancia del objeto al vértice del espejo la imagen es *virtual, directa y de mayor tamaño*. Dicho resultado puede comprobarse efectuando la construcción de imágenes mediante diagramas de rayos de acuerdo con los criterios anteriormente expuestos.

Láminas y prismas

La luz en las láminas. Cuando la luz atraviesa una lámina de material transparente el rayo principal sufre dos refracciones, pues encuentra en su camino dos superficies de separación diferentes. El estudio de la marcha de los rayos cuando la lámina es de caras planas y paralelas, resulta especialmente sencillo y permite familiarizarse de forma práctica con el fenómeno de la refracción luminosa.

En una lámina de vidrio de estas características las normales N y N' a las superficies límites S y S' son también paralelas, por lo que el ángulo de refracción respecto de la primera superficie coincidirá con el de incidencia respecto de la segunda. Si además la lámina está sumergida en un mismo medio como puede ser el aire, éste estará presente a ambos lados de la lámina, de modo que la relación entre los índices de refracción aire-vidrio para la primera refracción será inversa de la correspondiente a la segunda refracción vidrio-aire.

Eso significa que, de acuerdo con la ley de Snell, el rayo refractado en la segunda superficie S' se desviará respecto del incidente alejándose de la normal N' en la misma medida en que el rayo refractado en la superficie S se desvíe respecto de su incidente, en este caso acercándose a la normal.

Esta equivalencia en la magnitud de desviaciones de signo opuesto hace que el rayo que incide en la lámina y el rayo que emerge de ella sean paralelos, siempre que los medios a uno y otro lado sean idénticos. En tal circunstancia las láminas plano-paralelas no modifican la orientación de los rayos que inciden sobre ellas, tan sólo los desplazan.

El prisma óptico. Un prisma óptico es, en esencia, un cuerpo transparente limitado por dos superficies planas no paralelas. El estudio de la marcha de los rayos en un prisma óptico es semejante al realizado para láminas paralelas, sólo que algo más complicado por el hecho de que al estar ambas caras orientadas según un ángulo, las normales correspondientes no son paralelas y el rayo emergente se desvía respecto del incidente.

El prisma óptico fue utilizado sistemáticamente por Isaac Newton en la construcción de su teoría de los colores, según la cual la luz blanca es la superposición de luz de siete colores diferentes, rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta. Experimentos concienzudos realizados con rayos de luz solar y prismas ópticos permitieron a Newton llegar no sólo a demostrar el carácter compuesto de la luz blanca, sino a explicar el fenómeno de la dispersión cromática óptica.

Desde Newton, se sabe que el prisma presenta un grado de refringencia o índice de refracción distinto para cada componente de la luz blanca, por lo que cada color viaja dentro del prisma a diferente velocidad. Ello da lugar, según la ley de Snell, a desviaciones de diferente magnitud de cada uno de los componentes que inciden en el prisma en forma de luz blanca y emergen de él ya descompuestos formando los llamados colores del arco iris. Estas diferentes clases de luz definen la gama conocida como *espectro visible*.

Lentes

Las lentes son objetos transparentes, limitados por dos superficies esféricas o por una superficie esférica y otra plana, que se hallan sumergidas en un medio, asimismo transparente, normalmente aire. Desempeñan un papel esencial como componentes de diferentes aparatos ópticos. Con lentes se corrigen los diferentes defectos visuales, se fabrican los microscopios, las máquinas fotográficas, los proyectores y muchos otros instrumentos ópticos.

Tipos de lentes

De la combinación de los tres posibles tipos de superficies límites, cóncava, convexa y plana, resultan las diferentes clases de lentes. Según su geometría, las lentes pueden ser *bicóncavas*, *biconvexas*, *plano-cóncavas*, *plano convexas* y *cóncavo-convexas*.

Desde el punto de vista de sus efectos sobre la marcha de los rayos es posible agrupar los diferentes tipos de

lentes en dos grandes categorías: lentes convergentes y lentes divergentes. Las *lentes convergentes* se caracterizan porque hacen converger, en un punto denominado foco, cualquier haz de rayos paralelos que incidan sobre ellas. En cuanto a su forma, todas ellas son más gruesas en la zona central que en los bordes. Las *lentes divergentes*, por su parte, separan o hacen diverger los rayos de cualquier haz paralelo que incida sobre ellas, siendo las prolongaciones de los rayos emergentes las que confluyen en el foco. Al contrario que las anteriores, las lentes divergentes son menos gruesas en la zona central que en los bordes.

Formación de imágenes. Para estudiar la formación de imágenes por lentes, es necesario mencionar algunas de las características que permiten describir de forma sencilla la marcha de los rayos.

Plano óptico. Es el plano central de la lente.

Centro óptico O. Es el centro geométrico de la lente. Tiene la propiedad de que todo rayo que pasa por él no sufre desviación alguna.

Eje principal. Es la recta que pasa por el centro óptico y es perpendicular al plano óptico.

Focos principales F y F' (foco objeto y foco imagen, respectivamente). Son un par de puntos, correspondientes uno a cada superficie, en donde se cruzan los rayos (o sus prolongaciones) que inciden sobre la lente paralelamente al eje principal.

Distancia focal f. Es la distancia entre el centro óptico *O* y el foco *F*.

Lentes convergentes. Para proceder a la construcción de imágenes debidas a lentes convergentes, se deben tener presente las siguientes reglas:

Cuando un rayo incide sobre la lente paralelamente al eje, el rayo emergente pasa por el foco imagen *F'*. Inversamente, cuando un rayo incidente pasa por el foco objeto *F*, el rayo emergente discurre paralelamente al eje. Finalmente, cualquier rayo que se dirija a la lente pasando por el centro óptico se refracta sin sufrir ninguna desviación.

Cuando se aplican estas reglas sencillas para determinar la imagen de un objeto por una lente convergente, se obtienen los siguientes resultados:

– Si el objeto está situado respecto del plano óptico a una

distancia superior a dos veces la distancia focal, $2 \cdot f = 2 \cdot \overline{FO}$, la imagen es real, invertida y de menor tamaño.

– Si el objeto está situado a una distancia del plano óptico igual a $2f$, la imagen es real, invertida y de igual tamaño.

– Si el objeto está situado a una distancia del plano óptico comprendida entre $2f$ y f , la imagen es real, invertida y de mayor tamaño.

– Si el objeto está situado a una distancia del plano óptico inferior a f , la imagen es virtual, directa y de mayor tamaño.

Lentes divergentes. La construcción de imágenes formadas por lentes divergentes se lleva a cabo de forma semejante, teniendo en cuenta que cuando un rayo incide sobre la lente paralelamente al eje, es la prolongación del rayo emergente la que pasa por el foco objeto *F*. Asimismo, cuando un rayo incidente se dirige hacia el foco imagen *F'* de modo que su prolongación pase por él, el rayo emergente discurre

paralelamente al eje. Finalmente y al igual que sucede en las lentes convergentes, cualquier rayo que se dirija a la lente pasando por el centro óptico se refracta sin sufrir desviación.

Aunque para lentes divergentes se tiene siempre que la imagen resultante es virtual, directa y de menor tamaño, la aplicación de estas reglas permite obtener fácilmente la imagen de un objeto situado a cualquier distancia de la lente.

APLICACIÓN DE LA LEY DE SNELL A LÁMINAS PLANO-PARALELAS

Un acuario en forma de cubo de 1,5 m de longitud está lleno de agua. Sobre un extremo del mismo incide un haz de luz bajo un ángulo de 25° con respecto a la horizontal. Despreciando el efecto de las paredes de vidrio, calcular el desplazamiento lateral que experimenta el haz emergente respecto del incidente ($n_{\text{agua}} = 1,33$).

En la resolución de cualquier problema de óptica geométrica es esencial representar, de forma aproximada pero correcta, la marcha de los rayos. En este caso, y si se desprecia el efecto del vidrio, el haz de luz sufre dos refracciones, una en la superficie aire-agua y otra en la superficie agua-aire. Debido a que se trata de una lámina de caras plano-paralelas y que el medio a ambos lados es el mismo, el efecto desviador de la primera refracción será compensado por el de la segunda, de signo opuesto y el rayo emergente será paralelo al incidente. La desviación $\overline{AB}$ entre ambos podrá escribirse en forma de relación trigonométrica

como:

$$\overline{AB} = \overline{CB} \cdot \widehat{\text{sen } ACB}$$

siendo a su vez

$$\overline{CB} = \frac{\overline{CD}}{\cos \widehat{BCD}}$$

es decir,

$$\overline{AB} = \overline{CD} \cdot \frac{\widehat{\text{sen } ACB}}{\cos \widehat{BCD}}$$

pero de acuerdo con la figura:

$$\widehat{ACB} = \widehat{ACD} - \widehat{BCD}$$

$$\text{con } \widehat{BCD} = \varepsilon_2 \quad \text{y} \quad \widehat{ACD} = \varepsilon_1$$

por tanto,

$$\overline{AB} = \overline{CD} \cdot \frac{\widehat{\text{sen } (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}}{\cos \varepsilon_2}$$

ε_1 es conocido e igual a $90^\circ - 25^\circ$, ε_2 se puede calcular aplicando la ley de Snell y

$\overline{CD}$ es el lado del cubo igual a 1,5 m. De modo que:

$$\varepsilon_2 = \arcsen \left(\frac{n_1}{n_2} \sen \varepsilon_1 \right) =$$

$$= \arcsen \left(\frac{1}{1,33} \cdot \sen 65^\circ \right) \cong 43^\circ$$

$$\overline{AB} = 1,5 \cdot \frac{\sen (65 - 43)}{\cos 43} = 0,77 \text{ m}$$

LA NATURALEZA DE LA LUZ

La naturaleza de la luz ha sido objeto de la atención de filósofos y científicos desde tiempos remotos. Ya en la antigua Grecia se conocían y se manejaban fenómenos y características de la luz tales como la reflexión, la refracción y el carácter rectilíneo de su propagación, entre otros. No es de extrañar entonces que la pregunta ¿qué es la luz? se planteara como una exigencia de un conocimiento más profundo. Los griegos primero y los árabes después sostuvieron que la luz es una emanación del ojo que se proyecta sobre el objeto, se refleja en él y produce la visión. El ojo sería, pues, el emisor y a la vez el receptor de los rayos luminosos.

A partir de esa primera explicación conocida, el desarrollo histórico de las ideas sobre la naturaleza de la luz constituye un ejemplo de cómo evolucionan las teorías y los modelos científicos a medida que, por una parte, se consolida el concepto de ciencia y, por otra, se obtienen nuevos datos experimentales que ponen a prueba las ideas disponibles.

El modelo corpuscular de Newton

Isaac Newton (1642–1727) se interesó vivamente en los fenómenos asociados a la luz y los colores. A mediados del siglo XVII, propuso una teoría o modelo acerca de lo que es la luz, cuya aceptación se extendería durante un largo periodo de tiempo. Afirmaba que el comportamiento de la luz en la reflexión y en la refracción podría explicarse con sencillez suponiendo que aquella consistía en una corriente de partículas que emergen, no del ojo, sino de la fuente luminosa y se dirigen al objeto a gran velocidad describiendo trayectorias rectilíneas. Empleando sus propias palabras, la luz podría considerarse como «multitudes de inimaginables pequeños y velocísimos corpúsculos de varios tamaños».

Al igual que cualquier modelo científico, el propuesto por Newton debería resistir la prueba de los hechos experimentales entonces conocidos, de modo que éstos pudieran ser interpretados de acuerdo con el modelo. Así, explicó la reflexión luminosa asimilándola a los fenómenos de rebote que se producen cuando partículas elásticas chocan contra una pared rígida. En efecto, las leyes de la reflexión luminosa resultaban ser las mismas que las de este tipo de colisiones.

Con el auxilio de algunas suposiciones un tanto artificiales, consiguió explicar también los fenómenos de la refracción, afirmando que cerca de la superficie de separación de dos medios transparentes distintos, los corpúsculos luminosos sufren unas fuerzas atractivas de corto alcance que provocan un cambio en la dirección de su propagación y en su velocidad. Aunque con mayores dificultades que las habidas para explicar la reflexión, logró deducir las leyes de la refracción utilizando el modelo corpuscular.

El modelo ondulatorio de Huygens

El físico holandés Christian Huygens (1629-1695) dedicó sus esfuerzos a elaborar una teoría ondulatorio acerca de la naturaleza de la luz que con el tiempo vendría a ser la gran rival de la teoría corpuscular de su contemporáneo Newton.

Era un hecho comúnmente aceptado en el mundo científico de entonces, la existencia del «éter cósmico» o medio sutil y elástico que llenaba el espacio vacío. En aquella época se conocían también un buen número de fenómenos característicos de las ondas.

En todos los casos, para que fuera posible su propagación debía existir un medio material que hiciera de soporte de las mismas. Así, el aire era el soporte de las ondas sonoras y el agua el de las ondas producidas en la superficie de un lago.

Huygens supuso que todo objeto luminoso produce perturbaciones en el éter, al igual que un silbato en el aire o una piedra en el agua, las cuales dan lugar a ondulaciones regulares que se propagan a su través en todas las direcciones del espacio en forma de ondas esféricas. Además, según Huygens, cuando un punto del éter es afectado por una onda se convierte, al vibrar, en nueva fuente de ondas.

Estas ideas básicas que definen su modelo ondulatorio para la luz le permitieron explicar tanto la propagación rectilínea como los fenómenos de la reflexión y la refracción, que eran, por otra parte, comunes a los diferentes tipos de ondas entonces conocidas. A pesar de la mayor sencillez y el carácter menos artificioso de sus suposiciones, el modelo de Huygens fue ampliamente rechazado por los científicos de su época.

La enorme influencia y prestigio científico adquirido por Newton se aliaron con la falta de un lenguaje matemático adecuado, en contra de la teoría de Huygens para la luz.

El físico inglés Thomas Young (1772–1829) publicó en 1881 un trabajo titulado «Esbozos de experimentos e investigaciones respecto de la luz y el sonido». Utilizando como analogía las ondas en la superficie del agua, descubrió el fenómeno de interferencias luminosas, según el cual cuando dos ondas procedentes de una misma fuente se superponen en una pantalla, aparecen sobre ella zonas de máxima luz y zonas de oscuridad en forma alternada.

El hecho de que, en diferentes zonas, luz más luz pudiese dar oscuridad, fue explicado por Young en base a la teoría ondulatorio, suponiendo que en ellas la cresta de una onda coincidía con el valle de la otra, por lo que se producía una mutua destrucción.

Aunque las ideas de Young tampoco fueron aceptadas de inmediato, el respaldo matemático efectuado por Agustín Fresnel (1788–1827) catorce años después, consiguió poner fuera de toda duda la validez de las ideas de Young sobre tales fenómenos, ideas que se apoyaban en el modelo ondulatorio propuesto por Huygens.

El modelo corpuscular era incapaz de explicar las interferencias luminosas. Tampoco podía explicar los fenómenos de difracción en los cuales la luz parece ser capaz de bordear los obstáculos o doblar las esquinas como lo demuestra la existencia de una zona intermedia de penumbra entre las zonas extremas de luz y sombra. Las ideas de Huygens prevalecían, al fin, sobre las de Newton tras una pugna que había durado cerca de dos siglos.

La luz como onda electromagnética

El físico escocés James Clark Maxwell en 1865 situó en la cúspide las primitivas ideas de Huygens, aclarando en qué consistían las ondas luminosas. Al desarrollar su teoría electromagnética demostró matemáticamente la existencia de campos electromagnéticos que, a modo de ondas, podían propagarse tanto por el espacio vacío como por el interior de algunas sustancias materiales.

Maxwell identificó las ondas luminosas con sus teóricas ondas electromagnéticas, prediciendo que éstas deberían comportarse de forma semejante a como lo hacían aquéllas. La comprobación experimental de tales predicciones vino en 1888 de la mano del físico alemán Heinrich Hertz, al lograr situar en el espacio campos electromagnéticos viajeros, que fueron los predecesores inmediatos de las actuales ondas de radio. De esta

manera se abría la era de las telecomunicaciones y se hacía buena la teoría de Maxwell de los campos electromagnéticos.

La diferencia entre las ondas de radio (no visibles) y las luminosas tan sólo radicaba en su longitud de onda, desplazándose ambas a la velocidad de la luz, es decir, a 300 000 km/s. Posteriormente una gran variedad de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda fueron descubiertas, producidas y manejadas, con lo que la naturaleza ondulatorio de la luz quedaba perfectamente encuadrada en un marco más general y parecía definitiva. Sin embargo, algunos hechos experimentales nuevos mostrarían, más adelante, la insuficiencia del modelo ondulatorio para describir plenamente el comportamiento de la luz.

Los fotones de Einstein

Max Planck (1858–1947), al estudiar los fenómenos de emisión y absorción de radiación electromagnética por parte de la materia, forzado por los resultados de los experimentos, admitió que los intercambios de energía que se producen entre materia y radiación no se llevaba a cabo de forma continua, sino discreta, es decir, como a saltos o paquetes de energía, lo que Planck denominó *cuantos de energía*.

Esta era una idea radicalmente nueva que Planck intentó conciliar con las ideas imperantes, admitiendo que, si bien los procesos de emisión de luz por las fuentes o los de absorción por los objetos se verificaba de forma discontinua, la radiación en sí era una onda continua que se propagaba como tal por el espacio.

Así las cosas, Albert Einstein (1879–1955) detuvo su atención sobre un fenómeno entonces conocido como efecto fotoeléctrico. Dicho efecto consiste en que algunos metales como el cesio, por ejemplo, emiten electrones cuando son iluminados por un haz de luz.

El análisis de Einstein reveló que ese fenómeno no podía ser explicado desde el modelo ondulatorio, y tomando como base la idea de discontinuidad planteada con anterioridad por Planck, fue más allá afirmando que no sólo la emisión y la absorción de la radiación se verifica de forma discontinua, sino que la propia radiación es discontinua.

Estas ideas supusieron, de hecho, la reformulación de un modelo corpuscular. Según el modelo de Einstein la luz estaría formada por una sucesión de cuantos elementales que a modo de paquetes de energía chocarían contra la superficie del metal, arrancando de sus átomos los electrones más externos. Estos nuevos corpúsculos energéticos recibieron el nombre de *fotones* (fotos en griego significa luz).

La luz ¿onda o corpúsculo?

La interpretación efectuada por Einstein del efecto fotoeléctrico fue indiscutible, pero también lo era la teoría de Maxwell de las ondas electromagnéticas.

Ambas habían sido el producto final de la evolución de dos modelos científicos para la luz, en un intento de ajustarlos con más fidelidad a los resultados de los experimentos. Ambos explican la realidad, a pesar de lo cual parecen incompatibles.

Sin embargo, cuando se analiza la situación resultante prescindiendo de la idea de que un modelo deba prevalecer necesariamente sobre el otro, se advierte que de los múltiples fenómenos en los que la luz se manifiesta, unos, como las interferencias o la difracción, pueden ser descritos únicamente admitiendo el carácter ondulatorio de la luz, en tanto que otros, como el efecto fotoeléctrico, se acoplan sólo a una imagen corpuscular. No obstante, entre ambos se obtiene una idea más completa de la naturaleza de la luz. Se dice por ello que son complementarios.

Las controversias y los antagonismos entre las ideas de Newton y Huygens han dejado paso, al cabo de los

siglos, a la síntesis de la física actual. La luz es, por tanto, onda, pero también corpúsculo, manifestándose de uno u otro modo en función de la naturaleza del experimento o del fenómeno mediante el cual se la pretende caracterizar o describir.

EL «EXPERIMENTUM CRUCIS» DE NEWTON

Newton había encontrado ya que la luz blanca es una luz compuesta, pero deseaba demostrar de una forma indiscutible que los colores que emergían del prisma no eran modificaciones de la luz blanca, como sugerían sus adversarios científicos. Para conseguirlo ideó un «experimentum crucis» o experimento crucial que consistía, en esencia, en someter a cada uno de los colores obtenidos por la acción de un primer prisma, a un segundo prisma, y comprobar por una parte que no podía descomponerse más y por otra su diferente comportamiento en cuanto al grado de desviación sufrida por efecto del prisma. Newton resume sus resultados en los siguientes términos: «En primer lugar descubrí que los rayos que son más refractados que otros de la misma incidencia exhiben colores púrpuras y violetas, mientras que aquellos que exhiben el rojo son menos refractados, y los azules, verdes y amarillos poseen refracciones intermedias... En segundo y a la inversa, descubrí que rayos de igual incidencia son gradualmente más y más refractados según su disposición a exhibir colores en este orden: rojo, amarillo, verde, azul y violeta con todos sus colores intermedios».

EL EXPERIMENTO DE YOUNG

En su trabajo titulado «Esbozos de experimentos e investigaciones respecto al fondo y a la luz», Thomas Young describe su propio experimento de interferencias luminosas, conocido también como de las dos rendijas. Al igual que Newton, Young empleó la luz solar iluminando de forma controlada un cuarto oscuro.

Dispuso en su interior dos pantallas. Con la primera cubrió la ventana y en ella efectuó dos orificios que permitían el paso de la luz. Sobre la segunda recogía la luz proyectada. Modificando el tamaño de los orificios observó que si éstos eran grandes se formaban dos manchas luminosas y separadas en la segunda pantalla. Pero si los orificios eran suficientemente pequeños, las dos manchas de luz se extendían y sus mitades próximas se superponían una sobre la otra dando lugar a una serie de bandas brillantes separadas por otras oscuras.

Este fenómeno de interferencias luminosas podía ser explicado a partir de la teoría ondulatoria de la luz propuesta por Huygens. Cuando las ondas S y S' procedentes de los focos O y O' respectivamente, llegaban a la pantalla se superponían dando lugar a esa imagen compuesta observada por Young. Dicha superposición podía ser de dos tipos extremos, o bien los valles de la onda S coincidían con los valles de la onda S' (y análogamente para las crestas) o bien un valle de la onda S coincidía en la segunda pantalla con una cresta de la onda S' (y viceversa).

En el primer caso se produciría un refuerzo de la perturbación, lo que podría explicar la existencia de bandas brillantes en esa zona común; la interferencia luminosa habría sido constructiva. En el segundo se produciría una anulación mutua de las perturbaciones al estar dirigidas en sentidos opuestos; la interferencia habría sido destructiva dando lugar a esas zonas oscuras observadas experimentalmente.

La coincidencia o la oposición de las ondas al llegar a la segunda pantalla dependería de las diferencias de distancias entre el punto de confluencia y los focos O y O' respectivos, lo que explicaría que las bandas brillantes y oscuras se alternasen en la pantalla al desplazarlos desde el punto central equidistante de los dos orificios, hacia los extremos de la pantalla.