

# LA LUZ EN LA NATURALEZA Y EN EL LABORATORIO

**Autor:** ANA MARÍA CETTO

● [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)

● [EDICIONES](#)



© Fondo de Cultura Económica

Primera edición, 1987

Sexta reimpresión, 1996

ISBN 968-16-2565-X

Impreso en México

● [AGRADECIMIENTOS](#)

● [PRÓLOGO](#)

● [INTRODUCCIÓN](#)

● [I. EN BLANCO Y NEGRO](#)

● [II. DE COLORES Y OTRAS COSAS](#)

● [III. HISTORIA DE LA ÓPTICA](#)

● [IV. LAS LECCIONES DEL SIGLO XX](#)

● [V. MÁS ALLÁ DE LOS COLORES](#)

● [MATERIAL DE LECTURA](#)

● [GLOSARIO](#)

● [COLOFÓN](#)

● [CONTRAPORTADA](#)



# COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

**Coordinadora Fundadora:**

Física Alejandra Jaidar †

**Coordinadora:**

María del Carmen Farías

Indice



la

**ciencia / 32**

desde méxico

Primera edición, 1987

Sexta reimpresión 1996

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la: Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1987, FONDO DE CULTURA ECONOMICA, S.A. DE C.V.

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONOMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D. F.

ISBN 968-16-2565-X

Impreso en México



# AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a quienes me ayudaron directamente con la edición de este libro: a don Carlos Prieto, por facilitarme, para la portada, el cuadro Música solar de Remedios Varo; a Leopoldo García-Colín, por haberme honrado con su generoso Prólogo; a Alfredo Sánchez, del Instituto de Física, por su meticuloso trabajo fotográfico; a Ireri de la Peña, por la hazaña de haber logrado la obligada fotografía para la contraportada; a Carolina mi hija y a los amigos que leyeron el manuscrito, y muy en particular a mi esposo, Luis de la Peña, quien me hizo valiosas sugerencias; por último, a María del Carmen Farías por su franca y estimulante amistad.

ANA MARIA CETTO

Indice |



# PRÓLOGO

Es muy posible que la palabra óptica tenga un significado muy diferente y variado para el ciudadano común y corriente. Su uso más frecuente lo encontramos en los grandes letreros con que se anuncian las casas que se dedican a la venta de anteojos, previo examen de la vista, que en la actualidad se lleva a cabo con aparatos un tanto complejos. También se asocia el nombre, aunque de manera más indirecta, con la venta de equipo fotográfico, lentes de aumento, binoculares, telescopios, microscopios y otros aparatos similares. Es posible que los estudiantes de secundaria y preparatoria la recuerden como esa parte árida y tediosa de la física que se ocupa del estudio de lentes planas y curvas, rayos de luz, las leyes de la reflexión y refracción y algunos otros temas semejantes. Para los físicos profesionales, la palabra óptica tiene un significado más profundo. En el prólogo al volumen IV de su grandiosa obra sobre física teórica, intitulado *Teoría de la luz*, el gran físico alemán Max Planck nos dice:

La óptica presenta una ilustración todavía más clara que cualquier otra rama de la física de la tendencia peculiar progresiva de la investigación científica de abandonar el punto de partida original, las impresiones sensoriales específicas, para ubicar a los conceptos físicos sobre bases más objetivas. Pues, en tanto que la mayoría de los conceptos ópticos más importantes, la luz y el color, se derivaron originalmente a partir de nuestras impresiones visuales, estos conceptos nada tienen que ver hoy en día con las sensaciones inmediatas de la percepción. De hecho, están relacionados con los conceptos de ondas electromagnéticas y periodos de vibración (frecuencias), una visualización o forma de desarrollo que se ha justificado por los frutos abundantes a que ha dado lugar.

El libro *La luz* de Ana María Cetto reúne en toda su extensión la conceptualización vertida en las líneas escritas por Planck, mediante un lenguaje ameno, simple y siempre objetivo. Nos explica cómo se relacionan estos conceptos físicos más complejos de la física contemporánea —ondas electromagnéticas, frecuencias, periodos, etc.— con los aspectos más inmediatos que nosotros percibimos con la vista: la luz y el color son los temas centrales de la obra. De aquí se pueden dar explicaciones claras y simples acerca del uso y funcionamiento de la multitud de aparatos ópticos que todos conocemos y sobre muchos más un tanto más complejos como el láser, que fue inventado hace sólo unos decenios.

No obstante el habitual modo de concebir la luz como una onda, en nuestra conceptualización actual de la luz tenemos que pensar en ella a veces como onda, a veces como formada por pequeños corpúsculos: o partículas. ¿Por qué?; ¿de dónde surgieron estas dos formas de pensar? El lector encontrará en la obra no sólo la respuesta a estas interrogantes, sino que también apreciará en la lectura la tremenda repercusión que esta dualidad onda-partícula ha tenido en el desarrollo de la física durante el siglo XX. Se convencerá que la teoría de la luz es un apasionante capítulo de la física que trasciende por mucho nuestras burdas o elementales asociaciones de óptica con lentes. Y, finalmente, podrá también apreciar las connotaciones más sutiles sobre "la luz que no vemos" y la información que ésta nos proporciona sobre varios aspectos del mundo que nos rodea: desde la tomografía del cerebro humano y la radiografía de un hueso tomada con rayos X, hasta muchos aspectos de la estructura del universo.

La óptica es, pues, un ingrediente indispensable en nuestra concepción cotidiana del microcosmos y el macrocosmos. Véanlo por ustedes mismos.

L. GARCÍA-COLÍN

Indice



# INTRODUCCIÓN

El hombre sumergido en las tinieblas de la noche, que ha descansado de sus trabajos y penalidades, abre los ojos al placer más brillante cuando las horas del día se deslizan al descender el velo de la naturaleza; todo parece que recobra una nueva existencia en el gran teatro del mundo, al adornarse la Tierra con los brillantes colores de la luz, cuya belleza deslumbra nuestros ojos...

Wenceslao Barquera, *Física de la luz*, Imprenta de María F. de Jáuregui, México, 1809.

Estas palabras, escritas por un ilustre divulgador científico de la Nueva España, son vívido reflejo de las ideas y sentimientos que la luz ha logrado despertar en el hombre. La luz ha sido motivo de las más bellas y variadas expresiones. Desde siempre la humanidad ha vivido atraída por los fenómenos luminosos, ha jugado y experimentado con ellos, ha buscado entenderlos y ha hecho uso de ellos. A través de esa singular ventana que son nuestros ojos, la luz nos ha permitido conocer y entender mejor el mundo y apreciar su belleza.

Hoy día entendemos que para el fenómeno de la visión se necesita la combinación de dos elementos. El primero de ellos es la luz, que es una entidad física con propiedades muy particulares, y que existe independientemente de que nosotros la veamos. El otro es el ojo, que es sensible a la luz y transmite al cerebro la información captada al absorber la luz. Este libro estará dedicado al primer aspecto, que comprende la luz misma y una variedad de fenómenos físicos asociados con ella, los llamados fenómenos ópticos. El estudio de la visión y del funcionamiento del sistema visual en los animales y en el hombre comprende en sí mismo material tan vasto e interesante, que ameritaría al menos todo un libro aparte. Hemos de admitir también que en este texto sólo ocasionalmente se hace mención de algunos aparatos ópticos, sin entrar en el detalle de su construcción o su funcionamiento; el amplio e interesante tema de la instrumentación óptica daría material para otro libro más.

La primera intención de este texto es ayudar al lector a conocer mejor aquello que ya sabe acerca de la luz, a revivir y profundizar los conocimientos que ya posee. Con este propósito examinaremos juntos una serie de fenómenos que solemos observar cotidianamente. En los dos primeros capítulos recordaremos y revisaremos diversos efectos luminosos muy comunes, algunos de ellos quizá tan comunes que hace tiempo han dejado de sorprendernos. Seguramente el lector no encontrará una respuesta directa a todas las preguntas o dudas que estas observaciones le han provocado —o que aún le provocan— pero ojalá encuentre las herramientas para ir construyendo él mismo sus respuestas. Porque de las observaciones más simples podemos extraer conclusiones que nos llevan a plantear nuevas interrogantes, cada vez más profundos y menos sencillos de responder.

En buena medida éste ha sido también el camino histórico, el cual se desarrolla esquemáticamente en el capítulo III: de las respuestas a las preguntas más simples van surgiendo nuevas preguntas, menos obvias y más complejas. En el caso histórico es claro que este proceso se realiza siempre en un determinado contexto social, cultural, etc., que modula tanto los interrogantes que se plantean, como las hipótesis o explicaciones que se ofrecen. Así, por ejemplo, vemos que las antiguas culturas usaban las lentes y los espejos para desviar la luz del Sol, y sólo muchos siglos después se aprendió a aprovechar el poder amplificador de estos instrumentos. En otro orden de cosas, observamos cómo la visión mecanicista de la naturaleza que predomina en el siglo XVIII favoreció el modelo corpuscular de la luz por encima del ondulatorio, a pesar de que este último ofrecía una explicación razonable a muchos de los efectos observados.

Al desarrollo de las teorías sobre la luz y de los instrumentos ópticos han contribuido no solamente los

físicos: ha habido aportaciones notables de ingenieros, matemáticos, astrónomos, biólogos, filósofos... y muy especialmente médicos, preocupados por entender el fenómeno de la visión y curar defectos de la vista. Es interesante notar la fuerte repercusión que el desarrollo de la óptica ha tenido a su vez en otras áreas científicas, tales como la biología y la astronomía, así como en la medicina, la tecnología, las artes visuales, etcétera.

Si bien la presente exposición histórica recurre a una serie de personajes que han hecho alguna aportación a la óptica, habría que aclarar que esto se hace básicamente con el fin de proporcionar elementos de referencia. Ni de lejos están incluidas todas las personas que podrían ser mencionadas por sus contribuciones, y muchas de ellas son, por lo demás, anónimas. Porque la óptica, como todas las ramas del saber, es fruto del esfuerzo colectivo de la humanidad.

Como veremos en el capítulo IV, en el presente siglo el desarrollo de la óptica ha estado estrechamente ligado al surgimiento de nuevas teorías físicas, en particular la teoría cuántica y la relatividad. La física moderna ha elaborado las herramientas necesarias para describir la relación entre la materia y la radiación, los dos elementos básicos del mundo físico. Estas herramientas permiten, entre otras cosas, explicar las propiedades ópticas de la materia, e incluso diseñar nuevos materiales con determinadas características ópticas.

Al conocer mejor la luz y los fenómenos ópticos, hemos ampliado nuestro entendimiento y nuestra concepción de la naturaleza. La luz ha dejado de ser un elemento mágico o misterioso para convertirse en un fenómeno de determinadas características físicas, cuyo origen puede ser explicado y cuyos efectos se pueden predecir —si bien no todo acerca de la luz se ha dicho ya, como comentamos en el capítulo V—. Aún puede haber sorpresas, y seguramente el futuro nos tiene reservados nuevos descubrimientos interesantes en torno a la luz.

El desarrollo de la óptica ha significado también una extensión gradual de nuestros sentidos, y nos ha conducido a explorar nuevos mundos, inaccesibles a simple vista como el mundo de lo muy pequeño o de lo muy lejano, el mundo de lo ultravioleta o de lo infrarrojo, el mundo de las estrellas de neutrones, que emiten ondas de radio, el de los objetos transparentes a los rayos X...: mundos todos que no representan sino diferentes facetas del complejo universo en que vivimos.

Por último, no podemos olvidar el papel que la óptica desempeña en nuestra vida diaria, a través de los más diversos instrumentos, como las lámparas, los lentes, los espejos, la cámara fotográfica, el caleidoscopio . Por esto y todo lo anterior, invitamos al lector a reflexionar con nosotros en torno a la luz y a descubrir algunos de sus múltiples secretos.



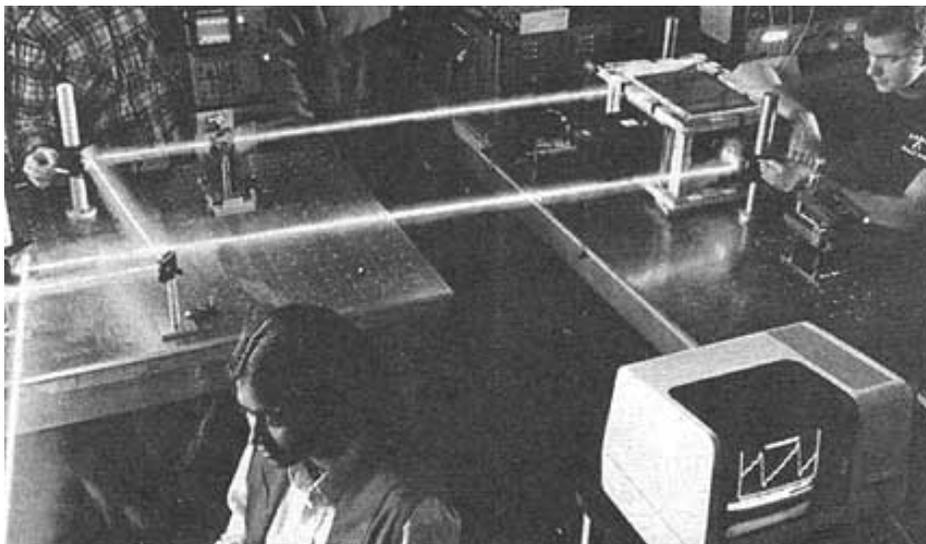
# I. EN BLANCO Y NEGRO

## 1. LUCES Y SOMBRAS

CON nuestros ojos abiertos, tratemos de imaginar que vemos en blanco y negro, sin distinguir los colores. El mundo se nos presenta entonces como un juego de intensidades, como un cuadro en que se alternan luces y sombras. Al mirar con más detalle, notamos que en realidad lo que nuestra vista detecta es meramente el *cambio* de intensidades. Un cuadro de intensidad constante no nos representa nada; las zonas claras u oscuras por sí solas no tienen sentido. Lo que nos permite identificar los objetos en una imagen es el *contraste* entre unas zonas y otras: el claroscuro. Una fotografía en blanco y negro nos da una idea de todo lo que este mero juego de intensidades nos logra transmitir (véase, por ejemplo, las Figuras 1 y 2). La televisión en blanco y negro nos muestra cómo los cambios en la intensidad de la luz y en los contrastes sirven para identificar inequívocamente los objetos en movimiento.

Visto con detenimiento, este juego de luces y sombras que nos brinda la naturaleza se debe a una compleja combinación de factores. En primer lugar reconocemos que hay objetos *luminosos* y objetos *oscuros*. En otras palabras, algunos objetos son focos o fuentes de luz, y los demás sólo reciben la luz que proviene de las fuentes. De hecho, la mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor no son emisores de luz; sólo los vemos gracias a la luz que proviene de las fuentes. Cuando no hay ninguna fuente que ilumine los objetos, no vemos nada.

En segundo lugar tenemos que la luz se propaga a partir de las fuentes *en todas las direcciones posibles*. Se propaga a través de la atmósfera, y aun donde no hay atmósfera; y se sigue propagando indefinidamente mientras no se encuentre con un obstáculo que le impida el paso. Además, la luz viaja en *línea recta* mientras no haya nada que la desvíe y mientras no cambie el medio a través del cual se está propagando.(Figura 1).



**Figura 1. La luz viaja en línea recta. Los haces de luz que vemos en esta fotografía son producidos por fuentes laser.**

En tercer lugar observemos que los obstáculos pueden tener muy diversos efectos sobre la luz. Algunos de los objetos, los llamados *opacos*, no la dejan pasar. Esto a su vez se puede deber a dos razones: ya sea que el objeto *refleje* la luz que incide sobre su superficie, ya sea que la *absorba*. En realidad, la mayoría de los cuerpos opacos reflejan una parte de la luz que les llega y absorbe el resto. Cuando una superficie se ve oscura a pesar de que está iluminada es porque absorbe una buena parte de la luz que recibe. La luz que absorbe un objeto ya no la regresa. Claro que si un objeto absorbiera toda la luz quedaría totalmente

oscuro, se vería más negro que la noche. Pero en general podemos ver los objetos opacos gracias a que reflejan una fracción de la luz que incide sobre ellos, y nuestros ojos reciben una parte de esta luz reflejada.

No todos los objetos, sin embargo, son opacos: los hay también *transparentes*, que son los que dejan pasar la luz, o al menos una fracción de ella. La atmósfera es transparente —por fortuna—, así como otros gases; también lo son algunos líquidos, como el agua y el alcohol, y algunos sólidos, como el vidrio y la lucita. En realidad, habría que aclarar que estos objetos no son perfectos transmisores de la luz. De toda la luz que entra en un medio transparente, una parte es absorbida por el medio, y ésa ya no la vemos salir. Por lo demás, una fracción de la luz que incide es reflejada por la superficie del medio, sin entrar en él, aunque éste sea transparente. De manera que la luz que logra atravesar el medio es la que no ha sido ni reflejada, ni absorbida. Esta combinación de efectos es la que da lugar a la superposición de imágenes reflejadas y transmitidas por un vidrio liso o por una superficie de agua clara, por ejemplo (véase la Figura 2).



**Figura 2.** Las imágenes vistas a través de la ventana se superponen a las imágenes reflejadas por el vidrio.

Cuando desde el interior de un recinto iluminado miramos hacia la ventana para ver el paisaje nocturno, lo que vemos en primer lugar es el reflejo del interior del cuarto. Una persona que mire desde fuera, en cambio, puede ver perfectamente hacia el interior del recinto. Una vez más estamos ante el mismo fenómeno: los vidrios de la ventana reflejan una fracción de la luz (la que nosotros vemos), y transmiten el resto (la que puede ver el observador externo). Si insistimos en ver el paisaje nocturno, habremos de apagar la luz interior o abrir la ventana para eliminar los reflejos.

Los materiales transparentes tienen otro efecto interesante sobre la luz: la *refractan*. Esto significa que al entrar la luz en el material cambia su dirección de propagación. Mientras ésta sigue viajando en el nuevo material, se propaga en línea recta y ya no se desvía, pero si llega a cambiar nuevamente de medio, se refracta otra vez.

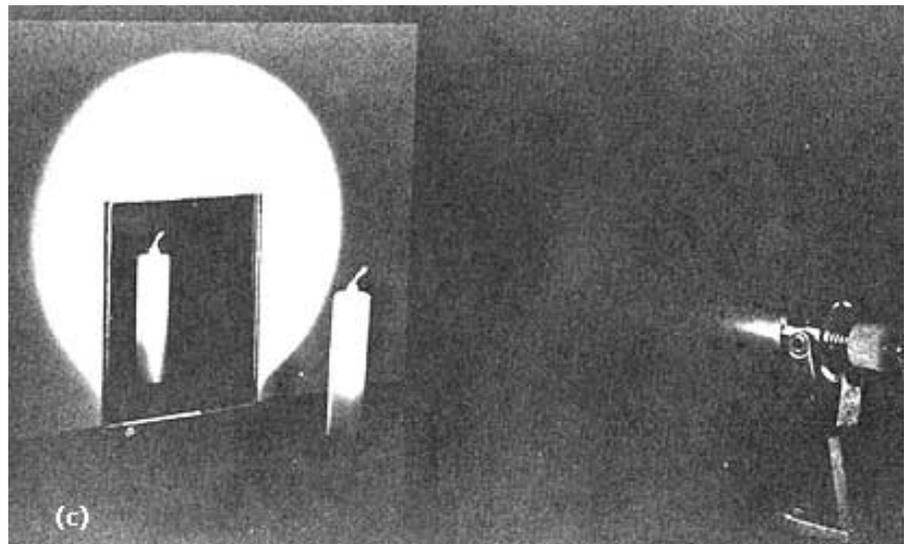
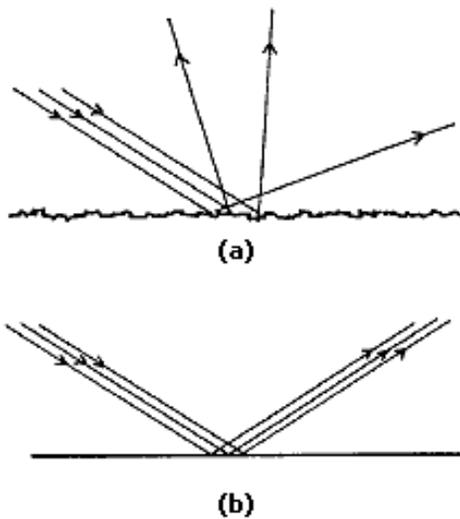
Estos fenómenos luminosos, junto con otros que serán mencionados más adelante, dan lugar a la gran riqueza de imágenes con que la naturaleza se presenta ante nuestros ojos. En lo que sigue nos detendremos un poco en analizar y entender estos fenómenos, empezando por los más sencillos.

## 2. REFLEXIONES

Como se menciona arriba, todo cuerpo, opaco o transparente, refleja una parte de la luz que incide sobre él. La mayoría de las superficies de los cuerpos son ásperas o irregulares, y producen por ello una reflexión *difusa*, enviando la luz reflejada en todas las direcciones posibles (Figura 3(a)). Gracias a esta reflexión difusa podemos ver las superficies iluminadas: porque una parte de esa luz que ha sido reflejada

en todas direcciones llega hasta donde están nuestros ojos.

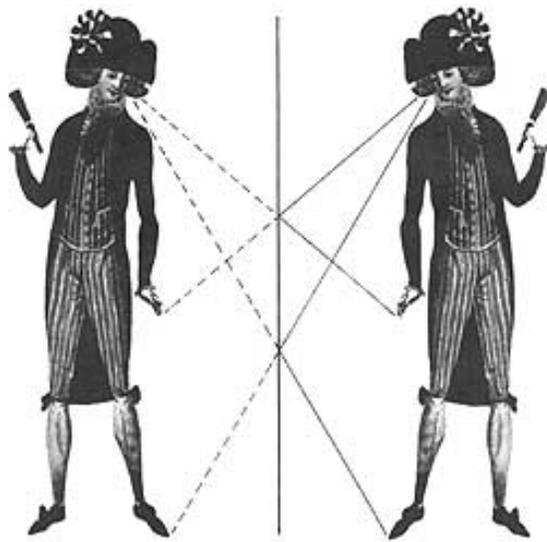
Una superficie lisa y bien pulida, en cambio, produce una reflexión regular; la luz que incide en una dirección determinada, la refleja en otra dirección bien determinada (Figura 3(b)). En este caso lo que se pone de manifiesto con la reflexión no es la superficie reflectora, sino los objetos cuyas imágenes se ven reflejadas. De hecho, un reflector perfectamente liso y limpio es invisible, como lo es el espejo de la figura 3(c): sólo nos permite ver la imagen reflejada. Este tipo de reflexión, llamada *especular*, ha llamado la atención del hombre desde tiempos inmemoriales, y ha tenido múltiples aplicaciones en ámbitos tan variados como el arte, el transporte, las comunicaciones y hasta en los actos de magia.



**Figura 3. (a) Una superficie rugosa refleja de manera difusa, y (b) una superficie lisa refleja de manera especular, (c) la imagen de una vela: contraste entre la reflexión difusa producida por la pantalla de cartón y la reflexión regular del espejo.**

La reflexión especular sigue un par de leyes muy simples, las cuales se ilustran en el recuadro de la página siguiente. La primera ley nos dice que el rayo incidente y el reflejado se encuentran siempre sobre el mismo plano. La segunda que el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales.

Como resultado de estas leyes, tenemos que un espejo plano produce imágenes fieles de los objetos: ni los deforma ni los cambia de tamaño (Figura 4). Lo que sí hace la reflexión es invertir derecha e izquierda; bien nos damos cuenta de ello cuando queremos hacer determinado movimiento con la mano frente al espejo, o descifrar un texto a través de su imagen reflejada.



**Figura 4. La imagen del joven es del tamaño del joven, y parece estar atrás del espejo.**

La imagen producida por un espejo plano tiene una característica asombrosa: parece estar atrás del espejo (véase la Figura 4.). Claro que no *está* ahí, porque si así fuera, no la veríamos; nos la taparía el propio espejo. Lo que sucede es que los rayos de la luz que nos llegan del espejo parecen provenir de atrás. A este tipo de imagen se le suele llamar *virtual*.

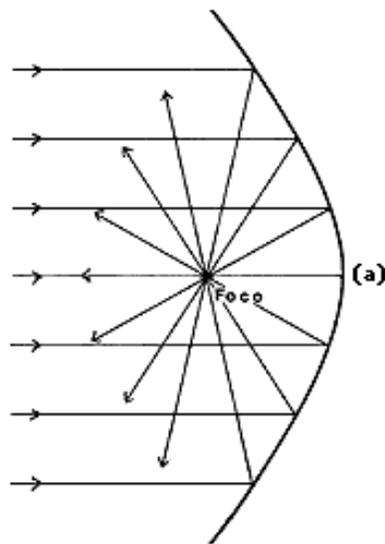
Los espejos curvos también reflejan, pero producen imágenes distorsionadas: cambian el tamaño y la forma de los objetos. Cuando la superficie reflectora es *convexa*, como una esfera de Navidad, las imágenes son más pequeñas que los objetos, y se van haciendo más pequeñas conforme éstos se alejan del espejo. Por ello, en un espejo de este tipo caben más objetos; su campo visual es más amplio que el de un espejo plano. Por este motivo suelen usarse los espejos convexos, llamados panorámicos, para la vigilancia en los comercios, como auxiliares del tránsito y para aumentar la visibilidad de los conductores de automóviles y autobuses.

En cambio, la imagen producida por un espejo *cóncavo* puede ser mayor o menor que el objeto, dependiendo de si éste se encuentra cerca del espejo o lejos de él. Es curioso observar cómo cambia la imagen en forma y en tamaño cuando uno se mira, por ejemplo, en la cara interior de una cuchara metálica bien pulida. Al alejar la cara de la cuchara la imagen se va agrandando hasta desaparecer, y repentinamente reaparece, pero de cabeza. Esta imagen invertida tiene otra característica peculiar: a diferencia de las imágenes virtuales, sí está enfrente del espejo. En este caso se trata de una imagen *real*.

A diferencia de las imágenes virtuales, una imagen real está ahí donde la vemos. Podemos verificar esto colocando enfrente de la cuchara, a cierta distancia de ella, un objeto luminoso (una velita, por ejemplo). Con una hoja de papel blanco que sirva de pantalla, colocada también enfrente de la cuchara, podemos captar la imagen reflejada; observaremos, además, que el reflejo de la vela está de cabeza. Una imagen virtual, en cambio, no puede ser proyectada sobre una pantalla.

Cuando el espejo tiene una forma irregular, en partes cóncava y en partes convexa, puede producir imágenes chuscas, como sucede con la carrocería de un coche recién pulido, o en las casas de los espejos en las ferias.

Una forma particularmente útil de espejo cóncavo es la parabólica. La razón de ello es que una parábola refleja un haz de rayos paralelos de tal manera que los rayos reflejados pasan todos por el mismo punto; es decir, los enfoca (véase la Figura 5(a)). Los grandes telescopios astronómicos usan reflectores parabólicos para enfocar la luz que viene casi paralela desde las lejanas estrellas. También por ello las antenas de microondas se construyen en forma de parábola, lo mismo que los colectores de luz solar (Figura 5(b)).



**Figura 5. (a) Los rayos paralelos reflejados por una parábola pasan todos por el foco.**



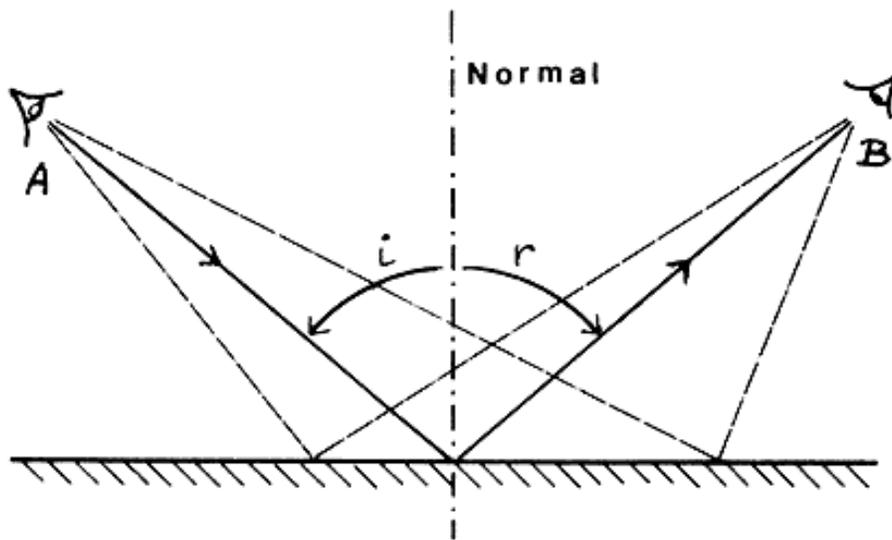
**Figura 5. (b) Antena de microondas, con el reflector parabólico; en el foco del paraboloide está el receptor.**

Los reflectores de los faros de los coches se hacen parabólicos precisamente con la finalidad opuesta: la de colocar una pequeña luz en el foco, que al ser reflejada salga del faro en forma de un haz paralelo.

Existe un método muy sencillo y económico de fabricar una parábola —aunque ésta no es muy duradera—: se coloca una cubeta con agua sobre una plataforma giratoria, y se la hace girar. La superficie del agua adquiere entonces forma parabólica, y la parábola se cierra más conforme la velocidad de giro aumenta. Si se tiene la suerte de que el agua esté clara y el día soleado, el reflejo de la luz del Sol puede servir para localizar el foco de la parábola.

## **LAS LEYES DE LA REFLEXIÓN**

Suponga usted que un rayo de luz incide en un espejo perfectamente plano y que es reflejado, como se ilustra en la figura. La línea sombreada representa la superficie del espejo, y el trazo grueso la trayectoria de la luz. A la línea perpendicular a la superficie se le llama normal. Al ángulo que forma el rayo incidente con la normal se le llama ángulo de incidencia  $i$  y el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal es el ángulo de reflexión,  $r$ .



En todos los casos, la trayectoria del rayo reflejado sigue dos leyes muy sencillas. La primera dice que este rayo está contenido en el mismo plano que el rayo incidente y la normal que pasa por el punto de incidencia. Por ejemplo, en la figura el rayo incidente y la normal están en el plano del papel, y nunca se da el caso de que el rayo reflejado se salga de este plano.

La segunda ley dice que el ángulo de reflexión,  $r$ , es igual al de incidencia,  $i$ . Es lo mismo que sucede, por ejemplo, con una pelotita que choca contra una pared lisa: se refleja con un ángulo igual al de incidencia.

Estas dos leyes juntas tienen una implicación interesante: la trayectoria que sigue un rayo para ir del punto A al punto B pasando por el espejo es la más corta de las trayectorias posibles. En la figura las líneas delgadas representan otras posibles trayectorias ( las que no se dan en la realidad), y puede observarse que todas ellas son más largas que la que se realiza.

Otro aspecto interesante es que un rayo que partiera del punto B para ir al punto A, seguiría exactamente la misma trayectoria en sentido contrario; podemos decir que el camino de los rayos de luz es reversible.

Gracias a esta reversibilidad de la trayectoria podemos estar seguros de que cuando miramos a alguien por un espejo, él también nos puede ver a nosotros.

### 3. LA REFRACCIÓN

Si al caminar por el desierto en un día caluroso usted ve de repente un espejo de agua, no se entusiasme, y si ve una imagen doble de un objeto lejano, no se preocupe: estos espejismos son consecuencias muy particulares del fenómeno de la *refracción*.

La refracción de la luz produce muchos efectos en realidad sorprendentes. Es responsable de que una cuchara parcialmente sumergida en un vaso de agua parezca quebrada. Hace también que se eleve en apariencia el fondo del mar o de un depósito de agua visto desde afuera —lo cual pone en peligro a los bañistas inadvertidos. Gracias a la refracción de la luz por la atmósfera, se prolongan los crepúsculos y los ocasos. También por la refracción un florero esférico lleno de agua puede enfocar la luz solar hasta el grado de incendiar un mueble o una cortina.

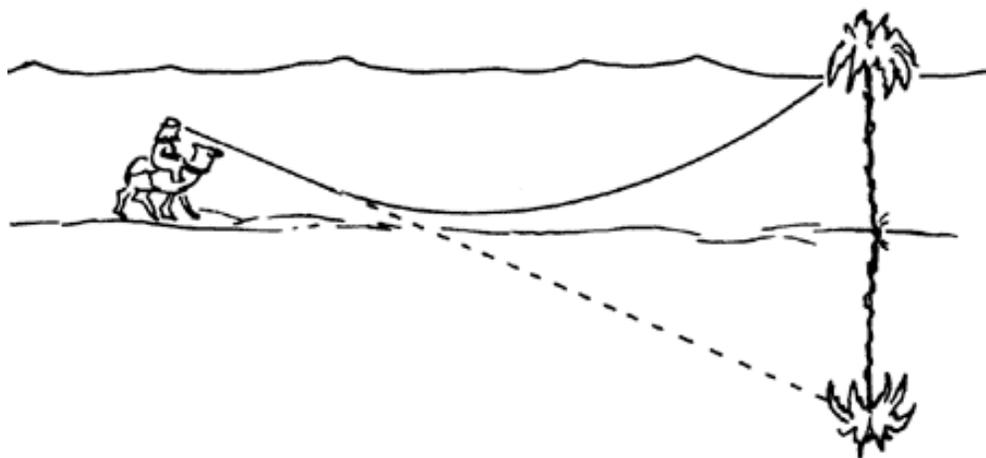
La refracción sigue también un par de leyes, casi tan sencillas como las de la reflexión. La primera de ellas nos dice que el rayo incidente y el refractado están sobre el mismo plano. En la segunda interviene un parámetro que caracteriza al medio: el índice de refracción,  $n$ .

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción, se desvía. Si el índice de refracción del segundo medio es mayor que el del primero, el rayo se quiebra, alejándose de la superficie entre los medios, como se ve en la figura del recuadro.

Cuando disminuye el índice de refracción, sucede lo contrario: el rayo se acerca a la superficie. (Esto es lógico, si se toma en cuenta la reversibilidad de los rayos de luz: suponga, por ejemplo, que en la misma ilustración el rayo de luz no viene de arriba, sino de abajo; al pasar al medio superior, que tiene un índice de refracción menor, vemos que el rayo se acerca a la superficie.

El índice de refracción de un medio se determina usando como referencia el del vacío, al que se le asigna el valor  $n=1$ . Así, el índice del aire es un poco mayor que 1, el del agua es 1.33, y el del vidrio es aún mayor. Algunos cristales empleados en la fabricación de lentes especiales alcanzan un valor más elevado: por ejemplo, el índice del diamante es 2.42, y el del yodo cristalino es 3.34. En general, el índice de refracción de los materiales es mayor que 1, aunque en algunas circunstancias especiales puede llegar a ser menor que 1, como se verá en el capítulo IV.

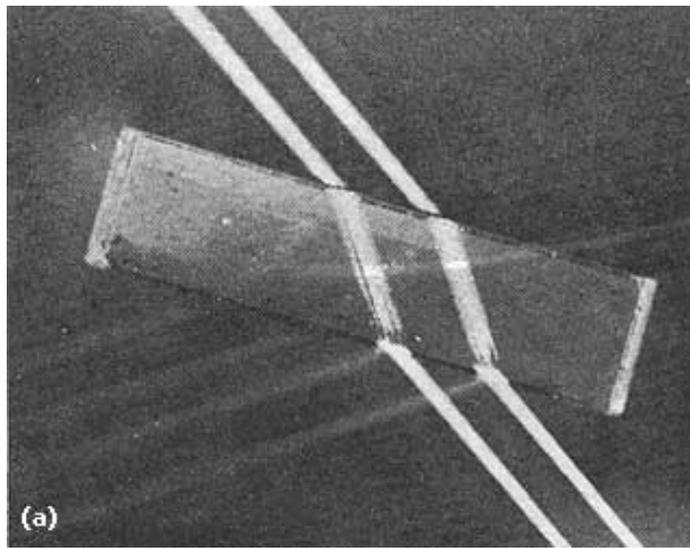
El índice de refracción de un gas depende naturalmente de su densidad: conforme aumenta la densidad del gas, aumenta también el valor de  $n$ . Así las capas atmosféricas de densidad variable presentan un índice de refracción también variable; y esto es lo que sucede con las capas de aire en el desierto debido al calentamiento de la arena. Por ello, cuando la luz atraviesa estas capas, se refracta dando lugar a espejismos como los que mencionábamos. En la figura 6 se ilustra la trayectoria de un rayo de luz que viaja desde la copa de la palmera hasta el ojo del beduino; la pronunciada curvatura de este rayo de luz se debe a las múltiples refracciones que sufre en su trayecto.



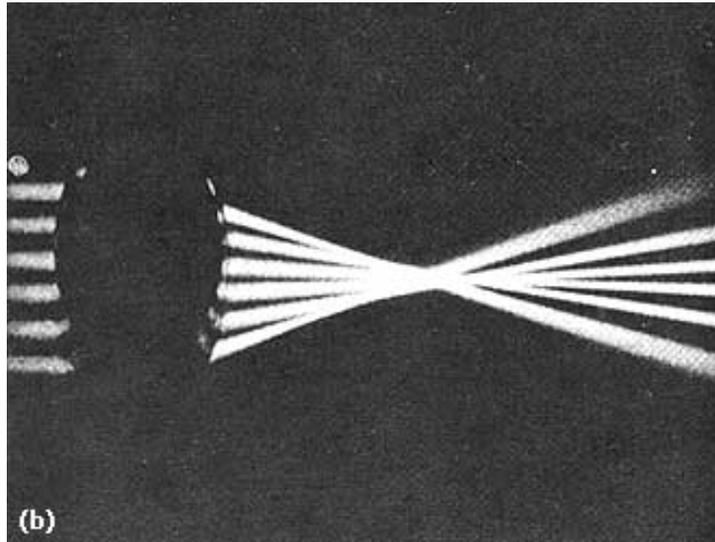
**Figura 6. Un espejismo en el desierto. El rayo que viene desde la copa de la palmera parece venir desde abajo.**

Como el rayo; parece llegarle desde abajo, lo que el hombre ve es una imagen invertida, como reflejada en un espejo de agua.

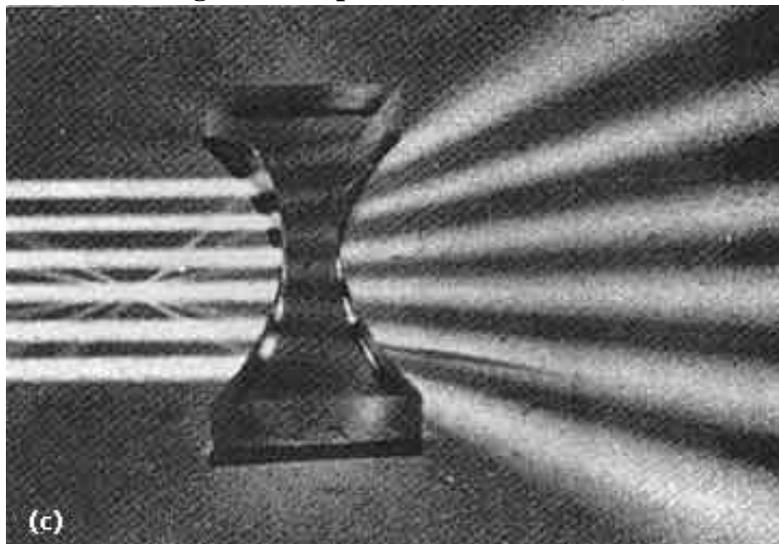
Cuando la luz atraviesa un vidrio de caras paralelas, como el de la figura 7 (a), los rayos se desplazan ligeramente, por la refracción que sufren al entrar en el vidrio y al salir de él; pero salen paralelos a la dirección original. Por ello las imágenes vistas a través de una ventana no se distorsionan —afortunadamente. Cuando, en cambio, la luz atraviesa una lente, cuyas caras no son paralelas, cada uno de los rayos es desviado de manera diferente, como muestran las figuras 7 (b) y 7 (c). Por ello las imágenes vistas a través de las lentes no reproducen fielmente a los objetos en tamaño y en forma.



**Figura 7. Refracción de un haz paralelo de luz: (a) por un vidrio de caras paralelas;**



**Figura 7. (b) por una lente convexa;**

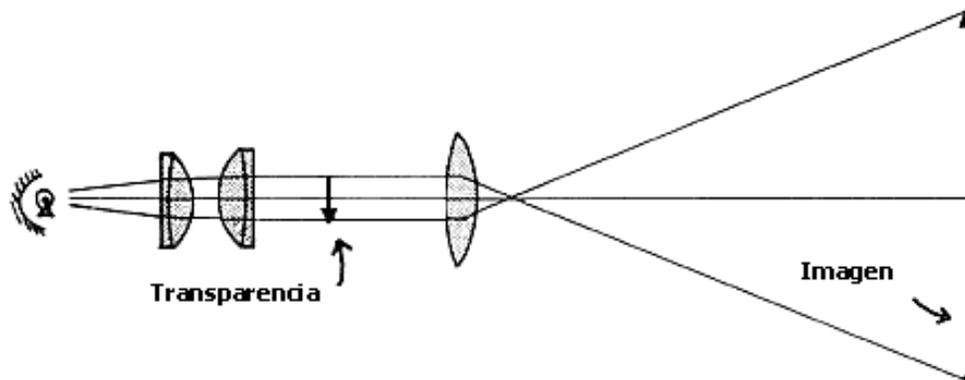


**Figura 7. (c) por una lente cóncava.**

Dependiendo de la curvatura de las caras de la lente y de su distancia al objeto, se obtienen imágenes muy diversas de un mismo objeto. De esta manera, las lentes pueden producir imágenes derechas o invertidas, reales o virtuales, distorsionadas o no, más grandes o más pequeñas que el objeto. De ahí la utilidad de las lentes en la fabricación de instrumentos ópticos, como cámaras fotográficas, proyectores de cine, binoculares, microscopios, telescopios, etc. De ahí también la importancia de la córnea, el cristalino y las

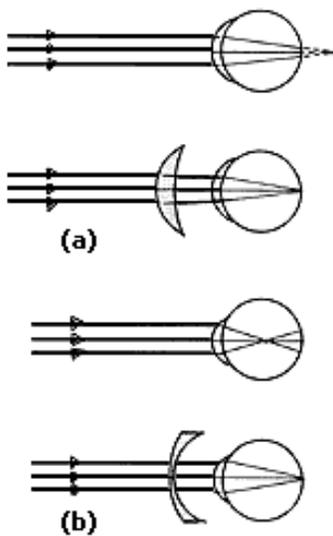
otras partes del ojo, cuya función es enfocar los rayos para formar imágenes pequeñas sobre nuestra retina: basta que se altere ligeramente la posición, la forma o el índice de refracción de alguna de estas delicadas partes para que la retina no reciba imágenes claras de los objetos, lo cual provoca una visión pobre o defectuosa.

En la construcción de los instrumentos ópticos más finos generalmente se utilizan complejas combinaciones de lentes, colocadas sucesivamente, de manera que una lente corrija los defectos ópticos producidos por la otra parte y a la vez se vaya logrando el efecto final deseado: una determinada amplificación de la imagen, con cierta profundidad de foco, o cierta distancia entre objeto e instrumento, o determinadas condiciones de iluminación, etc. En la figura 8 se presenta una combinación de lentes relativamente sencilla que sirve de base para un proyector de transparencias o de películas, y se ilustra esquemáticamente la formación de la imagen. Un sistema óptico muy similar sirve para la amplificación de fotografías, salvo que en este caso se proyecta verticalmente la imagen ampliada sobre una placa de material sensible a la luz.



**Figura 8. Esquema de un proyector de transparencia. Las lentes condensadoras (izquierda sirven para colimar el haz de luz; la lente proyectora (derecha) desvía la luz que ha pasado por la transparencia, para producir una imagen ampliada (que es real e invertida).**

También mediante el uso de lentes apropiadas se pueden contrarrestar —hasta cierto grado— algunos defectos de la vista. La idea es la misma que mencionábamos arriba: frente al sistema óptico constituido por los ojos, se colocan las lentes adecuadas para que la imagen llegue corregida a la retina. En la figura 9 se ilustra cómo dos anomalías muy comunes, que son la hipermetropía y la miopía, pueden ser corregidas con este procedimiento. Curiosamente, en este caso la corrección se efectúa antes de producirse la imagen defectuosa, porque la luz pasa primero por los anteojos y después por los ojos. Afortunadamente no se necesita un complejo sistema de lentes para corregir la mayoría de los defectos visuales importantes. Y afortunadamente también, el uso de los lentes no interfiere con el funcionamiento del ojo mismo; sólo afecta la trayectoria de los rayos de luz que llegan al ojo.



**Figura 9. Corrección de la imagen visual con ayuda de lentes.**

**(a) La hipermetropía es corregida con una lente convergente.**

**(b) La miopía es corregida con una lente divergente.**

## **LAS LEYES DE LA REFRACCIÓN**

Suponga usted que un rayo de luz incide en una superficie plana que separa dos medios. En la figura la recta horizontal representa dicha superficie, el trazo grueso la trayectoria del rayo. Una vez más se ha dibujado la normal a la superficie. Al cambiar de medio, el rayo cambia de dirección: se refracta. Cada uno de los dos medios de propagación está caracterizado por un parámetro: el índice de refracción,  $n$ .

La trayectoria del rayo refractado sigue dos sencillas leyes. La primera es que dicho rayo se encuentra en el plano del rayo incidente y la normal que pasa por el punto de incidencia. En otras palabras, si el rayo incidente y la normal están en el plano de la hoja, también el rayo refractado debe estar en este plano.

Para expresar la segunda ley, consideremos que el rayo incidente y el rayo refractado se han dibujado del mismo tamaño. Entonces, la relación entre los tamaños de las AN y BN' es igual al inverso de la relación entre los correspondientes índices de refracción. En otras palabras,  $AN/BN' = n_2/n_1$ .

Ésta es una forma de expresar la ley de Snell.

Es claro que los rayos que inciden perpendiculares a la superficie no se refractan; entran al medio sin desviarse.

En el caso de la figura, el medio superior es aire y el inferior agua. Como el índice de refracción del aire es menor que el del agua, tenemos que  $AN > BN'$ : el rayo se acerca a la normal al penetrar en el agua.

Una vez más, como en la reflexión, vemos que el camino del rayo es reversible: un rayo que partiera de B llegaría a A por la misma trayectoria, pero en sentido contrario. Por lo tanto, cuando nosotros vemos un

pez en el agua, él también nos puede ver.

---

**Indice**



## II. DE COLORES Y OTRAS COSAS

### 1. LOS COLORES

HASTA el momento todas nuestras reflexiones sobre la luz han sido en blanco y negro. Ahora nos toca introducir el color, ese otro gran ingrediente de la luz que contribuye a la riqueza visual de la naturaleza.

Empecemos por anotar algunas observaciones generales sobre el color. En primer lugar observamos que la luz siempre lleva asociado algún color, o una combinación de ellos; esto nos sugiere que el color ha de estar relacionado con alguna propiedad física de la luz. En ocasiones el color de la luz es difícil de definir a simple vista, pero, como se verá después, hay formas de determinar aproximadamente qué proporción de cada color está contenida en cualquier tipo de luz.

Otra observación es que dos factores contribuyen al color de los objetos: éstos mismos y la luz que los ilumina. Por ejemplo, una hoja de papel blanco es blanca cuando está iluminada por la luz del Sol, pero se ve roja cuando se la ilumina con luz roja. Seguramente le ha sucedido que compra usted un objeto de determinado color, escogido bajo la iluminación artificial de la tienda, y al salir de ella descubre bajo la luz del Sol que ése no era el color que usted buscaba.

¿Cuál es, entonces, el origen del color, y cuál es el color de las cosas? Vayamos por pasos.

La luz emitida por un foco o fuente de luz tiene un color que depende de la fuente: del material que la constituye, del mecanismo de emisión y de condiciones físicas, como la temperatura de la fuente. Por ejemplo, cuando la fuente es un filamento incandescente, como el de los focos domésticos o bombillas, la luz es esencialmente blanca, en ocasiones con un tono amarillento o rojizo. Las lámparas fluorescentes, en cambio, emiten una luz que parece más fría, porque contiene más luz azul. Otras fuentes son el Sol y las estrellas, una flama de gas o de una vela, una lámpara de vapor de mercurio, una resistencia eléctrica que se ha calentado al rojo vivo..., y cada una de estas fuentes emite luz de un color característico.

Ahora supongamos que tenemos una fuente emisora de luz *monocromática*, o sea luz de un solo color. No es fácil fabricar un emisor de luz monocromática, pero en su defecto se puede usar una fuente de luz blanca, cubierta con un vidrio de un color puro, por ejemplo rojo; así, lo que se obtiene es luz roja. Algunos objetos iluminados por esta luz se verán más claros que otros, pero todos se verán rojos y de ningún otro color. Esto nos indica que los objetos no cambian el color de la luz que les llega; sólo afectan su intensidad, su brillo. Las superficies que parecen más claras son las que reflejan mayor cantidad de luz roja y absorben menos. Los materiales más transparentes son los que dejan pasar una mayor cantidad de luz roja sin absorberla. Los objetos más oscuros son los que más la absorben. En la figura (10a) se muestra una fotografía que fue tomada con este tipo de luz.



**Figura 10. (a) Iluminación con luz roja.**

Si ahora se apaga la luz roja y se alumbra con otra luz monocromática, digamos verde, el cuadro cambia: algunos objetos que antes se veían claros ahora se ven oscuros y viceversa (véase la Figura 10(b)). Esto indica que algunas superficies reflejan mejor la luz verde que la roja o a la inversa. Así también hay objetos que son transparentes a la luz roja, pero no a la verde, o viceversa.



**Figura 10. (b) La misma escena, iluminada con luz verde.**

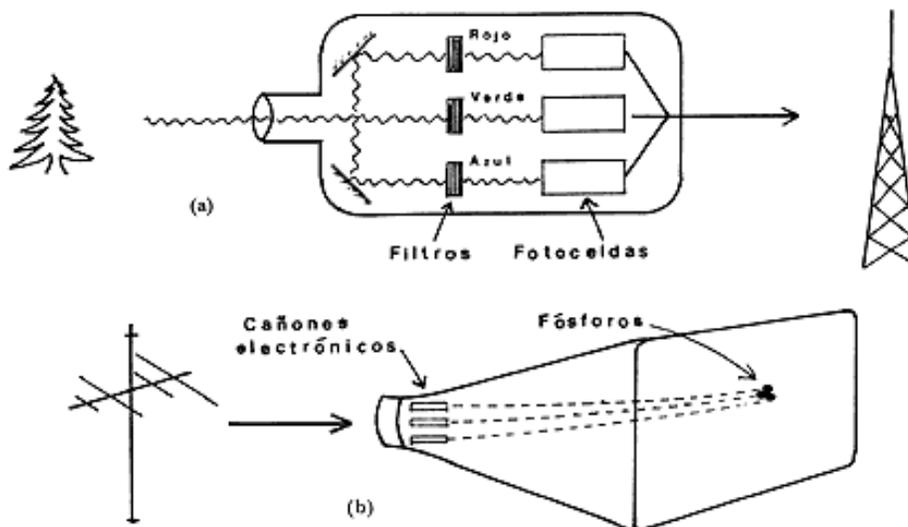
Ahora enciéndanse simultáneamente la luz roja, la verde y una azul, en proporciones adecuadas de intensidad: los objetos parecen haber recuperado su color "normal" (Figura 10c). Las diversas superficies reflejan una proporción diferente de cada uno de los colores. Las superficies blancas son las que reflejan todos los colores; las negras no reflejan ninguno, porque lo absorben todo. Cuando un material transparente es incoloro es porque deja pasar todos los colores, sin reflejar o absorber ninguno en particular.



**Figura 10. (c) La misma escena iluminada con los tres colores primarios (luz normal).**

Aquí observamos otro detalle interesante: que cuando el rojo, el verde y el azul se suman en proporciones adecuadas, el resultado es blanco. Por ello a estos tres colores se les llama *primarios*.

La televisión a colores es un buen ejemplo de los sorprendentes resultados que se obtienen mediante la adición de colores primarios. La pantalla del televisor está cubierta de puntos fluorescentes de los tres colores: rojo, verde y azul. Dependiendo del color que se requiere reproducir, cada uno de estos puntos se activa en mayor o menor grado. Naturalmente, antes de ello la cámara de televisión tuvo que analizar la imagen punto por punto y separar la luz en sus colores primarios a través de una serie de filtros y espejos (Figura 11. (a)). Esta información se transforma después en señal eléctrica y se envía como una onda hasta el receptor de la televisión, el cual la decodifica y la envía a la pantalla, en forma de haz electrónico, para activar la cubierta fluorescente (Figura 11(b))



**Figura 11. Adición de colores en la televisión. (a) La luz de la imagen entra en la cámara y se descompone en los colores primarios. Esta información es enviada del transmisor al receptor. (b) La señal captada por el receptor estimula los puntos fluorescentes de la pantalla; la combinación de colores es lo que percibe el ojo.**

Si usted examina con una lupa las ilustraciones a color de una revista o las tiras cómicas del periódico dominical observará que también están hechas de puntos de colores. Usualmente estas impresiones están hechas con sólo tres tintas. En cambio, los pintores puntillistas del siglo pasado llenaban sus cuadros con miles de puntos de diversos colores, para producir una variedad de tonos que dan una sensación de sutileza

y luminosidad cuando se miran desde cierta distancia.

Ya que hablamos de la apariencia de los objetos, cabe detenernos a analizar por qué los metales tienen esa apariencia tan característica que los distingue de otros objetos. Una superficie metálica lisa o bien pulida refleja la luz de manera especular; de hecho, los espejos más comunes consisten de una delgada capa metálica cubierta por una placa de vidrio para su protección. Pero el *brillo* característico que nos permite reconocer los metales no depende de lo bien pulida que se encuentre la superficie (con tal de que esté limpia), sino de que la reflexión de la luz es selectiva y se efectúa en la capa exterior de la superficie. Es decir, la superficie del metal refleja unos colores con más eficiencia que otros, y toda la luz que incide sobre el metal sufre el mismo proceso de selección.

Las superficies no metálicas, en cambio, tienen una capa exterior que refleja todos los colores en la misma proporción. La luz no reflejada penetra a través de esta primera capa hasta que es absorbida o reflejada por capas interiores de la superficie que sí son selectivas; son éstas las que le dan color a la superficie del objeto. De las propiedades específicas de estas diversas capas depende la textura de la superficie y su respuesta a las diferentes iluminaciones. Por ejemplo, si la cara superior es mate, producirá una reflexión difusa. Si abajo de ésta hay una capa de colorante transparente (como la tinta o la acuarela, por ejemplo), filtrará la luz que la atraviese. Si el soporte mismo de la superficie también es coloreado, contribuirá con una reflexión selectiva, y así sucesivamente. En manos de artistas, las posibilidades son infinitas.

## 2. EL ARCO IRIS

Todos hemos visto los colores del espectro en los bordes de un espejo, o en el arco iris que se forma en el cielo cuando el Sol ilumina las gotas de lluvia. Seguramente también ha oído usted acerca de los famosos experimentos que hizo Newton con prismas, y quizá hasta ha reproducido alguno de estos experimentos en clase. Recordemos de qué se trata.

Cuando se envía un haz de luz blanca hacia un prisma de vidrio (o de otro material transparente), el prisma refracta la luz dos veces: a la entrada y a la salida. Pero lo hace de una manera curiosa; descomponiéndola en todos los colores del espectro (Figura 12). En otras palabras, el prisma dispersa la luz en forma de abanico, separándola en cada uno de sus colores. La componente roja es siempre la que menos se quiebra y la violeta es la que sufre una mayor refracción.



**Figura 12. Un haz de luz blanca es dispersado por un prisma, dando lugar al espectro.**

Esta observación nos indica que el índice de refracción del vidrio es *diferente* para cada uno de los colores: para el naranja es mayor que para el rojo, para el amarillo mayor que para el naranja, etc. Cuando se habla a secas del índice de refracción de un material (por ejemplo, cuando se dice que el del agua es 1.33), generalmente se utiliza como referencia la luz amarilla (la emitida por el sodio). Pero en ocasiones se

requiere mayor precisión: por ejemplo, para caracterizar el vidrio usado en la fabricación de instrumentos ópticos es necesario conocer su índice de refracción para la luz roja, la verde, la amarilla..., y es importante saber si este índice varía poco o mucho de un color a otro.

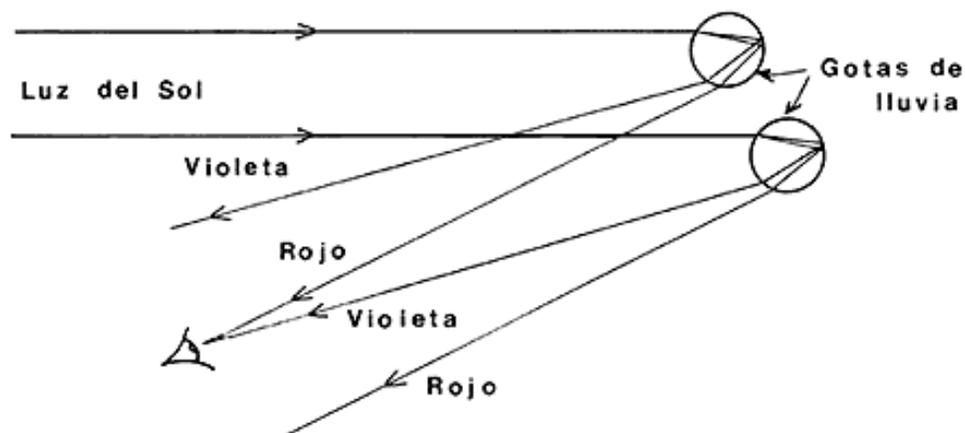
Esta separación de la luz en los colores del arco iris se puede producir de muchas maneras; no es necesario usar un prisma para ello. Por ejemplo, en los binoculares o los microscopios de juguete las imágenes suelen estar rodeadas de un halo de color a causa de la dispersión de la luz por las lentes: el vidrio refracta más la luz azul que la roja. En vez de formarse una sola imagen blanca, se forma una distinta con cada color. A este defecto de las lentes, que desmejora la calidad de la imagen, se le llama *aberración cromática*. Con una cuidadosa selección del vidrio y una adecuada combinación de lentes puede llegar a eliminarse casi totalmente este defecto cromático.

Hay algunos materiales que son especialmente efectivos en producir esta separación de colores, porque refractan la luz azul mucho más que la roja: su índice de refracción varía notablemente entre los extremos del espectro. El diamante es uno de estos materiales. Cuando una pieza de diamante tiene muchas caras, la combinación de refracciones y reflexiones múltiples da como resultado un bello conjunto de luces de purísimos colores.

Claro que la intensidad de cada uno de los colores que aparecen en el espectro depende de la luz original que se dispersó. Por ejemplo, si la luz era rojiza antes de entrar al prisma, el espectro contendrá básicamente luz roja, y una proporción menor de los otros colores. Si la luz es de un color puro, no se dispersa: sale del prisma igual como entró en él (pero desviada). Como puede verse, aquí tenemos un procedimiento para identificar cualquier luz: se la dispersa mediante un prisma y después se mide la intensidad producida por cada uno de sus componentes.

¿Cuántos colores hay en el espectro? Se ha hablado de los siete colores del arco iris desde tiempos muy remotos, cuando se le atribuían al número siete propiedades mágicas. El espectro de siete colores es tan arbitrario como la semana de siete días. En realidad, si uno observa con cuidado la luz que sale de un prisma puede percatarse de que hay una infinidad de colores diferentes; que la transición de uno a otro es gradual, siendo imposible definir la frontera entre un color y su vecino.

No sorprende, sin embargo, que el arco iris se haya considerado como un fenómeno mágico; hoy día su aparición continúa siendo una experiencia singular, y nos seguirá maravillando aunque conozcamos la explicación de su origen. Los detalles de la formación del arco iris son muy complejos, pero básicamente se puede entender como resultado de la refracción y la reflexión de la luz por las gotas de lluvia, como se ilustra en la figura 13. Como la luz roja se refracta menos que la violeta, aparece más alta en el cielo; esto explica el orden en la aparición de los colores. Obsérvese en la figura de dónde viene la luz que se dispersa: el observador debe estar de espaldas al Sol para poder ver el arco iris.



**Figura 13. El arco iris se forma cuando las gotas de lluvia dispersan la luz del Sol.**

**En este esquema, el observador recibe la luz roja de la gota más alta y la luz violeta de la más baja.**

## Cuando hay millones de gotas se forma un arco con el espectro completo.

La mayoría de las personas perciben con claridad ese cambio gradual de color desde el rojo hasta el violeta en el espectro. Es más: dos haces de luz monocromática que correspondan a la misma posición en el espectro siempre los vemos del mismo color. Pero también pueden producirse diferentes combinaciones de luces que se vean del mismo color. Por ejemplo, una mezcla (con proporciones adecuadas) de rojo y verde puede igualar a una de amarillo con un poco de azul. De manera que no siempre podemos identificar con certeza, a "puro ojo", los componentes originales que intervienen en un color. Sin embargo, ya sabemos que con ayuda de un prisma podemos separar e identificar estos componentes.

Veíamos en la sección anterior que mediante combinaciones adecuadas de los tres colores primarios —rojo, verde, y azul— es posible producir cualquier color; no hay color alguno que no pueda obtenerse de esta manera. Esto tiene una consecuencia interesante: que para definir un color arbitrario basta especificar tres cifras, así como para definir cualquier punto en el espacio también son suficientes tres cifras. Al color blanco, por ejemplo, corresponde la terna  $(1/3, 1/3, 1/3)$  lo que indica que está compuesto de proporciones iguales de rojo, verde y azul. Podría decirse que a cualquier color corresponde un punto en el espacio cromático. (De hecho, cualquier terna de números iguales representa luz blanca; por ejemplo,  $(2, 2, 2)$  corresponde a una luz blanca de mayor intensidad).

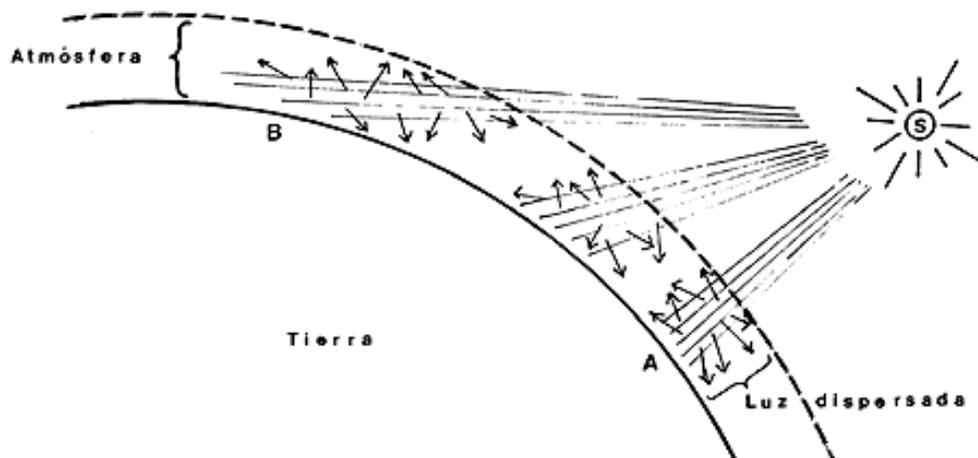
Decíamos que la mayoría de las personas perciben sin dificultad las diferencias de colores. Sin embargo, aproximadamente el 8% de los hombres y el 0.4% de las mujeres no logran distinguir todos los colores, a veces por razones hereditarias y en ocasiones a causa de alguna enfermedad. A esta deficiencia visual se le llama *daltonismo*, en memoria de John Dalton, famoso químico de fines del siglo XVIII, quien hizo la primera descripción de esta deficiencia. Dalton mismo era daltónico, lo cual representaba para él una desventaja porque no podía percibir los cambios en los colores producidos por las reacciones químicas. La falla más común consiste en la incapacidad de distinguir los colores comprendidos entre el rojo y el amarillo, aunque también hay personas que confunden los colores comprendidos entre azul y el verde. Algunos muy especiales no distinguen color alguno; ven en blanco y negro. Ahora se sabe que una variedad de las células visuales que se encuentra en la retina (los conos) contiene tres tipos de una sustancia sensible a la luz de diferentes colores; estas células son las responsables de la percepción cromática. La ausencia de una o más de dichas sustancias se traduce entonces en la incapacidad de distinguir determinados colores.

### 3. OTROS COLORES EN EL CIELO

Alzando otra vez la mirada, tratemos de responder a la vieja pregunta: ¿por qué el cielo se ve azul de día, y a veces rojo al atardecer?

El color del cielo se debe a un fenómeno que no ha sido mencionado hasta ahora: la dispersión de la luz solar por la atmósfera. Siempre que un haz de luz atraviesa un gas, las moléculas del gas desvían una parte de esa luz en todas direcciones. Es como si la luz fuese un haz de municiones lanzadas a través de un gas formado de pequeñas pelotas; si no hay muchas pelotas (o sea, si el gas no es denso), la mayor parte de las municiones atraviesa sin desviarse, pero algunas chocarán con ellas y rebotarán en todas las direcciones posibles. Conforme aumenta la densidad del gas, se hace más notable el efecto de la dispersión. También los líquidos y los sólidos transparentes dispersan una fracción de la luz que los atraviesa, sobre todo cuando contienen impurezas. Cuando la dispersión es alta, se habla ya no de materiales transparentes, sino traslúcidos: aquellos que transmiten la luz de manera difusa.\*

El efecto de dispersión por la atmósfera es más notable en la luz violeta y azul que en el resto del espectro. Por ello, aunque la luz solar es blanca, el Sol aparece amarillento cuando lo miramos de frente (porque ha perdido una parte de su componente azul), y en cambio la luz dispersada por la atmósfera, que ilumina el cielo, es esencialmente azul (véase la Figura 14)



**Figura 14. La dispersión de la luz solar por la atmósfera.**

**Un observador en A ve un Sol amarillento; el observador B lo ve rojizo. La luz indirecta (dispersada) es azul.**

Al acercarse el Sol al horizonte, la luz que nos llega tiene que atravesar una capa más gruesa de atmósfera, por lo que la dispersión aumenta; la mayor parte de la luz violeta, azul y verde es desviada, de manera que sólo nos llegan los colores comprendidos entre el amarillo y el rojo. A esto se debe el color de los ocasos (Figura 14).

La dispersión producida por partículas más grandes es más irregular y afecta a todos los colores por igual. Por eso, cuando hay vapor de agua o partículas de polvo en la atmósfera, el cielo pierde su color azul y adquiere una apariencia blanquecina y difusa. Claro que cuando estos ingredientes adicionales de la atmósfera además de dispersar absorben una mayor fracción de la luz, el cielo se oscurece; se ve gris.

#### **4. MANCHAS DE ACEITE Y POMPAS DE JABÓN**

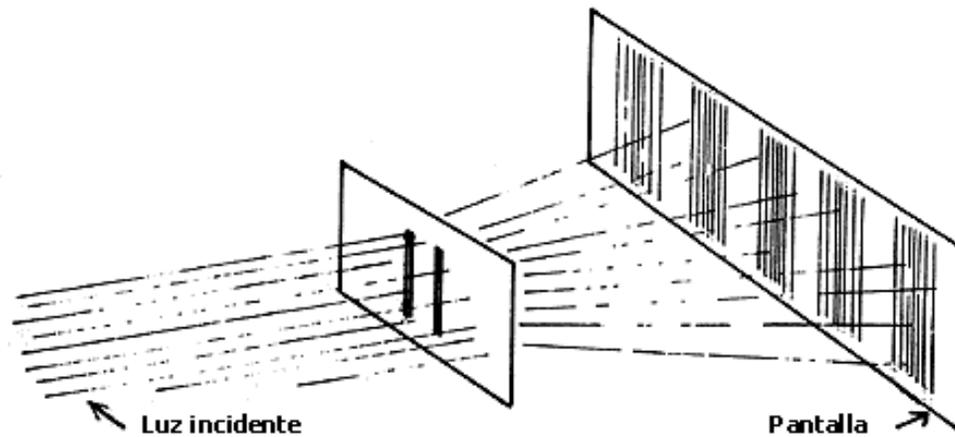
Hay otros fenómenos que llaman nuestra atención por su colorido y que seguramente han despertado alguna vez nuestro interés por encontrar una explicación. ¿Cómo se producen los hermosos colores en una capa delgada de aceite que flota sobre una superficie de agua? ¿Por qué las pompas de jabón reflejan la luz en forma de arco iris?

El origen de estos efectos de colores se puede entender si se considera lo que le sucede a la luz cuando atraviesa una capa muy delgada de un material transparente que está rodeada por ambos lados de otro medio transparente. Pero antes de ver lo que sucede, tenemos que considerar otro fenómeno que entra aquí en juego: la *interferencia*.

Cuando un haz de luz es dividido en dos haces más o menos iguales y éstos separados se superponen nuevamente, resulta que en la región donde los haces se han recombinado existen zonas oscuras que se alternan con zonas luminosas; la iluminación no es pareja.

Para observar este fenómeno con detalle se puede realizar el siguiente experimento: perfórese un pequeño agujero en una pantalla de cartulina negra con la que se cubre la ventana del cuarto, con el fin de que penetre apenas un estrecho haz de luz. Enfrente de la ventana colóquese una segunda pantalla negra, en la que se hayan hecho con una navaja dos ranuras muy delgadas y próximas entre sí (Figura 15). En seguida colóquese otra pantalla, pero esta vez blanca, para recibir la luz que ha pasado por las ranuras. Probablemente en el primer intento usted no observe nada especial, pero cambiando con cuidado las posiciones de las pantallas y la distancia entre las rendijas podrá obtener un resultado que le parecerá extraño: en la pantalla blanca se proyectan franjas de colores en forma alternada. Si no hay otras luces en

el cuarto, esta imagen se percibe con mucha claridad.



**Figura 15. El experimento de las dos rendijas. Un estrecho haz de luz atraviesa dos ranuras muy próximas; sobre la pantalla blanca aparecen proyectadas franjas de luz alternadas con franjas oscuras.**

Esta experiencia fue realizada por Thomas Young, un médico inglés, en 1802, cuando el Sol era casi la única fuente de luz que se empleaba para los experimentos ópticos. Pero hoy día podemos remplazar la luz solar con la de una bombilla o foco incandescente, que es más fácil de adaptar a nuestras necesidades. Si empleamos luz monocromática, podemos hacer una observación adicional: la imagen proyectada consiste ahora de franjas oscuras que se alternan con franjas claras, siempre del mismo color.

La explicación de este efecto, ofrecida por el propio Young (aunque sus contemporáneos no se la querían aceptar; véase el capítulo III) se basa en el hecho de que la luz es un fenómeno *ondulatorio*.

Todos hemos tenido oportunidad de observar algunos comportamientos característicos de las ondas. Recordemos, por ejemplo, las ondas que se forman en la superficie de agua de un estanque. Si la fuente de estas ondas es pequeña (por ejemplo, una piedrita lanzada al agua), las ondas son circulares y se propagan en forma radial, hacia afuera. En cambio, si la fuente de ondas es plana (por ejemplo, una regla que agita el agua con un ligero movimiento periódico, las ondas son planas y se propagan todas en la misma dirección. Esta dirección de propagación no se modifica mientras las ondas no se encuentren barreras o con un cambio en el medio de la propagación. Si por ejemplo, la profundidad del agua cambia, la onda se desvía; sufre una refracción. Esto les sucede a las olas del mar cuando se aproximan a la playa.

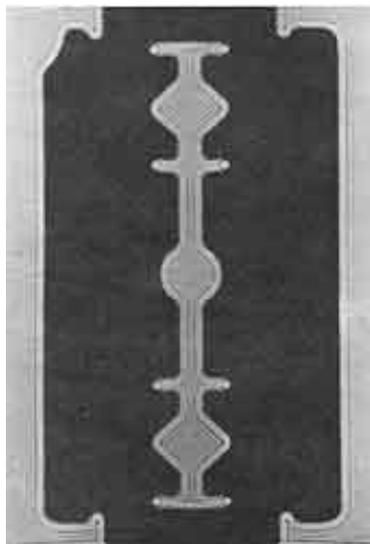
Se observa también que cuando en el estanque hay una barrera, la onda se deforma al llegar a ella, como dándole la vuelta al obstáculo. El resultado es que la onda puede ser detectada aun detrás de la barrera aunque con una menor intensidad como se ilustra en la figura 16. Este efecto, llamado *difracción*, se presenta en todos los fenómenos ondulatorios. Gracias a la difracción del sonido podemos escuchar a alguien que nos llama desde otro cuarto: el sonido le da la vuelta a los bordes de las paredes. Es más, los tonos más bajos nos llegan mejor, lo que significa que las ondas de mayor longitud se difractan más.



**Figura 16. Fotografía aérea de un puerto, en la que se muestra la difracción de las olas en trono al borde de un rompeolas.**

Esto explica por qué no es usual observar la difracción de la luz: la longitud de las ondas de la luz es sumamente pequeña, pequeñísima comparada con el tamaño de los objetos que nos rodean. Pero aun así, hay métodos sencillos para poner en evidencia el fenómeno. Por ejemplo, si coloca usted sus manos frente a sus ojos de tal manera que sólo pueda pasar la luz por una delgada rendija entre dos dedos, podrá observar bandas oscuras y claras, paralelas a los bordes de la rendija. De hecho, el italiano F. Grimaldi descubrió en 1650 la difracción de la luz al observar cuidadosamente la sombra de un cabello.

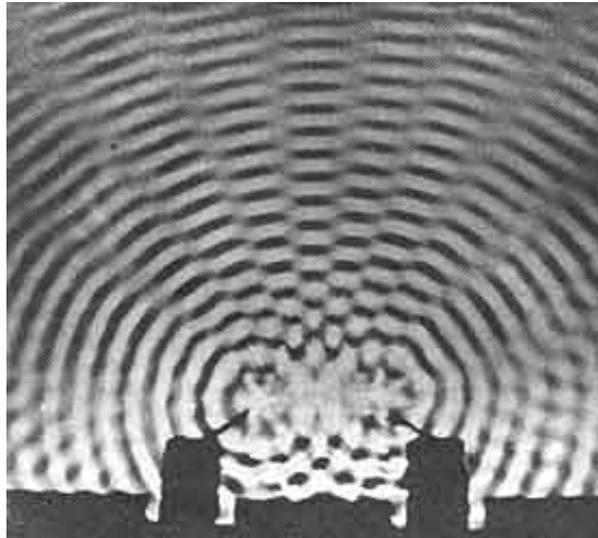
Como resultado de la difracción de la luz, los contornos de las sombras pierden su nitidez; la frontera entre luz y sombra deja de ser clara. En la zona del borde aparecen franjas claras y oscuras, como se ilustra en la figura 17.



**Figura 17. La sombra de una navaja. Los efectos de los bordes se deben a la difracción de la luz.**

Otra característica de las ondas es que pueden *interfreir* unas con otras. Por ejemplo, cuando en el estanque de agua hay dos fuentes que generan ondas (véase la Figura 18), se observa que estas dos ondas se superponen al pasar por el mismo punto, sumándose o restándose según la altura de cada una de ellas. Recuérdese que la parte más alta de una onda se llama cresta y la más baja valle. Hay puntos del agua en los que la cresta de una onda coincide siempre con el valle de la otra, y viceversa; esto da como resultado que en dichos puntos el agua no se mueve: es como si por ellos no pasara ninguna onda. Son los puntos que se ven grises en la fotografía de la figura 18; en cambio, en las zonas blancas la altura de la onda

resultante es positiva (son zonas de crestas), y las zonas negras representan depresiones en el agua (o sea, valles).



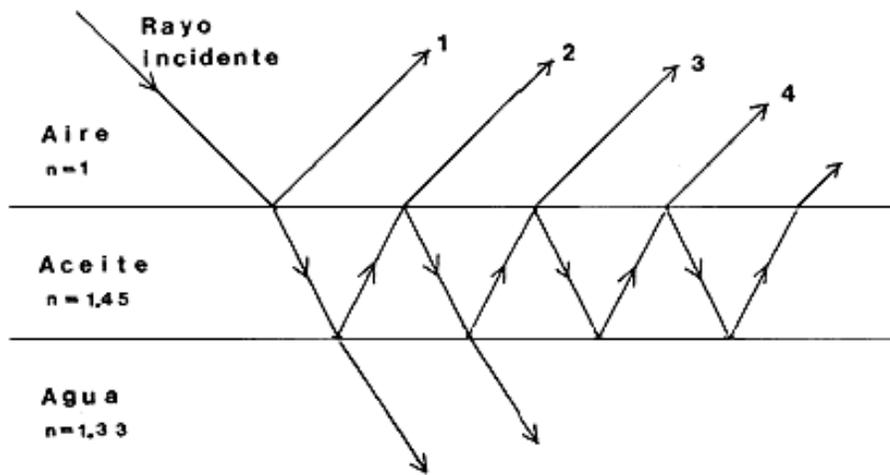
**Figura 18. Fotografía de un patrón de interferencia entre las ondas generadas simultáneamente por dos fuentes en el agua.**

Para que esta interferencia se dé es necesario que las dos fuentes envíen sus ondas en forma *coherente*, es decir, que las crestas (o los valles) salgan de sus respectivas fuentes al mismo tiempo (en fase) o con una diferencia de tiempos que se mantenga constante durante toda la emisión; si la fase varía al azar, se destruye la interferencia.

Pues bien, lo mismo sucede con la luz: las ondas de luz emitidas por dos fuentes con fases constantes interfieren, dando lugar a un patrón como el de la figura 15. Recuérdese que en este caso, en lugar de dos fuentes, se usaron dos rendijas por las que pasa la luz emitida por una solamente. La razón de ello es que dos fuentes de luz independientes no producen emisiones coherentes. Cada una de las rendijas actúa como una nueva fuente. Las zonas oscuras son aquellas en las que la onda de una fuente siempre cancela a la de la otra; son las llamadas zonas de interferencia *destruktiva*, en las que la onda resultante siempre es nula. A éstas no llega la luz. Las zonas que aparecen más iluminadas son aquellas en las que siempre coinciden las crestas (o los valles), produciéndose interferencia *constructiva*.

Ahora regresemos a la cuestión del color de las manchas de aceite. Cuando la luz incide en una capa de aceite, le sucede algo similar a lo que se ilustra en la figura 19: una parte de la luz se refleja en la superficie, y la otra penetra en el aceite, refractándose; de ésta, una fracción se refleja en la superficie del agua, se refracta nuevamente al salir el aire, y así sucesivamente. El resultado es que salen muchos rayos (los rayos 1, 2, 3, 4, etc.) que interfieren entre ellos, porque como emanaron de la misma fuente, viajan en fase. Esta interferencia da lugar a franjas claras y oscuras. ¿Por qué las franjas se ven de distintos colores? Porque como ya dijimos, los diversos colores del espectro se refractan en mayor o menor grado, y entonces las trayectorias de un color difieren de las de otros colores. En consecuencia, se obtiene un patrón de interferencia para *cada uno* de los colores, y la combinación de todos estos patrones es lo que produce el aspecto irisado de la mancha de aceite.

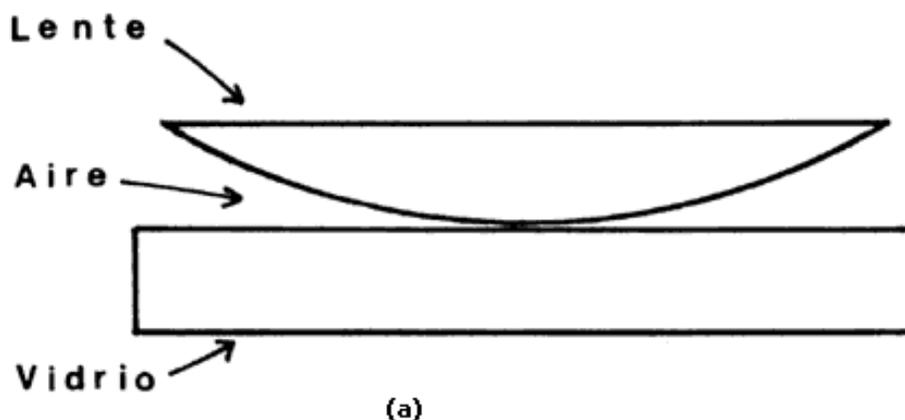
Con las pompas de jabón sucede algo similar, salvo que en este caso se trata de una delgada capa de agua rodeada de aire por arriba y por abajo (el jabón no tiene propiedades ópticas especiales; se agrega al agua sólo para poder hacer las pompas muy delgadas). El mismo efecto de interferencia da lugar a la iridiscencia de las escamas de algunos peces: estas escamas están cubiertas de una delgada capa de material transparente que da lugar a múltiples reflexiones y refracciones, como las ilustradas en la figura 19.



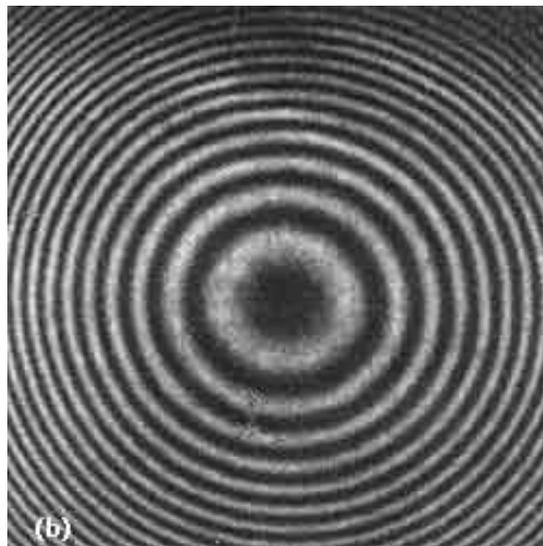
**Figura 19. Trayectorias de la luz que incide en una capa de aceite flotando sobre agua.**

Este efecto de interferencia por reflexiones múltiples ha sido aprovechado para la fabricación de materiales con determinadas propiedades ópticas. Suponga, por ejemplo, que el grosor de la capa de la figura 19 es justamente el adecuado para que todos los rayos reflejados interfieran constructivamente: entonces esta capa actúa como un magnífico reflector. Si en cambio el espesor de la capa es tal que los rayos 1, 2, 3, etc. interfieren destructivamente, no hay luz reflejada; se trata de una capa antirrefleitora. Por otra parte, si los rayos de determinados colores se suman, pero los de otros se destruyen, la capa actúa como filtro cromático. Las capas necesarias para producir estos efectos son muy delgadas —de diezmilésimos de milímetro—, por lo que suelen aplicarse sobre soportes de vidrio o sobre las lentes de los aparatos ópticos.

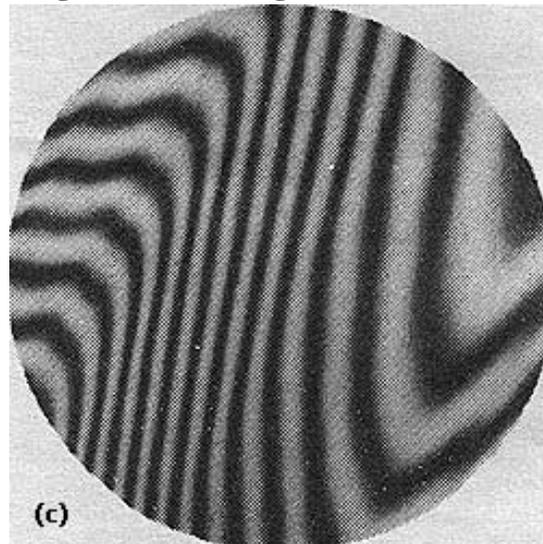
Otra forma sencilla de producir la interferencia de la luz es mediante el aparato de los anillos de Newton, que consiste simplemente de una lente convexa colocada sobre un vidrio plano, como se ilustra en la figura 20(a). Cuando este sistema es iluminado verticalmente desde arriba, se obtiene una imagen de anillos concéntricos, que son bandas de interferencia (Figura 20(b)). Utilizando luz blanca para iluminar puede obtenerse un patrón de hermoso colorido. En la figura 20(c) se muestra el tipo de imagen que puede resultar cuando el vidrio de abajo no es perfectamente plano o el pulido de la lente no es regular.



**Figura 20. Los anillos de Newton. (a) Aparato para producir los anillos.**



**Figura 20. (b) Fotografía de los anillos.**

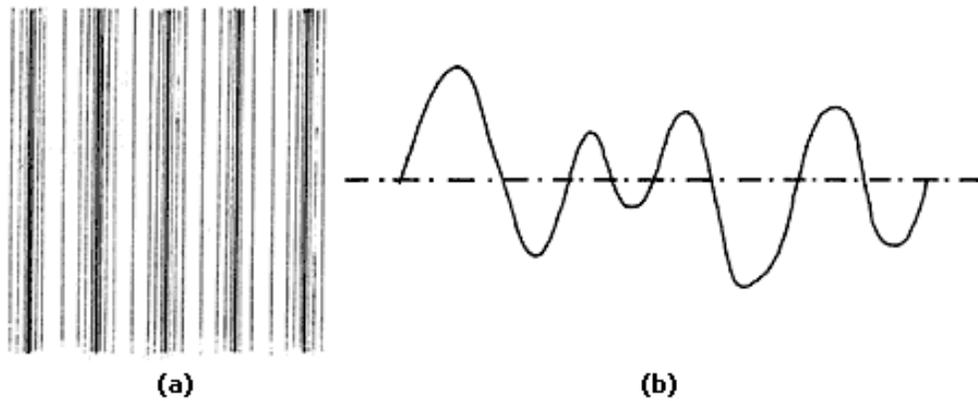


**Figura 20. (c) Patrón que se obtiene cuando alguna de las superficies no está bien pulida.**

## 5. LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ

Ahora que hemos aprendido que la luz es un fenómeno ondulatorio se antoja comparar las ondas de la luz con otras que nos son más familiares. Hemos hablado de las ondas sonoras y de las que se forman en una superficie de agua, pero podemos pensar también, por ejemplo, en las que se forman en una cuerda, o en el cuero de un tambor, o en las ondas sísmicas que nos llegan desde el epicentro de un terremoto.

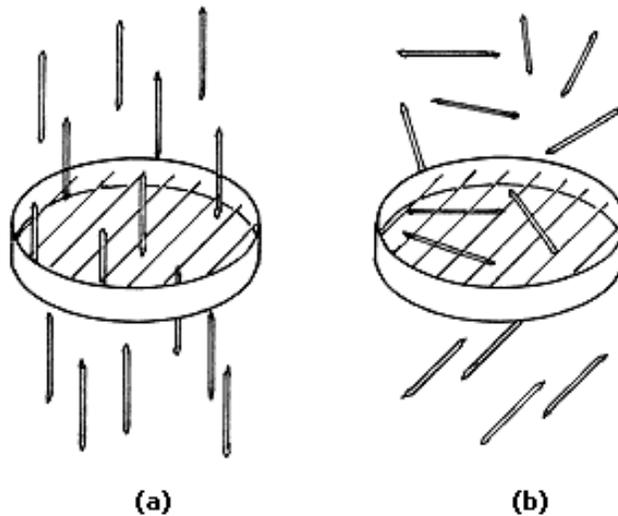
Todas estas ondas tienen propiedades en común, pero también tienen características específicas. En particular, resulta que en algunos casos la perturbación del medio es paralela a la dirección de propagación de la onda; piénsese por ejemplo en el caso del sonido, en que la alteración provocada por la fuente sonora se propaga como una onda de compresión y expansión del aire (Figura 21(a)). Se trata aquí de ondas *longitudinales*. En otros casos la perturbación del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como sucede, por ejemplo, con las olas en el agua, o con una cuerda que se pone a vibrar (Figura 21(b)). Se trata entonces de ondas *transversales*.



**Figura 21. Ondas longitudinales y transversales.**

**(a) Las ondas sonoras son longitudinales. (b) Las ondas en una cuerda son transversales.**

Pues bien, resulta que las ondas de luz son transversales. Y una diferencia importante entre los dos tipos de onda es que las transversales se pueden *polarizar*, mientras que las longitudinales no. Para entender lo que esto significa, veamos la figura 22, en la que se dejan caer palillos a través de una coladera hecha de hilos paralelos. En el caso (a), todos los palillos pasan, pero en el caso (b) sólo aquellos que están orientados en la dirección de los hilos. Podemos decir entonces que esta coladera es como un polarizador, porque del conjunto de palillos que le llegan con todas las orientaciones sólo deja pasar aquéllos que tienen una determinada orientación.



**Figura 22. Polarización de un conjunto de palillos.**

**(a) Los palillos longitudinales pasan todos por la coladera: no hay polarización;**

**(b) de los palillos transversales sólo pasan algunos: el conjunto sale polarizado.**

El primer caso de la figura 22 es análogo al de las ondas longitudinales: todas pasan a través del polarizador. El segundo asemeja a las ondas transversales: sólo pasan las ondas paralelas a la rejilla, y como resultado de esta selección éstas salen polarizadas.

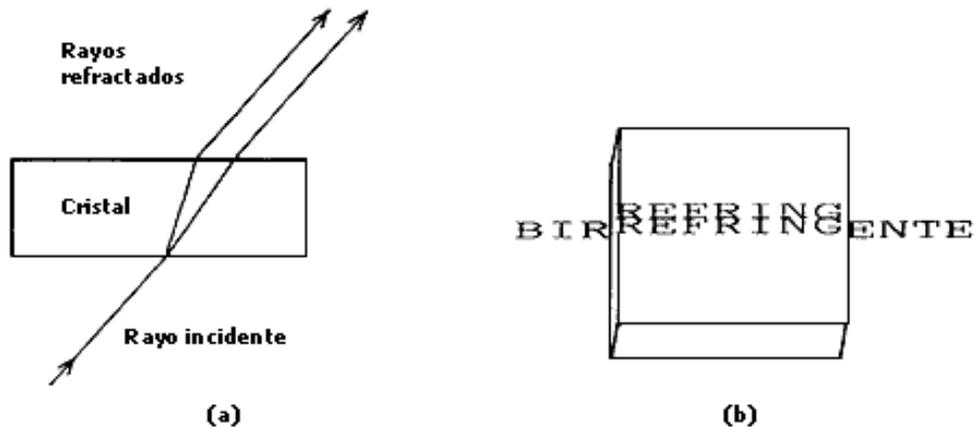
En consecuencia, la luz, siendo una onda transversal, puede ser polarizada. A simple vista esto no hace ninguna diferencia; quizá una parte de la luz que usted está recibiendo esté polarizada, pero no lo nota. Pero ahora coloque un polarizador enfrente de sus ojos; entonces sí va a observar alguna diferencia. Es como si colocara una coladera que sólo deja pasar una fracción de la luz. Suponga usted que la luz ya venía polarizada antes de incidir en el polarizador; es como si los palillos ya polarizados cayeran sobre una segunda coladera. En particular si los hilos de ésta son perpendiculares a los de la primera coladera, no

habrá palillo que pase. Así, dos polarizadores dispuestos en direcciones perpendiculares —o sea, cruzados— no dejan pasar la luz.

En realidad, aunque no nos demos cuenta, mucha de la luz que vemos está polarizada. Para empezar, la luz del Sol no llega parcialmente polarizada, por efecto de las moléculas del aire; además, la luz azul viene más polarizada que la roja. Curiosamente, los ojos de las abejas sí están provistos de un mecanismo para detectar la polarización, y esto les sirve aun en días nublados para orientarse y regresar a su panal.

También la luz reflejada por una superficie no metálica se polariza parcialmente. Por ejemplo, los reflejos que recibimos del agua y de los vidrios vienen polarizados. Por ello, usando anteojos polarizadores podemos eliminar en buena medida los reflejos, lo cual nos permite ver mejor las imágenes no reflejadas..., siempre y cuando la orientación del polarizador esté escogida adecuadamente.

Algunos cristales, como el cuarzo, la calcita y la turmalina, tienen la capacidad de polarizar la luz, gracias a una propiedad muy curiosa: estos cristales tienen dos índices de refracción. Esto significa que un solo haz incidente es refractado por el cristal de dos maneras, por lo que salen dos haces separados y se forman dos imágenes (Figura 23). Cada una de éstas está hecha con luz polarizada. Si usted tiene oportunidad de conseguir un trozo de cristal birrefringente podrá ver la formación de las dos imágenes, y si tiene anteojos polarizadores a su alcance observe usted cómo puede hacer aparecer y desaparecer cada una de las dos imágenes al girar los anteojos.



**Figura 23. Un cristal birrefringente separa el rayo incidente en dos rayos (a), dando así lugar a dos imágenes (b).**

Hay muchos materiales, naturales y artificiales, que pueden afectar la polarización de la luz. El polaroid, que es un material sintético, está hecho de largos y diminutos cristales que contienen yodo, alineados y embebidos en una hoja de plástico. Al atravesar el polaroid, la luz se polariza en la dirección de estos cristales.

Un bello ejemplo de uso de la polarización se muestra en la figura 24: un objeto prácticamente transparente se vuelve visible cuando es colocado entre dos polarizadores, porque las sustancias de las que está hecho modifican la polarización de la luz que lo atraviesa. Usted puede observar este fenómeno al introducir un trozo de celofán arrugado entre dos polarizadores; los diversos colores de la imagen dependen del grosor de las capas de celofán y de la orientación relativa de los dos polarizadores. Si estira usted el celofán, puede llegar a percibir los efectos de la tensión sobre la estructura del material. En efecto, la polarización de la luz se usa de esta manera como herramienta para detectar tensiones en los componentes de una estructura.



**Figura 24. Una araña vista a través de un microscopio de luz polarizada.**

**La araña está colocada entre dos polarizadores.**

### NOTAS

\*Nótese que el mismo término dispersión se ha empleado en las secciones 2 y 3 para describir dos fenómenos diferentes. Ésta es una connotación del español local, que esperamos no confunda al lector. Al fenómeno descrito en esta sección se le llama *difusión* en España, y *scattering* en los países de habla inglesa.

---

**Indice**



# III. HISTORIA DE LA ÓPTICA

## 1. EL NACIMIENTO DE UNA CIENCIA

LA LUZ y los fenómenos relacionados con ella han desempeñado un papel fundamental en la evolución y el desarrollo de la humanidad. Difícil sería imaginar un mundo envuelto en la eterna oscuridad; lo que sí es claro es que sería muy diferente del mundo en que vivimos... y mucho menos interesante.

Tomando esto en cuenta, no es de sorprender que la óptica haya surgido como una de las primeras ramas de las ciencias naturales: desde épocas muy remotas el hombre se ha sentido atraído por los fenómenos luminosos, que despertaban en él gran curiosidad, y que le aportaban, además, una variedad de beneficios prácticos.

Entre los vestigios de las antiguas civilizaciones se han hallado algunos objetos que testimonian este interés por los fenómenos ópticos. Por ejemplo, en las ruinas de Nínive, antigua capital asiria, fue encontrada una pieza de cristal de roca, pulida en forma de lente convergente. En Creta se hallaron dos lentes que datan de 1200 a.C. y que, según algún historiador, fueron usadas como lentes de aumento, aunque no hay testimonio que confirme esta hipótesis.

Más antiguos aún, de entre los restos de tumbas egipcias se han extraído trozos de espejos metálicos, que probablemente no servían sólo de adorno, sino también para desviar la luz del Sol. ¿Cómo se explica una de otra manera las hermosas decoraciones que cubren los muros interiores de las tumbas subterráneas, accesibles sólo por estrechos retorcidos túneles? Porque resulta que no hay señal alguna de que sus autores hayan utilizado fuego para alumbrarse mientras pintaban..

Por otra parte, un fragmento de un antiguo documento griego encontrado en Egipto habla de algunas ilusiones ópticas. Entre ellas menciona un conocido efecto visual que no ha dejado de intrigar a la humanidad; el agrandamiento aparente del Sol y de la Luna cuando se acercan al horizonte (Figura 25).



**Figura 25. El agrandamiento aparente de la Luna cerca del horizonte sigue provocando nuestra admiración.**

En un pasaje de *Las nubes*, divertida comedia de Aristófanes que data del siglo V a.C., se habla de una piedra transparente que se surte en las boticas y que sirve para encender el fuego y para fundir la cera con la luz del Sol. Curiosamente, si bien había entre los griegos un conocimiento de las propiedades de los espejos y de los "cristales encendedores", no parece que hayan desarrollado la habilidad de producir amplificación de imágenes con la ayuda de estos objetos; para ello habría que esperar hasta la Edad Media.

Los filósofos naturales de la antigua Grecia propusieron algunas teorías ópticas en las que se confundía la luz con el fenómeno de la visión. Según decían los pitagóricos, la visión es causada por la proyección de imágenes lanzadas desde los objetos hacia el ojo. En cambio, Euclides y los platónicos sostenían que la sensación visual se produce cuando los "haces oculares" enviados desde los ojos chocan con los objetos. Podría resumirse la idea de los platónicos acerca de la visión diciendo: "Ojos que no ven, luz que no existe."

Aristóteles rechazaba estas dos teorías de la visión, y proponía en cambio que el medio entre el objeto y el ojo desempeña un papel esencial. Decía que cuando este medio (que puede ser el aire o el agua, por ejemplo) está en reposo, hay oscuridad; excitado por el "fuego" de un objeto, el medio pasa al estado activo y se vuelve transparente. Los colores del objeto pueden entonces viajar hasta nuestros ojos; del "estado de actividad" del medio dependerá qué colores puede transmitir.

También los matemáticos griegos se preocuparon por la óptica, pero por sus aspectos geométricos. Por ejemplo, a la pregunta de por qué los objetos se vuelven invisibles con la distancia, respondían que los rayos visuales que salen del ojo son divergentes, y cuanto más se alejan de éste, tanto más espacio dejan entre ellos. Observaciones geométricas tan importantes como la propagación rectilínea de la luz, y la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión se hallan en los escritos sobre óptica atribuidos a Euclides, el gran géometa alejandrino.

Los famosos espejos concavos que según la historia emplearon los siracusanos para quemar las naves del invasor romano fueron producto de los estudios ópticos de Arquímedes. Desgraciadamente este invento no parece haber logrado su cometido, porque los romanos sitiaron la isla de Siracusa —y aunque aparentemente por error de un soldado— mataron a Arquímedes. Sin embargo, la obra de este científico llegó a ejercer una influencia importante hasta los dos primeros siglos de nuestra era inspirado en sus hallazgos, Herón estudió los espejos de diversas formas: planos, cóncavos y convexos, y logró fundir en una las dos leyes de la reflexión especular. Escribe en su obra *Catoptrica*: "el rayo, sea o no reflejado, sigue siempre el camino más corto entre el objeto y el ojo" (véase capítulo I, sección 2). Esta aseveración sería retomada por Fermat en el siglo XVII, quien la reformuló en términos más generales.

También el fenómeno de la refracción llamó la atención de los griegos. Una contribución importante a su estudio se la debemos al astrónomo Claudio Tolomeo, quien en su *Libro quinto de óptica* informa de la construcción de un aparato para medir con exactitud los ángulos de incidencia y de refracción, si bien no logró formular la ley de la refracción, que todavía Kepler, en el siglo XVII, buscaría en vano. Al estudiar la refracción producida por la atmósfera, Tolomeo advirtió que su magnitud aumenta con la distancia de los astros al cenit, por lo que sus efectos son más notables en la cercanía del horizonte.

## 2. LA ÓPTICA DURANTE LA EDAD MEDIA

La época del Imperio romano y la mayor parte del Medievo transcurrieron prácticamente sin dejar huella en la historia de la física en Occidente. Las contribuciones más significativas a la óptica medieval se deben sin duda al célebre científico árabe Ibn al-Haytham, conocido en Europa como Alhazan o Al-Hazen, quien vivió en el siglo X.

Los mahometanos se habían impuesto la tarea de "examinar las obras de los griegos y mejorarlas donde sea posible". A esto se dedicó Al-Hazen, y con éxito. Por ejemplo, logró establecer una distinción clara entre la luz como entidad física y el ojo como detector. Hizo importantes adelantos en la óptica de lentes y espejos, y fue el primero en analizar correctamente los principios de la cámara oscura. Hizo un buen cálculo de la altura de la atmósfera, basado en la duración del crepúsculo. Además, anticipó un descubrimiento reservado a un lejano porvenir: que la luz viaja con una velocidad finita.

En buena medida los adelantos en la óptica árabe se debieron a sus aplicaciones a la medicina. De la obra de Al-Hazen, traducida al latín en el siglo XIII, hemos heredado algunas de las palabras usadas para identificar las partes del ojo: retina, córnea, humor acuoso, humor vitreo...

En Occidente habían de transcurrir aún tres siglos para que una persona se aventurara a cuestionar los cánones aristotélicos: el monje franciscano Roger Bacon. Entre otras cosas, Bacon estudió a fondo la obra de la escuela árabe. Era un aficionado de la óptica, y consideraba que esta ciencia, "además de ser bella, es indispensable para el conocimiento de otras ciencias".

Hay quienes consideran que Bacon fue el inventor de los anteojos. Se dice que recomendaba su uso a los ancianos y a las personas de vista débil, y que era tan experto en estos menesteres, que al usar los lentes personalmente podía enterarse en Oxford de lo que estaba sucediendo en París. Habría que aclarar que ya en aquellos tiempos la tecnología del pulido de cristales estaba muy desarrollada en el norte de Italia, y probablemente los vidrieros venecianos o pisanos se adelantaron a Bacon con el invento. Aun así, las aportaciones de Bacon a la sistematización de la óptica como ciencia fueron importantes, si bien sus ideas innovadoras, en particular su *Llamado a la ciencia experimental* lanzado desde la prisión, no encontrarían eco hasta el Renacimiento.

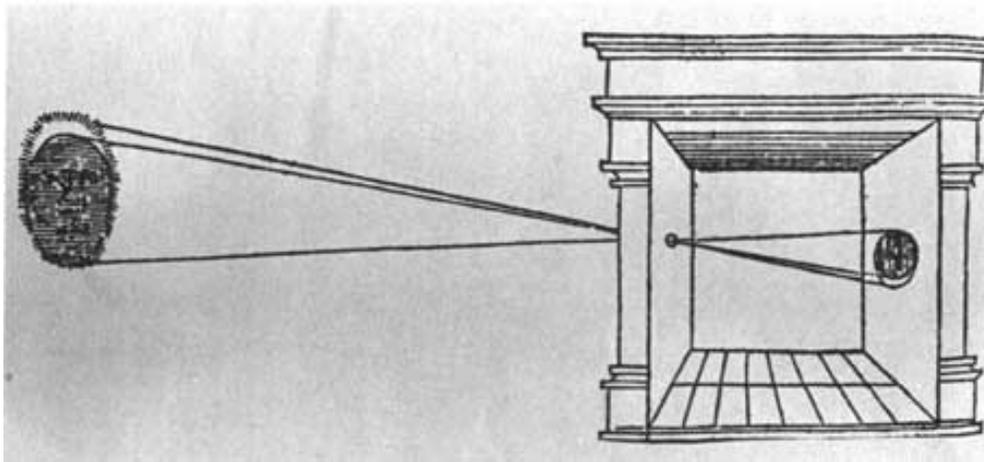


**Figura 26. Primera pintura de una persona con anteojos, obra de Tommaso da Modena que data de 1523.**

### **3. EL DESARROLLO DE LA ÓPTICA DURANTE EL RENACIMIENTO**

La revolución artística que se dio en Europa durante los siglos XVI y XVII estuvo acompañada de una revolución comparable en el ámbito de las ciencias. Los científicos abandonaron la especulación escolástica y comenzaron a estudiar la naturaleza a través del experimento..., con notables resultados. La óptica participó de esta revolución, y se desarrolló tanto en el plano teórico como en el práctico.

De la impresionante obra de Leonardo da Vinci, primera gran figura de la época, una parte está dedicada a la óptica. Entre otras cosas, formuló una teoría de la visión, en la que el ojo es comparado a una cámara oscura. Es muy probable, por cierto, que al igual que otros pintores de la época, Leonardo se haya valido de la cámara oscura para hacer sus croquis e incorporar los principios de la perspectiva en su pintura. Dice en uno de sus manuscritos: "Una pequeña apertura en el postillo de la ventana proyecta sobre la pared interior del cuarto una imagen de los cuerpos que están más allá de la apertura" (Figura27).

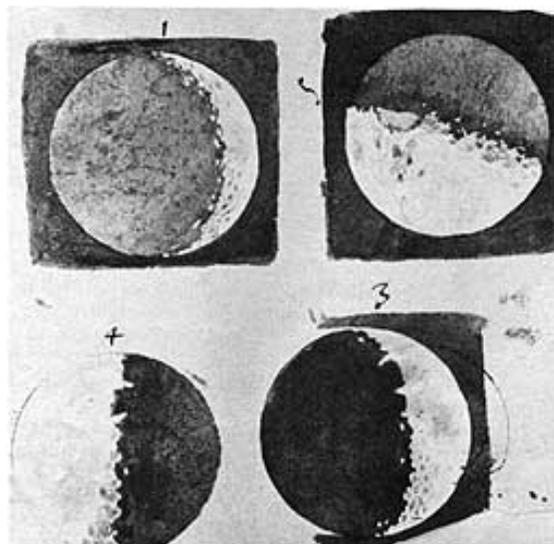


**Figura 27. Primera ilustración que se conoce de una cámara oscura,**

**usada para observar un eclipse solar en 1544. De un libro del médico holandés Gemma Frisius.**

A la revolución científica del Renacimiento contribuyó de manera importante la invención de instrumentos que ampliaban las posibilidades de observación y permitían una experimentación cuantitativa. De los instrumentos ópticos desarrollados en la época, sin duda los más importantes son el telescopio y el microscopio.

Galileo Galilei, quien durante 30 años se dedicó a hacer experimentos en física, escribe en las primeras páginas de su libro *Siderius Nuntius* ("El mensajero de las estrellas"), publicado en 1610: "Hace diez meses llegó a mis oídos la noticia de que un holandés había hecho una lente para espiar, que hace que los objetos distantes parezcan cercanos. Al cabo de un breve tiempo logré fabricar un instrumento similar, a través de un estudio profundo de la teoría de la refracción." Galileo debe de haber trabajado arduamente esos días, porque no contaba con la ley de la refracción, que fue establecida sólo 11 años más tarde por W. Snell, un joven holandés (véase capítulo I, sección 3). En cuanto tuvo armado un buen telescopio, Galileo lo dirigió hacia el firmamento y hacia la Tierra. Los descubrimientos celestes (incluidos cuatro de los satélites de Júpiter) los consignó rápidamente en la obra antes mencionada, y con la misma celeridad vendió el aparato a la alcaldía de Venecia, por ser una herramienta especialmente útil para las batallas navales (Figura 28).



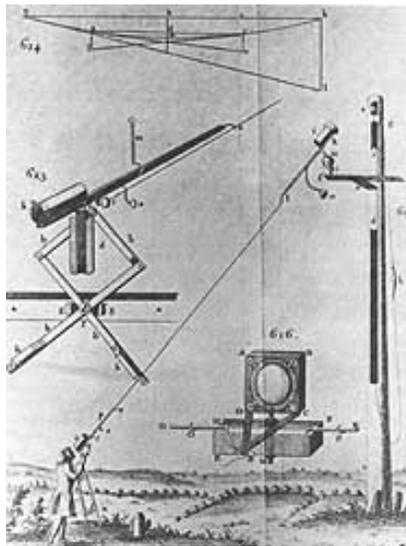
**Figura 28. "Es maravilloso contemplar el cuerpo de la Luna"**

**Acuarela de Galileo que muestra las fases de la Luna, tal como las observó con su telescopio de 1610.**

Alguno de los escolásticos —que abundaban todavía en la época de Galileo y lo atacaron ferozmente por

sus revelaciones— llegó a afirmar que los fenómenos celestes vistos por Galileo "no son más que ilusiones ópticas, y para verlas es necesario fabricar un antejo que las produzca". El célebre astrónomo Johannes Kepler, en cambio, a quien Galileo envió uno de sus primeros telescopios, estaba encantado con el instrumento, lo perfeccionó y lo usó para compilar las tablas de datos sobre el movimiento de los planetas alrededor del Sol, que constituyeron la base para el establecimiento de sus trascendentales leyes sobre el movimiento planetario. En su esfuerzo por perfeccionar el telescopio, Kepler dedicó un año al estudio de la formación de imágenes. El libro *Dioptrice* (publicado en 1611) que contiene los resultados de este trabajo, se convirtió en texto para estudiosos de la óptica durante muchos años.

Por otra parte, la publicación de Galileo se agotó en unos cuantos días y los fabricantes de lentes se dedicaron a armar telescopios cada vez más grandes y más elaborados. El físico holandés Christiaan Huygens, además de ser un gran teórico de la óptica, era especialmente hábil para la fabricación de estos instrumentos —aunque sólo los hacía para uso personal y de sus amigos (Figura 29). Con uno de sus telescopios descubrió un satélite de Saturno y pudo distinguir claramente los anillos que circundan este planeta.



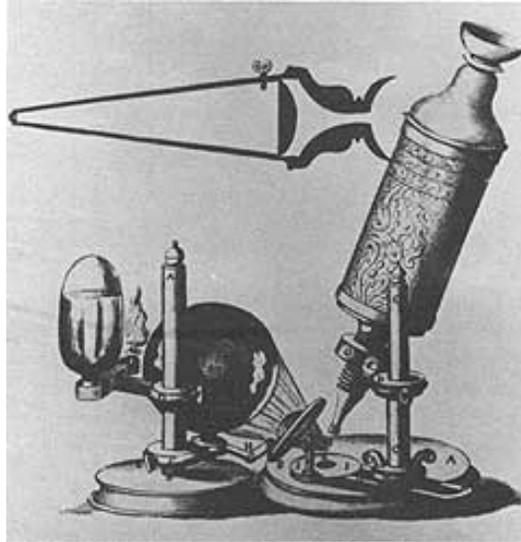
**Figura 29. El telescopio aéreo de Huygens, que tenía el inconveniente de no poderse usar cuando había viento.**

Un contemporáneo de Huygens, el astrónomo danés Olaf Römer, se había dedicado a medir con cuidado los periodos de rotación de los satélites de Júpiter y así descubrió, en 1676, que cuando uno de estos satélites se encuentra atrás de Júpiter, su luz tarda más tiempo en llegar a la Tierra que cuando se encuentra adelante de él. De esto extrajo una conclusión muy importante: que la luz no es un fenómeno instantáneo, sino que necesita tiempo para propagarse, por lo que debe viajar a una velocidad finita.

Éste y otros descubrimientos de la época sirvieron a Huygens para reunir sus propias ideas acerca de la luz. Semejante al sonido, decía, la luz es también una vibración que se propaga. Con base en esta hipótesis, logró explicar simultáneamente la mayoría de los fenómenos ópticos con una gran simplicidad. Su obra *Traité de la lumière*, escrita en 1678, representa el primer intento de desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz, si bien un esbozo de esta teoría ya había sido adelantado por Robert Hooke como resultado de sus observaciones sobre difracción e interferencia.

Cabe aquí recordar, por cierto, las valiosas observaciones de pequeños animales y de cortes vegetales que hizo Hooke con el microscopio compuesto, y que marcaron, junto con los estudios de su contemporáneo holandés Leeuwenhoek, el inicio de una nueva etapa para la biología (véase la Figura 30a). Si bien ya desde principios del siglo XVII se había emprendido la fabricación de microscopios, éstos daban imágenes poco claras y de baja amplificación. Hooke dio un importante paso adelante al aplicar la teoría de las lentes al mejoramiento del microscopio compuesto. Por otra parte, Leeuwenhoek perfeccionó el microscopio simple al elaborar lenticillas de gran poder de aumento. De los 419 microscopios fabricados por Leeuwenhoek que se conocen, algunos tienen una amplificación mayor de 250x. A estos instrumentos

se deben las primeras observaciones de bacterias, glóbulos rojos, huevecillos de insectos y muchos otros seres microscópicos, observaciones que contribuyeron a cambiar radicalmente las ideas sobre el ciclo de la vida animal y sobre la estructura de los seres vivos a nivel microscópico.



**Figura 30 (a). El microscopio compuesto de Hooke, con el que se adentró en el mundo de los microorganismos.**

Sin embargo, regresando a Huygens, hemos de aclarar que sus ideas sobre la naturaleza ondulatoria de la luz no fueron aceptadas por la mayoría de sus contemporáneos. Ya René Descartes había afirmado que la luz se compone de corpúsculos acelerados. Isaac Newton adoptó esta proposición y la incorporó en su teoría de la emisión de la luz. Newton descartaba la hipótesis ondulatoria de Huygens, entre otras cosas porque no podía explicar con ella la propagación rectilínea de la luz.

Además de su trascendental contribución a la dinámica, Newton hizo una serie de estudios importantes en óptica. En 1660, a los 18 años de edad, ya había fabricado un telescopio pequeño y poco potente, pero con una innovación: usó espejos en vez de lentes, para evitar la aberración cromática que da lugar a imágenes con franjas de colores alrededor de los objetos, como se mencionó en el capítulo II, sección 2 (Figura 30(b)). Los telescopios reflectores se convirtieron rápidamente en importantísimo instrumento de la astronomía.



**Figura 30 (b). El telescopio reflector de Newton.**

Pero a Newton, más que usar el instrumento, lo que le interesaba era estudiar esas franjas de colores, entender su origen y, de ser posible, aprender a eliminarlas para mejorar la calidad de las imágenes. Esto lo motivó a emprender una serie de estudios con prismas y luz blanca. Así obtuvo el espectro de los colores.

Observó que el prisma no modifica la luz, sino que sólo la separa físicamente, y concluyó que cada uno de los colores se distingue por su "refractabilidad". Algunos de sus contemporáneos se decepcionaron con este descubrimiento, porque se había pensado que el blanco representaba la pureza, ¡no una mezcla de colores!.

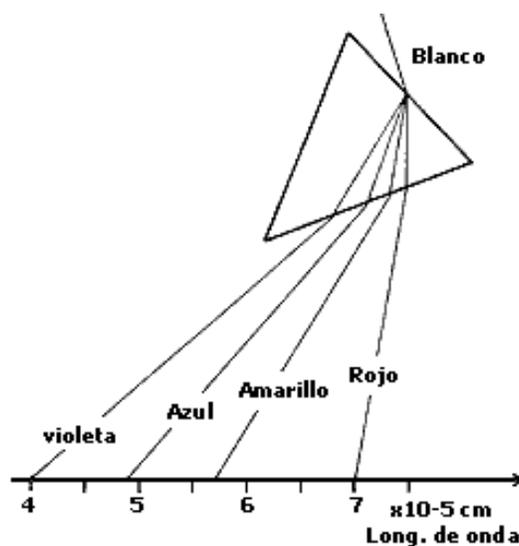
En el libro *Opticks*, escrito años más tarde, Newton informa de sus experimentos con prismas, así como otras observaciones que se refieren a la transversalidad de los rayos luminosos, a la difracción y a la interferencia. En particular describe los famosos anillos que llevan su nombre, a los que nos referimos en el capítulo II, sección 4 (Figura 20).

La obra de Newton tuvo tal repercusión, que durante un siglo fue usada como referencia clásica, y pocos eran los que se animaban a cuestionar su contenido o ir más allá en el estudio de los fenómenos ópticos. Un aspecto particular merece ser mencionado, sin embargo: Newton había concluido que la aberración cromática no puede ser eliminada de las lentes, ni siquiera usando una combinación de ellas. A pesar de ello, una combinación acromática de lentes se logró en la práctica en 1758, y significó un enorme paso adelante para la astronomía y la microscopía, así como para la geografía y la artillería. José Antonio Alzate, ilustre científico de la Nueva España, reporta a fines del siglo XVIII el uso de un "excelente antejo acromático" para estudiar la geografía de los volcanes del Valle de México.

#### 4. EL SIGLO DE LAS ONDAS

El siglo XIX se inició con una serie de pruebas que sugerían que la luz es de naturaleza ondulatoria. La prueba más importante provino de los experimentos que mostraron la existencia de la interferencia, realizados por Thomas Young entre 1801 y 1804, a los que nos referimos en el capítulo II (véase la Figura 15). Young explicó los anillos de Newton como debidos a la superposición de ondas. Contando el número de anillos, llegó incluso a determinar la longitud de onda de la luz: encontró que en una pulgada caben 37 640 ondas rojas y 59 750 ondas violetas.

Este descubrimiento es sumamente importante, porque pone de manifiesto una relación directa entre el color —que representa una sensación visual— y un parámetro físico, como lo es la longitud de onda. Resulta, de acuerdo con lo establecido por Young, que la longitud de onda de la luz es muy pequeña, del orden de 0.00005 cm, o sea, la mitad de una micra, correspondiéndole al violeta una longitud menor que al rojo. A los colores intermedios del arco iris les corresponden valores intermedios de la longitud de onda (Figura 31).



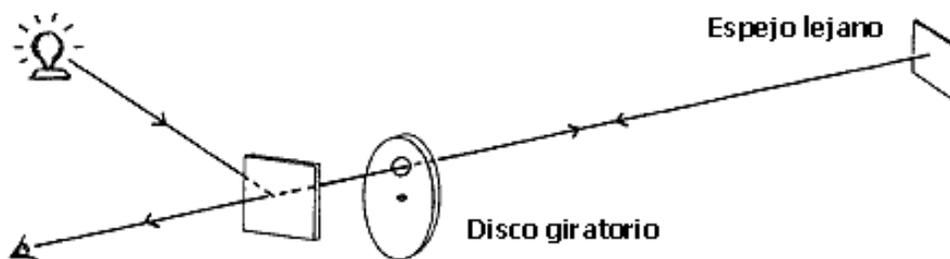
**Figura 31. A cada color del arco iris le corresponde una longitud de onda determinada.**

Las publicaciones de Young acerca de la interferencia son consideradas hoy día la obra más trascendente en óptica física aparecida después del libro de Newton. Pero en su época, en que dominaba la concepción mecanicista del Universo, no eran nada bien vistas. Por ejemplo, escribía uno de sus críticos que los

artículos de Young "no contienen nada que merezca el nombre de experimento o descubrimiento [...] su único efecto puede ser el de detener el progreso de la ciencia". Young publicó un folleto en el que respondía a estas críticas con serios argumentos, pero de esta publicación se vendió un solo ejemplar.

Así las cosas, prefirió dedicarse a otros temas de estudio, hasta que en 1815 la teoría ondulatoria fue revivida por Augustin Fresnel a través de sus estudios de la difracción y la interferencia —sin tener conocimiento de los trabajos de Young. Poco a poco la teoría fue ganando terreno, al poder explicar fenómenos tan diversos como los colores de las pompas de jabón, los anillos de Newton, la polarización, la birrefringencia, e incluso la propagación rectilínea de la luz. Sólo mucho después, a principios de este siglo, surgen nuevos fenómenos que dirigen la atención de los físicos hacia una renovada imagen corpuscular de la luz.

Los éxitos de la teoría ondulatoria revivieron el interés por determinar con precisión la velocidad de la luz. Según la teoría de emisión de Newton, la luz debía viajar más rápido en un medio ópticamente denso que en el aire; según la teoría ondulatoria debía suceder lo contrario. Claro que hace 150 años medir la velocidad de la luz con precisión no era tarea sencilla, porque la luz viaja sumamente rápido. En 1849, Fizeau, en Francia, diseñó un método estroboscópico similar al que se ilustra en la figura 32, aunque algo más complicado, en virtud de la alta velocidad de la luz. Las mediciones de Fizeau, y todas las realizadas posteriormente, le dieron la razón a la segunda teoría: la luz disminuye su velocidad al entrar en un medio ópticamente denso.



**Figura 32. Esquema del método estroboscópico para medir la velocidad de la luz.**

**Un pulso de luz pasa a través del agujero del disco giratorio y se refleja en el espejo. Para que el pulso reflejado**

**pase también por el agujero, es necesario que éste se encuentre en ese instante en la posición adecuada.**

Los experimentos estroboscópicos se fueron haciendo cada vez más elaborados. En 1972, el norteamericano A. Michelson usó luz reflejada desde el monte Wilson hasta el monte San Antonio, a 35 km de distancia, y así obtuvo el valor de 299 798 km/seg, con una precisión de 0.001%.

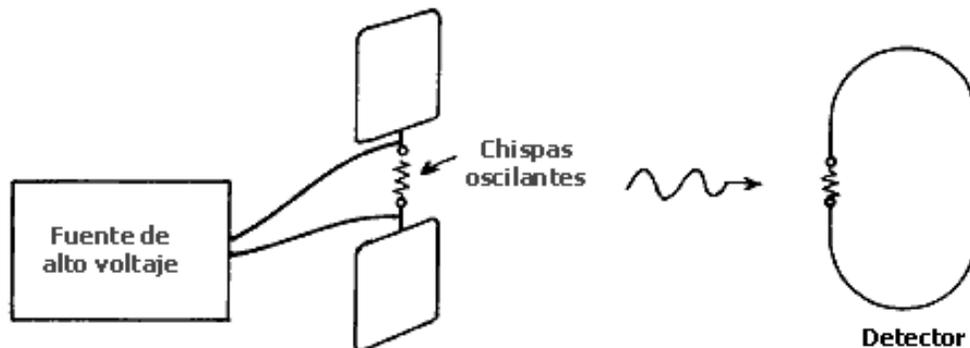
La velocidad de la luz es considerada una de las constantes físicas más importantes, y en especial ocupa un lugar central en las teorías del electromagnetismo y de la relatividad. Pero, ¿qué tiene que ver la luz con el electromagnetismo?

La primera prueba de que la luz está relacionada con fenómenos eléctricos y magnéticos la obtuvo Michael Faraday, gran experimentador inglés, en 1845. "Finalmente he logrado iluminar una curva magnética y magnetizar un rayo de luz", escribe, refiriéndose al cambio de polarización que sufre la luz al pasar por un vidrio que está sujeto a un campo magnético. Éste y otros experimentos de Faraday y de algunos contemporáneos suyos sirvieron de base para la teoría electromagnética de la luz, desarrollada y expresada en lenguaje matemático por el escocés James C. Maxwell.

La teoría de Maxwell, que describe en forma unificada el conjunto de fenómenos eléctricos y magnéticos, condujo a muchas predicciones nuevas, que posteriormente fueron comprobadas experimentalmente. Una de las más importantes fue que pueden existir ondas de radiación de campo eléctrico y magnético, que estas ondas viajan con la velocidad de la luz, y que ésta es, en efecto, radiación portadora de energía, y por esta misma razón ejerce una presión al chocar contra una superficie.

En nuestra experiencia común, la presión de la luz es tan pequeña que no la detectamos; pero en el interior de las estrellas sí puede llegar a ser significativa. La presión de la radiación solar es responsable nada menos que de la cauda de los cometas.

El Vaticinio de Maxwell acerca de las ondas de radiación electromagnética fue confirmado 15 años más tarde, en 1888, por Heinrich Hertz al producir ondas por medio de cargas oscilantes y detectarlas por medio de antenas (véase la Figura 33). Este experimento fue la piedra angular para el desarrollo de la radio y de toda la comunicación inalámbrica.



**Figura 33. Esquema del aparato usado por Hertz para producir y detectar ondas de radio.**

En realidad, las ondas de radio no son las primeras ondas invisibles que fueron descubiertas. Ya en 1800 el astrónomo William Herschel, al medir el calentamiento producido por los distintos colores de la luz solar, había observado que más allá del rojo hay una radiación que no se ve, pero que calienta. Lo que descubrió así fue la radiación infrarroja, de longitud de onda menor que un mm. (Las ondas de Hertz, en cambio, tienen una longitud de varios metros.) En la misma época, el físico Wilhelm Ritter, en Alemania, y el médico John Wollaston, en Inglaterra, descubrieron una radiación oscura que tiene efectos químicos: se trataba de la luz ultravioleta, de longitud de onda más pequeña que la de la luz visible.

En 1895 fue descubierto otro tipo de ondas, de longitud aún más pequeña: los rayos X (Figura 34). Pero al igual que sucedió con las otras radiaciones mencionadas, cuando Röntgen hizo su descubrimiento no sabía que se trataba de ondas electromagnéticas. Esto vino a ser confirmado apenas en 1912, cuando Max von Laue mostró que los rayos X se difractan al igual que otras ondas.

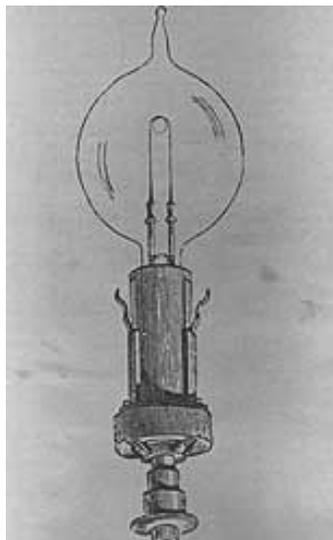


**Figura 34. Radiografía original tomada por Röntgen, de un hombre con zapatos y con llaves en los bolsillos.**

Poco a poco se fue cubriendo el espectro completo de la radiación electromagnética, desde las ondas de radio de 10 km hasta los rayos  $\gamma$  de 0.0000000001 cm.

Así, el trabajo de Maxwell, Hertz y muchos otros científicos del siglo XIX abrió no sólo una nueva ventana a nuestra visión de la naturaleza, sino también una nueva puerta al desarrollo tecnológico.

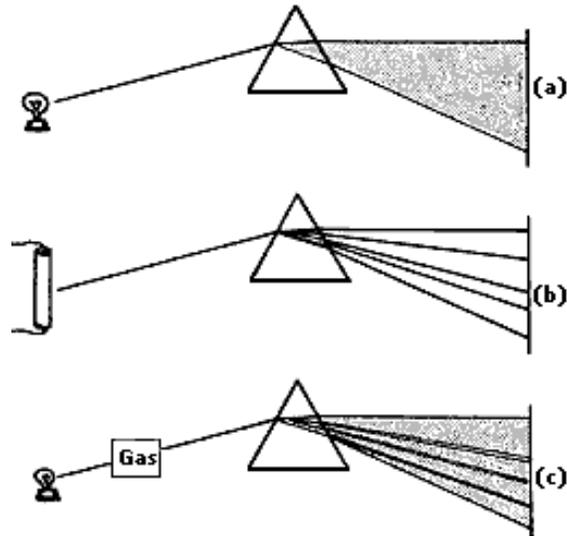
De la misma manera en el campo de la iluminación se dieron grandes avances, merced a la extensión del uso de la electricidad. En los años sesenta del siglo pasado, el alumbrado público aún se hacía con lámparas de arco, pero éstas eran ineficientes y requerían mucho mantenimiento (véase la Figura 35). Ya era claro para entonces que el futuro de la iluminación estaba en la lámpara de filamento incandescente, pero ésta no se pudo fabricar antes de aprender a extraer el aire de la lámpara, para evitar la combustión del filamento. En la figura 35 se ilustra la primera lámpara de filamento de carbón, manufacturada por Joseph Swan en Inglaterra, en 1868. Como es sabido, quien registró la patente no fue Swan, sino Thomas A. Edison, en 1879. Durante los años siguientes, Swan y Edison se dedicaron a competir por la elaboración de filamentos más duraderos. Después de algunos pleitos, los inventores decidieron aliarse para formar una empresa de lo más próspera: a los dos años ya vendían 200 000 focos ¡a 2.50 dólares cada uno!



**Figura 35. "Bulbo eléctrico" fabricado por Swan en 1878.**

**El filamento era de algodón mercerizado, tratado con sosa cáustica.**

El siglo XIX también vio el nacimiento de la fotografía, que entre otras cosas se convirtió en instrumento importante para las ciencias. Si bien las primeras impresiones fotográficas datan de 1827, fue apenas en 1842 cuando las técnicas fotográficas se habían desarrollado lo suficiente para poder tomar "instantáneas" de personas, de paisajes, de la Luna y ghasta de un espectro de luz. Para entonces, el óptico alemán Joseph Fraunhofer ya había descubierto las líneas oscuras en el espectro que se obtiene de la luz solar al hacerla pasar por un prisma; ya se sabía, además, que cada una de estas líneas negras tiene una posición determinada en el espectro (véase la Figura 36). Con la posibilidad de imprimir los espectros sobre una placa fotográfica, se desarrolló la espectroscopía, poderosa herramienta de análisis que entre otras cosas ha servido para revelar la analogía química entre los astros, a la vez que proporcionó una de las primeras pruebas del comportamiento cuántico de la materia.



**Figura 36. Espectros. (a) Un sólido incandescente emite luz de todos los colores; su espectro de emisión es continuo. (b) Un gas a alta temperatura emite luz de ciertos colores; su espectro de emisión es discreto. A la pantalla llegan sólo estas líneas de colores. (c) Un gas frío absorbe luz de ciertos colores; su espectro de absorción es discreto. La luz que llega a la pantalla presenta líneas negras, que corresponden a los colores absorbidos por el gas.**



# IV. LAS LECCIONES DEL SIGLO XX

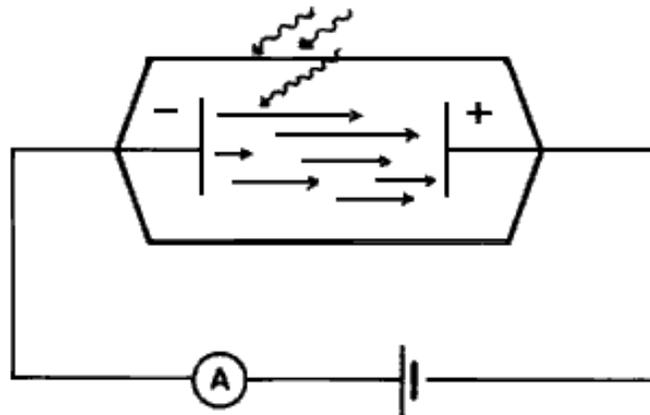
## 1. EL DESCUBRIMIENTO DEL FOTÓN

PARA principios de este siglo se había acumulado un enorme catálogo de observaciones acerca del comportamiento de la luz y de la materia; sólo faltaba explicar todos estos fenómenos observados. Pero resultó que las teorías físicas de la época —la mecánica, la óptica, el electromagnetismo, la termodinámica, etc.— no proporcionaban explicaciones del todo adecuadas; en algunos casos, las respuestas que daban simplemente contradecían las observaciones. Así las cosas, no quedaba más remedio que revisar las teorías.

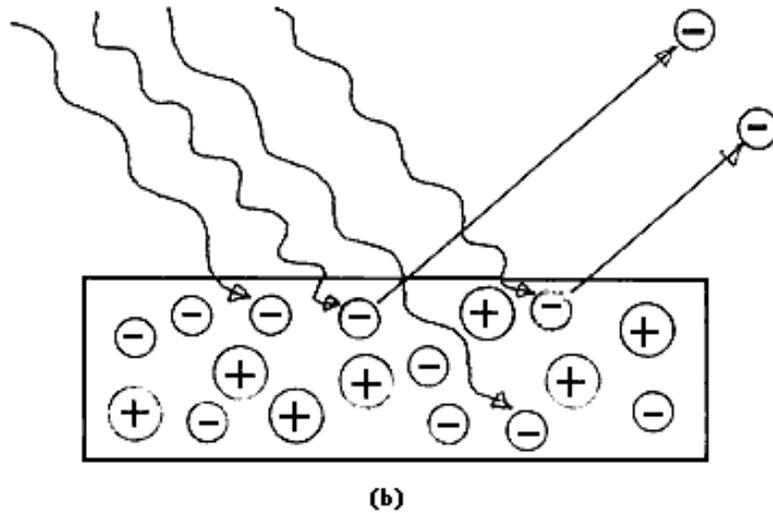
Una de las observaciones que causaban más dolor de cabeza a los físicos es la siguiente: todos sabemos que al calentar un objeto, su radiación térmica va cambiando de color: del infrarrojo al rojo, de éste al anaranjado, al amarillo, etc. Esto es lo que se observa, por ejemplo, cuando se enciende un radiador térmico de resistencias delgadas. Pero no es cierto que si se sigue calentando el material la radiación llega al ultravioleta: más bien cubre todo el espectro, dando como resultado una luz esencialmente blanca. Según la física clásica, sin embargo, la radiación del extremo violeta debería dominar por su intensidad ¿Por qué falla la predicción clásica?

Para resolver esta "catástrofe ultravioleta", Max Planck formuló en 1900 un postulado que aun a él mismo le parecía descabellado, pero que funcionó: el cuerpo no emite la radiación térmica de manera continua, en forma de ondas, sino en paquetes de energía o *cuantos*, y cada uno de éstos posee una cantidad de energía que depende de la longitud de onda, o sea del color de la luz emitida. Los cuantos de luz azul, por ejemplo, son más energéticos que los de luz roja. Una mayor intensidad de radiación significa un mayor número de cuantos emitidos. Con ayuda de este postulado Planck logró derivar la fórmula correcta para el espectro de la radiación térmica.

Por otra parte, Hertz había descubierto en 1887 que al irradiar una superficie metálica con luz de longitud de onda corta, podía producir emisión de electrones (véase la Figura 37 (a)). Como en este fenómeno participan la luz y la electricidad, se le denominó efecto *fotoeléctrico*. La existencia del fenómeno en sí no presentaba mayor problema, pero lo que no lograba explicar la física clásica es por qué el metal emite electrones sólo para ciertas longitudes de onda de la luz, y por qué cuando se aumenta la longitud de onda cesa la emisión de electrones, independientemente de la intensidad de la luz o de cuánto tiempo se deje encendida. Tampoco se entendía por qué la velocidad de los electrones liberados no depende de la intensidad de la luz, pero sí de su color. Al usarse luz de longitud de onda más pequeña, los electrones salen disparados con más energía (véase la Figura 37 (b)).



(a)



**Figura 37. El efecto fotoeléctrico. (a) Esquema de un aparato que sirve para hacer el experimento.**

**(b) Si la luz incidente tiene suficiente energía, puede expulsar electrones del metal.**

Este hecho condujo a Einstein en 1905 a proponer que el postulado cuántico de Planck debía tomarse en serio: que la luz que incide sobre el metal está concentrada en forma de corpúsculos cuya energía es proporcional a su frecuencia. El electrón, al absorber uno de estos *corpúsculos*, se queda con toda su energía y la usa para escaparse del metal. Si la energía absorbida por el electrón es mayor que la que requiere para escapar del metal, saldrá disparado con un exceso de energía cinética; en cambio, si es menor, no saldrá del metal. La relación entre la energía y la frecuencia de la luz está expresada en la célebre fórmula.

$$E = h\nu$$

en donde aparece la constante de Planck ( $h$ ) como factor de proporcionalidad entre la energía del cuanto ( $E$ ) y su frecuencia ( $\nu$ ). Tomando en cuenta que la relación entre la frecuencia y la longitud de onda es  $\nu = c / \lambda$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz, podemos concluir que la energía de un cuanto es inversamente proporcional a su longitud de onda:

$$E = hc / \lambda.$$

La idea de la cuantización de la luz no fue fácilmente aceptada por la mayoría de los físicos de principios de siglo, acostumbrados al mundo clásico de estructuras continuas y procesos graduales: ya bastante trabajo les había costado a algunos de ellos aceptar la atomicidad de la materia. Pero con el tiempo fue aumentando el número de experimentos que evidencian la naturaleza cuántica de la luz, confirmándose así la existencia del fotón. (Por cierto, la palabra *fotón* fue introducida por G. N. Lewis en 1926, como sinónimo de cuanto de luz). Uno de los experimentos cruciales en este sentido fue el realizado por el norteamericano Arthur Compton, entre 1921 y 1923, que consistió en irradiar un bloque de parafina con luz monocromática de alta frecuencia, y observar que el haz dispersado tiene una frecuencia que es menor que la original y depende del ángulo de dispersión. El propio Compton mostró que este efecto sólo puede ser explicado con base en la teoría fotónica de la luz.

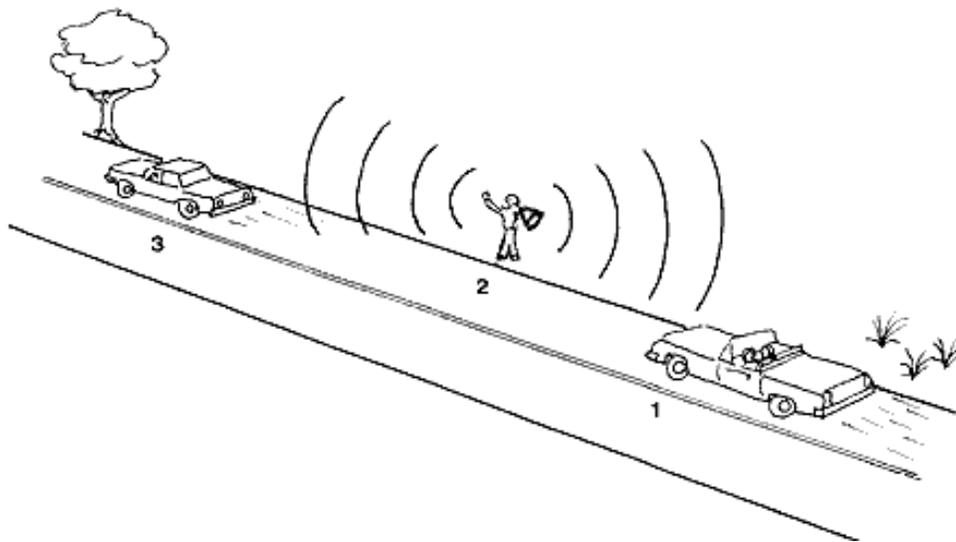
La explicación de los espectros atómicos, dada por el danés Niels Bohr en 1913, se basa en la idea de que al absorber el átomo un fotón, se queda con toda la energía de éste. Ésta fue una idea crucial para el nacimiento de la mecánica cuántica. Aunque el modelo de Bohr fue posteriormente sustituido por descripciones más complejas del átomo, constituye sin duda uno de los pilares de la teoría cuántica de la

materia, que se ha desarrollado de manera impresionante en los últimos 60 años. Hoy día existe un abstracto y elaborado formalismo que describe al fotón y sus interacciones con la materia con un notable grado de precisión: la electrodinámica cuántica.

No debemos pensar, sin embargo, que con la introducción del fotón desaparecen las ondas: las propiedades ondulatorias de la luz han quedado firmemente establecidas a través de una gran variedad de observaciones y experimentos, de manera que podemos seguir considerando la luz —y toda la radiación electromagnética— como un fenómeno ondulatorio. Lo que sí resulta más problemático es *conciliar* las dos imágenes de la luz: la fotónica y la ondulatoria. A ello retornaremos antes de finalizar el último capítulo de este libro.

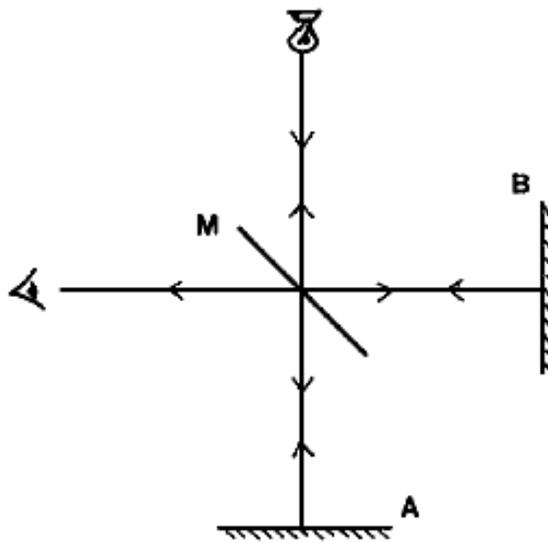
## 2. LA ÓPTICA RELATIVISTA

Paralelamente a la teoría cuántica de la luz y de la materia, se fue desarrollando la óptica de los cuerpos en movimiento. Recordemos que ya en 1842 Christian Doppler había hecho una observación que es aplicable a todos los fenómenos ondulatorios: la frecuencia de una onda *aumenta* al acercarse el receptor a la fuente, y *disminuye* cuando se aleja uno de otro (véase la Figura 38). En el caso de las ondas sonoras este fenómeno nos es bien familiar: lo percibimos cada vez que oímos pasar una ambulancia. El tono de la sirena sube cuando se nos acerca, y baja al alejarse. De la misma manera uno espera que en el caso de la luz se produzca un corrimiento de todos los colores hacia el azul cuando la fuente se nos acerca, y hacia el rojo cuando ésta se aleja, porque a la luz azul corresponde una longitud de onda menor, o sea una frecuencia mayor, que a la luz.



**Figura 38. Ilustración del efecto Doppler. La frecuencia de las ondas (o sea el número de ondas por unidad de tiempo) que detecta el receptor núm.1 es mayor que la frecuencia de emisión; la que detecta el núm. 2 es igual y la que detecta el núm. 3 es menor.**

Sin embargo, encontrar la fórmula correcta para el efecto Doppler óptico no resultó tan sencillo. Hacia fines del siglo pasado aún se creía que la luz requería, como todas las otras ondas, un medio de propagación, al cual se le llamó éter. Curiosamente, sin embargo, no se había detectado ningún efecto de la presencia de este éter luminífero. En 1887 A. Michelson y E. Morley realizaron un experimento (consistente en hacer interferir dos haces de luz que han seguido caminos diferentes; véase la Figura 39) destinado a medir las variaciones de la velocidad de la luz debidas al movimiento de la Tierra a través de éter. El resultado fue negativo: la velocidad de la luz medida desde la Tierra es la misma en todas las direcciones, a pesar de que ésta se mueve.



**Figura 39. Esquema simplificado del aparato que usaron Michelson y Morley para medir la velocidad de la Tierra a través del "éter luminífero". *M* es un espejo semiplataado que divide el haz de luz incidente desde arriba, en dos haces dirigidos hacia los espejos A y B; esos haces siguen caminos diferentes, y cualquier diferencia de velocidad entre ellos puede ser detectada observando la interferencia que producen.**

Hubo quienes propusieron interpretar este experimento como un indicio de que la Tierra *no se mueve*. Pero una conclusión alternativa es la que propuso Einstein, también en 1905: que la velocidad de la luz —y de cualquier tipo de radiación electromagnética— *es siempre la misma*; no depende ni de la velocidad de la fuente que la emite, ni del movimiento del observador que la recibe. Desde este nuevo punto de vista el éter sale sobrando —así como cualquier sistema de referencia absoluto. Con esta hipótesis nació la teoría de la *relatividad especial*. La dinámica newtoniana resultó ser una teoría aproximada, cuyas fórmulas dan buenos resultados sólo cuando la velocidad de los objetos es mucho menor que la de la luz.

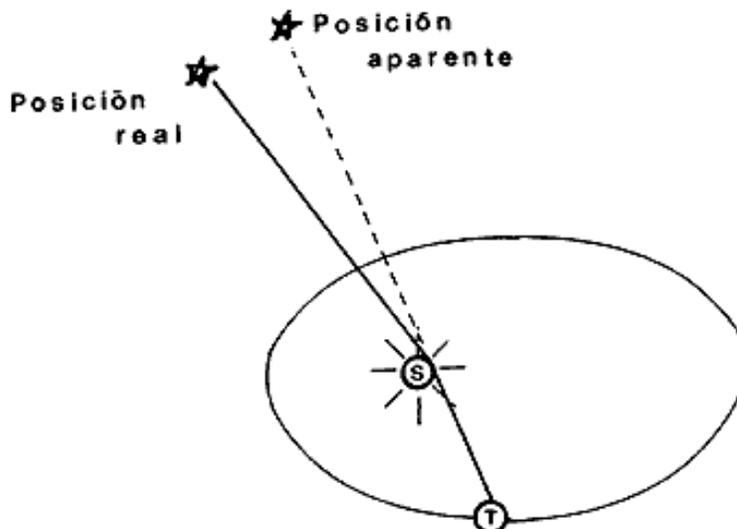
La fórmula correcta para el efecto Doppler óptico se obtuvo a partir de esta teoría, y resultó diferente de la fórmula que se había derivado para otros fenómenos ondulatorios, aunque cualitativamente el efecto es el mismo: el corrimiento hacia el rojo es mayor cuanto más rápido se aleja la fuente del observador. Este efecto ha resultado de gran utilidad para determinar las velocidades de los astros a partir del corrimiento de sus espectros.

La teoría de la relatividad especial también nos ha enseñado que no hay objeto material que pueda ser acelerado más allá de la velocidad de la luz; ni siquiera se le puede hacer alcanzar la luz. Para que un cuerpo material adquiriera esta velocidad se requeriría una energía infinita. Solamente partículas *sin masa* pueden viajar a la velocidad de la luz..., pero, por lo mismo, sólo pueden hacerlo a esta velocidad, no pueden ser deceleradas o aceleradas como las partículas materiales. En particular, los corpúsculos de la luz, los llamados fotones, no tienen masa, y siempre se mueven con la velocidad  $c$ .

Una consecuencia de lo anterior es que no hay mecanismo de transmisión de información que sea más rápido que la luz. ¿Qué le sucedería si existiesen objetos que viajaran con una velocidad mayor? Resultaría, de acuerdo con la teoría de la relatividad, que estos objetos no podrían ser decelerados hasta alcanzar la velocidad de la luz, por lo que serían inaccesibles para nosotros. Esto naturalmente hace un poco difícil idear cualquier experimento para la detección de tales partículas superluminales o "taquiones", y, en efecto, hasta ahora no se les ha observado; más aún, los físicos todavía no se ponen de acuerdo sobre la posibilidad de su existencia.

Diez años más tarde, el mismo Einstein generalizó su teoría a la relatividad de todos los movimientos. Esta teoría de la *relatividad general* mostró tener implicaciones novedosas e insospechadas en el terreno de la óptica. Por ejemplo, predice que un rayo de luz es desviado de su trayectoria rectilínea al atravesar un

campo gravitatorio, o sea, al viajar por la cercanía de un cuerpo masivo (véase la Figura 40). Este efecto, aunque es muy pequeño, fue detectado en 1919 y desde entonces ha sido confirmado una y otra vez mediante la observación de eclipses solares.



**Figura 40. Un campo gravitatorio intenso produce una curvatura de la trayectoria de la luz, de manera que la estrella parece estar en una posición diferente de la real.**

En este punto cabe detenernos para recordar el principio de Fermat (mencionado ya en las secciones I.2, I.3 y III.1), según el cual al viajar de un punto a otro la luz sigue el camino más corto. Pero si ésta viaja en el vacío, el camino más corto es la recta que une los dos puntos. ¿Acaso, entonces, la deflexión de la trayectoria de la luz predicha por la relatividad general nos obliga a renunciar al principio de Fermat? No necesariamente, como lo mostró el propio Einstein: podemos imaginar que el espacio se ha curvado por la presencia de cuerpos masivos, y en este espacio *curvo* la luz sigue describiendo la trayectoria más corta.

Otra consecuencia de la teoría de la relatividad general es un corrimiento adicional del color de la luz, de origen gravitatorio que se suma al efecto Doppler. Según la relatividad, al alejarse un fotón del campo gravitatorio de una estrella (o de un planeta) aumenta su energía potencial y a este aumento debe corresponder una disminución de su energía  $h\nu$ , por lo que la frecuencia sufre un corrimiento hacia valores más bajos. Por consiguiente, la luz emitida por una estrella nos llega con una frecuencia menor que la de emisión, y el efecto es más notable conforme la estrella es más masiva.

El conocimiento de estos efectos relativistas sobre la luz ha sido de gran importancia para las teorías sobre el origen, la evolución y la estructura del Universo.

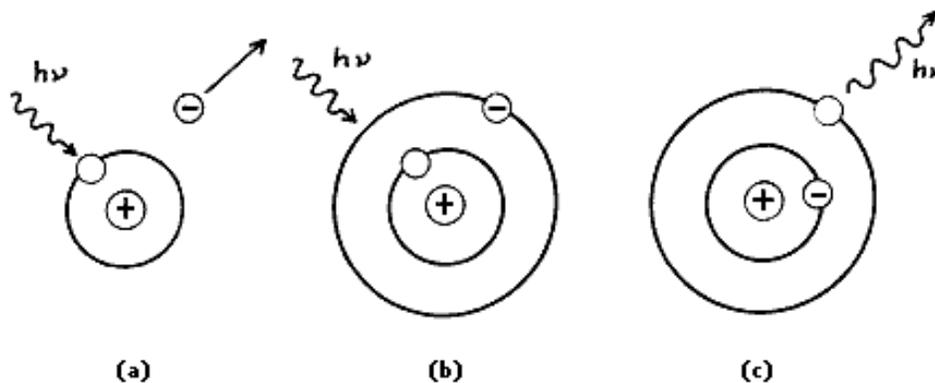
### 3. LUZ Y MATERIA

Una reflexión sobre los diversos fenómenos luminosos que han sido mencionados hasta ahora nos lleva a concluir que todos ellos se producen por la interacción de la luz con la materia. Porque es la materia la que refleja la luz, la refracta, la dispersa, la difracta, la desvía, la polariza, la absorbe... En ausencia de materia, la luz viajaría sin ser perturbada, siempre en la misma dirección y con la misma velocidad. Pero, curiosamente, esta luz no podría ser detectada por ningún otro mecanismo, porque la detección de ella implica alguna forma de interacción con la materia. De manera que la luz en ausencia de materia sería tan invisible como lo es la materia en ausencia de aquella.

Ya que hablamos de cosas invisibles, cabe aquí recordar al "hombre invisible", que desde la novela de H.G. Wells ha tenido diversas apariciones en otras historias y en las pantallas de cine. A este personaje suele atribuírsele un poder casi ilimitado, porque, al no ser visto por nadie, es inatrapable e invulnerable, sin embargo, su poder no puede ser tan grande como se pretende ya que para ser realmente invisible, todas las partes de su cuerpo, entre ellas los ojos, tienen que ser transparentes y con un índice de refracción igual

al del aire —o al del agua, cuando se sumerja en ella. Entonces los rayos de luz no pueden ser refractados al entrar a sus ojos, y no hay posibilidad de que se forme una imagen en la retina. A esto hay que agregar que para que el ojo detectara luz tendría que absorber al menos una parte de ella, por lo que no podría ser del todo transparente. En suma, el hombre invisible no puede ver nada.

Claro está que la interacción entre luz y materia no sólo afecta a la luz; la materia también puede resultar afectada de diversas formas. Consideremos, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico antes mencionado: cuando el metal es irradiado con luz, absorbe parte de ella. En cada acto elemental de absorción, toda la energía de un fotón es absorbida por un átomo. Como resultado de este proceso, el fotón es aniquilado —deja de existir—, en tanto que el electrón se escapa del metal (Figura 41(a); por cada fotón absorbido se libera un electrón. (Este electrón liberado puede a su vez enviarse a otra placa metálica para producir una emisión de electrones en cascada, y así sucesivamente; éste es el principio de funcionamiento de los tubos fotomultiplicadores, que convierten la llegada de un fotón en señal eléctrica.)



**Figura 41. Esquema que ilustra la absorción de un fotón por un átomo de hidrógeno.**

**En (a), el electrón se escapa al absorber el fotón; el átomo queda ionizado.**

**En (b), el fotón tiene una energía menor y no alcanza a ionizar el átomo;**

**sólo lo excita: el electrón cambia su órbita, pero sigue amarrado al núcleo.**

**En (c), el átomo se desexcita: el electrón emite un fotón y regresa con ello a su estado normal.**

La liberación de electrones por efecto de la luz puede suceder en principio en cualquier tipo de material, en estado sólido, líquido o gaseoso. Pero en general, los electrones del material no están tan libres como para escaparse al ser empujados por un fotón: esto suele suceder en los metales, y cuando la energía de los fotones es suficientemente alta. En otras circunstancias, los fotones absorbidos por la materia no son lo suficientemente energéticos y sólo alcanzan a "excitar" a los electrones, a aumentar su energía (Figura 41(b)). Pero los electrones siguen amarrados a los átomos, y al poco tiempo se deshacen de este exceso de energía, chocando con sus vecinos. Cuando esto sucede, la temperatura del material se eleva ligeramente: la energía luminosa se ha convertido en energía térmica. Es claro entonces que un material que absorbe más luz se calienta más. Por eso no conviene usar ropa oscura en un día caluroso y soleado, porque recuérdese que las superficies oscuras son más absorbedoras. Por la misma razón suelen cubrirse con pintura reflectora los tanques de gas expuestos a la luz del Sol: para evitar el sobrecalentamiento del gas. En cambio, si lo que se quiere es aprovechar la radiación solar para la calefacción, debe utilizarse un colector que absorba la luz con un máximo de eficiencia, y que no la deje escapar.

También puede suceder que los electrones atómicos excitados por la luz tengan la suficiente energía para liberarse de su respectivo átomo, pero sin poder escapar del material. Así, hay materiales que en ausencia de luz son aislantes (porque sus electrones están amarrados), pero pueden volverse conductores bajo la iluminación (porque entonces sus electrones fluyen libremente). Se trata de un tipo especial de semiconductores, llamados *fotoductores*.

En algunos materiales ocurre que para librarse del exceso de energía que adquirió al absorber el fotón, el electrón vuelve a emitir un fotón; entonces el material brilla, se ve luminiscente (Figura 41(c)). Normalmente el estado excitado del electrón dura muy poco, menos de 0.0000001 segundos; en este caso la emisión de luz se llama fluorescencia. Pero en ciertos materiales, los llamados fosforescentes, la excitación puede quedar atrapada durante horas o días, dando lugar a un brillo persistente. Este efecto luminiscente es particularmente llamativo cuando la luz emitida por el material tiene un color diferente de la luz que se usó para excitarlo. Por ejemplo, la pintura fluorescente que cubre las manecillas de los relojes generalmente absorbe parte de la luz blanca del Sol, pero sólo emite luz verde. En biología y en medicina se aprovecha la fluorescencia para el análisis microscópico de células y tejidos.

La luz absorbida por la materia puede tener aún otros efectos importantes: por ejemplo, puede producir cambios químicos. Así es como se inicia el fenómeno de la visión en las células de la retina, y así también es como se inicia el complejo proceso de la fotosíntesis en las hojas de las plantas verdes. En ambos casos la luz absorbida proporciona la energía necesaria para que se lleven a cabo ciertas reacciones químicas. En el proceso fotosintético, la energía luminosa ya transformada en energía química se almacena en compuestos orgánicos, que después pueden ser utilizados como combustibles por los organismos vivos. En el caso de la visión, los cambios químicos inducidos por la luz dan lugar a un potencial eléctrico que se transmite por el nervio óptico hasta el cerebro.

Algunos complejos de plata, como los presentes en las emulsiones fotográficas, también sufren cambios químicos al absorber la luz. A todos estos materiales que son afectados por la luz absorbida se les llama fotosensibles, y a los cambios que sufren, reacciones fotoquímicas.

Hemos visto, pues, que la absorción de la luz puede tener efectos diversos sobre la materia: puede producir emisión de electrones, fotoconducción, fluorescencia o fosforescencia, calentamiento o reacciones químicas. Ahora bien, la luz que no es absorbida, sino reflejada, ¿acaso tiene también algún efecto sobre la materia?

Pensemos en lo que sucede cuando choca una pelota contra un muro: la pelota recibe un impulso del muro que la hace rebotar; pero también el muro recibe un impulso de la pelota, de la misma magnitud y en sentido contrario. Si no notamos este efecto sobre el muro es simplemente porque es rígido y su masa es muchísimo mayor que la de la pelota. La superficie de un sólido iluminado se asemeja al muro que recibe muchos pelotazos y los refleja: el sólido refleja los "fotonazos", pero a cambio de ello siente la presión, que es el efecto de los empujones. En otras palabras, como ya se había mencionado en el capítulo III, sección 4, la luz ejerce una presión sobre la materia.

Por último, veamos qué pasa con la luz que al incidir sobre un material no es ni reflejada ni absorbida por él. Esto significa que la luz penetra en el material. Pero como hemos visto en el capítulo I, sección 3, al cambiar de medio la luz se refracta, o sea que modifica su dirección de propagación. Aunado a este cambio de dirección hay un cambio en la velocidad de propagación: en un medio cuyo índice de refracción es  $n$ , la velocidad de la luz es

$$v = c / n.$$

Por consiguiente, cuando se dice que la velocidad de la luz es  $c$ , en realidad se está hablando de su velocidad de propagación en el *vacío*.

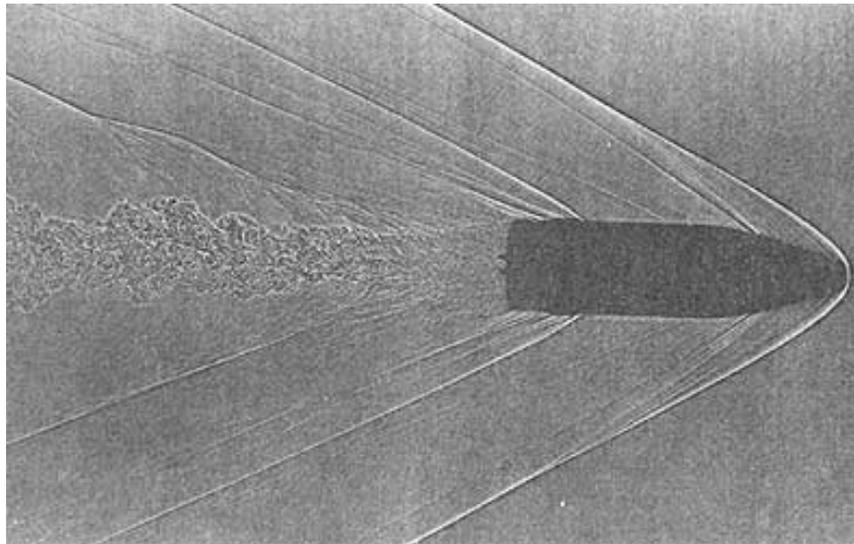
Cada vez que la luz pasa de un medio a otro con mayor índice  $n$ , cambia su velocidad, pero nunca se detiene; sigue viajando a la que le corresponde en el nuevo medio. Este cambio de velocidad se debe naturalmente a la interacción de la luz con las partículas del medio; lo curioso es que una vez que la luz ya ha penetrado en un determinado medio, no se sigue frenando; y si nuevamente penetra en un medio con menor índice de refracción, su velocidad se vuelve a incrementar.

En el capítulo I mencionamos algunos materiales comunes cuyo índice de refracción es mayor que uno,

aunque no mucho mayor. Pero también recuérdese del capítulo II que el índice de refracción no es el mismo para todas las longitudes de onda. En particular, resulta que frente a la radiación de longitud de onda muy corta (rayos X), la mayoría de los materiales se vuelven transparentes y presentan un índice de refracción pequeño, *menor* que uno.

Resulta entonces, de acuerdo con la fórmula escrita arriba, que la velocidad de la radiación en el interior de un material puede ser mayor o menor que  $c$ , lo que parece contradecir el postulado fundamental de la relatividad especial que dice que la radiación electromagnética siempre se propaga con la velocidad  $c$ . En realidad no hay contradicción. La onda que penetra el material (y que viene del vacío, con velocidad  $c$ ) pone en movimiento a los electrones del material y hace que éstos emitan nuevas ondas, que también se propagan en el vacío interatómico con velocidad  $c$ . Es la *superposición* (en el interior del material) de las ondas originales y las emitidas la que viaja con una velocidad de grupo  $v$ , que puede ser mayor o menor que  $c$ . Es esta superposición la que vemos salir del material como onda refractada.

En 1934 el físico soviético P. A. Cherenkov descubrió un efecto interesante al bombardear un material ópticamente denso (con  $n > 1$ ) con electrones muy veloces: observó que cuando la velocidad de las partículas que penetran es mayor que la de la luz en el medio, se produce una radiación visible, generalmente comprendida entre el amarillo y el violeta. Esta radiación representa una onda de choque (electromagnética), producida al penetrar los electrones en el material, al igual que se produce una onda de choque (de presión) cuando un avión rebasa la velocidad de propagación del sonido en el aire, o cuando una lancha rebasa la velocidad de propagación de las ondas en el agua (véase la Figura 42). La radiación Cherenkov es luz que puede ser registrada por un fotomultiplicador; así funcionan los detectores Cherenkov, utilizados en los grandes aceleradores para registrar partículas muy rápidas e incluso medir su velocidad.



**Figura 42. Onda de choque producida por una bala al atravesar el aire.**

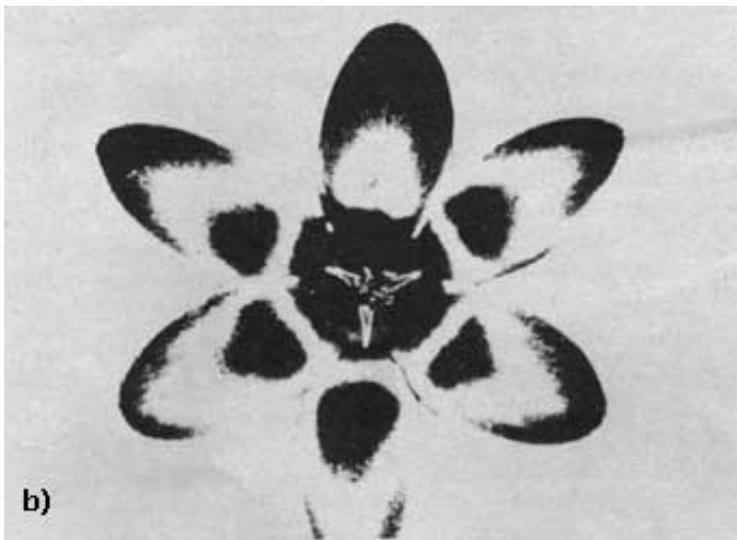
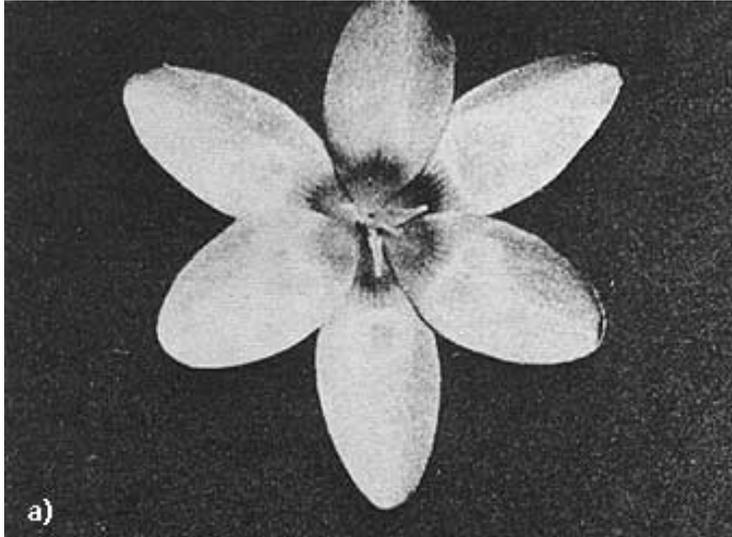


## V. MÁS ALLÁ DE LOS COLORES

### 1. LUCES QUE NO VEMOS

EN EL capítulo anterior aprendimos que la luz está hecha de ondas de radiación electromagnética, y que a cada color de la luz corresponde una determinada longitud de onda. También vimos que hay otros tipos de radiación electromagnética que no suelen llamarse luz, y que poseen longitudes de onda diferentes. Cabe entonces preguntarnos: ¿qué es lo que distingue a la luz de aquellas otras ondas?, ¿dónde está la frontera entre unas y otras?

Si usted ha tenido oportunidad de tomar fotografías con diferentes tipos de película, probablemente se haya dado cuenta de que en algunas fotos se ven más claros ciertos objetos que en otras. Con película ordinaria, ciertos tonos rojos se pierden y en cambio aparecen más evidentes los violetas. En realidad, esta película es sensible a la radiación que está más allá del violeta —la ultravioleta— y que nuestros ojos no perciben. A esta radiación ya no la llamamos luz, porque no la detectamos a simple vista. Sin embargo, lo único que la distingue de la radiación visible es su longitud de onda, que es un poco menor (véase la Figura 43).

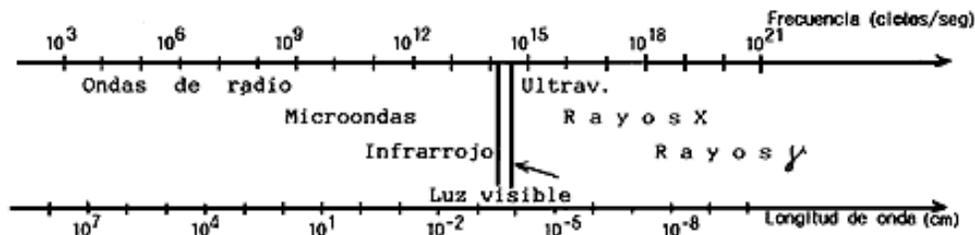


**Figura 43. La misma flor fotografiada con luz normal en (a) y con luz ultravioleta en (b).**

Por otra parte, si utiliza película sensible al rojo, captará una radiación que es invisible para nosotros por tener longitud de onda demasiado grande: la radiación infrarroja. Los ojos de algunos animales son sensibles a otras longitudes de onda, y entonces ven luces que nosotros no vemos, pero en cambio son ciegos a ciertos colores que nosotros sí podemos ver.

Toda esta radiación electromagnética de la que hemos venido hablando es producida por electrones en movimiento: partículas cargadas que al ser puestas a vibrar pierden una parte de su energía en forma de radiación. Por ejemplo, en una antena de radio los electrones son forzados a oscilar rápidamente de un lado a otro, y la frecuencia de las ondas emitidas está determinada por la frecuencia de estas oscilaciones. La luz visible es producida normalmente por cambios en el movimiento de los electrones en los átomos o las moléculas. Los rayos  $\lambda$ , por su parte, se producen con electrones muy veloces. En cambio, los rayos  $\gamma$  suelen producirse durante transformaciones nucleares en las que se liberan grandes cantidades de energía.

En la figura 44 se presenta la lista de estos tipos de radiación, con una indicación de las longitudes de onda que les corresponden; esto es lo que suele llamarse espectro electromagnético. Observe que puede existir radiación de cualquier longitud de onda, desde las ondas de radio hasta los rayos  $\lambda$ ; más allá de éstos no se han detectado ondas de radiación.



**Figura 44. El espectro electromagnético. Los nombres de las secciones o bandas del espectro son esencialmente históricos, y puede verse que hay traslape entre algunas de estas secciones.**

En la misma figura se han anotado las frecuencias de las ondas, porque en ocasiones suele especificarse este dato en vez de la longitud de onda. Por ejemplo, cuando se habla de ondas de radio de 860 kilohertz en la banda de amplitud modulada (Radio UNAM, AM), se quiere decir que estas ondas poseen una frecuencia de 860 000 ciclos por segundo. A esta frecuencia corresponde una longitud de onda de 350 m aproximadamente. Se ve claro de la tabla que a mayor longitud de onda corresponde una menor frecuencia y viceversa —como sucede con todos los fenómenos ondulatorios. Así, por ejemplo, la luz visible tiene una frecuencia mayor que las ondas de radio, y la frecuencia de los rayos X es aún mayor. Recordemos de la sección IV. 1 que la relación entre frecuencia y longitud de onda es  $\nu = c / \lambda$ , con  $c = 300\,000$  km/seg aproximadamente.

Recordando también la fórmula de Planck enunciada en el capítulo anterior,  $E = h\nu$  vemos que la radiación más energética es la que posee una mayor frecuencia, o sea una menor longitud de onda. Por eso los efectos de las diferentes radiaciones pueden ser muy diversos, así como también sus aplicaciones. Veamos algunos ejemplos.

*Ondas de radio.* Recordemos que Hertz usó un simple oscilador eléctrico para generar las ondas que ahora llevan su nombre, y pudo captar éstas con un receptor de radio muy primitivo. Rápidamente sus experimentos cobraron importancia, y ya a comienzos del nuevo siglo se habían establecido las comunicaciones de radio a través del Océano Atlántico. El radio, el radar y la televisión de hoy día son elaboraciones y modificaciones de la idea original: su transmisión y recepción dependen de circuitos oscilatorios en esencia similares a los que usó Hertz.

Las ondas de radio tienen frecuencias que van desde  $10^4$  hasta  $10^{10}$  hertz. Las de menor frecuencia tienen una longitud de onda de 30 kilómetros, y por ello se difractan alrededor de cualquier obstáculo; pero conforme aumenta la frecuencia, la propagación de estas ondas se vuelve más direccional; se hacen más evidentes los fenómenos de reflexión y refracción. Las estaciones de radio en AM (amplitud modulada) utilizan frecuencias bajas; las bandas de frecuencias más altas están ocupadas por los radioaficionados, la policía, la aviación, la frecuencia modulada, la televisión, la radio de onda corta y el radar.

En el extremo de las radiofrecuencias altas se encuentran las *microondas*, que son generadas por corrientes oscilatorias en tubos de vacío. Sus frecuencias varían entre  $10^9$  y  $10^{12}$  hertz. Las microondas también son usadas para las telecomunicaciones, sobre todo a través de satélites; las de mayor frecuencia se emplean más bien para producir calor con la ayuda de hornos especiales.

Las *ondas infrarrojas* constituyen lo que se llama radiación térmica. Son las ondas radiadas por los electrones menos amarrados en los átomos y las moléculas, y sus frecuencias van de  $10^{11}$  a más de  $10^{14}$  hertz. En el extremo de las frecuencias altas se habla ya de luz infrarroja: luz que puede ser detectada por películas especiales, aunque nosotros sólo percibimos sus efectos térmicos.

En seguida viene la luz visible, que cubre una banda muy estrecha del espectro, alrededor de los  $10^{14}$  ciclos. Su longitud de onda es tan pequeña que suele usarse por comodidad una unidad muy pequeña para medirla: el angström ( $\text{\AA}$ ), que equivale a **0.00000001 cm**. Así, por ejemplo, el extremo rojo tiene una longitud de onda de **7 500  $\text{\AA}$**  a la luz amarilla corresponde aproximadamente una longitud de **5 500  $\text{\AA}$**  y el extremo violeta es de poco menos que **4 000  $\text{\AA}$** . Fuera de esta zona nuestros ojos no ven. La radiación visible normalmente es producida por los electrones atómicos que no están muy amarrados a los núcleos.

La *radiación ultravioleta* también es generada por este tipo de electrones, pero contiene más energía que la luz visible, porque sus frecuencias son mayores: van de  $10^{15}$  a  $10^{17}$  hertz. Las moléculas de nuestras células visuales no son excitadas por esta radiación. Pero muchas moléculas de los seres vivos pueden sufrir modificaciones importantes al absorber una radiación tan energética, al grado de que estos cambios se pueden traducir en mutaciones genéticas o formación de células cancerosas. Por ello no es recomendable "broncearse" con luz ultravioleta. Por otro lado, probablemente este tipo de luz fue la que contribuyó a la formación de las moléculas primitivas que dieron origen a la vida sobre el planeta. En general, la radiación comprendida entre el infrarrojo y el ultravioleta (incluyendo toda la zona del visible) es la más importante en cuanto a sus efectos biológicos.

Más allá de la luz ultravioleta se encuentran los rayos **X**, que pueden ser producidos por los electrones más amarrados a los núcleos atómicos, o bien por un frenamiento repentino de electrones que viajan a altas velocidades y chocan contra un blanco (así fue en realidad como los descubrió Röntgen). Los rayos **X** son más penetrantes que la luz visible, porque portan más energía. Al penetrar en un organismo pueden por ello dañar moléculas y ocasionar serios perjuicios, como los antes mencionados. Por otra parte, los rayos **X** son de gran utilidad para la visualización de estructuras internas y la detección de fracturas de huesos, malformaciones, etc. Cabe mencionar que estos rayos —como todas las ondas— se difractan, y por el tamaño de su longitud de onda son difractados con eficiencia por un cristal. El análisis de la difracción de los rayos **X** se ha convertido en poderosa técnica para la determinación de estructuras de cristales y otros arreglos periódicos de átomos o moléculas.

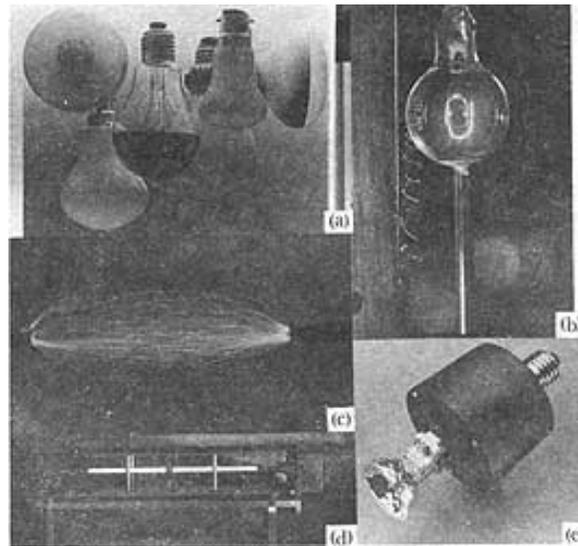
Los *rayos gamma*, que son más energéticos que los rayos **X**, pueden ser generados de la misma manera, pero usando electrones con velocidades aún mayores. En la práctica no hay una demarcación clara entre los dos tipos de radiación. La radiación gamma también aparece de manera natural como producto de la radiactividad; así fue, de hecho, como se la descubrió. El contenido energético de los rayos gamma llega a ser tan alto, que les permite penetrar gruesos muros de concreto sin una pérdida considerable de su energía. Esta radiación puede alcanzar una frecuencia de  $10^{24}$  hertz, 10 mil millones de veces más alta que la de la luz visible. A frecuencias más altas aún no se ha logrado detectar radiación alguna.

## 2. ORIGEN Y DESTINO DE LA LUZ

Resulta, pues, que existen otras radiaciones que se parecen a la luz, pero no solemos llamarlas así. En cambio, es usual que llamemos luz a algo que no lo es. Cuando decimos: se fue la luz, conectaron la luz o tengo que pagar la luz, estamos hablando evidentemente de otra cosa. Porque por fortuna la luz no se ha ido, y no se irá en mucho, mucho tiempo.

Dado que la luz es portadora de energía, es necesario que haya disponible alguna forma de energía para que a partir de ella se pueda generar la luz. La energía eléctrica que se suministra, digamos, a una casa, puede ser utilizada con diversos propósitos: para hacer funcionar el motor de un refrigerador u otro aparato, para calentar un radiador o una plancha, para hacer pasar corriente por un receptor de radio o televisión, para encender una lámpara, etc. Vemos entonces que, aunque por razones históricas usamos el vocablo luz, en realidad nos estamos refiriendo a la energía eléctrica, que sirve —entre otras cosas— para generar luz de manera artificial.

La luz doméstica se produce generalmente por medio de bombillas o focos, que son bulbos de vidrio con un delgado filamento metálico en su interior que se enciende al calentarse con el paso de la corriente eléctrica; el aire del interior es sustituido por un gas inerte para evitar la combustión del filamento. El color de la luz varía según el material de éste; a cada material corresponde un espectro característico, que depende de la temperatura a la cual se calienta el material (como comentamos en la sección 1 del capítulo anterior). Sin embargo, los focos tienen la desventaja de requerir mucha energía para producir poca luz; su eficiencia es aproximadamente del 2%. Casi toda la energía eléctrica que usa un foco se desperdicia en forma de calor. Sólo mediante un adecuado sistema reflector y el uso de finos filamentos de tungsteno-halógeno se ha logrado incrementar recientemente la eficiencia (véase la Figura 45).



**Figura 45. Fuentes de luz artificial. (a) Focos convencionales, (b) bulbo manufacturado a fines del siglo XX, (c) lámpara de arco, (d) el primer aparato láser, (e) foco moderno de tungsteno-halógeno.**

Ya hacia fines del siglo pasado se exploraron otros métodos de producir luz con más eficiencia, mediante descargas eléctricas a través de un gas. El más exitoso de estos intentos, producido por primera vez en 1910 en Francia, fue sin duda el tubo de neón, que sigue utilizándose para anuncios luminosos.

En las últimas décadas se ha extendido el uso de otro tipo de fuentes luminosas, entre ellas las lámparas de vapor de mercurio y de sodio, y las fluorescentes. Las lámparas de mercurio y de sodio se encienden al calentarse el vapor que contienen en su interior. En cambio, en las lámparas fluorescentes se produce una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, y este vapor ionizado radía luz ultravioleta, que es invisible. Pero el interior del tubo está cubierto de una mezcla de compuestos químicos llamados fósforos (como los que cubren la pantalla del televisor), que se encienden cuando les llega esta luz ultravioleta. Así,

las lámparas fluorescentes pueden producir cualquier color, dependiendo de los fósforos que se utilicen en su fabricación. A diferencia de las lámparas de vapor, las fluorescentes funcionan en frío. La eficiencia de estas lámparas es 5 o 6 veces mayor que la de los focos, pero sigue siendo baja (apenas el 10% de la energía invertida se transforma en luz visible).

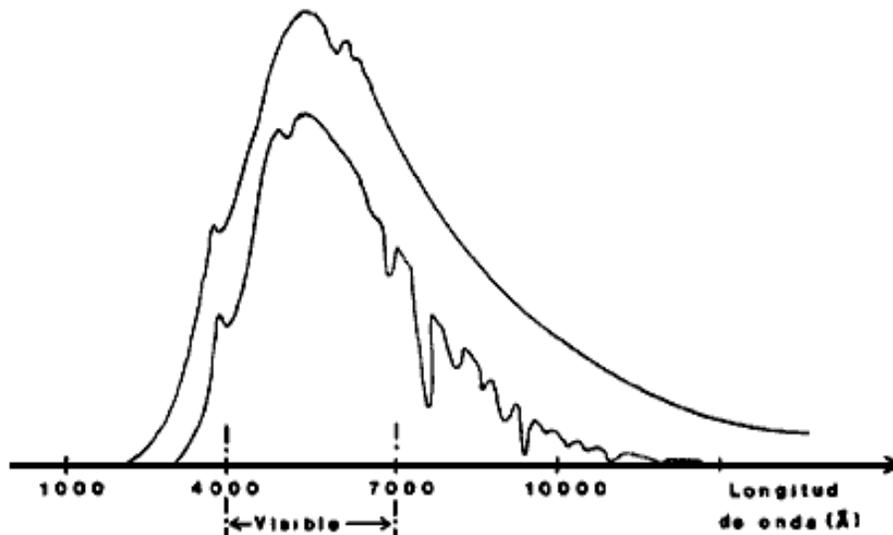
A comienzos de los años sesenta se inventó otro tipo de fuente de luz, que recibió el nombre de generador óptico cuántico, o simplemente láser (palabra formada por las iniciales de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). En este aparato la emisión de la luz también proviene de los electrones atómicos que se desexcitan. Pero algunos de los fotones emitidos chocan con otros átomos excitados que, como respuesta, emiten fotones idénticos. Los dos fotones pueden a su vez chocar con otros átomos excitados, y así sucesivamente, produciéndose una amplificación de la emisión. Para que esto suceda tiene que haber naturalmente una alta concentración inicial de átomos excitados, la cual puede haberse producido, por ejemplo, por descarga eléctrica o por iluminación.

A diferencia de las otras fuentes que hemos mencionado, el láser emite radiación coherente, toda en fase y en la misma dirección, sin dispersarse; el instrumento tiene la extraordinaria capacidad de emitir energía luminosa en forma concentrada en el espacio, en el tiempo y en el espectro. Por ejemplo, hay láseres que producen luz de un color muy puro, o sea de una sola frecuencia; otros que producen pulsos brevísimos, de una duración de  $10^{-12}$  segundos; otros más, que pueden enviar hasta la Luna un haz tan estrecho, que aun su reflejo puede llegar en forma concentrada hasta la Tierra. Actualmente se alcanza con la luz de láser una intensidad de  $10^{16}$  watts/cm<sup>2</sup>, un millón de billones superior a la intensidad de luz que sale de una bombilla común (véanse las Figuras 1 y 45(d)). Por sus extraordinarias características, el láser tiene ya las más diversas aplicaciones en la industria, la medicina, la química, los transportes, las comunicaciones, la informática, los espectáculos..., incluso, desgraciadamente, en el desarrollo de nuevas armas. Su direccionalidad, coherencia e intensidad han hecho de la luz de láser un factor importante de desarrollo de la holografía, que es una técnica de formación de imágenes tridimensionales basada en la difracción e interferencia de la luz.

Sobre nuestro planeta surgen ocasionalmente fuentes naturales de luz que pueden ser impresionantes, como lo es un volcán en erupción. Cabe mencionar también algunos bellos ejemplos de organismos vivos que son luminosos, como ciertos hongos, bacterias, gusanos, crustáceos, peces e insectos. La luz que emiten estos organismos es en general muy tenue, pero la podemos apreciar gracias a que nuestra vista es capaz de adaptarse a bajas intensidades de luz. Este fenómeno, llamado bioluminiscencia, es provocado por reacciones químicas muy complejas que se llevan a cabo entre moléculas especiales de los organismos emisores. Extrayendo y purificando dichas moléculas, y proporcionándoles la energía necesaria, se ha logrado reproducir esta luminiscencia en el laboratorio.

La fuente principal de luz para nosotros sigue siendo el Sol, del cual recibimos una iluminación mayor que la que jamás podríamos pensar en generar artificialmente. De hecho, la radiación solar ha sido un factor primario para el origen y la evolución de la vida y para la ecología de nuestro planeta; entre otras cosas, lo mantiene a una temperatura agradable, provoca la evaporación de agua, inicia la fotosíntesis, que es la puerta de entrada de la energía en el ciclo biológico, y nos proporciona una excelente iluminación, al menos durante cerca de medio día. Sin la luz del Sol no habría vida sobre la Tierra.

En la figura 46 se presenta una curva de la intensidad de la radiación solar para diferentes longitudes de onda. La curva superior representa la luz incidente sobre la capa superior de la atmósfera. La curva inferior la intensidad que llega al nivel del mar, después de haber atravesado la atmósfera (suponiendo que ésta no contuviese demasiadas impurezas). Es interesante observar que la mayor parte de la luz ultravioleta es absorbida por el ozono, el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera, mientras que el vapor de agua y el bióxido de carbono absorben la luz infrarroja. Así resulta que la atmósfera terrestre es como una ventana que sólo deja pasar la luz visible, justamente aquella que nos es útil y no daña nuestros organismos. Dicho más correctamente, la vida sobre la Tierra ha aprendido a aprovechar de todas las maneras posibles la radiación que le llega por esta ventana; y no es casual, por ello, que la luz que perciben nuestros ojos esté comprendida entre los 4 000 y los 7 000 Å.



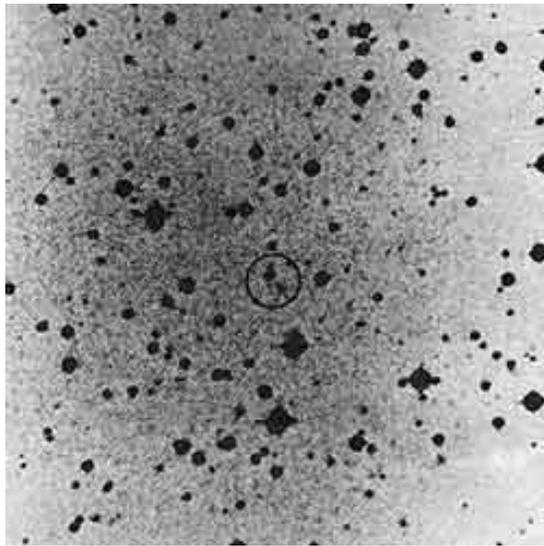
**Figura 46. El espectro de la radiación solar. La curva superior representa la intensidad de luz incidente sobre la atmósfera y la curva inferior la luz que llega al nivel del mar.**

El Sol, como todas las estrellas, tiene un brillo propio porque la materia de su interior, al estar sujeta a altísimas presiones y temperaturas, choca frecuentemente entre sí. Tan violentas son estas colisiones, que algunas de ellas dan lugar a la fusión de dos o más núcleos atómicos para formar uno solo. En la secuencia más común participan cuatro protones (o núcleos de hidrógeno) que reaccionan en cadena para dar lugar finalmente a un núcleo de helio. Pero resulta que este núcleo tiene menos masa que la suma de las cuatro partículas originales, o sea que hay una *pérdida de masa* durante la fusión. Esta masa perdida se transforma en energía de radiación, según la famosa fórmula de Einstein:

$$E = mc^2.$$

La cantidad de energía liberada en esta forma es impresionante; en el interior del Sol se queman cada segundo cuatro millones de toneladas de materia. (Pero aún contiene el Sol la suficiente masa para seguir radiando casi con la misma intensidad durante miles de millones de años.) De toda la radiación emitida por el Sol, la Tierra recibe sólo el 0.0000001%; casi todo el resto se escapa del Sistema Solar.

¿A dónde va a dar la luz que se ha escapado? El espacio está casi vacío de materia, por lo que la luz puede viajar grandes distancias antes de ser interceptada. Por ejemplo, la siguiente estrella más cercana a nosotros está a cuatro años luz de distancia, lo cual significa que la luz que recibimos de esa estrella ha tenido que viajar durante cuatro años. De hecho, la radiación proveniente de objetos que están a más de 10 mil millones de años luz de distancia parece llegarnos sin problemas, lo cual indica que el espacio intergaláctico es sumamente transparente (véase la Figura 47).



**Figura 47. En el centro de esta fotografía (señalado con una flecha) puede verse un cuasar que se encuentra a más de 16 mil millones de años luz de distancia, según cálculos basados en su corrimiento espectral. Se cree que la luz que recibimos de este objeto fue emitida poco después de la gran explosión. Los otros objetos de la fotografía se encuentran a diferentes distancias; algunos de ellos dejaron de existir mucho antes de que se tomara esta foto. En cambio, otras estrellas lejanas surgidas hace tiempo no aparecen en la foto porque aún no nos llega su luz. La foto muestra, por lo tanto, un mundo que nunca ha existido, o fragmentos del mundo que han existido en diferentes épocas.**

Por otra parte, el corrimiento espectral de las galaxias lejanas hacia el rojo nos indica que el Universo está en expansión, de manera que en el pasado la materia debe haber estado más concentrada, y por ello los choques de la luz con la materia eran más frecuentes. Los cosmólogos consideran que gracias a esta estrecha interacción, la materia y la radiación deben haber llegado a una situación de equilibrio en el pasado remoto. Pero con la expansión del Universo, la densidad de materia y de luz ha disminuido, y la interacción entre ambas se ha reducido a tal grado que prácticamente ya no se crean ni se destruyen fotones (a escala cósmica); en otras palabras, la cantidad de luz existente en el Universo es constante.

Esta radiación cósmica de fondo cubre todo el espectro, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, pero la contribución de mayor intensidad se encuentra en el lejano infrarrojo. Esto significa, de acuerdo con la fórmula establecida por Planck para la radiación térmica (sección IV.1), que la temperatura del Universo es muy baja, del orden de tres grados absolutos. No se sabe exactamente cuánta luz hay en el Universo, pero se calcula que por cada protón o neutrón hay mil millones de fotones. En realidad, ésta es una cantidad pequeña; el espacio intergaláctico es muy oscuro. Se necesitan aparatos muy sensibles para detectar la radiación de fondo. Pero cuando el Universo era 100 veces más pequeño, esta radiación de fondo era suficiente para iluminar el cielo como si todo el tiempo fuera de día. Si alguna vez el Universo vuelve a contraerse (los cosmólogos aún no se ponen de acuerdo sobre ello), podrá recuperar su brillo de antaño; pero en todo caso habría que esperar algunos miles de millones de años para que esto sucediera.

### **3. A FIN DE CUENTAS, ¿QUÉ ES LA LUZ?**

**luz** f. Agente físico que ilumina los objetos y los hace visibles. Claridad que irradian los cuerpos en combustión, ignición o incandescencia...

*(Diccionario Porrúa de la Lengua Española, México, 1980).*

Todos sabemos qué es la luz, pero no es fácil decir lo que es.

J. BOSWELL.

¿Alguna vez ha intentado usted definir una mesa? Generalmente uno reconoce una mesa al verla, pero si se intenta dar una definición, habrá siempre alguna mesa que no se ajuste a ella, a menos que la definición sea tan vaga y ambigua que hasta lo que no es una mesa pueda ser considerado como tal.

Algo similar sucede con la luz, con la agravante de que se trata de un concepto considerablemente más complejo y sutil que el de mesa. Cualquier definición que pretendiéramos hacer de la luz resultaría incompleta, porque seguramente dejaría de lado algún aspecto particular de este complejo fenómeno. Sin embargo, a grandes rasgos hemos aprendido a identificar la luz, conocemos muchas de las características que le son propias, sabemos cómo se comporta ante determinadas circunstancias, y reconocemos los fenómenos en los que interviene. Hemos adquirido una idea de la luz, que se va afinando y enriqueciendo en función de nuevas experiencias.

Hemos visto que en la historia de las teorías ópticas, dos modelos muy diferentes sobre la naturaleza de la luz han competido durante siglos. Por un lado, se ha pensado en la luz como algún tipo de movimiento ondulatorio; por otro, se le ha considerado como un flujo de partículas muy veloces. Durante el siglo XIX el modelo ondulatorio logró una aceptación casi universal gracias a una impresionante serie de experimentos y de desarrollos teóricos. Con el cambio del siglo, sin embargo, fueron descubiertas algunas propiedades de la luz que aparentemente sólo podían ser explicadas con una teoría corpuscular. La naturaleza de estos corpúsculos, los fotones, ha resultado ser considerablemente más sutil de lo que se imaginaba en un principio, pero al menos parecen poseer una determinada cantidad de energía y de impulso en forma de paquete, por lo que de alguna manera se asemejan a partículas ordinarias, aunque no se tiene idea de su tamaño, no tienen masa y siempre viajan con la misma velocidad.

La existencia de estos dos modelos, cada uno de ellos parcialmente adecuado para explicar ciertos fenómenos luminosos, ha presentado un formidable dilema a los físicos. En cierto modo, la mecánica cuántica, desarrollada durante las primeras décadas de este siglo, ha venido a dar una respuesta a esta aparente incompatibilidad entre ondas y partículas, al mostrar que lo que usualmente se ha identificado como partícula (como los protones, los electrones, los neutrones, etc.) *también* posee propiedades ondulatorias.

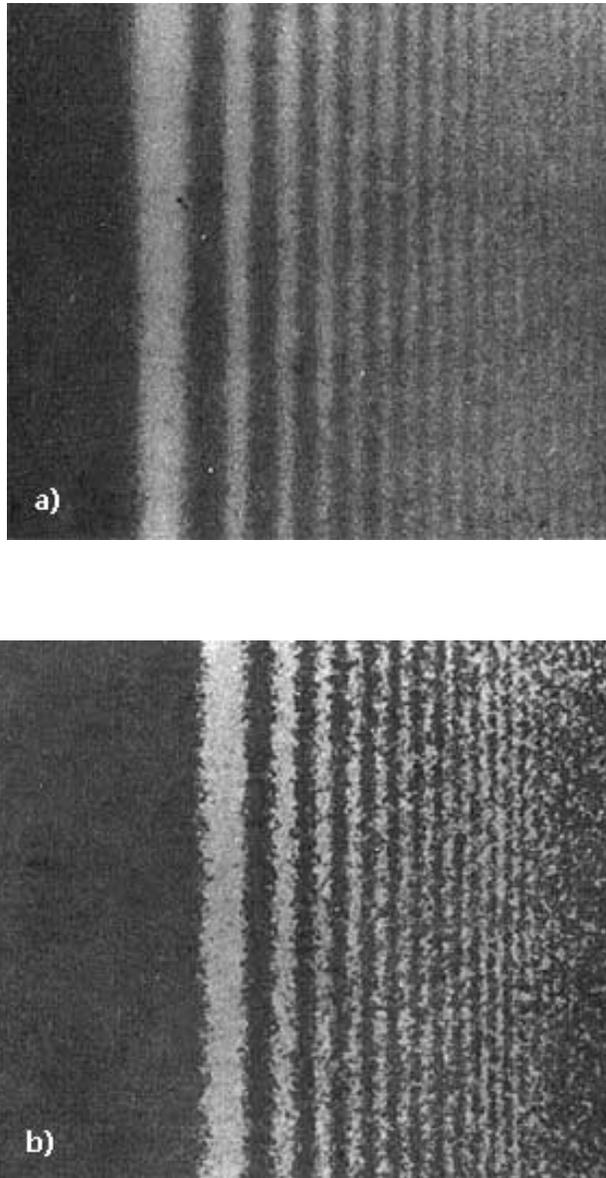
En efecto, los constituyentes elementales de la materia también se comportan en ocasiones como ondas. Tómese, por ejemplo, un haz de electrones, lanzados todos con la misma velocidad: resulta que pueden ser difractados y se les puede hacer interferir, como a las ondas (Figura 48). Es más, se le puede asignar una longitud de onda. De acuerdo con la fórmula propuesta por Louis de Broglie en 1923, la longitud de onda asociada a partículas de masa  $m$  y velocidad  $v$  es

$$\lambda = h / mv,$$

donde nuevamente interviene la constante de Planck,  $h$ . Esta constante es sumamente pequeña, por lo que también la longitud de onda asociada a los corpúsculos es en general pequeña. Por ejemplo, los electrones que son acelerados en un microscopio electrónico tienen una longitud de onda de  $5 \text{ \AA}$  o aun menor, o sea mil veces más pequeña que la de la luz visible. De hecho, ésta ha sido la base del éxito de la microscopía electrónica: cuando una muestra es "iluminada" con electrones de tan pequeña longitud de onda, se produce una imagen mucho más fina que al ser iluminada con luz visible.

Tanto con la luz como con la materia, el aspecto ondulatorio se pone particularmente de manifiesto cuando el flujo (de luz o de partículas) es muy intenso. En cambio, cuando la intensidad del flujo es baja, sobresale el aspecto corpuscular. Para ilustrar esto recordemos el experimento de las dos rendijas, que fue descrito en el capítulo II. Cuando este experimento se realiza con una cantidad normal de luz, aparece muy claro el fenómeno de interferencia, que es ondulatorio. Pero una iluminación normal equivale a una

enorme cantidad de fotones. Si la intensidad de la luz se reduce mucho, es posible detectar en la pantalla cada uno de los fotones. (Para ello es necesario reducir de tal manera la intensidad de la luz, que a simple vista no se detecta; pero el material fotosensible de la pantalla sí debe registrar su llegada). Se observa entonces que los fotones van incidiendo al azar sobre los diversos puntos de la pantalla, construyéndose poco a poco el patrón de interferencia, que se ilustra en la figura 48(a). Sólo cuando han llegado muchos fotones (todos con la misma energía, o sea con la misma longitud de onda) se ven claras las franjas de interferencia. Si el experimento se realiza con electrones o neutrones (u otras partículas) en vez de fotones, se observa el mismo fenómeno: la estructura granular del patrón de interferencia se pierde gradualmente al aumentar la intensidad del haz de partículas o el tiempo de exposición (Figura 48(b)).



**Figura 48. Difracción ocasionada por el borde de un obstáculo (véase también la Figura 17).**

**(a) Patrón de difracción de la luz. (b) Patrón de difracción de electrones.**

No hay que perder de vista, sin embargo, que en el caso de las partículas estamos hablando de ondas asociadas a la materia, mientras que en el caso de la luz se trata de ondas de radiación electromagnética,

que escapan de la materia que les dio origen, y que dejan de existir cuando ésta las reabsorbe. En el primer caso hay un transporte de materia: son las partículas mismas las que se mueven, y no dejan de existir aunque cambien de velocidad o se detengan. En cambio, la luz, al ser radiación, no puede detenerse, y no viene acompañada de un flujo de materia, aunque sí de energía.

Al estar compuesta de campo electromagnético oscilatorio, la luz se puede considerar como una excitación pasajera del vacío o del medio en que se está propagando; excitación que es creada por la materia, puede afectar a la materia que encuentra en su camino, y eventualmente es aniquilada por la misma materia. Estos campos eléctrico y magnético en todo momento son perpendiculares a la dirección del rayo de luz; por ello se dice que la luz es una onda transversal (recuérdese la sección II.5).

Aunque la luz es un fenómeno ondulatorio, transporta la energía, el momento lineal y aun el momento angular en forma cuantizada, según la visión actual. Esto implica que la interacción de la luz con la materia no se da de manera continua, sino discreta; el intercambio de energía no es gradual, sino escalonado. La aparente continuidad de la luz a la que estamos tan acostumbrados se debe a la escala macroscópica de nuestras experiencias cotidianas y a la enorme cantidad de fotones que normalmente nos iluminan. Probablemente usted está recibiendo en estos momentos cerca de  $10^{17}$  fotones por segundo en cada centímetro cuadrado de su piel expuesta a la luz; ¿cómo podría sospechar siquiera que la luz tiene este carácter discreto?

La rápida, accidentada y a menudo controversial evolución de las teorías ópticas nos conduce a sospechar que quizá muchas de las afirmaciones que hacemos hoy día sobre la luz tienen carácter provisional. La experiencia científica nos ha enseñado que no hay teoría que pueda ser definitivamente confirmada; las teorías sólo se van consolidando conforme muestran su capacidad predictiva y extienden su dominio de aplicabilidad. Con optimismo podemos suponer que gradualmente nos hemos ido acercando a un mejor conocimiento del fenómeno de la luz, pero probablemente no habrá que esperar mucho tiempo para aprender más sobre ella y para corregir algunas de las afirmaciones presentes. Cabe aquí recordar, a guisa de moraleja, una confesión que escribió Einstein en 1951, a medio siglo de distancia de su histórico trabajo sobre el efecto fotoeléctrico:

Todos estos 50 años de reflexión concienzuda no me han traído más cerca de la respuesta a la pregunta ¿qué son los cuantos de luz? Hoy día, todo Hugo, Paco o Luis cree que sabe la respuesta, pero está equivocado.



# MATERIAL DE LECTURA

En esta lista vienen incluidos algunos títulos que fueron de suma utilidad en la elaboración de este libro, y otros más que pueden ayudar al lector a profundizar en los temas de su interés.

Bernal, J. D., *La ciencia en la historia*, UNAM-Nueva Imagen.

-----, *La ciencia en nuestro tiempo*, UNAM-Nueva Imagen, México, 1979.

-----, *La ciencia en nuestro tiempo*.

Cetto, A., H. Domínguez, J. M. Lozano, R. Tambutti y A. Valladares, *El mundo de la física*, tema 9 (Ondas, luz y sonido), Trillas, México, 1983. Del tema 10, consúltense los capítulos de J. de la Herrán, L. de la Peña y L. F. Rodríguez (edición de 1986).

Gamow, G., *Biografía de la Física*, Alianza Editorial, Madrid, 1980.

Landau, L. y Y. Rumer, *Qué es la teoría de la relatividad*, Ed. Siglo Veinte, Buenos Aires, 1975.

Cline, B. Lovett, *Los creadores de la nueva física*, Fondo de Cultura Económica, México, 1973.

Papp, D., *Historia de la física*, Espasa-Calpe, Madrid, 1961.

Perelman, Y., *Física recreativa*, Libros 1 y 2, Editorial Mir, Moscú, 1969.

Ponomariov, L., *Alrededor del cuanto*, Editorial Mir, Moscú, 1974.

De la colección La Ciencia desde México, los siguientes títulos publicados hasta la fecha abordan diversos aspectos de la luz y de las teorías ópticas:

Peña L. de la, *Albert Einstein, navegante solitario*.

Rickards Campbell, J., *Las radiaciones: reto y realidades*.

Rius M., y M. Castro-Acuña, *La química hacia la conquista del Sol*.

Rodríguez, L. F., *Un Universo en expansión*.

Ruiz Mejía, C., *Trampas de luz*.



# GLOSARIO

**aberraciones.** Defectos de las lentes y los espejos que impiden la formación de imágenes perfectas. Las más importantes son la aberración cromática (debida a que los diferentes colores se refractan en direcciones diferentes) y la aberración esférica (debida a que las superficies esféricas no enfocan en un solo punto los rayos paralelos).

**Ångström.** Unidad de longitud equivalente a  $10^{-10}$  m, empleada para expresar longitudes de onda de la luz. Llamada así en honor del astrónomo y espectroscopista sueco A. J. Ångström. Se escribe también *angstrom* o Å.

**birrefringencia.** La doble refracción de la luz producida por cristales minerales. Puede llegar a producir dos imágenes de un mismo objeto visto a través del cristal.

**cámara oscura.** Caja totalmente oscura, a la que se hace un pequeño orificio en una de sus paredes para permitir que en su interior se proyecte la imagen de los objetos exteriores.

**coherentes.** Dícese de dos o más ondas (o grupos de ondas) que son emitidas en fase o con una diferencia de fases que se mantiene constante.

**colores primarios.** Tres colores empleados como base para producir todos los colores. Para iluminación se usan los primarios *aditivos*: rojo, verde y azul. Para pigmentos se usan los primarios *sustractivos*: magenta, amarillo y cian (índigo o añil).

**cóncavo.** Se aplica a las superficies curvas que forman una cavidad. Las lentes cóncavas son más delgadas en el centro que en el borde.

**conos y bastones.** Células visuales fotorreceptoras. Gracias a los bastones distinguimos contrastes; gracias a los conos distinguimos colores.

**convergente.** Se aplica a las lentes y los espejos que aumentan la convergencia de un haz de luz. Las lentes convexas son convergentes.

**convexo.** Se aplica a las superficies curvas redondeadas hacia el exterior. Las lentes convexas son más gruesas en el centro que en el borde.

**crestas y valles.** Zonas de mayor amplitud en una onda. La cresta es la parte más alta y el valle la más baja.

**cromático.** Relativo al color.

**daltonismo.** Defecto de la vista que consiste en no percibir ciertos colores o confundirlos con otros. Llamado así en honor al químico y físico inglés J. Dalton que lo descubrió. También se le puede llamar *acromatopsia*.

**difracción.** Desviación de las ondas producida por el borde de un obstáculo o una apertura.

**dispersión.** a) Separación o descomposición de la luz en los colores del espectro, como la que se produce, por ejemplo, al pasar la luz por un prisma. b) Desviación irregular de la luz en todas direcciones, como la producida, por ejemplo, por las partículas de la atmósfera.

**divergente.** Se aplica a las lentes y los espejos que aumentan la divergencia (o disminuyen la convergencia) de un haz de luz. Las lentes cóncavas son divergentes.

**efecto Cherenkov.** Radiación producida cuando en un medio se mueven partículas con una velocidad mayor que la velocidad de la luz en dicho medio. Llamado así en honor de su descubridor, el físico soviético P. A. Cherenkov.

**efecto Doppler.** Alteración de la frecuencia (o la longitud de onda) producida por el movimiento relativo entre la fuente emisora y el detector. Llamado así en honor del físico austriaco C. Doppler, quien demostró este efecto en el sonido.

**efecto fotoeléctrico.** Emisión de electrones por una superficie metálica, producida por la iluminación del metal. A los electrones así liberados se les llama *fotoelectrones*.

**electromagnetismo.** Rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos y las relaciones entre éstos.

**espectro.** Diagrama o gráfica de la intensidad de la luz como función de la frecuencia (o la longitud de onda). Espectro de *absorción*: serie de líneas o bandas oscuras en un espectro, debidas a la absorción de la luz por una sustancia. Espectro de *emisión*: serie de líneas o bandas luminosas en un espectro, debidas a la emisión de luz por una sustancia.

**espectroscopía.** Técnica de análisis químico basada en el estudio de los espectros de emisión o absorción de los materiales.

**éter.** Fluido hipotético que se admitía como soporte de las ondas electromagnéticas, entre ellas la luz.

**fase.** Amplitud relativa de la onda en un punto dado. Se dice que dos ondas están en fase cuando coinciden sus amplitudes relativas (por ejemplo, sus crestas).

**filtro.** Pantalla que se interpone en el camino de la luz para absorber ciertas frecuencias (o ciertos colores) de ésta.

**fluorescencia.** Luz emitida por determinados cuerpos o sustancias, enseguida de haber sido expuestos a iluminación de ciertos colores.

**fosforescencia.** Luz emitida por determinados cuerpos o sustancias después de haber estado expuestos a iluminación de ciertos colores. A diferencia de la fluorescencia, la fosforescencia subsiste después de desaparecer la radiación excitante.

**fotoconductor.** Material que aumenta su conductividad eléctrica bajo la influencia de la luz.

**fotón.** Cuanto de luz: partícula luminosa sin masa y con energía  $h\nu$  donde  $\nu$  es la frecuencia asociada a la luz y  $h$  la constante de Planck.

**fotoquímica.** El estudio de los efectos químicos de la radiación, básicamente la visible y la ultravioleta.

**fotosíntesis.** Síntesis química de carbohidratos simples a partir de bióxido de carbono y agua, realizada en las células vegetales a partir de la absorción de energía luminosa.

**frecuencia.** El número de vibraciones o ciclos por unidad de tiempo. La frecuencia de las ondas electromagnéticas suele medirse en ciclos por segundo, llamados hertz en honor del físico alemán H. Hertz.

**hipermetropía.** Defecto de la visión causado por falta de convexidad del cristalino, lo que hace que las imágenes se formen detrás de la retina en vez de formarse sobre ella.

**holografía.** Técnica de registro y reproducción de imágenes tridimensionales, basada en la interferencia de

rayos luminosos coherentes.

**imagen real.** Imagen formada por la convergencia de rayos de luz al ser desviados por una lente o un espejo; puede ser proyectada sobre una pantalla.

**imagen virtual.** Imagen que parece estar situada en la región de donde divergen los rayos de luz después de haber sido desviados por una lente o un espejo; no puede ser proyectada sobre una pantalla.

**índice de refracción.** Propiedad óptica de un medio, que determina, entre otras cosas, la desviación sufrida por la luz al entrar en ese medio y la velocidad de propagación de ella en el medio. Se indica con la letra  $n$ .

**incandescencia.** Luz producida por metales y otros materiales al ser elevados a muy altas temperaturas. Se aplica en particular al filamento de los bulbos eléctricos.

**infrarrojo.** Se refiere a la radiación electromagnética no visible cuya frecuencia es apenas menor que la de la luz roja.

**interferencia.** Superposición de dos o más ondas, que da como resultado la suma de amplitudes (cuando coinciden crestas con crestas) y la cancelación de amplitudes (cuando coinciden crestas con valles); se habla entonces de interferencia *constructiva* y *destruktiva*, respectivamente.

**láser.** Fuente de luz coherente que opera en dos etapas: inicialmente los átomos son bombeados a un estado excitado, y después se estimula la emisión de luz por estos átomos. La palabra *láser* es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*,

**ley de Snell.** Ley que relaciona el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción de la luz al pasar de un medio a otro; esta relación está determinada por el cociente de los índices de refracción de los dos medios. Llamada así en honor de su descubridor, W. Snell.

**longitud de onda.** Distancia entre dos crestas consecutivas de una onda.

**microondas.** Ondas electromagnéticas de frecuencia mayor que las ondas de radio y menor que la radiación infrarroja.

**miopía.** Defecto de la visión causado por un excesiva convexidad del cristalino, lo que hace que las imágenes enfocadas se formen enfrente de la retina en vez de formarse sobre ella.

**monocromático.** Se refiere a la luz de un solo color o, en términos más precisos, de una sola longitud de onda.

**ondas electromagnéticas.** Perturbaciones que se propagan con la velocidad de la luz, consistentes en ondas de campo eléctrico y de campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Las ondas de luz, en particular, son de esta naturaleza.

**ondas longitudinales.** Se las llama así cuando la perturbación o el desplazamiento que producen es paralelo a la dirección de propagación. En particular, las ondas del sonido son longitudinales.

**ondas transversales.** Se denominan así cuando la perturbación que producen es perpendicular a la dirección de propagación. Las ondas en una cuerda son transversales; las de la luz también.

**polarización.** Propiedad que pueden poseer las ondas transversales, consistentes en que todas las vibraciones de la onda se producen sobre una sola dirección perpendicular a la de propagación.

**polarizador.** Material que al interponerse en el camino de la luz produce la polarización parcial o total de ésta.

**principio de Fermat.** Principio según el cual la trayectoria que sigue un rayo de luz para ir de un punto a otro es tal, que el tiempo de recorrido es mínimo. Fue enunciado por el matemático francés P. de Fermat.

**rayos y (gamma).** Radiación electromagnética de frecuencia mayor que los rayos X: es la radiación más energética que se conoce.

**rayos X.** Radiación electromagnética de frecuencia mayor que la ultravioleta y menor que los rayos gamma.

**reflexión.** Fenómeno que ocurre cuando la luz incide sobre una superficie y es desviada por ésta sin cambiar de medio. La reflexión es *especular* cuando la superficie es lisa, y *difusa* cuando la superficie es rugosa.

**refracción.** Cambio de dirección de propagación de la luz, que se produce cuando ésta pasa de un medio a otro de diferente densidad (o diferente índice de refracción).

**taquión.** Partícula hipotética que viaja con velocidad mayor que la de la luz.

**traslúcido.** Dícese de un medio que transmite la luz pero la dispersa, de manera que no permite que se vea con claridad lo que está al otro lado de él.

**ultravioleta.** Se refiere a la radiación electromagnética no visible cuya frecuencia es apenas mayor que la de la luz violeta.



# COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de diciembre de 1996 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz de San Lorenzo, 244; 09830

México, D. F. Se tiraron 2 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



Don Wenceslao Barquera es uno de esos mexicanos fuera de serie que, además de dedicarse a sus numerosos oficios, principalmente el periodismo, a ayudar a la causa de los insurgentes en la Guerra de Independencia, etcétera, todavía encontró tiempo para dedicarlo a la ciencia y a su divulgación. En su libro *Física de la luz* (1609) califica a este fenómeno físico de "el placer más brillante" que, al descorrer el velo de la naturaleza hace que todo parezca cobrar nueva existencia al adornar la Tierra con brillantes colores cuya belleza deslumbra nuestros ojos.

No hay quien conozca la luz, sin embargo poco es lo que sabemos de ella; en ocasiones para los mismos físicos parece cosa de magia, de encantamiento. El presente libro, nos dice su autora, la doctora Ana María Cetto, constituye una invitación al lector a penetrar al mundo misterioso de la luz —y de los fenómenos ópticos. Para facilitar su comprensión y su lectura, se parte del estudio de fenómenos cotidianos relacionados con la reflexión, la refracción, la polarización, el análisis de los colores, ofreciéndose una explicación sencilla, mas que refleja el estado actual de los conocimientos que sobre ellos se tiene.

En *La luz* se expone, a continuación, cómo ha sido el desarrollo histórico de las teorías sobre la ciencia que estudia las leyes y los fenómenos de la luz, desde la Antigüedad hasta nuestros días, trayectoria que permite al lector la adquisición de una visión más profunda y más completa acerca de la luz y las diversas concepciones que sobre ella se han tenido. Se verá cómo los científicos modernos inquietan sobre su naturaleza, su origen, su interacción con la materia, sus aplicaciones y la relación que guarda con otras radiaciones, de los rayos gamma a las ondas de radio.

Asistimos en la actualidad a una verdadera eclosión de descubrimientos en el campo de las teorías ópticas en particular y de la física en general. No obstante, la esencia, la naturaleza intrínseca de la luz continúa manteniéndose misteriosa. Muchas de las afirmaciones que sobre ella se hacen tienen el carácter de provisionales. En palabras de Einstein, "hoy todo Juan, Pepe o Pancho cree que sabe la respuesta, pero está equivocado".

La doctora Cetto hizo su licenciatura de física en la Facultad de Ciencias de la UNAM; obtuvo su maestría en Harvard y su doctorado en la UNAM. Escribe en varias revistas especializadas y es autora de dos libros de texto; es investigadora titular C del IFUNAM y miembro de la Academia de la Investigación Científica, de la Sociedad Mexicana de Física y del Sistema Nacional de Investigadores

En la portada *Música solar*, pintura de Remedios Varo Cortesía de Carlos Prieto

