

CARLOS RUIZ MEJÍA

# TRAMPAS DE LUZ

**M**e parece especialmente interesante entender los mecanismos que permiten a los cristales captar la luz. Normalmente todos conocemos estos materiales; en el lenguaje común se conocen como "materiales fosforescentes," y su característica esencial es que brillan en la oscuridad. Este fenómeno ocurre porque están emitiendo luz.

Los números de muchos relojes (o los de otros objetos fosforescentes), atrapan la luz del Sol, o de un foco, y la emiten constantemente mientras los observamos en la oscuridad. Estos objetos, con los que estamos familiarizados, generalmente no son cristalinos, sino amorfos. Entender el comportamiento de los materiales amorfos es un problema mucho más complicado que el de los cristalinos. En esta ocasión únicamente nos referiremos a estos últimos. ¿Qué es un cristal? En el lenguaje de la vida diaria hablamos indistintamente de un vidrio o un cristal. En la física, un cristal es un sólido (también existen cristales líquidos, cuyas propiedades son muy interesantes, pero que no son importantes para nuestra discusión) constituido por bloques de átomos que se repiten indefinidamente. Por ejemplo, imaginemos un cubo que tiene un átomo en cada uno de sus ocho vértices y otro átomo en el centro. Con este cubo como unidad, podemos construir un cristal, poniendo una línea de cubos iguales, uno junto a otro, en contacto, que se extiende hacia la derecha y hacia la izquierda del primero. A partir de cada uno de éstos, extendemos líneas de cubos iguales (también en contacto), que van hacia adelante y hacia atrás de cada uno de los anteriores. Finalmente, tomando como centro cada uno de los cubos obtenidos, pondríamos en línea cubos idénticos hacia arriba y hacia abajo. Es como si construyéramos un cubo grande formado por cubos de madera. ¿Cuántos de estos cubos tendría un cristal típico? Serían del orden de  $10^{22}$  por centímetro cúbico (un 1 seguido de 22 ceros, en un centímetro cúbico de material cristalino).

Hay varios tipos de arreglos geométricos para una unidad cristalina. Se puede demostrar teóricamente

que sólo son posibles unos cuantos conjuntos de simetrías (otro ejemplo de ladrillo unidad sería un cubo con átomos en las esquinas y átomos en los centros de sus caras). Tenemos también unidades cristalinas que no son cúbicas y puede haber otro tipo de complicación además, cuando en lugar de tener un átomo

en cada posición, tenemos conjuntos de átomos o moléculas. En la figura 1 vemos la diferencia entre un cristal (a) y un vidrio (b). Aquí no tenemos un cubo, sino figuras en dos dimensiones. En el caso del cristal el hexágono unidad se repite en todo el plano. Aunque en la figura sólo aparezcan tres hexágonos, en el cristal aparecerían (en

uno de sus planos) un gran número de unidades. En el caso del vidrio no hay una unidad que se repita. Los círculos blancos y negros representan a distintos tipos de átomos.

Ahora conviene hablar un poco sobre la luz. La luz es energía pero, ¿está constituida por partículas, o por ondas?

La luz es un fenómeno electromagnético. Esto significa que está constituida por ondas eléctricas y magnéticas. Se sabía por Ørsted y Faraday que el movimiento de cargas eléctricas (las corrientes) producían campos magnéticos y que la variación del campo magnético producía corrientes. Las ecuaciones de Maxwell resumen los resultados experimentales de Ampere, Ørsted y Faraday. De ahí se concluyó que son ondas periódicas las que llevan la energía electromagnética. Maxwell pudo demostrar que las ondas electromagnéticas y las ondas luminosas se propagan con la misma velocidad, y consideró que eran fenómenos idénticos. Su teoría fue recibida con frialdad por la comunidad científica de la época. Lo que hacía falta era un experimento que mostrara la forma en que se propagan las ondas electromagnéticas. H. Hertz demostró la realidad de las ondas electromagnéticas, catorce años después de la teoría de Maxwell. El problema residía en que las ondas electromagnéticas que podían producirse fácilmente en el laboratorio eran del orden de un kilómetro. No es fácil encontrar laboratorios tan largos y, además, la energía de ondas con

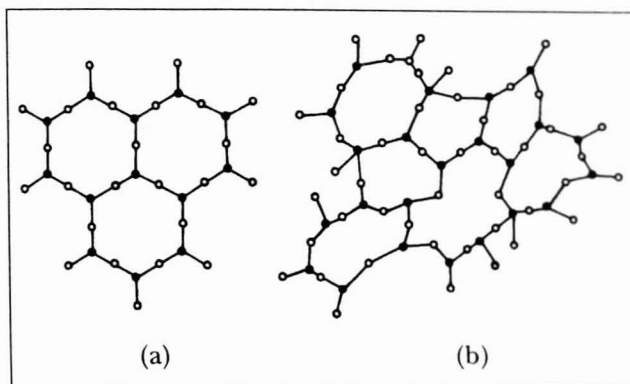


Figura 1 (a) Patrón bidimensional de un cristal, (b) de un vidrio

estas longitudes de onda es pequeña. Para producir ondas cortas, Hertz diseñó un aparato que era una especie de oscilador. ¿Cómo se puede saber si la radiación emitida es una onda? Hertz colocó a cierta distancia del oscilador una placa de zinc conectada a tierra, que hacía el papel de un espejo reflector. Si el oscilador estuviera produciendo ondas, éstas se reflejarían en la placa de zinc produciéndose un sistema de ondas estacionarias entre el oscilador y la placa de zinc. El sistema experimental de Hertz consistía en dos esferas iguales, provistas de varillas metálicas terminadas en dos pequeñas esferas que se podían acercar a voluntad. Para cargar eléctricamente este arreglo, se usaba una bobina que daba corriente alterna de corto periodo. Debido a la diferencia de potencial salta una chispa entre las dos pequeñas esferas. La presencia de las ondas se detecta cuando salta una chispa. Estas chispas variaban en longitud y brillo de punto a punto, acusando máximos y mínimos equidistantes, los cuales son característicos de las crestas y nodos de las ondas estacionarias. En los nodos, la intensidad de la chispa es nula, y en las crestas es máxima.

Una vez determinada la posición de las crestas y los nodos, es muy fácil obtener la longitud de onda (tiene que ver con la distancia entre cresta y nodo). En sus primeros experimentos Hertz encontró longitudes de onda del orden de treinta metros, después consiguió producir ondas más cortas. Aquí conviene destacar que la longitud de onda de la luz visible es unas décimas de micrón (una milésima de milímetro), y un millón de veces más pequeña que la de la "luz" invisible de Hertz (más adelante hablaremos del espectro electromagnético).

Hertz encontró que las ondas producidas con su oscilador se refractaban al pasar por un prisma de brea, igual que ocurre con la luz visible cuando atraviesa un prisma de cristal. Finalmente logra medir la velocidad de propagación de sus ondas y coincide con la de la luz. Hertz fue el primero en demostrar que es posible transmitir ondas eléctricas sin usar un conductor. Sus dispositivos permitieron la transmisión de señales a una cuantas decenas de metros. E. Branly aumentó el alcance y O. Lodge y G. Popoff perfeccionaron sus logros. W. Marconi las utilizó para accionar un aparato Morse. En 1869 se logró que las ondas herztianas cruzaran el Canal de la Mancha.

Con los experimentos mencionados se reconoció que la teoría de Maxwell era correcta y que la luz era

en realidad radiación electromagnética. Eso fue un gran triunfo científico, pero no era completo. Por ejemplo, la teoría de Maxwell no explica el mecanismo que produce las ondas luminosas, ni la dispersión de la luz, la doble refracción y la electrólisis.

Las ecuaciones de Maxwell no toman en cuenta que la electricidad está constituida por ciertas unidades. Para poder entender los fenómenos que ocurren a escala microscópica, es necesario tomar en cuenta la naturaleza corpuscular de la materia y de la electricidad. Fue H. A. Lorentz quien extendió las ecuaciones de Maxwell. Propone que el fluido eléctrico está formado por unidades de electricidad y les llama electrones (Stoney fue el primero que usó ese nombre). Entonces, son electrones los que circulan por un alambre que lleva corriente eléctrica.

Las características del magnetismo se pueden describir en términos de minúsculas corrientes moleculares. Estas cargas que giran producen campos magnéticos microscópicos. Al sumar estos campos

magnéticos microscópicos se tendrá un campo magnético macroscópico, que es el que se mide experimentalmente. Lorentz supuso que los electrones irradian energía al girar dentro de los átomos. Las leyes que rigen la energía radiante, no son tan simples como las imaginó Lorentz. El punto más importante es que él no sospechó que la energía emitida por los electrones estaba cuantizada. Es interesante ver, aunque sea una vez, a qué región del espectro electromagnético corresponden las ondas de radio, las microondas, las infrarrojas, la luz visible, etcétera. En la figura 2 se muestra tal espectro.

Partículas con carga positiva o negativa y movimiento acelerado producirán ondas electromagnéticas. También se producen en procesos internos de átomos y moléculas. Cuando un electrón pasa de un cierto nivel de energía atómico a otro de menor energía, emite una onda electromagnética. De igual manera las pueden producir los seres vivos y aparatos inventados por el hombre.

Cuando la luz visible, los rayos-X o los ultravioleta inciden sobre un gas o un metal se generan electrones. Este fenómeno recibe el nombre de efecto fotoeléctrico. Cuando la radiación incide sobre un metal, el número de electrones generado depende del material utilizado. Por ejemplo, el rubidio es más eficiente que el potasio y el sodio. La cantidad de electrones emitida por segundo es proporcional a la intensidad del

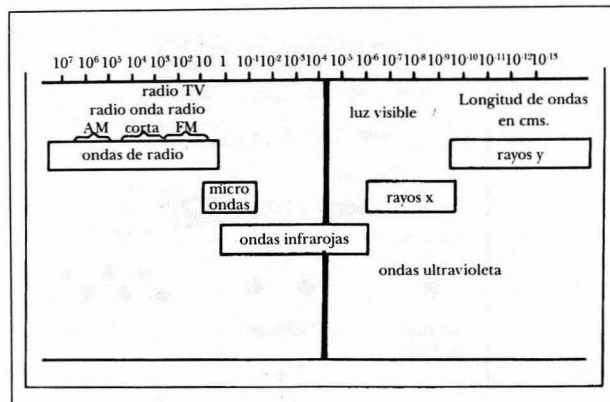


Figura 2 Espectro de la radiación electromagnética

haz incidente y crece rápidamente como función de la energía de radiación electromagnética. Para cada metal hay una frecuencia de la radiación incidente, límite, abajo de la cual no se produce el fenómeno. Esa frecuencia recibe el nombre de umbral fotoeléctrico y depende de la naturaleza química del metal.

Se observa que la velocidad de los electrones que salen del metal no depende de la intensidad del haz incidente (número de fotones que llegan, por unidad de área), sino de la energía de los fotones que chocan con el metal.

De los experimentos realizados se concluyó que la energía luminosa está concentrada en forma de granos o corpúsculos, cuya energía es proporcional a la frecuencia de la radiación incidente. Al chocar con el metal cada uno de los cuantos luminosos (granos), cede su energía a cualquier electrón que encuentra en su camino y esa energía será independiente de la distancia a que esté la fuente luminosa.

Es curioso que la teoría de corpúsculos luminosos, cuya realidad se comprobó a partir del efecto fotoeléctrico,

fue planteada por Newton muchos años antes. La idea de Newton se mantuvo por largo tiempo, hasta que Young y Fresnel, en el siglo XIX, demostraron la naturaleza ondulatoria de la luz. La idea de corpúsculo no fue compatible con los fenómenos de interferencia y polarización. Desde entonces, hasta 1917 (efecto fotoeléctrico), se pensó que la luz era un fenómeno ondulatorio y que no podía estar compuesta por granos de energía. En 1923 se hizo otro experimento (que no discutiré), el cual se conoce con el nombre de efecto Compton. Este experimento también reveló la naturaleza corpuscular de la luz. De acuerdo a estos resultados se concluyó que la luz viaja a través del espacio en forma de unidades discretas cuya energía es  $hn$  ( $h$  es una constante, la constante de Planck, y  $n$  es la frecuencia de la radiación). Esta afirmación es válida para la totalidad del espectro electromagnético. Por lo tanto, Newton tenía razón, excepto porque según su punto de vista moderno la luz puede contener corpúsculos con diferentes cantidades de energía.

¿Debemos olvidar entonces todo lo que se había afirmado sobre la naturaleza ondulatoria de la luz? Fenómenos como la reflexión de la luz, la refracción, la interferencia, la polarización, se explican satisfactoriamente usando la teoría ondulatoria. Pero, ¿cuál de los dos puntos de vista adoptaremos? Según nuestra experiencia los dos son incompatibles. Aparentemente la

dificultad estriba en que para la descripción de los fenómenos físicos estamos obligados a usar el lenguaje de la vida cotidiana. Cuando deseamos describir un fenómeno físico recurrimos a representaciones que provienen de la imaginación. El lenguaje común ha surgido de la experiencia cotidiana y no puede superar esos límites. La física clásica está formulada usando imágenes de la vida diaria. Dentro de ella la luz se describe como una partícula o como una onda. No hay otra manera de dar una descripción intuitiva de los movimientos. De hecho se ha tratado de aplicar esos puntos de vista en el caso de los procesos atómicos y ahí ha sido muy claro que nuestra intuición,

surgida de la experiencia cotidiana, ha fracasado. Los procesos físicos pueden interpretarse en términos de corpúsculos o de ondas, por lo que podemos decir que las descripciones corpuscular y ondulatoria de la luz son maneras complementarias de describir un proceso físico único, y que éste puede admitir una descripción intuitiva en un número limitado de casos. En el efecto fotoeléctrico la luz se interpreta

como un conjunto de corpúsculos y en fenómenos de difracción, como una onda. Son las limitaciones a que estamos sujetos en el proceso de medición, las que conducen a la distinción entre partículas y ondas. Finalmente cabe preguntarse si el descubrimiento de la mecánica cuántica invalida la mecánica newtoniana. La respuesta es no. La mecánica de Newton sigue siendo válida en sus dominios tradicionales. Si la luz se puede comportar como un conjunto de partículas, ¿pueden las partículas tener características ondulatorias? En 1924 Louis De Broglie consideró que el electrón se podía entender como un tren de ondas. Usando la mecánica cuántica asignó una frecuencia y una longitud de onda al electrón. Esto no fue fácil de aceptar, pero en 1927, Davison y Germer mostraron que los electrones se podían difractar, al chocar con la superficie de un cristal, igual que si se tratara de ondas.

Ahora podemos hablar un poco sobre el átomo y la manera como cambian sus niveles de energía al formar parte de un cristal. Podemos imaginarnos el sistema atómico como un sistema planetario en el que el núcleo haría el papel del Sol y los electrones el de los planetas. El primero que propuso este modelo fue Rutherford en 1911, después de hacer incidir átomos de helio sobre una lámina delgada de oro. Después de hacer varios experimentos se convenció de que en los átomos la car-

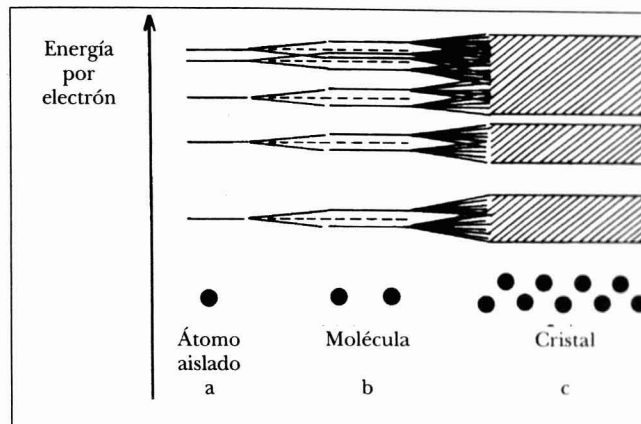


Figura 3

Niveles de energía de un átomo (a), una molécula (b) y un cristal (c)

ga positiva está concentrada en los centros (de los átomos) y que los electrones se distribuyen alrededor de esos centros. Del estudio de las propiedades químicas de los elementos, Bohr propuso que los electrones se movían en órbitas alrededor del núcleo y que se agrupaban en capas que se iban llenando sucesivamente. La primera se llena con dos electrones y corresponde al helio. La segunda capa se llena con ocho. Así,  $2 + 8$  corresponde a la primera y segunda capas llenas (neón),  $2 + 8 + 8$  tiene sus tres primeras capas llenas (argón). La cuarta y quinta capas tienen 18 y 32 electrones, respectivamente. Cada uno de los electrones en un átomo ocupa un cierto nivel de energía. En la figura 2 vemos los niveles de energía asociados con un átomo, una molécula y un cristal. Ahí, el eje vertical representa la energía por electrón. Conforme nos movemos hacia arriba, la energía es más grande. Notamos que los niveles de energía, para un electrón en un átomo, van quedando menos espaciados conforme aumenta la energía (el espacio entre dos líneas horizontales es cada vez más pequeño, al crecer la energía). El largo de las líneas horizontales no tiene ningún significado físico, la energía se mide con respecto al eje vertical. Si juntamos dos átomos, para

formar una molécula, ¿qué pasa con cualquier nivel de energía de un electrón? Se convierten en dos niveles. Si la molécula estuviera formada por tres átomos, cada nivel del electrón en el átomo aislado se convertiría en tres niveles al formarse la molécula. En un cristal, el número de átomos es tan grande que los niveles electrónicos quedan muy juntos dando lugar a una banda. La distribución de los electrones entre los niveles de energía sigue el principio de Pauli, el cual dice que no puede haber más de un electrón en cada estado cuántico (definido por cuatro números cuánticos).

¿Qué pasa cuando mandamos un haz de luz sobre un gas atómico? En la figura 3 se le llama estado base al nivel más bajo del átomo (la línea horizontal más baja). Los demás se conocen con el nombre de estados excitados. Esos estados pueden estar ocupados o desocupados (por electrones). Un electrón del estado base puede pasar al primer estado excitado (el que le queda más cerca), si hay un lugar desocupado, con esa energía, y si la energía del fotón que choca con el electrón es igual a la diferencia de energías entre el estado base y el primer es-

tado excitado (suponiendo que el fotón no pierde energía en algún otro proceso, esas transiciones de energía deben cumplir ciertas reglas). Lo importante es que la energía que interviene en estos procesos debe estar cuantizada. No debe ser mayor ni menor que la diferencia de energías entre el estado base y el primer estado excitado. También puede haber transiciones del estado base a otros estados excitados. La energía de los fotones tendrá que ser igual a las diferencias de energía entre el estado base y los correspondientes estados excitados. Un electrón también puede ir del primer estado excitado (o de otros estados excitados) al estado base. Al hacerlo, emitirá luz (un fotón) de la misma energía

que el fotón que lo llevó al estado excitado. Desde luego, se necesita que en el estado base haya un lugar desocupado.

Usando estas ideas sencillas podemos explicar cómo un cristal atrapa la luz. En este caso, las transiciones electrónicas son de una banda llena a una vacía, en lugar de ocurrir de un nivel ocupado a uno desocupado, como en el átomo. En el caso atómico los electrones pueden ocupar los niveles de energía que les corresponden, como en la figura 3a, pero no pueden ocupar ninguna otra

posición energética (por ejemplo, ningún lugar entre el estado base y el excitado). Geométricamente quiere decir que el electrón no puede estar en cualquier órbita alrededor del núcleo. Por eso decimos que las órbitas están cuantizadas. Con cada órbita hay asociado un nivel de energía (figura 3a), por eso no puede haber niveles intermedios. Un electrón que pertenece a un cierto átomo, seguirá estando ahí cuando el átomo se junta con otros para formar un cristal, pero dentro del esquema de bandas (figura 3c) el electrón se localiza en una banda de energía (no en un nivel de energía). Los niveles que corresponden a las órbitas más cercanas al núcleo (se trata de electrones más amarrados al núcleo) se transforman en bandas llenas. Así, un cristal puede tener varias bandas llenas. A la última banda llena se le suele llamar banda de valencia y a la primera vacía, banda de conducción. Al espacio que queda (energéticamente hablando) entre estas dos bandas, se le llama banda prohibida, porque no puede haber electrones que tengan energías correspondientes a las de la banda prohibida (cuyas magnitudes

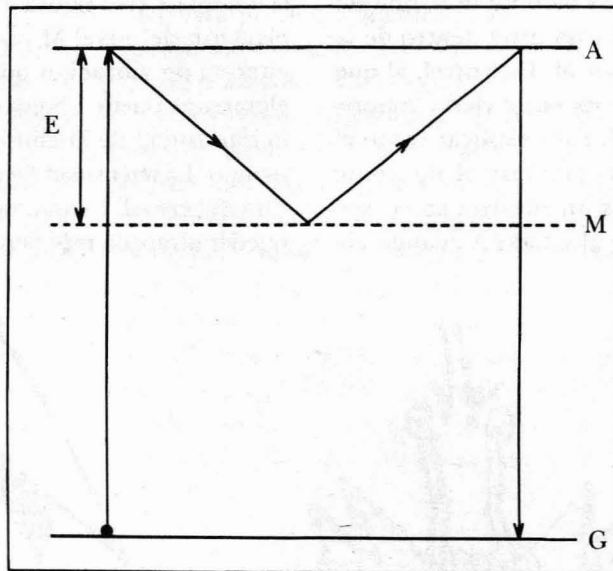


Figura 4  
Representación esquemática de un centro con un nivel metaestable M

están entre la más alta de la banda de valencia y la más pequeña de la banda de conducción). Sin embargo, si el cristal en cuestión contiene impurezas de otro material, éstas pueden introducir niveles discretos en la banda prohibida. La sal común, cloruro de sodio, se encuentra en la naturaleza en forma cristalina. Cuando se agregan átomos de talio al cloruro de sodio y se funden juntos y luego se dejan enfriar adecuadamente para que la mezcla quede cristalina (no amorfa), las impurezas de talio introducen niveles discretos en la banda prohibida del cloruro de sodio. En la figura 4 vemos un esquema en el que se muestra el nivel más alto de la banda llena (la última) o banda de valencia, denotado por G, el nivel más bajo de la banda de conducción, denotado por A y un nivel dentro de la banda prohibida denotado por M. Este nivel, al que llamaremos metaestable, corresponde a cierta impureza que se introdujo al cristal. Para explicar cómo el cristal atrapa la luz podemos emplear el siguiente ejemplo: supongamos que hay un electrón en el estado G, el cual se excita y pasa al estado A cuando ab-

sorbe un fotón de energía igual al ancho de la banda prohibida (ver figura 4). No basta que la energía del fotón sea exactamente igual al ancho de la banda prohibida; hay ciertas reglas que da la mecánica cuántica las cuales especifican bajo qué condiciones son posibles esas transiciones. En este modelo se supone que el electrón no puede ir de G a M (transición prohibida). Una vez que el electrón llegó al nivel A puede regresar al nivel G con la emisión de un fotón, o puede caer en el nivel M. También se parte del hecho de que la transición de M a G está prohibida, por lo que es necesario que los electrones viajen del nivel M al A antes de desexcitarse y llegar a G. Se supone que la energía E (ver figura 4) no es muy grande y que un electrón del nivel M puede saltar al A con la pura energía de vibración que posee el cristal. Con esos elementos puede obtenerse una fórmula que predice la intensidad de la emisión de luz como función del tiempo. La intensidad dependerá de E y de la temperatura del cristal. Cuanto más grande sea E, la luz puede quedar atrapada más tiempo. ■

