

ARQUITECTURA DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Autor: ELIEZER BRAUN

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)



- [I. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ](#)
- [II. DIFRACCIÓN](#)
- [III. INTERFERENCIA](#)
- [IV. REJILLAS DE DIFRACCIÓN](#)
- [V. CRISTALES](#)
- [VI. ¿QUÉ RAYOS SON LOS RAYOS X?](#)
[¿POR QUÉ USAR LOS RAYOS X?](#)
- [VII. REGRESANDO A LOS CRISTALES Y OTRAS COSAS MÁS](#)
- [VIII. NEUTRONES. ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES](#)
- [IX. COMPARACIÓN ENTRE RAYOS X Y NEUTRONES](#)
- [X. FUENTES DE NEUTRONES](#)
- [XI. ESPECTROMETRÍA DE NEUTRONES](#)
- [XII. ¿QUÉ OTRA INFORMACIÓN SE PUEDE OBTENER?](#)
- [XIII. APLICACIÓN A LÍQUIDOS](#)
- [XIV. COMENTARIOS FINALES](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaime

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora :

María del Carmen Farías



la

ciencia/26

para todos

Primera edición (La Ciencia desde México), 1987

Segunda reimpresión, 1995

Segunda edición (La Ciencia para Todos), 1997

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1987 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, SA. DE C. V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

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

ISBN 968-16-5258-4

Impreso en México



INTRODUCCIÓN

En nuestra vida cotidiana posiblemente hayamos tenido oportunidad de encontrarnos con noticias periodísticas y de televisión en las que se habla acerca de productos de alta tecnología moderna como, por ejemplo, los transistores, y en épocas más recientes, los "chips", módulos electrónicos completamente integrados que se utilizan como componentes básicos de las computadoras y de otros aparatos electrónicos. Hemos oído hablar de que dichos objetos están hechos de germanio o silicio, que se afirma son sustancias cristalinas que tienen determinadas propiedades. A veces se mencionan características microscópicas de estas sustancias; por ejemplo, se suele decir que los átomos de la sustancia están colocados de cierta manera. Ante todo esto, nos podemos preguntar: ¿cómo se sabe que tienen las características que se mencionan si nos es imposible verlas con nuestros ojos o aun con potentes microscopios, ya que se trata de partículas de dimensiones microscópicas?

Efectivamente, con nuestros ojos no podemos ver a los átomos o moléculas que componen una sustancia y por lo tanto no es posible ver cómo se encuentran dispuestos. Sin embargo, en el transcurso del desarrollo científico de la humanidad se han aplicado con inteligencia e ingenio los conocimientos y principios de la física para poder inferir las características microscópicas de los cuerpos. Esto ha resultado ser un verdadero trabajo detectivesco.

El propósito de este libro es relatar la interesante aventura de determinar la estructura microscópica de varios tipos de sustancias. Entre éstas destacan los cristales. Para ello será necesario entender, antes que nada, algunos fenómenos físicos en los que se basan los métodos usados.

En primer lugar, se reseñarán algunas características de la luz, y más generalmente, las ondas electromagnéticas como los rayos X. Se describirá la manera en que se usan para los propósitos de determinación de estructuras microscópicas. Asimismo, se explicará el motivo de la utilización de los rayos X.

Además de radiaciones electromagnéticas también se han usado haces de neutrones. Hablaremos sobre las propiedades de estas partículas y la forma en que nos pueden dar información acerca de fenómenos microscópicos que ocurren en el interior de la materia.

Se podrá preguntar el lector sobre la necesidad de utilizar técnicas físicas tan refinadas y en ocasiones muy costosas, cuando ya existen procedimientos desarrollados en la química. La respuesta es que, en general, por medios químicos no ha sido posible encontrar las estructuras microscópicas de las sustancias. Además, algunas de las técnicas químicas son tales que las muestras que se desea analizar se destruyen en el proceso. Una gran ventaja de la utilización de la difracción tanto de rayos X como de neutrones es que los análisis que se hacen no son destructivos y las muestras no sufren ningún deterioro.

Entre las sustancias cuya estructura se ha podido determinar están los cristales, que siempre han atraído poderosamente nuestra atención. Además, se han podido encontrar diferentes características de los movimientos que realizan las partículas microscópicas en el cristal.

Las técnicas desarrolladas para los cristales se han aplicado asimismo a sustancias líquidas y sorprendentemente han tenido buen éxito. También han sido foco de atención otro tipo de sustancias sólidas que no son cristalinas, sino amorfas, como los vidrios

En el transcurso de nuestra narración se presentan breves resúmenes históricos de la evolución de algunos campos de la física que son de relevancia para los propósitos que perseguimos.

Hemos intentado presentar una descripción coherente de manera que el lector pueda seguir el hilo de los razonamientos lógicos que han utilizado los científicos para llegar a sus conclusiones. Esperamos que el

lector saque provecho de esta lectura. ¡Empezamos!

Indice



I. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ

CUANDO soltamos una piedra en un estanque de agua quieta, observamos que ésta empieza a moverse. Nos damos cuenta de que partes del agua que no fueron tocadas por la piedra también empiezan a moverse después de cierto tiempo: la perturbación que nosotros creamos con la piedra se propagó a otras porciones del agua que no estuvieron en contacto con la piedra. A esta propagación de una perturbación se le llama *onda*.

Otro ejemplo de generación de una onda es cuando movemos una cuerda estirada. Si inicialmente la cuerda estaba en posición horizontal, al mover verticalmente su extremo la perturbación así creada se propaga a otras porciones de la cuerda que no fueron tocadas por la mano. Es decir, en la cuerda se genera una onda. La cuerda se mueve de arriba hacia abajo adquiriendo una forma como la mostrada en la figura 1. En determinado instante, un punto como el A se ha separado de la posición de equilibrio B que originalmente tenía. Este punto sube y baja. Al realizar este movimiento, el punto llega a separarse una distancia máxima de su posición de equilibrio. Así, por ejemplo, el punto C ha llegado a su distancia máxima. La separación máxima CF que adquiere cada punto se llama *amplitud de onda*.

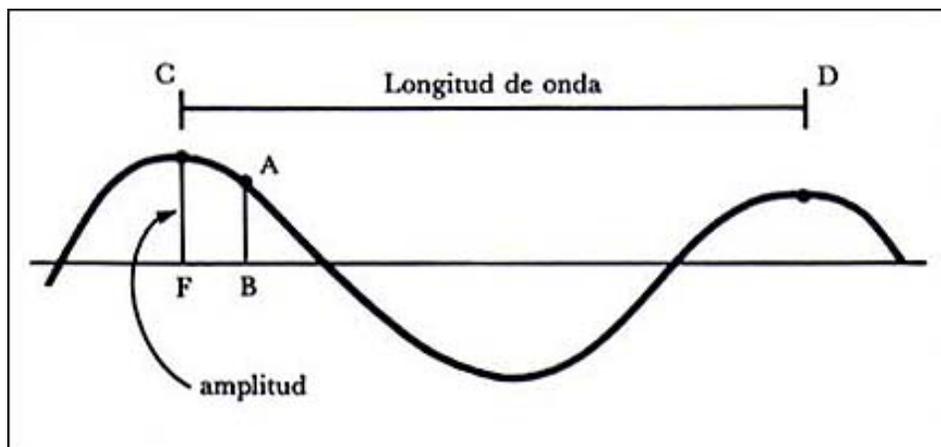


Figura 1. *Algunas características de las ondas.*

Sean D, E,... otros puntos que han llegado a su distancia máxima al mismo tiempo que C. La distancia entre dos máximos sucesivos, como el C y D, se llama *longitud de onda*.

En la naturaleza existen muchos fenómenos que tienen características ondulatorias. Uno de ellos es la luz.

En el estudio e investigación de la estructura microscópica de la materia se han utilizado técnicas que se basan en algunas propiedades que tiene la luz. La característica ondulatoria de la luz es la que será de interés para nosotros. Por este motivo haremos una breve reseña sobre el desarrollo histórico de algunos conceptos que la humanidad tiene en la actualidad acerca de la luz.

Desde la antigüedad los hombres se preguntaron que es la luz. Esta cuestión dio lugar, en el transcurso del tiempo, a una serie de problemas muy sutiles.

Galileo Galilei (1564-1642) ya se había dado cuenta de que la luz se propaga en línea recta y, además, que si su velocidad era finita ésta debería ser muy grande. En 1675 el danés Olaf Roemer, observando eclipses de las lunas del planeta Júpiter, hizo la primera medición de la velocidad de la luz, y encontró que efectivamente tenía un valor muy grande (alrededor de 300 000 km/s). En esa época también se conocían otros fenómenos que experimentaba la luz: la reflexión y la refracción.

La *reflexión* ocurre cuando un rayo de luz llega a una superficie que está pulida y se regresa. Un ejemplo bien conocido de reflexión ocurre en los espejos. Si un rayo de luz llega a una superficie formando

determinado ángulo entonces el rayo reflejado sale formando el mismo ángulo con la superficie. Este resultado se llama "ley de la reflexión".

Un rayo de luz experimenta refracción al pasar de un medio a otro. Por ejemplo, al llegar un rayo de luz en el aire y encontrar una superficie de agua, una parte de la luz se transmite en el agua y otra parte se refleja. Sin embargo, el rayo dentro del agua cambia la dirección de su propagación. Este fenómeno constituye la *refracción*. Supongamos que un rayo de luz llega a la superficie que separa a los dos medios formando determinado ángulo. Al transmitirse al otro medio el rayo se propaga formando *otro* ángulo, que en general es distinto al primero.. La relación entre estos dos ángulos depende de las características de las dos sustancias en que se propagan los rayos. La ley de Snell explica el comportamiento del rayo transmitido, en términos del rayo incidente y de propiedades de los medios.

En el siglo XVII los principales fenómenos conocidos de la luz eran la reflexión y la refracción. El célebre físico inglés Isaac Newton (1642-1727) propuso un modelo para explicar el comportamiento de la luz. Supuso que la luz estaba compuesta de corpúsculos minúsculos que se movían con cierta velocidad. Así pudo explicar la reflexión, simplemente como un rebote de las pequeñísimas partículas al chocar con una superficie que separa a dos medios. Además, usando la hipótesis corpuscular de la luz, pudo dar argumentos que explicaban por qué la luz cambia su dirección, haciendo ver que al pasar los corpúsculos de un medio a otro cambian su velocidad.

Una propiedad muy importante de la luz es el *color*. Newton encontró que la luz blanca estaba compuesta de varios colores. Hizo un sencillo experimento donde la luz blanca, por ejemplo del Sol, se hacía pasar a través de un prisma. Se dio cuenta de que la luz que emergía del otro lado del prisma estaba compuesta de rayos que tenían los colores del arco iris, es decir, todos los colores visibles. Así encontró que cada color se refracta en el prisma de manera distinta a la impresión que produce otro color.

Otro fenómeno que estudió Newton fue el siguiente: cuando un haz de luz blanca incide sobre una burbuja de jabón, resulta que se forman regiones oscuras intercaladas con regiones iluminadas. Esto mismo ocurre cuando un haz incide sobre un vidrio esférico que se coloca sobre una placa plana de vidrio dejando una capa de aire muy delgada entre ellos. Se forma un patrón de luz en el que se suceden zonas oscuras con zonas iluminadas. Newton hizo mediciones muy precisas en las que relacionó los anchos de las regiones tanto iluminadas como oscuras con la curvatura del vidrio. Encontró que para cada color se tenía una región iluminada con un ancho distinto. Entonces Newton llegó a la conclusión de que, hablando en terminología moderna, había algo periódico en el comportamiento de la luz.

Hubo otro fenómeno luminoso que Newton llegó a conocer, la llamada *difracción* de la luz, descubierta en 1665 por el italiano F.M. Grimaldi. Este hizo una pequeñísima perforación en la persiana de su ventana, que daba al Sol. En la trayectoria de la luz que pasó colocó un pequeño objeto y observó la sombra que proyectaba. Encontró que el extremo de la sombra no era nítido sino difuso, y que además se formaban bandas de color en las que regiones iluminadas se alternaban con regiones oscuras. De otras observaciones que hizo Grimaldi llegó a la conclusión de que la luz "se voltea" alrededor de los bordes de obstáculos opacos iluminados por una fuente muy pequeña de luz. En el capítulo II hablaremos más extensamente acerca de este fenómeno.

La difracción fue otro fenómeno que reforzó la idea que había tenido Newton de que existía algo periódico en el comportamiento de la luz. Sin embargo, estas periodicidades no lo disuadieron de la opinión de que la luz estaba compuesta por corpúsculos, pues creyó que las periodicidades eran efectos secundarios causados por los distintos medios con los que la luz entraba en contacto, más que una propiedad intrínseca de la luz.

El inmenso prestigio que gozó Newton hizo que el modelo corpuscular de la luz fuera el aceptado por los científicos de todo el siglo XVIII.

A principios del siglo XIX el físico inglés Thomas Young (1773-1829) inició un trabajo de análisis y experimentación muy amplio con rayos de luz. Llegó a la conclusión de que todos los fenómenos

conocidos se podían explicar suponiendo que la luz estaba formada de ondas. Pudo demostrar que los anillos de Newton se formaban por la interferencia de ondas. Así, explicó que la banda oscura se debía a que en ese lugar dos ondas se componían destructivamente: una onda tenía un signo y otra tenía el signo inverso (véase el capítulo III) mientras que en otro lugar ocurría que las ondas tenían los mismos signos, o sea se componían constructivamente y daban lugar a una zona muy iluminada. Comprobó sus ideas haciendo diversos experimentos. Uno de los más notables fue el de la interferencia con dos rendijas, que se describirá en el capítulo III. Por el momento nos bastará decir que Young pudo explicar el resultado de este fenómeno suponiendo que la luz tenía naturaleza ondulatoria. Si la luz estuviese compuesta de corpúsculos, no daría lugar a este fenómeno de interferencia.

Sin embargo, Young no pudo explicar satisfactoriamente el fenómeno de difracción con base en la hipótesis ondulatoria.

Las ideas de Young fueron atacadas muy fuertemente e ignoradas durante más de una década. En Francia las retomó Augustin Fresnel (1788-1827), quien mejoró la concepción ondulatoria de la luz y pudo explicar el fenómeno de difracción.

En ese país se generó una controversia muy viva sobre esta hipótesis. El famoso científico S. D. Poisson, con su extraordinario dominio de las matemáticas, hizo diversos cálculos basados en la teoría ondulatoria y concluyó que la teoría de Fresnel tenía una consecuencia que le pareció absurda. Poisson calculó que, en ciertas circunstancias bien determinadas, una consecuencia de la teoría ondulatoria era que en el centro de la sombra de un disco opaco circular debía haber ¡una zona iluminada! Esto no era posible, ya que iba contra el sentido común. Preocupado, Fresnel realizó un experimento en las mismas condiciones de los cálculos de Poisson y observó que ¡en el centro de la sombra se formaba efectivamente una región iluminada! Vemos que el sentido común deja mucho que desear...

Este experimento causó sensación y dio como resultado que los principales científicos aceptaran la hipótesis ondulatoria de la luz. Posteriormente, se encontró otro tipo de fenómenos, como la *polarización*, y la *dispersión*, que solamente se pudieron explicar con base en esta hipótesis. Hacia los años de 1830 la hipótesis de Newton sobre la naturaleza corpuscular de la luz ya había sido prácticamente abandonada en favor de la ondulatoria.

A pesar de que se había logrado desarrollar una teoría ondulatoria para la luz, todavía quedaba una incógnita muy importante sin resolver, quizá la más fundamental: en las ondas de luz ¿qué era lo que ondulaba? O más precisamente, ¿la perturbación de qué cosa era lo que se propagaba? Recuérdese que una onda es la propagación de una perturbación. Durante un buen número de años no hubo respuesta a esta cuestión.

Fue mucho tiempo después, en el año de 1873, cuando el gran físico británico James Clerk Maxwell publicó sus investigaciones sobre electricidad y magnetismo, en donde presentó una gran síntesis de resultados experimentales obtenidos con anterioridad por científicos como H. C. Oersted, A. M. Ampere, M. Faraday, etc. Con base en su trabajo, Maxwell predijo que en la naturaleza deberían existir ondas electromagnéticas. Estas ondas son la propagación simultánea de perturbaciones eléctricas y magnéticas. Además, hizo ver que la luz es una onda electromagnética, es decir, descubrió que la luz tenía un origen electromagnético. La respuesta a la cuestión sobre qué es lo que ondula en la luz es, entonces: las perturbaciones eléctricas y magnéticas.

Años más tarde, en 1886, cuando Maxwell ya había muerto, Heinrich Hertz demostró en un laboratorio la existencia real de las ondas electromagnéticas, confirmando brillantemente la teoría electromagnética de la luz. Son justamente estas ondas las que se utilizan, por ejemplo, para las transmisiones de radio y televisión.

Una característica de las ondas es su longitud de onda. Resulta que, dentro de cierto intervalo de longitudes de onda, el ojo humano es sensible a las ondas electromagnéticas y las registra como luz visible. Fuera de este intervalo, el ojo humano no registra las ondas, y éstas nos parecen invisibles. Las

ondas ultravioleta e infrarrojas, por ejemplo, son ondas electromagnéticas que no vemos. En el cuadro 1 se dan los intervalos de la longitud de onda de algunas ondas electromagnéticas. Estos intervalos son aproximados, ya que no hay una separación muy tajante entre ellos.

CUADRO 1

| longitud de onda (en mm)* | nombre que recibe la onda |
|---|----------------------------------|
| menores que 10^{-9} | rayos gamma |
| entre 10^{-9} y 10^{-5} | rayos X |
| entre 10^{-5} y 3.5×10^{-4} | ondas ultravioletas |
| entre 3.5×10^{-4} y 7.5×10^{-4} | luz visible |
| entre 7.5×10^{-4} y 10^{-1} | ondas infrarrojas |
| entre 10^{-1} y 10 | microondas |
| entre 10 y 10^3 | ondas de radio (FM) |
| entre 10^3 y 10^5 | ondas de radio (onda corta) |
| entre 10^5 y 10^7 | ondas de radio (AM) |
| entre 10^7 y 10^9 | otras ondas de radio |

* La notación exponencial usada significa, por ejemplo: $10^2=100$, $10^3=1\ 000$, etc. Además, $10^{-1} = 0.1$, $10^{-2} = 0.01$, etc.

Cuando encendemos un foco nuestros ojos perciben una sensación que llamamos luz. Este fenómeno es de naturaleza ondulatoria. Es decir, el foco produce ondas que al llegar a la retina nos dan la sensación de luz. Ahora bien, resulta que también somos sensibles a la longitud de onda de la luz que nos llega. En efecto, distinguimos diferentes colores. Cada color tiene su longitud de onda característica. Resulta que para la luz visible estas longitudes de onda son extremadamente pequeñas. Por ejemplo, la luz amarilla tiene una longitud de onda de **0.00057 mm** ($=5.7 \times 10^{-4}$ mm), es decir 5.7 diezmilésimas de milímetro. En el cuadro II se muestran los valores de las longitudes de onda de varios colores. Hacemos la aclaración de que estos valores solamente tienen un significado aproximado, ya que un color descrito genéricamente como "rojo" o "verde" corresponde a un amplio intervalo de longitudes de onda en la vecindad de los valores dados, puesto que existen muchas tonalidades de rojo o de verde. Recuérdese que hay verdes que van desde el verde claro hasta el verde "bandera". A cada tonalidad le corresponde una longitud de onda determinada.

CUADRO II

| color | longitud de onda (en mm) |
|--------------|---------------------------------|
| rojo | 0.00065 |
| amarillo | 0.00057 |
| verde | 0.00052 |
| azul | 0.00045 |
| violeta | 0.00040 |

Nótese que todo el intervalo de longitudes de onda que se da en el cuadro II es el que queda comprendido en el renglón de luz visible del cuadro 1. En efecto, por ejemplo el extremo del cuadro II que corresponde a la luz violeta tiene longitud de onda igual a $0.00040 \text{ mm} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$, valor que está entre $3.5 \times 10^{-4} \text{ mm}$ y $7.5 \times 10^{-4} \text{ mm}$.

Como se mencionó arriba, a mediados del siglo pasado James Clerk Maxwell desarrolló la teoría electromagnética demostrando que lo que percibimos como luz es en realidad una onda electromagnética. Lo importante para nuestros propósitos es que Maxwell predijo que podían existir ondas electromagnéticas no sólo con las longitudes de onda de la luz visible, dadas en el cuadro II, sino también ondas con longitudes más chicas y más grandes que las mencionadas, que son invisibles para el ojo humano. Así, las ondas que tienen longitud de onda de cientos de metros son ondas de radio que se utilizan para transmisiones de radio y de televisión, mientras que ondas de longitud de onda de millonésimos de milímetro corresponden a los llamados rayos X (véase el capítulo VI).

Por tanto, existe toda una gama de ondas electromagnéticas que corresponde a todos los posibles valores de longitudes de onda. De esta gran variedad el ojo humano solamente percibe como luz visible a las ondas que están en un intervalo relativamente pequeño de valores de la longitud de onda.

Por otro lado, sabemos que pueden existir dos ondas de luz del mismo color pero de diferentes intensidades. La onda de mayor intensidad tiene una mayor amplitud. Además, la intensidad de la onda está relacionada con la energía que tiene. Mientras mayor sea la intensidad de una onda mayor será su energía.

La amplitud de onda y la longitud de onda son dos cantidades independientes.

Hemos de mencionar que en lo arriba expuesto no se han considerado otros aspectos de la naturaleza de la luz. No hablaremos acerca de ellos ya que no son relevantes para nuestros propósitos. El lector interesado puede consultar otras fuentes. ¹ En los capítulos II, III y IV explicaremos con mayor amplitud los fenómenos de difracción y de interferencia de luz, que nos serán de suma utilidad.

NOTAS

¹ Por ejemplo, E. Braun, *Una faceta desconocida de Einstein*, México, Fondo de cultura Económica, 1987.



II. DIFRACCIÓN

UNA experiencia muy común para nosotros es que la luz se propaga en línea recta. Si enviamos el haz de luz de una linterna sobre una pantalla, la región iluminada que se forma resulta de la propagación en línea recta de cada uno de los rayos del haz.

Otro ejemplo lo tenemos cuando se ilumina una rendija con un haz de luz (Figura 2).

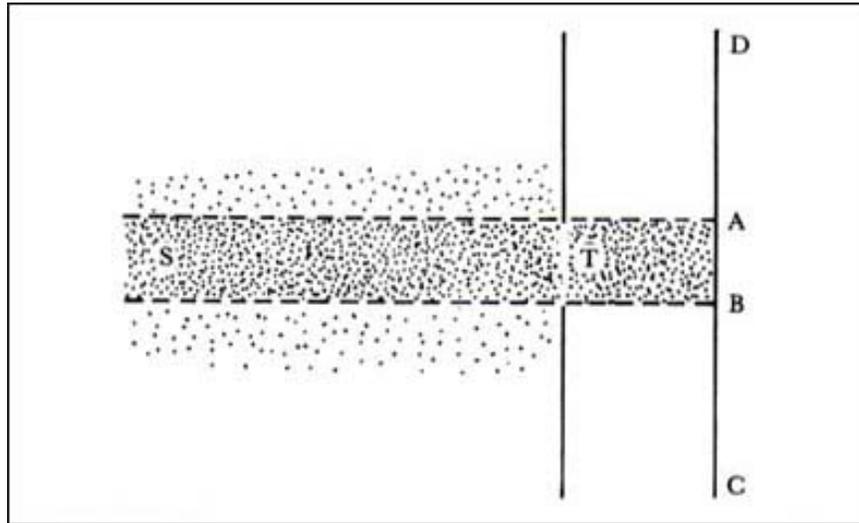


Figura 2. Si la luz se propaga en línea recta, sobre la pantalla CD la región AB queda iluminada.

Sobre la pantalla CD se forma una región iluminada AB, que resulta de la propagación rectilínea de los rayos del haz ST. Se forman así dos regiones de sombra: la BC y la AD.

A pesar de que estamos muy acostumbrados a lo anterior, la realidad es un poco distinta. En efecto, si en el caso de la figura 2 observamos con detenimiento la frontera entre la región de sombra y la región iluminada, por ejemplo en A, nos daremos cuenta de que no hay una separación bien definida entre las dos regiones; lo que se muestra en la figura 3. En esta figura, la flecha marca el lugar en que se encuentran la frontera A entre la región de sombra y la iluminada. Nótese que dentro de las regiones de sombra se forman regiones alteradas de zonas iluminadas y oscuras, que se van desvaneciendo gradualmente hasta que se entra francamente en la región de sombra.

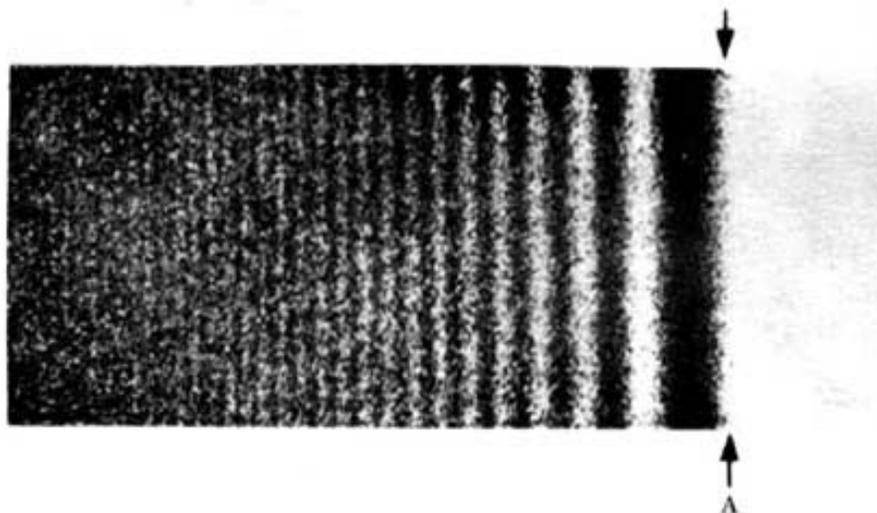


Figura 3. La sombra que forma un borde no es completamente definida.

La descripción hecha en el párrafo anterior nos indica que en realidad la luz no se propaga rigurosamente en línea recta, sino que al pasar por cada uno de los extremos H y K de la rendija (Figura 4), en lugar de propagarse a lo largo de las líneas rectas HB y KA, la luz se "dobla" y llega a regiones BG y AF que deberían estar en la sombra.

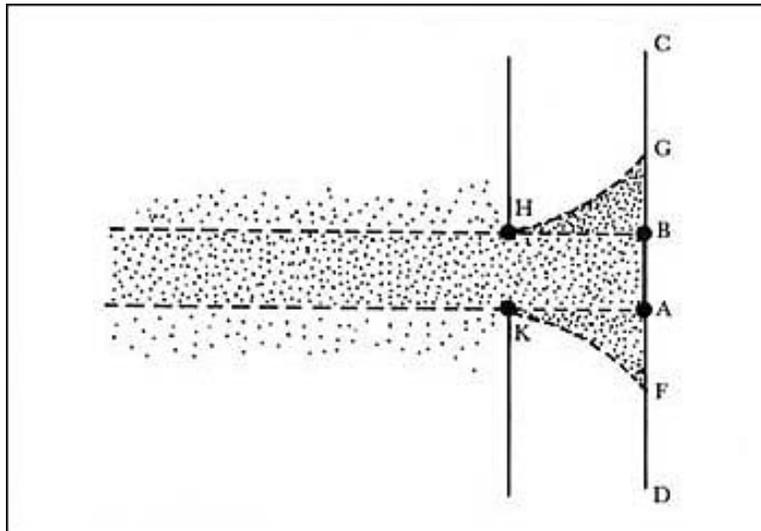


Figura 4. La luz no se propaga en línea recta al pasar por el extremo de una rendija, sino que se "dobla", es decir se difracta.

A este fenómeno en que la luz se "dobla" al pasar por el extremo de una superficie y no sigue su propagación en línea recta se le llama *difracción*.

Si empezamos a cerrar los ojos frente a una fuente de luz intensa, cuando la abertura entre los párpados llegue a ser muy pequeña percibiremos una sucesión de rayas iluminadas, separadas entre sí por medio de zonas oscuras. La amplitud que alcanza esta sucesión de rayas es mucho mayor que el tamaño de la abertura entre nuestros párpados. Estas rayas se deben a que la luz que llega a nuestros ojos se difracta.

El alcance de las zonas iluminadas GB y AF (Figura 4) que no llegan a quedar completamente en la sombra depende de varios factores. Estos son: la longitud HK de la rendija, la distancia RS entre la rendija y la pantalla CD, así como de la longitud de la onda con que se ilumina. Si el tamaño HK de la rendija es muy grande comparado con la longitud de onda de la luz, entonces las regiones GB y AF son muy pequeñas y casi no se notan. En este caso, se puede considerar que la luz sí se propaga en línea recta. Este es el caso con el que estamos más familiarizados, ya que las rendijas que encontramos cotidianamente tienen longitudes de centímetros y la luz que vemos tiene longitudes de onda del orden de diezmilésimas de milímetro.

Por otro lado, si el tamaño de la rendija es comparable al de la longitud de onda de la luz, entonces el efecto es bastante apreciable. En este caso las regiones de difracción GB y AF se extienden muy ampliamente.

En la figura 5 se muestran los patrones de difracción de dos rendijas iluminadas con la misma fuente de luz. El patrón de la figura 5(a) corresponde a una rendija que es dos veces más ancha que la rendija que produce el patrón de la figura 5(b). En las figuras notamos que mientras más angosta sea la rendija, más se extenderá el patrón de difracción que se forma.

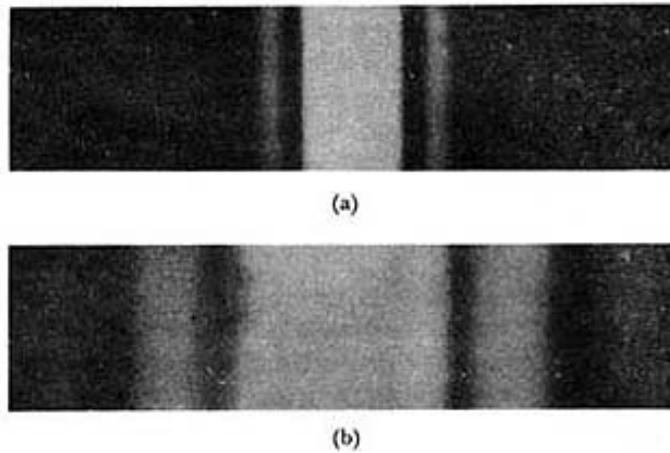


Figura 5. *Patrones de difracción que forman dos rendijas, una el doble de ancho que la otra. La más ancha forma el patrón (a), mientras que la más angosta da lugar al patrón (b).*

En general, se puede decir que cuando la longitud de onda de la luz utilizada es del mismo orden que las longitudes de las rendijas, entonces ocurren fenómenos de difracción.

Los fenómenos descritos hasta este momento ocurren cuando la rendija que se usa tiene una forma rectangular muy delgada. Sin embargo, también se pueden utilizar rendijas de otras formas. Así, si se usa una rendija cuadrada, entonces el patrón de difracción que se forma en la pantalla es como el mostrado en la figura 6. Por supuesto que la longitud de onda de la luz es del orden de la longitud de los lados del cuadrado formado por la rendija. Otro ejemplo es el mostrado en la figura 7, para el caso de una rendija circular.

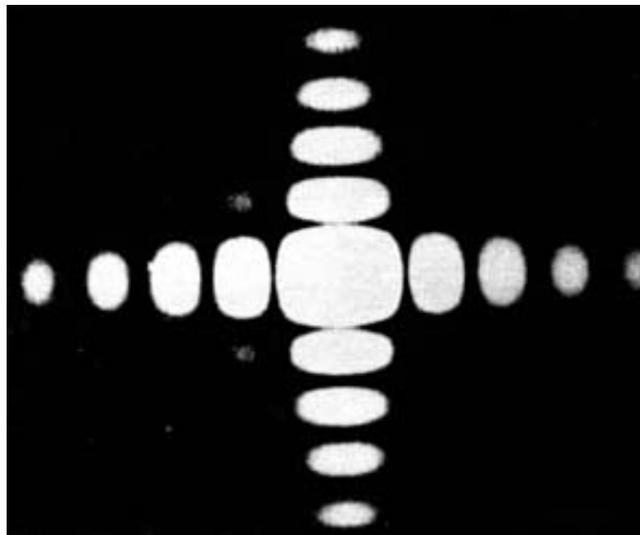


Figura 6. *Patrón de difracción que forma una rendija cuadrada. Nótese las zonas iluminadas en lo que sería la región de la sombra geométrica, que es la región que está fuera del cuadrado central.*



Figura 7. Patrón de difracción que forma una rendija circular. La región de sombra geométrica que es la que está fuera del círculo central, contiene zonas iluminadas.

Se ha encontrado también el patrón de difracción causado por una rendija rectangular. Si se compara este patrón con el formado por una rendija cuadrada resulta que en la dirección en que la rendija se hace más delgada, el patrón se esparce más.

También se ha obtenido, por supuesto, el patrón que forma una rendija elíptica. Comparándolo con el patrón que forma una rendija circular resulta que se extiende en aquella dirección en la cual la rendija se contrae.

En cualquiera de los casos tratados, las características del patrón de difracción que se forma, es decir, la separación entre las zonas iluminadas y las de sombra, así como su alcance, dependen de las dimensiones de la rendija, de la separación entre la rendija y la pantalla y, de la longitud de onda de la luz usada.



III. INTERFERENCIA

EN ALGUNA ocasión hemos visto pompas de jabón. Si las observamos con detenimiento nos damos cuenta de que muestran diversos colores.

Otra experiencia que seguramente el lector ha tenido es la de ver en la calle, después de que ha llovido, el agua que cayó sobre aceite. Uno observa que el charco de agua tiene diversos colores.

Estos fenómenos son dos ejemplos de *interferencia* de luz, fenómeno que ocurre cuando dos haces de luz llegan a la misma región del espacio. Veamos con detenimiento este fenómeno.

Supóngase que dos ondas como las mostradas en las figuras 8(a) y 8(b) llegan a una región del espacio. El efecto neto que producen estas ondas en cada punto es la combinación de ambas. Esta última afirmación significa lo siguiente: consideremos el punto P, en el cual la onda a tiene una amplitud representada por AB, mientras que la onda b tiene una amplitud dada por CD; notamos que ambas amplitudes tienen el mismo sentido, es decir, hacia arriba; por tanto, la amplitud neta en el punto P es la suma de las amplitudes AB más CD, que da la amplitud AD mostrada en la figura 8(c). Siguiendo este procedimiento para cada punto, encontramos que la onda resultante de la combinación de las ondas a y b es la onda c mostrada en la figura 8. Se dice que la interferencia de las ondas a y b da lugar a la onda c.

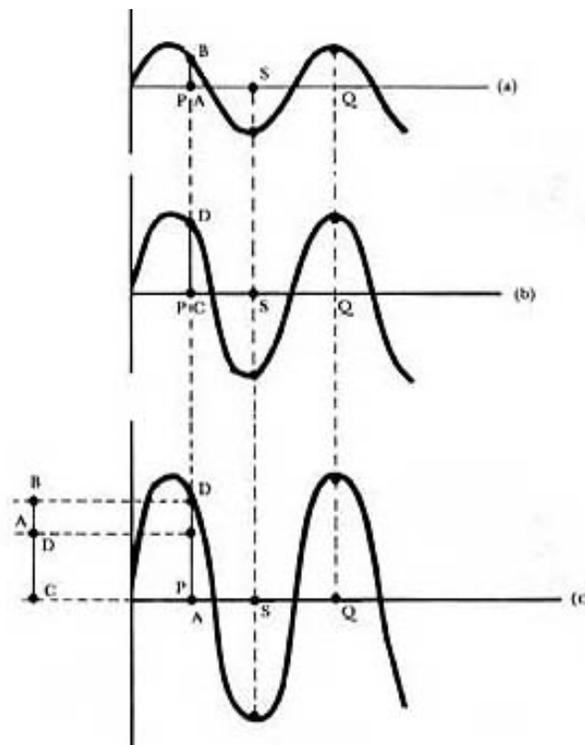


Figura 8. Dos ondas en fase, (a) y (b), interfieren constructivamente dando como resultado la onda (c).

En el caso particular que estamos tratando, nos damos cuenta de que las ondas que interfieren son tales que cuando una de ellas tiene un máximo, la otra también lo tiene (punto Q de la figura 8); mientras que cuando una de ellas adquiere un mínimo, la otra también lo adquiere (punto S de la figura 8). Se dice que las ondas que interfieren están en fase. Vemos que la onda resultante (c) tiene una amplitud igual a la suma de las amplitudes de cada una de las ondas que interfieren. Las ondas, por decirlo así, se refuerzan una a la otra. Este caso se llama *interferencia constructiva*.

Puede darse también otra situación en que las ondas que interfieren sean tales que cuando en un punto determinado una de ellas tenga una amplitud en un sentido, la otra tenga una amplitud en el otro sentido,

como se muestra en la figura 9. Se dice que estas ondas están fuera de fase. Consideremos el punto P, en el cual la onda a tiene amplitud AB y la onda b tiene amplitud CD. A diferencia del caso arriba tratado, ahora los sentidos de las ondas son opuestos; mientras una tiene amplitud hacia arriba, la otra tiene amplitud hacia abajo. Por lo tanto, la amplitud neta ahora es la diferencia entre AB y CD, que da el valor RL mostrado en la figura 9 (c). La onda resultante es la c. Notamos que en este caso la amplitud de la onda resultante es menor que la que tiene la onda de la figura 8(b). Por decirlo así, una onda cancela el efecto de la otra. Hay interferencia destructiva. Si ocurriese el caso en que las ondas que interfieren tuvieran justamente la misma amplitud, pero estuvieran absolutamente fuera de fase, entonces la cancelación sería completa; en este caso las cantidades AB y CD serían iguales, por lo que su diferencia RL sería cero. En consecuencia, el resultado neto es que ¡no hay onda! La interferencia es ahora completamente *destructiva*.

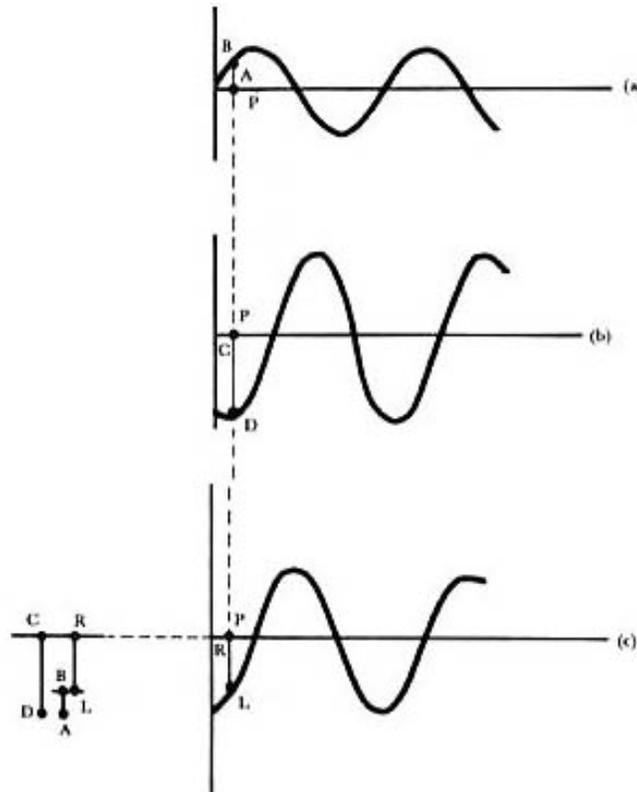


Figura 9. Dos ondas fuera de fase, (a) (b), interfieren destructivamente dando como resultado la onda (c).

Si las ondas que interfieren son tales que no están en fase ni completamente fuera de fase, la interferencia da lugar a una onda como la mostrada en la figura 9(c). No hay ni reforzamiento ni destrucción completos, se da una combinación intermedia entre los casos arriba descritos.

Los efectos de la interferencia tanto constructiva como destructiva se pueden observar con la luz en un experimento como el que se describe a continuación:

Consideremos una fuente de luz S (Figura 10) de un solo color. Esto significa que se tiene una onda de una sola longitud de onda bien determinada. Se hace incidir la luz que sale de la fuente sobre una pantalla FG que tiene dos rendijas A y B. Si no hubiese difracción de los haces de luz en cada una de las rendijas, entonces en la pantalla LK solamente quedarían iluminadas las zonas RS y TU. Sin embargo, si la longitud de onda de la luz incidente es del mismo orden que las dimensiones de las rendijas, entonces cada una de ellas difracta al haz que pasa por ellas y en un punto como el Q, que no está dentro de los haces BUT o ASR, llegan dos ondas, provenientes de cada una de las rendijas, y estas dos ondas interfieren. Así del otro lado de la pantalla FG existen dos ondas que interfieren.

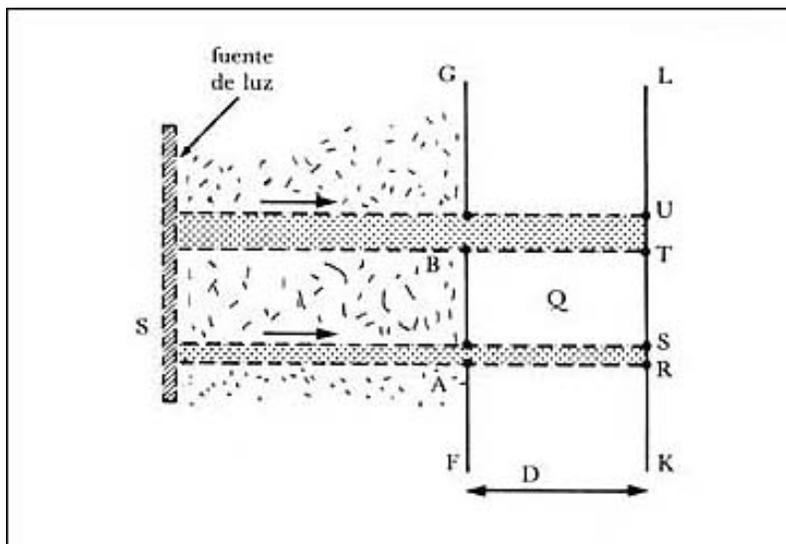


Figura 10. Si la luz se propagara en línea recta solamente quedarían iluminadas las zonas UT y SR.

Consideremos ahora lo que ocurre en la pantalla KL. En un punto de la pantalla como el O (Figura 11) las dos ondas llegan en fase, por lo que hay interferencia constructiva. En consecuencia, en el punto O debe verse luz intensa. En un punto como el P, las ondas llegan completamente fuera de fase, por lo que hay interferencia destructiva. Por lo tanto, en P no hay luz, es decir, debe estar oscuro. En otro punto como el Q, las ondas llegan en fase, por lo que debe haber luz intensa, etc. Esto significa que en la pantalla KL debemos ver bandas de luz intensa seguidas de bandas oscuras. Efectivamente esto es lo que ocurre. En la figura 12 se muestra lo que se observa en la pantalla KL. En este patrón de interferencia se aprecian bandas de luz intensa seguidas de bandas completamente oscuras.

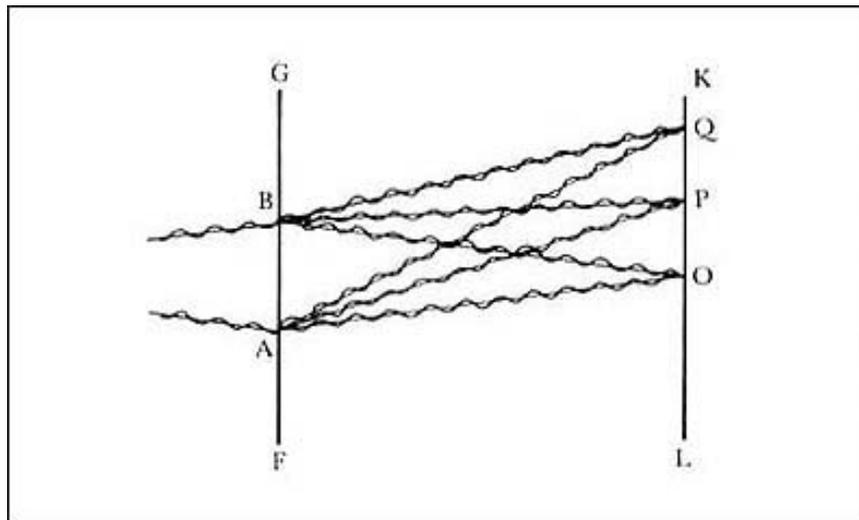


Figura 11. Al pasar las ondas por cada rendija se doblan, debido a la difracción, e interfieren. En el punto O las ondas llegan en fase; en el punto P llegan fuera de fase; en el punto Q llegan en fase, etcétera.

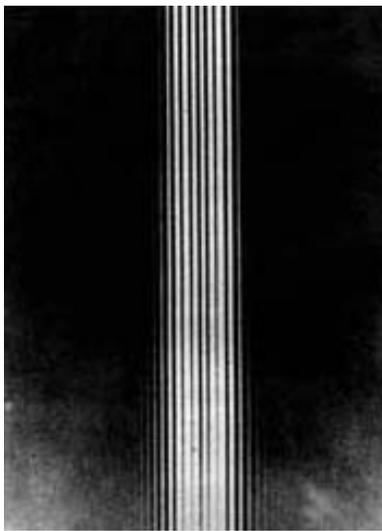


Figura 12. Patrón que se forma en la pantalla KL de la figura 11.

Regresando a los fenómenos mencionados al principio de este capítulo, solamente queremos mencionar que tanto en la pompa de jabón como en el charco con aceite la luz blanca que llega, por ejemplo, la del Sol, se separa en varios rayos y los así formados interfieren dando lugar a patrones de interferencia. Ahora bien, dado que el patrón de interferencia que se forme depende de la longitud de onda de la luz y en vista de que la luz blanca está compuesta de muchos colores, es decir, de muchas longitudes de onda, entonces cada color forma un patrón característico. Las posiciones de los máximos iluminados dependen de la longitud de onda; diferentes longitudes de onda resultan en diferentes posiciones de sus máximos. Lo que vemos entonces es la combinación de los patrones de interferencia para diferentes colores. Ya que el patrón de interferencia que se forme depende de la longitud de onda de la luz, al ocurrir este fenómeno la luz blanca se separa en sus componentes. Es por ello que en la pompa y el charco observamos diversos colores.

Volvamos al caso de la figura 12. Las posiciones en que se encuentran tanto los puntos iluminados como los oscuros dependen de varias cantidades: de la distancia AB entre las rendijas, de la distancia D entre las pantallas FG y KL y de la longitud de onda de la luz que se usa. En efecto, si se cambia la posición de la pantalla LK entonces los puntos en que las ondas están en fase ya no serán los mismos que cuando la distancia era D ; lo mismo pasa para aquellos puntos en que las ondas están fuera de fase. De manera similar, cuando se cambia la distancia AB entre las rendijas, la separación entre las ondas que interfieren cambia y por consiguiente, los puntos de interferencia tanto constructiva como destructiva cambian. Asimismo, al variar la longitud de onda de la luz incidente, también cambia visiblemente el patrón de interferencia que se forma.

La relación entre los factores de los que depende el patrón de interferencia puede usarse de diferentes maneras, como se describe a continuación.

Una posibilidad es dar el valor de la longitud de onda de luz incidente así como las características geométricas tanto de la rendija como la distancia entre las pantallas. Entonces es posible predecir el patrón de interferencia que se formará en la pantalla LK .

Otra posibilidad es dar las características geométricas del arreglo, es decir, la distancia entre las rendijas y la distancia D entre las pantallas y además dar el patrón de interferencia que se forma en LK . Dado este patrón, uno puede medir la distancia que hay entre el centro de una banda iluminada y el centro de una banda oscura. Con todos estos valores se puede inferir el valor de la longitud de onda de la luz incidente. Usado de esta manera, este arreglo se llama espectroscopio de interferencia. Este aparato sirve para encontrar los valores de las longitudes de onda de haces luminosos.

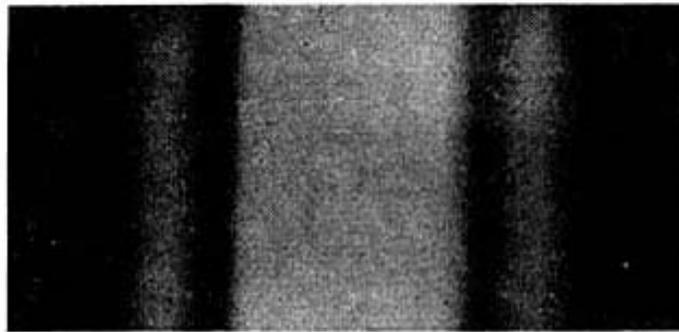
Finalmente, si se da el patrón de interferencia que se forma en la pantalla LK así como la longitud de onda de la luz incidente, se pueden inferir las características geométricas de arreglo. Es decir, es posible obtener

entonces, por ejemplo, el valor de la longitud de la separación entre las rendijas. Es esta última aplicación la que nos interesará más adelante.

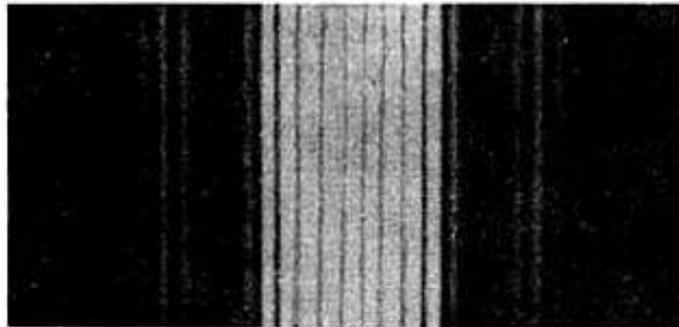


IV. REJILLAS DE DIFRACCIÓN

EN EL capítulo anterior hablamos del patrón de interferencia que forman dos rendijas al difractar la luz que pasa por ellas, al que se suele llamar patrón de difracción. Podríamos preguntarnos qué tipo de patrón de difracción se forma si en lugar de dos rendijas se tienen tres o más rendijas. Una rejilla de difracción es una pantalla con un número grande de rendijas de iguales tamaños y situadas a la misma distancia una de otra. En la figura 13 se muestran los patrones de difracción para rejillas que tienen 1, 2, 5 y 20 rendijas, cuando son iluminadas por un haz de luz que incide perpendicularmente sobre ellas. En este caso vemos que hay nuevamente zonas iluminadas alternando con zonas oscuras. Obsérvese que al aumentar el número de rendijas, la luz difractada se va concentrando en regiones cada vez más angostas. Para una rejilla con 20 rendijas el patrón se forma prácticamente de rayas muy marcadas, que tienen sensiblemente la misma intensidad. Por otro lado, para rejillas con pocas rendijas, las zonas iluminadas están más extendidas y tienen distintos tamaños, así como diferentes intensidades.



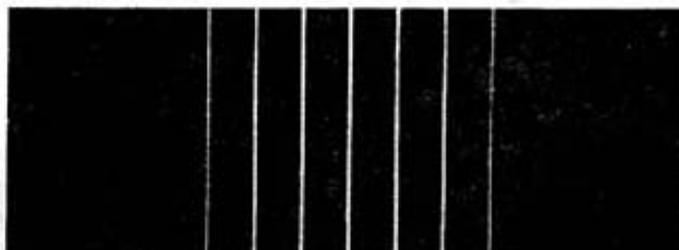
(a)



(b)



(c)



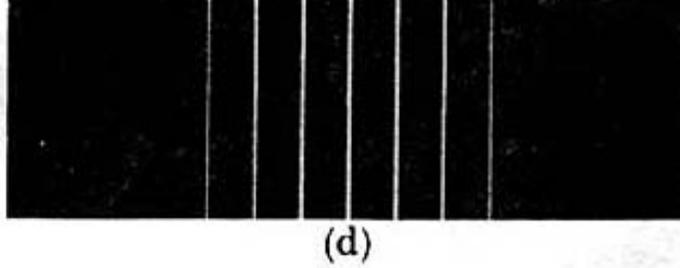


Figura 13. Patrones de difracción que forman rejillas con: (a) 1 rendija; (b) 2 rendijas; (c) 5 rendijas; (d) 20 rendijas. A medida que el número de rendijas aumenta, se van formando líneas cada vez más angostas.

Al igual que en los casos tratados en el capítulo anterior, las posiciones de las zonas iluminadas y oscuras que se forman por la rejilla de difracción dependen de la geometría del arreglo y de la longitud de onda de la luz incidente. Naturalmente, se ha supuesto que las dimensiones de las rendijas que forman la rejilla son del mismo orden que la longitud de onda de la luz.

Una aplicación muy importante de la rejilla de difracción ocurre en espectroscopía. Se utiliza la rejilla para la determinación de longitudes de onda de fuentes de luz desconocidas; por ejemplo, se usan rejillas con geometrías bien determinadas en el estudio de la luz que llega de las estrellas u otros cuerpos estelares. Midiendo con cuidado la distancia entre las zonas iluminadas y las oscuras que se producen, se encuentran los valores de las longitudes de onda de la luz que llega. De esta información se puede determinar qué sustancias emitieron la luz. Este es el método que se ha seguido para determinar la composición química del Sol, de los planetas y de diferentes estrellas.

El tipo de rejilla que hemos considerado hasta este momento está formado por un conjunto de rendijas dispuestas a lo largo de una línea recta. Por este motivo se le llama también rejilla de difracción en una dimensión. Otro dispositivo que se puede construir es la llamada rejilla de difracción en dos dimensiones. Esta consiste en un conjunto de aberturas colocadas regularmente en un plano (Figura 14(a)). El patrón de difracción que produce una rejilla de este tipo se muestra en la figura 14(b). Nótese que este patrón es también geoméricamente regular. De hecho, esta regularidad refleja la regularidad geométrica en que están dispuestas las rendijas de la misma rejilla.

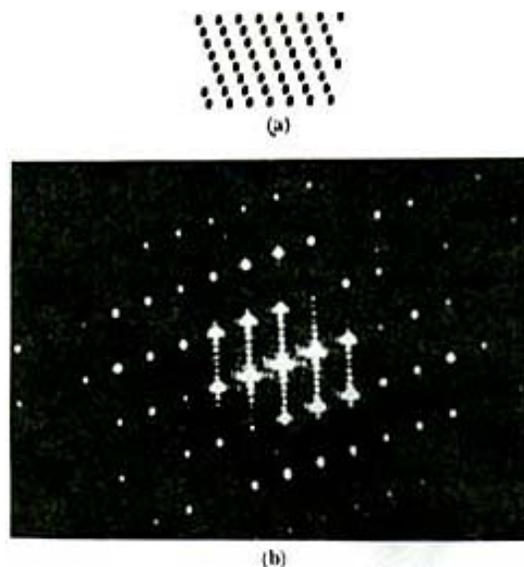


Figura 14. Una rendija en un plano formada por un conjunto de rendijas regularmente dispuestas (a) forma un patrón de difracción (b) que también es regular. La regularidad del patrón es un reflejo de la regularidad de la rejilla.

Si las rendijas de una rejilla en dos dimensiones no están dispuestas regularmente en el plano (Figura 15(a)), entonces el patrón de difracción que produce esta rejilla es también irregular (Figura 15(b)).

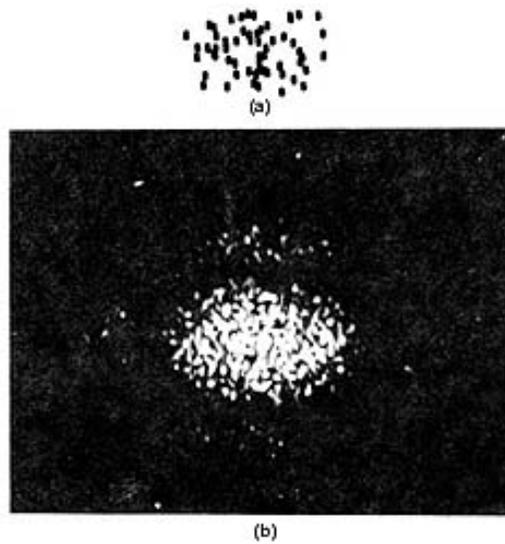


Figura 15. Una rejilla en un plano formada por un conjunto de rendijas que no están regularmente dispuestas (a) forma un patrón de difracción (b) que tampoco es regular.

Al igual que en los casos tratados en el capítulo anterior, si se dan la longitud de onda de la luz incidente así como los valores de las distancias entre las posiciones de los puntos iluminados en un patrón de difracción, se pueden determinar, por medio de un análisis detallado, las posiciones y el arreglo geométrico de la rejilla que generó el patrón. Esta observación nos será de utilidad más adelante.

Hemos hablado de rejillas de difracción en una y en dos dimensiones. ¿Se podrían también considerar rejillas de difracción en tres dimensiones? La respuesta es que sí. Uno podría tratar de construir en un laboratorio una rejilla tridimensional. Sin embargo, en la naturaleza existen rejillas en tres dimensiones a nuestra disposición. Estas son los cristales, tema del que nos ocuparemos en la siguiente sección.



V. CRISTALES

DESDE tiempos lejanos el hombre ha conocido el cuarzo, que es una sustancia mineral y cuya composición química es bióxido de silicio (SiO_2). Este compuesto es uno de los minerales más comunes y se presenta en la naturaleza en variadas formas, una de las cuales es transparente. Por este motivo los griegos le llamaron *crystallos*, que quiere decir "hielo claro", pues creían que se formaba de agua en el frío intenso de los Alpes; de allí el nombre de cristal, o más comúnmente, cristal de roca, usado para dicha variedad. Además del cristal de roca, existen otras variedades del cuarzo que tienen distintos colores, entre las que podemos mencionar como ejemplos la amatista, el ojo de tigre, etcétera.

Los cristales de cuarzo tienen la característica de que sus superficies forman figuras geométricas bien determinadas. Ocurren en formas prismáticas con caras lisas. Así, una variedad común del cuarzo se presenta en forma de doble pirámide (Figura 16(a)); otra variedad adquiere la forma de una bipirámide hexagonal con un prisma (Figura 16(b)), mientras que en otras ocasiones presenta una forma distorsionada (Figura 16(c)).

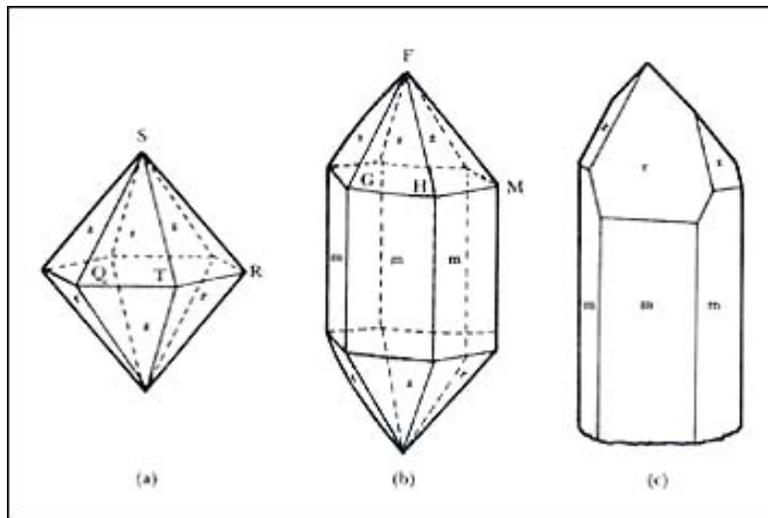


Figura 16. Formas que tienen diversas variedades de cristales de cuarzo.

La belleza y elegancia de los cristales han sido motivo constante de admiración. En 1611 Johannes Kepler conjeturó que los cristales deberían tener una estructura interna periódica. Posteriormente, en 1664 el científico inglés Robert Hooke escribió sobre la regularidad de la forma de diferentes cristales y especuló sobre el porqué de ello. Formuló la hipótesis de que esto era el resultado de un empaquetamiento ordenado de partículas esféricas dentro del cristal.

En 1669 el médico danés Nicolaus Steno descubrió que aunque las caras del cuarzo presentaban variaciones en su forma y en su tamaño, dependiendo de las condiciones en las cuales el cristal se formó, los ángulos entre las caras correspondientes eran siempre iguales. Es decir, por ejemplo, el ángulo que forman las caras QST y TSR en el cuerpo de la figura 16(a) es *igual* al ángulo que forman las caras GFH y HFM del cuerpo de la figura 16(b).

Además del cuarzo, en el siglo XVII se conocía un gran número de otras sustancias que también presentan caras en su superficie y para las cuales parecía también ser cierta la observación de Steno de que los ángulos entre sus caras son iguales, a pesar de que se presentan en diversas variedades.

Los pensadores de la época se convencieron de que esta constancia de los ángulos entre las caras de una forma cristalina de una sustancia determinada debe ser reflejo de cierta regularidad en su estructura interna.

Años después, en 1772, el francés Romé de Lisle, después de un estudio muy sistemático, descubrió que estos ángulos entre las caras de un cristal son característicos de la sustancia, o sea, un mineral presenta siempre el mismo ángulo entre sus caras sin importar el lugar de donde se le haya extraído o las condiciones en que haya cristalizado la sustancia. Por otro lado, distintos cristales tienen distintos valores de los ángulos entre los planos que forman sus caras. Cada sustancia, por lo tanto, tiene un valor bien determinado de dicho ángulo. El valor del mencionado ángulo ha servido para saber qué cristal se tiene, es algo así como la "huella digital" del cristal.

Otra propiedad de los cristales que ya se conocía era la facilidad con que se parten. Resulta que los cristales tienden a romperse con relativa facilidad a lo largo de ciertas superficies, mientras que prácticamente no se rompen en otras direcciones. Estas superficies son justamente las mismas de las que se habló en los párrafos anteriores. Mas adelante volveremos a hablar al respecto.

En 1774 el francés René Just Haüy publicó un libro *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux* en el cual hizo ver que la propiedad que tienen los cristales de formar ángulos bien determinados entre sus caras se podría explicar si se supone que internamente están formados por unidades que se repiten (Figura 17), en forma análoga a aquella en que se repiten los ladrillos de un muro. La única diferencia consistiría en que la unidad o "ladrillo" que se repite en el cristal lo hace en todo el espacio, o sea en tres dimensiones, y no solamente a lo largo de una superficie plana como ocurre con el muro. Además, con esta hipótesis Haüy pudo explicar otras propiedades de los cristales, como la extraordinaria simetría y regularidad que muestran y la de romperse a lo largo de ciertas superficies.

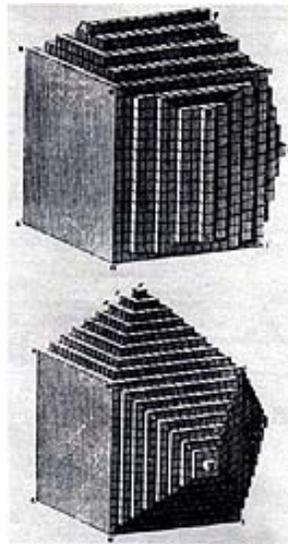


Figura 17. Formación de cristales a partir de la repetición de una unidad elemental, según Haüy.

Con el desarrollo de las ideas sobre la estructura atómica de la materia, se pensó que era claro que la simetría macroscópica de los cristales era un reflejo de que los átomos o moléculas que formaban la sustancia estaban dispuestos en forma ordenada. Hacia mediados del siglo XIX el francés A. Bravais formuló la hipótesis de que las moléculas de un cristal formaban un patrón estructural que al repetirse traslacionalmente en tres dimensiones formaba el cristal. Este patrón estructural, llamado la *celda unitaria*, estaría formado por un átomo o una molécula o un complejo de moléculas y sería el "ladrillo" básico con el que se construiría el cristal. La analogía en dos dimensiones sería el patrón que tiene el papel tapiz con el que se suele cubrir las paredes de las habitaciones. Se puede uno dar cuenta que este patrón se repite al trasladarlo a lo largo del papel. De esta manera, con la hipótesis de la celda unitaria Bravais pudo explicar algunas características de los cristales así como las diferencias que para entonces ya se habían encontrado entre diversos cristales.

Sin embargo, hasta principios del siglo XX no hubo manera de demostrar directamente la hipótesis formulada por Bravais. En particular no se podía determinar cómo estaba construida la celda unitaria. Hasta esa época no se conocía prácticamente nada acerca de la estructura de los átomos en los sólidos. No

se había progresado más allá de medir y registrar las características de las caras externas de los cristales, logrando solamente identificar y clasificar minerales. Se trataron de aplicar métodos químicos que no fueron útiles para resolver esta cuestión, pues para su uso los sólidos se tenían que calentar, evaporar o mezclar en soluciones, y al realizar estas operaciones, el sólido perdía justamente las características microscópicas que se querían determinar. Se requería de un tipo de análisis que no destruyera la muestra que se estuviese analizando.

En 1912 la situación cambió radicalmente cuando Max von Laue descubrió que la difracción de rayos X podría proporcionar la clave para la determinación de la estructura interna de los cristales. Pero antes de continuar, hablaremos en el siguiente capítulo sobre los rayos X.



VI. ¿QUÉ RAYOS SON LOS RAYOS X? ¿POR QUÉ USAR LOS RAYOS X?

EN EL año de 1895 el físico Wilhelm Conrad Röntgen, profesor de la Universidad de Würzburg, Alemania, hizo un descubrimiento que tuvo gran importancia tanto en el desarrollo subsecuente de la ciencia como en sus aplicaciones prácticas.

Desde mediados del siglo pasado un buen número de investigadores había trabajado en experimentos con tubos de vidrio al vacío; en cada uno de sus extremos se encontraba una punta metálica. Si entre las puntas existe un voltaje eléctrico muy alto, entonces se genera una corriente eléctrica que va de una de las puntas a la otra. A esta corriente se le llamó *rayos catódicos* debido a que una de las puntas era el cátodo (la terminal negativa) y la otra, el ánodo (la terminal positiva). Años después se descubrió la naturaleza de estos rayos catódicos: resulta que son partículas eléctricamente cargadas llamadas electrones, que se desprenden del cátodo y llegan al ánodo.

Trabajando con tubos de rayos catódicos, Röntgen descubrió que del ánodo (la terminal a la que llegan los rayos catódicos) salían emanaciones, a las que denominó rayos X, ya que no conocía su naturaleza. La manera en que los descubrió fue la siguiente: Röntgen cubrió el tubo con un papel negro de manera que no pudiera salir o entrar luz en él. Hizo pasar los rayos catódicos dentro del tubo, con el laboratorio a oscuras, y se dio cuenta de que una placa pintada de platinocianuro de bario que se encontraba, de casualidad, en un banco a un metro de distancia, emitía una luz verdosa. Al principio Röntgen creyó que esta luz se debía a que parte de los rayos catódicos que estaba produciendo dentro del tubo incidían, de alguna forma, sobre la placa. Sin embargo, al volver a repetir las descargas de rayos catódicos de tal manera que no pudiesen llegar a la placa, ésta seguía emitiendo luz. Röntgen llegó a la conclusión de que el tubo de rayos catódicos emitía emanaciones que llegaban a la placa y como consecuencia se generaba la luz verdosa. Esto no fue todo. También se dio cuenta de que estas emanaciones, los rayos X, salían del ánodo.

En resumen, el proceso que ocurrió en el experimento de Röntgen es el que a continuación describimos: los rayos catódicos van del cátodo al ánodo; al recibir el impacto de estas partículas el ánodo emite rayos X que llegan a la placa de platinocianuro de bario y esta sustancia emite, a su vez, luz verdosa.

Inmediatamente Röntgen empezó a investigar algunas de las características de los rayos X. Encontró, entre otras, las siguientes propiedades:

- 1) Los rayos X son imperceptibles a la vista del hombre.
- 2) Al hacer llegar rayos X a una sustancia, resulta que casi todas las sustancias son más o menos transparentes a estos rayos; es decir, los rayos X cruzan la sustancia. En orden de transparencia se tienen, por ejemplo, la madera, el aluminio y el plomo. El plomo figura entre las sustancias menos transparentes a los rayos X.
- 3) Además del platinocianuro de bario otras sustancias, al quedar expuestas a los rayos X, también emiten radiación luminosa. Como ejemplo de estas sustancias se pueden mencionar algunos compuestos de calcio, vidrio de uranio, cuarzo. Sin embargo, la luz emitida es distinta para compuestos diferentes.
- 4) Las emulsiones fotográficas resultan ser muy sensibles a los rayos X. Una placa fotográfica expuesta a un haz de rayos X se ennegrece.
- 5) Los rayos X se propagan en línea recta.

Otro hecho que descubrió Röntgen fue que siempre que rayos catódicos incidan sobre un cuerpo sólido, éste emite rayos X. Además notó que al cambiar el metal del que estaba hecho el ánodo, los rayos X

emitidos cambiaban sus características. Así descubrió que mientras más pesado sea el elemento que desempeña el papel del ánodo, produce rayos X de manera más eficiente. Esto ocurre si, por ejemplo, en lugar de aluminio se pone platino como ánodo.

Después del informe que presentó Röntgen sobre sus descubrimientos el 28 de diciembre de 1895, se desarrolló una intensa actividad de investigación sobre la naturaleza y propiedades de los rayos X. Un año después de su descubrimiento se habían escrito, por lo menos, alrededor de cincuenta libros y folletos y más de mil artículos sobre los rayos X.

Dada la propiedad de los rayos X de atravesar sustancias y de ser absorbidos de maneras distintas por diferentes sustancias, dependiendo de su composición y densidad, fueron inmediatamente aplicados a lo que después se llamó radiografía. Esta es la aplicación más antigua y mejor conocida. Como es bien sabido, los rayos X se utilizan ampliamente en la medicina. También se usan radiografías en la industria para la correcta fabricación de materiales, así como en la detección de fallas en partes de maquinaria, solamente para mencionar algunas de sus aplicaciones.

A pesar de lo llamativo de estas primeras aplicaciones, quedaba la cuestión de cuál era la naturaleza de los rayos X.

El físico británico C. A. Barkla y varios de sus colaboradores realizaron una serie de experimentos con rayos X desde 1906 hasta 1912, en los que se vislumbraron diversos hechos que los llevaron a suponer que estos rayos eran ondas electromagnéticas. Para entonces se habían llevado a cabo numerosos intentos de verificar la naturaleza ondulatoria de los rayos X y al mismo tiempo estimar su longitud de onda. En efecto, en 1902, H. Haga y C. H. Wind hicieron pasar un haz de rayos X a través de una rendija, tal como se había hecho con la luz visible. Lo único que encontraron fue que la imagen formada en la pantalla se hacía un poco ancha. Como pantalla utilizaron una placa fotográfica. Más adelante, el gran físico alemán Arnold Sommerfeld, que trabajaba en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Munich, hizo ver que, si los rayos X eran ondas, entonces deberían tener un longitud de onda del orden de 10^{-8} cm (0.000 000 01 cm, es decir, una décima de millonésima de milímetro), o sea del orden de angstrom. ¹ Como comparación recordemos que la longitud de onda de la luz visible (véase el capítulo 1) es del orden de diezmilésimas de milímetro, o sea de varios miles de angstrom.

Sin embargo, hasta 1912 no se había logrado hacer una demostración clara y sin ambigüedades de la hipotética naturaleza ondulatoria de los rayos X.

Un alumno de Sommerfeld, Peter Ewald, se interesó en el tema y escribió en 1910 su tesis doctoral al respecto. Sin embargo, después de doctorarse, varios resultados le seguían pareciendo pocos claros. Decidió manifestar sus dudas a Max von Laue, profesor de la misma universidad. Lane había trabajado durante mucho tiempo en el campo de la difracción de la luz visible por diversos tipos de rejillas.

Ewald había supuesto que los átomos en los cristales estaban ordenados como en una red, es decir, de manera regular. Laue, que ignoraba las entonces conocidas propiedades de los cristales, preguntó acerca de las razones de esta hipótesis, a lo cual Ewald contestó relatando los motivos de origen macroscópico que ya relatamos en el capítulo V. "¿Y qué distancia hay entre los átomos?" preguntó Laue. Ewald respondió que no se conocían con precisión estas distancias, pero que conociendo la densidad del cristal así como la masa de cada átomo se podría estimar que las distancias entre los átomos de un cristal deberían ser del orden de 10^{-8} cm, o sea de varios angstrom. En ese momento de la conversación Lane se distrajo y dejó de escuchar lo que Ewald decía. Estaba recordando la estimación de la longitud de onda de los rayos X que había hecho Sommerfeld no hacía mucho tiempo. Laue tuvo una asociación de ideas muy feliz: si los rayos X tienen longitud de onda del orden de varios angstrom y si la distancia entre los átomos en un cristal también fuera del orden de varios angstrom, entonces... Laue recordó que se producía un patrón de difracción en una rejilla si, entre otras cosas, la longitud de onda de las ondas era del mismo orden de magnitud que la distancia entre las rendijas (véase capítulo IV).

Durante un buen tiempo Laue estuvo meditando, con el siguiente argumento. ¿Qué pasaría si un haz de rayos X atravesara un cristal? Si es cierto que los rayos X son ondas de longitud de onda pequeña y si además también fuera cierto que los cristales están contruidos en forma de una red regular, en la que las distancias entre los átomos son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de los rayos X, ¿no funcionaria la red cristalina como una rejilla de difracción y los rayos X experimentarían este fenómeno? Dicho de otra manera, la red cristalina estaría funcionando como una rejilla de difracción para los rayos X de manera análoga a aquella en que una rejilla común funciona para la luz visible. Se recordará que el fenómeno de difracción solamente se presenta en haces que tienen características ondulatorias. Por lo tanto, esto podría decidir la cuestión de si la naturaleza de los rayos X es ondulatoria y al mismo tiempo decidir si un cristal es un arreglo regular y ordenado de átomos.

Laue se excitó mucho y discutió esto con mucha gente. Tanto Röntgen como Sommerfeld dudaron sobre sus ideas. Sin embargo, los físicos más jóvenes se entusiasmaron y Walther Friedrich se ofreció para ejecutar el experimento, ya que tenía experiencia en el manejo de rayos X. Sin embargo, Sommerfeld puso muchas objeciones y Friedrich empezó a dudar. Laue, entretanto, había convencido también a Paul Knipping de realizar el experimento. Finalmente, el 21 de abril de 1912 Knipping y Friedrich lo llevaron a cabo. El resultado que obtuvieron fue que el cristal *sí* difractaba los rayos X. Laue hizo la siguiente reseña en su autobiografía: "El fotograma de un trozo de sulfato de cobre expuesto a la radiación X mostró, junto a la radiación primaria, una corona de espectros difractados por la red cristalina (véase la figura 18). Profundamente sumido en mis reflexiones iba hacia casa... cuando Friedrich me mostró esta radiografía. Ya cerca de mi casa, ... me vino la idea para la teoría matemática del fenómeno".

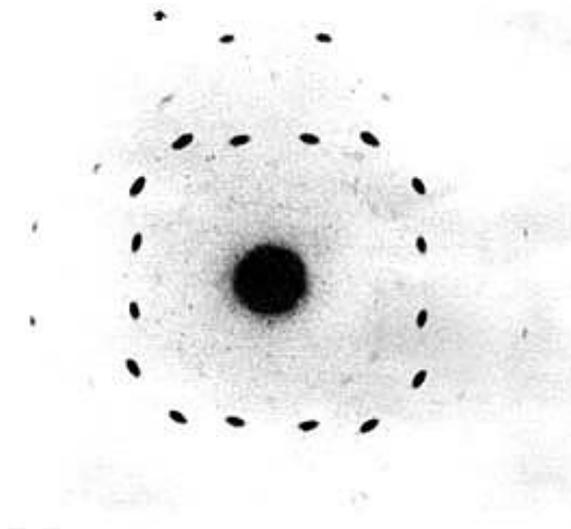


Figura 18. Fotografía del patrón de difracción de un cristal de sulfato de cobre, obtenida en 1912 por Laue, Friedrich y Knipping.

Las zonas oscuras de la foto de la figura 18 corresponden a haces de rayos X que llegan a la película, que hizo las veces de pantalla. La zona central corresponde al haz directo que no se difractó, mientras que los puntos a su alrededor corresponden a haces difractados por el cristal.

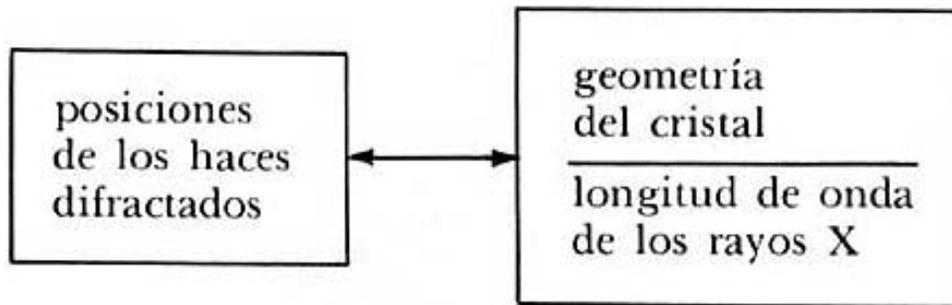
El resultado del experimento se propagó entre la comunidad científica como un reguero de pólvora, causando una impresión muy profunda. Albert Einstein le envió a Laue el 10 de junio de 1912 una tarjeta postal en la que escribió: "Lo felicito cordialmente por su maravilloso éxito. Su experimento figura entre lo más bello que la física ha vivido." Laue se alegró mucho por esta felicitación.

Es así como Laue demostró dos cosas al mismo tiempo: en primer lugar, que la estructura cristalina consiste efectivamente en una red regular y ordenada, ya que el patrón de difracción muestra regularidad, y en segundo lugar, que los rayos X son ondas. Además, hizo ver que la red cristalina funciona como una rejilla de difracción para rayos X de la misma forma en que una rejilla lo hace para la luz visible. La idea de Laue fue que para que el patrón de difracción fuera apreciable, era necesario que la longitud de onda de

la radiación incidente fuese del mismo orden de magnitud que la separación entre los elementos de la rejilla. Asimismo, Laue hizo ver que el cristal estaba funcionando como una rejilla en tres dimensiones, a diferencia de las rejillas en una y dos dimensiones con las que anteriormente había trabajado (véase el capítulo IV).

En 1914 Max von Laue obtuvo el premio Nobel de Física por su trabajo de difracción de rayos X en cristales.

Ahora bien, en la teoría matemática que desarrolló Laue, y de la que habla en su autobiografía arriba citada, lo que hizo fue encontrar la relación entre las posiciones de los puntos obtenidos en la figura 18, la geometría de la "rejilla", o sea del cristal, y la longitud de onda de los rayos X



Esto constituye, de hecho, una extensión de las relaciones que se conocían para rejillas en una y dos dimensiones de las que se habló en el capítulo IV. De esta manera se abrió el camino para el estudio de la estructura microscópica de los cristales.

Ahora debe quedar clara la respuesta a las preguntas que se hicieron en el título del presente capítulo. En primer lugar, los rayos X son ondas electromagnéticas de longitudes de onda muy pequeñas, invisibles al ojo humano. De hecho, son una parte del conjunto de todas las posibles ondas electromagnéticas (véase el capítulo 1). En segundo lugar, se usan en el estudio y análisis de las estructuras de sustancias cristalinas, debido a que tienen una longitud de onda del mismo orden de magnitud que la separación de los átomos en un cristal. Es por este motivo que el patrón de difracción de rayos X incidentes sobre un cristal es apreciable y contiene información sobre la estructura de la red.

NOTAS

1 Parala descripción de fenómenos microscópicos se suele utilizar la unidad de medida llamada angstrom (abreviada Å). Su definición es $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ cm}$

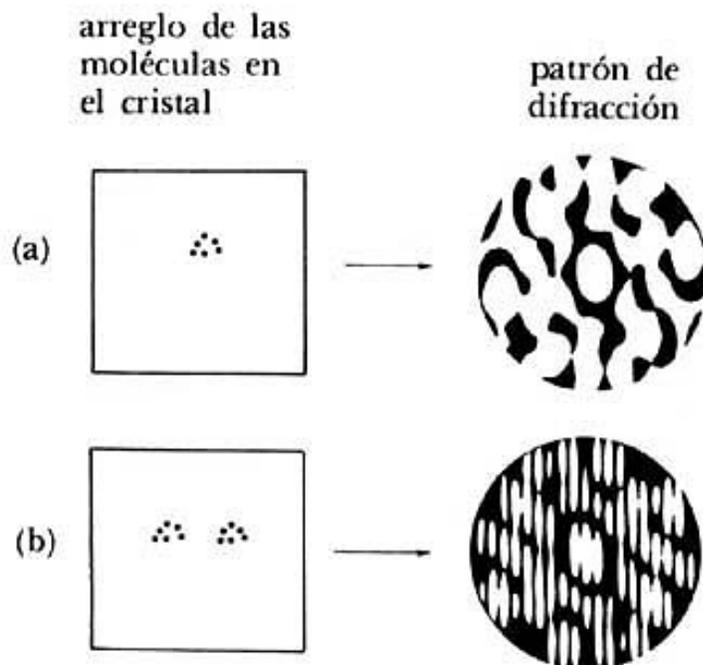


VII. REGRESANDO A LOS CRISTALES Y OTRAS COSAS MÁS

UNA vez descubierto el hecho de que los cristales pueden difractar rayos X, se inició una gran actividad en este nuevo campo. En particular, W. L. Bragg, en Inglaterra desarrolló una explicación alternativa a la de Laue, que resultó ser más sencilla.

Debido a la primera Guerra Mundial (1914-1918) hubo un paréntesis en que prácticamente se suspendieron los trabajos de investigación en los países participantes en la contienda. Sin embargo, hacia los primeros años de la década de 1920 ya se habían determinado las estructuras de un buen número de materiales inorgánicos. Posteriormente, ya entrada la misma década, se analizaron con éxito cristales inorgánicos más complejos; después de 1930 se encontraron estructuras de cristales orgánicos.

Al transcurrir el tiempo se fueron desarrollando técnicas cada vez más refinadas para poder encontrar la estructura de una sustancia a partir de los patrones de difracción de rayos X que producen. Es claro que diferentes estructuras producen distintos patrones de difracción. En la figura 20 se ilustra esta afirmación. Se presentan en ella, del lado izquierdo, los arreglos de átomos en una estructura, y en el lado derecho el patrón de difracción de rayos X que produce. En forma análoga a lo que ocurre con la difracción de una rejilla con distinto número de rendijas, vemos que a medida que el número de átomos aumenta las imágenes que se producen van siendo más marcadas. En la sucesión mostrada en la figura 19 se han colocado los átomos en forma regular y ordenada. Es interesante notar cómo los patrones van cambiando y que en forma análoga a lo que ocurre al difractarse luz visible en rejillas con varias rendijas (véase la sucesión de la Figura 13), ahora los rayos X difractados adquieren patrones que se van haciendo más y más puntuales a medida que los elementos de la rejilla aumentan. Por supuesto, estos elementos son los átomos que componen el cristal. Como en el caso de la luz visible, los patrones de difracción se van volviendo más nítidos (Figura 13).



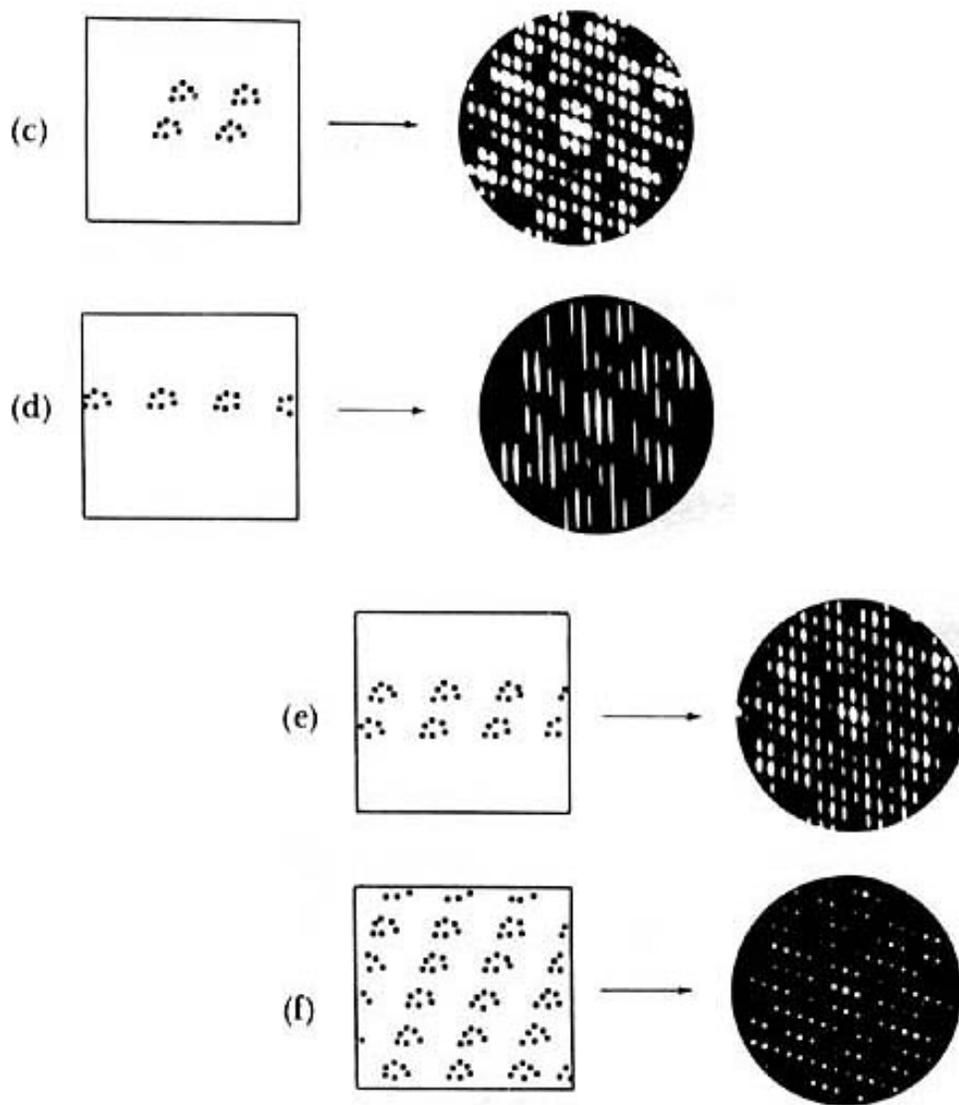


Figura 19. Distintos arreglos de las moléculas en un cristal dan lugar a diferentes patrones de difracción.

Si se cambian tanto las distancias como la colocación geométrica de los átomos, entonces el patrón de difracción que resulta también se modifica.

Mencionaremos algunos resultados obtenidos para varias estructuras cristalinas. En primer lugar, consideremos el cloruro de sodio **NaCl**, que es la bien conocida sal de mesa común. Este compuesto está formado de dos átomos: sodio y cloro. El análisis de la difracción de rayos X por el cloruro de sodio muestra que tiene una estructura cristalina cúbica en la que los átomos de cloro y sodio se encuentran dispuestos en forma alternada, como se muestra en la Figura 20(a). Este arreglo se repite con la misma orientación a lo largo de toda la sustancia formando la red cristalina. Se encuentra que la longitud del lado del cubo que se acaba de mencionar es de 5.63 \AA . La estructura que tiene el cloruro de sodio es característica también de la mayoría de los halogenuros alcalinos como el bromuro de potasio **KBr** (con longitud de la arista de su cubo igual a 6.59 \AA), así como de otros compuestos como el bromuro de plata **AgBr** (con longitud de 5.77 \AA), el óxido de uranio **UO** (4.92 \AA), etcétera.

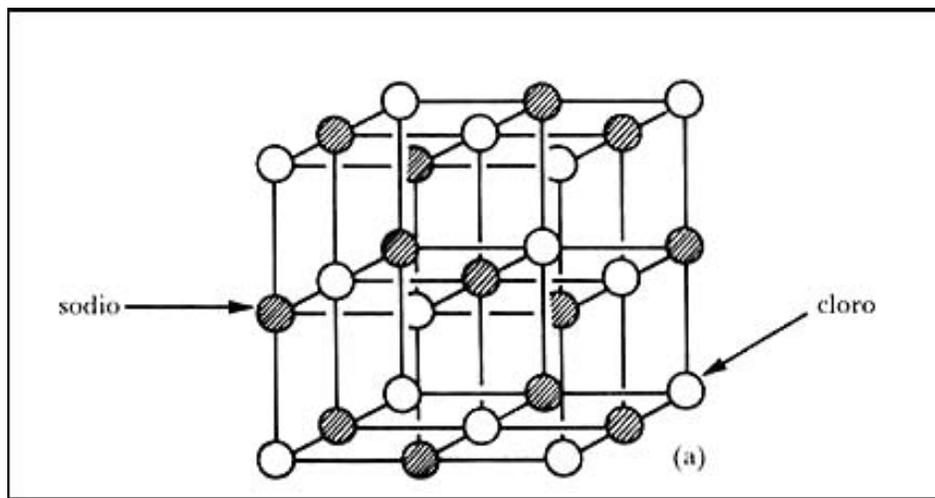


Figura 20. Estructuras de diversos cristales obtenidas por análisis de difracción de rayos X: (a) cloruro de sodio, cúbica.

Otro ejemplo es la estructura del cobre, mostrada en la figura 20(b). Esta estructura es una red que recibe el nombre de cúbica centrada en las caras. Los átomos de cobre se encuentran colocados en los vértices de un cubo así como en el centro de cada una de las caras que forman el cubo. La longitud del cubo es de 3.61 Å. Este arreglo se repite con la misma orientación a lo largo de todo el cristal. La estructura cúbica centrada en las caras es característica de muchos metales como el níquel (3.52 Å), aluminio (4.04 Å), oro (4.07 Å), plomo (4.94 Å) y platino (3.92 Å), por ejemplo.

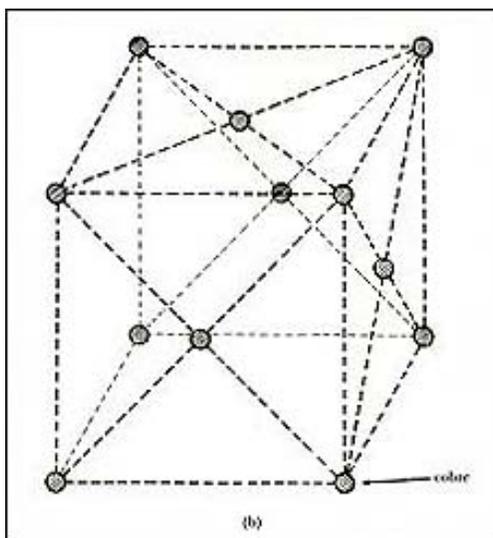


Figura 20 (b). Cobre, cúbica centrada en las caras.

Existe otro tipo de estructura, la llamada cúbica centrada en el cuerpo (Figura 20(c)) que tiene el cristal de cloruro de cesio **CsCl**. En cada vértice del cubo se encuentra un átomo de cesio, mientras que en el centro del cubo está un átomo de cloro. La longitud del lado del cubo es de 4.11 Å. El cloruro de rubidio **RbCl** es otro compuesto que tiene esta estructura, con una longitud de la arista del cubo igual a 3.74 Å.

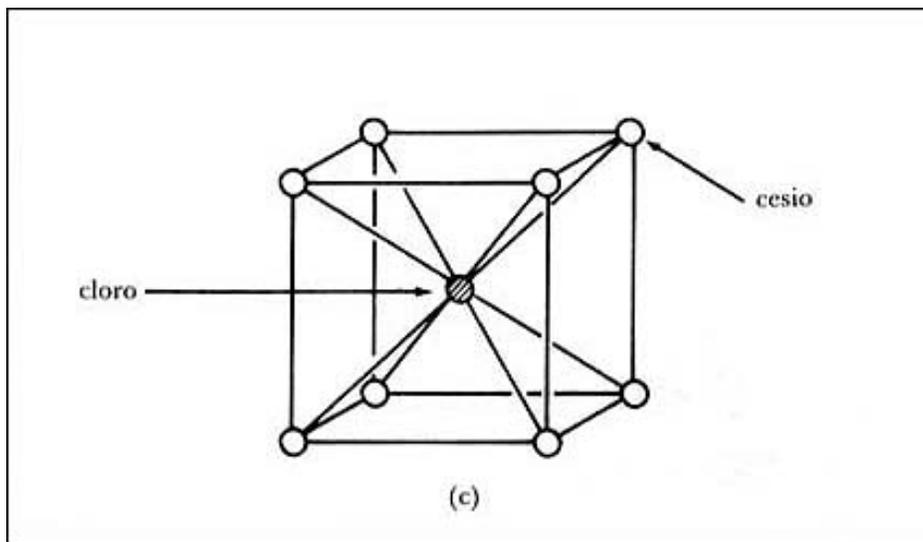


Figura 20 (c). Cloruro de cesio, cúbica centrada en el cuerpo.

El diamante es una sustancia que también tiene estructura cristalina, sin embargo, ésta resulta ser más complicada que las anteriores. El diamante está formado de átomos de carbón. La diferencia entre el diamante y otras formas de carbón que conocemos radica en la disposición de sus átomos. En el diamante cada átomo de carbón está enlazado con otros átomos, en forma de tetraedro (cuatro caras). La estructura del diamante se forma de dos estructuras cúbicas centradas en las caras, estando una de éstas desplazada, con respecto a la otra, a lo largo de la diagonal del cubo en una distancia igual a la cuarta parte de su longitud. En la figura 21 se muestra la estructura del diamante; se ven también los enlaces que forman un tetraedro. La longitud del lado del cubo del diamante es de 3.56 \AA . Es justamente a causa del enlace en forma de tetraedro que se suelen encontrar los diamantes en formas octaédricas (ocho caras), resultado de la colocación de dos tetraedros tocando sus bases. Combinando de diversas maneras las posiciones de varios tetraedros también se encuentran formas de diamante dodecaédricas (doce caras), con 24 y 48 caras.

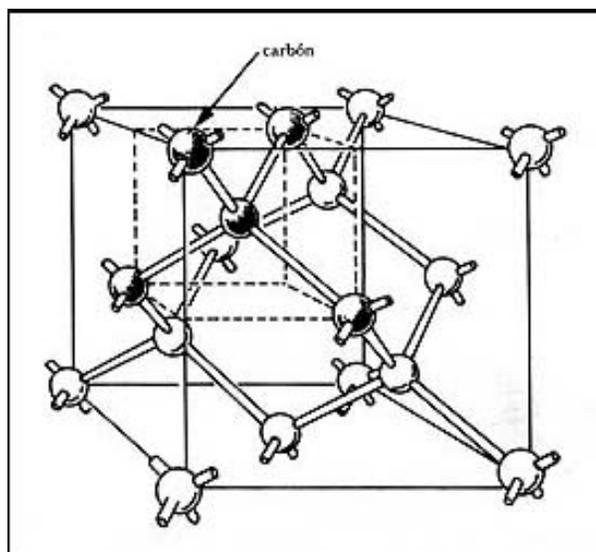


Figura 21. Estructura del diamante.

El diamante es la sustancia más dura que existe. Esto se debe a que la unión entre los átomos de carbón es muy intensa. Sin embargo, dicha dureza varía de manera muy significativa a lo largo de distintas direcciones. Las direcciones en las cuales es más sencillo pulir el diamante son las de las caras cristalinas. El diamante se puede partir perfectamente en cuatro direcciones, paralelas a las caras del octaedro. Los técnicos que trabajan estas joyas utilizan esta característica para dividir piedras grandes en varias porciones más pequeñas.

El carbón también cristaliza en otra forma, dando lugar al grafito. La estructura cristalina del grafito

consiste en anillos hexagonales que se encuentran en diferentes planos paralelos, que están unidos entre sí. Resulta que la unión entre átomos de carbón que están en un plano es muchísimo más intensa que la unión entre átomos de carbón que están en planos adyacentes. A diferencia de lo que ocurre en el diamante, en donde cada átomo de carbón está unido fuertemente a otros cuatro átomos de carbón formando un tetraedro, dándole a la sustancia la dureza en tres dimensiones, en el grafito, un átomo de carbón está unido fuertemente sólo con otros tres átomos de carbón en un plano, mientras que la unión con el cuarto átomo de carbón es muy débil y ocurre perpendicularmente al plano. En consecuencia, hay una unión muy intensa en dos dimensiones, a lo largo de la superficie del plano. Es por este motivo que el grafito se divide a lo largo de planos formando láminas delgadas y es relativamente fácil separar los planos.

A pesar de que tanto el diamante como el grafito son ambas sustancias formadas con los mismos átomos de carbón, tienen propiedades muy distintas debido a la estructura cristalina que adquieren. Además del precio, el diamante se distingue del grafito en lo siguiente: el diamante es transparente, mientras que el grafito es negrogrisáceo; el diamante es muy duro, mientras que el grafito es blando; el diamante es mal conductor de electricidad, mientras que el grafito es buen conductor, etcétera.

De las dos estructuras que mencionamos para el carbón, la que corresponde al grafito es la más estable en las condiciones ordinarias de temperatura y presión en las que vivimos. Para formar la estructura del diamante se requiere de muy altas presiones, que se han logrado en el transcurso de las eras geológicas en las profundidades de la Tierra. En principio, la estructura del diamante no es estable y debería transformarse en la estructura estable, es decir, en grafito (¡uuy!, ¿qué le va a pasar a mis joyas?); sin embargo, una vez formado el diamante, su estructura persiste, en la práctica, indefinidamente (¡uuf, qué suerte!) ya que en las condiciones de temperatura y presión en que nos encontramos la transformación de la estructura inestable a la estable ocurre de manera extraordinariamente lenta.

Otros elementos también cristalizan en una estructura igual a la del diamante, como por ejemplo el germanio (5.65 \AA) y el silicio (5.43 \AA).

La cristalización en forma laminar, como la que ocurre en el grafito, también se da en otras sustancias que reciben el nombre genérico de micas. Las micas tienen composiciones químicas muy variables, por ejemplo, aluminosilicatos con potasio, magnesio, hierro o litio, así como con flúor. Consecuentemente sus propiedades físicas son diversas. Sin embargo, su estructura cristalina es análoga a la del grafito.

Con las técnicas de difracción de rayos X se han revelado imperfecciones de las estructuras cristalinas. Estas imperfecciones se detectaron al comparar el patrón de difracción de estas sustancias con el patrón de difracción de estructuras perfectas y darse cuenta de que hay pequeñas variaciones.

Otra aplicación que se ha hecho de los rayos X es la determinación de la estructura de moléculas. La distancia entre los átomos que forman una molécula resulta ser también del orden de angstroms, es decir, del orden de longitud de onda de los rayos X. Por lo tanto, un conjunto de moléculas también sirve como rejilla de difracción al hacer incidir sobre ellas radiación X. Aplicando las mismas ideas que para la determinación de estructuras cristalinas se han determinado estructuras moleculares de compuestos químicos, algunos de ellos muy complejos, como por ejemplo la penicilina, una vez conocida su estructura se pudo efectuar su síntesis. Otro caso fue la determinación de la estructura de la aspirina.

El conocimiento de estructuras moleculares biológicas ha contribuido a desarrollar la biología moderna. El paso inicial fue la celebrada determinación de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN) (Figura 22(a)), hecha por medio de difracción de rayos X por el físico Francis Crick y el biólogo James Watson en Cambridge, Inglaterra, en 1953. Con ello descubrieron la estructura del material genético de los seres vivos. Por este trabajo recibieron el premio Nobel de Medicina en 1956. El ADN existe dentro de cada cromosoma de cada célula de cada organismo vivo, desde la más sencilla ameba hasta el hombre. Crick y Watson descubrieron que el ADN está formado por una hélice doble, como escalera en espiral, compuesta de azúcares y fosfatos en sus dos lados; además, los "escalones" están hechos de parejas de moléculas: adenina y timina, guanina y citosina. Cada una de las moléculas de la pareja está unida a una espiral. El

orden en que se encuentran estas parejas a lo largo de la hélice determina el mensaje genético y es el que controla el desarrollo posterior del individuo: que sea un pino o una rosa, que el pelo sea rizado o los ojos azules, etcétera. Cada molécula de ADN está constituida por segmentos codificados o genes, que llevan instrucciones hereditarias para producir las proteínas que gobiernan todos los procesos vivos.

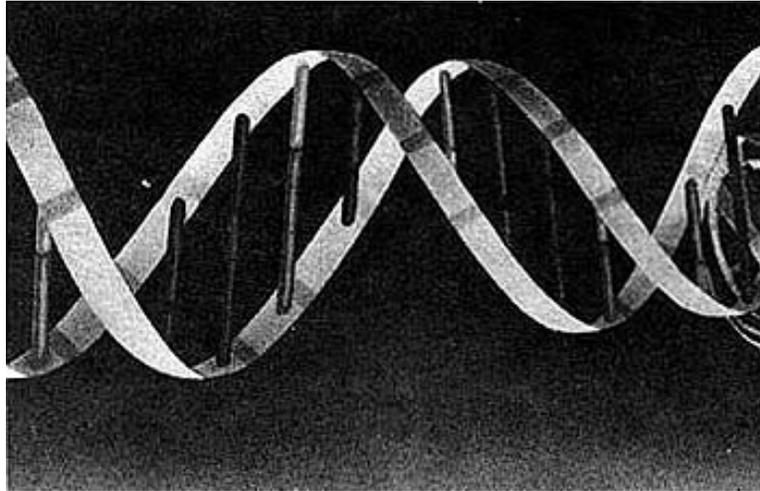


Figura 22 (a).Estructura helicoidal del ácido desoxirribonucleico (ADN) donde se encuentra contenida la información genética de los seres vivos.

En la figura 22(b) vemos una fotografía del patrón de difracción del ADN. Se puede ver claramente en este patrón la X que se forma y que es característica de estructuras helicoidales.

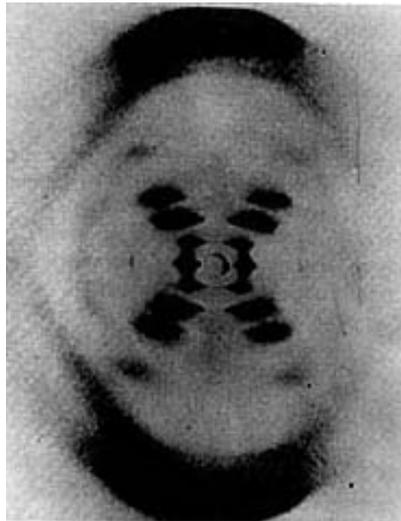


Figura 22 (b). Patrón de difracción de rayos X del ADN.

Podemos ahora apreciar la gran capacidad que tiene el método de difracción de rayos X para proporcionar información sobre diversas características de estructuras microscópicas.



VIII. NEUTRONES. ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES

EN LOS capítulos anteriores describimos brevemente los principios físicos en los que se basa la utilización de la difracción de rayos X para encontrar la estructura de ciertas sustancias como los cristales, moléculas, etcétera. A pesar de la gran capacidad que tiene esta técnica, hay situaciones en las que no es muy eficaz. Por ejemplo, si el cristal está formado por compuestos que contienen bastantes átomos de hidrógeno, entonces la difracción de rayos X es muy débil y no proporciona buena información. Hay otras características microscópicas, como las propiedades de los movimientos que realizan los átomos en el cristal, para las cuales el uso de los rayos X no es adecuado, ya que no puede proporcionar esta información. Por otro lado, se ha descubierto otro método complementario que utiliza neutrones y que ha ayudado a obtener información sobre propiedades microscópicas de las sustancias que no es capaz de proporcionar la difracción de rayos X. Antes de describirlo, diremos qué son y cómo se encontraron los neutrones.

En 1911, el físico británico lord Ernest Rutherford, que trabajaba en el famoso Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, llevó a cabo una serie de experimentos en los que se basó para llegar a la conclusión de que el átomo debería tener una estructura muy particular. Sus resultados experimentales indicaban que dicha estructura debía ser muy parecida al sistema planetario. En efecto, encontró que cada átomo tiene dos componentes: en el centro del átomo debe haber un núcleo rodeado de una nube de partículas —los *electrones*— que giran a su alrededor. El núcleo desempeña un papel análogo al del Sol en el sistema planetario, mientras que los electrones que lo rodean desempeñan el papel de los planetas. Además, Rutherford llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) El núcleo tiene una carga eléctrica positiva, mientras que los electrones tienen carga eléctrica negativa, de tal suerte que la carga total del átomo es cero; es decir, el átomo es eléctricamente neutro.
- 2) La masa del núcleo es muchísimo más grande que la masa de los electrones. Se encontró que, dependiendo del tipo de núcleo, su masa es varios miles de veces mayor que la de los electrones.

Las partículas de carga positiva que componen el núcleo se llaman *protones*. Resulta que la masa de un protón es alrededor de 1 836 veces la masa de un electrón. Además, las cargas eléctricas de un protón y un electrón tienen las mismas magnitudes, pero con signos opuestos; la del protón es positiva y la del electrón, negativa. Así, por ejemplo, el átomo más sencillo está formado por un núcleo compuesto únicamente de un protón que a su alrededor tiene un electrón. Este átomo es el hidrógeno. De manera análoga quedan constituidos otros tipos de átomos. Cada uno de ellos tiene cierto número de protones en su núcleo e igual número de electrones a su alrededor. Como ilustración mencionaremos los casos del carbono que tiene seis protones en su núcleo y seis electrones a su alrededor; el oxígeno tiene ocho protones y ocho electrones; el cloro tiene diecisiete protones y diecisiete electrones, etcétera.

Las características químicas que tiene un átomo quedan determinadas por el número de electrones (que es igual al de protones en el núcleo) que contiene; este número se llama *número atómico* del elemento. Así, dos átomos tienen propiedades químicas distintas si sus números atómicos son diferentes. El flúor, con número atómico 9, es distinto del argón, que tiene número atómico 18, justamente porque sus números son distintos.

Hacia 1920 el mismo Rutherford, basado en resultados de diferentes experimentos, hizo una suposición: en el núcleo del átomo debería existir otra partícula, distinta al protón. Para ser consistente con el experimento, esta partícula debería tener carga eléctrica nula. Sin embargo, Rutherford no pudo dar ninguna prueba concluyente sobre la existencia de esta partícula.

Durante más de diez años el grupo de Rutherford en Cambridge estuvo estudiando y sondeando el núcleo atómico. Hasta 1932, otro físico inglés perteneciente a dicho grupo, sir James Chadwick, descubrió en el

laboratorio la existencia de la partícula propuesta por Rutherford. A esta partícula se le llama *neutrón*.

Por lo tanto, el núcleo de un átomo contiene protones y neutrones. Es claro que para que el átomo sea neutro el número de protones debe ser igual al número de electrones que rodean al núcleo.

La masa que tiene un neutrón es casi igual a la que tiene un protón, o sea alrededor de 1 836 veces la masa de un electrón. A causa de esta diferencia de masas resulta obvio que la masa de un átomo está prácticamente concentrada en su núcleo.

Ahora bien, como mencionamos en un párrafo anterior, las propiedades químicas que tiene un átomo dependen del número de electrones que posee. Esto significa que dos átomos que tengan el mismo número de electrones (y por tanto, de protones) pero que tengan *distintos* números de neutrones en sus núcleos son químicamente idénticos. Así, por ejemplo, el carbón tiene seis protones (y por tanto, seis electrones) pero puede tener en su núcleo cinco, seis, ocho neutrones. Se denotan a estos núcleos como ${}_6\text{C}^{11}$, ${}_6\text{C}^{12}$, ${}_6\text{C}^{14}$, respectivamente. Aquí el 6 colocado abajo y a la izquierda del símbolo químico C del carbón indica su número atómico. El número que está arriba y a la derecha es la suma de los protones y de los neutrones que hay en el núcleo; es decir, del número total de partículas que se encuentra en el núcleo. Los átomos de carbón así formados son todos químicamente idénticos ya que todos tienen el mismo número atómico, a saber, seis. Sin embargo, estos átomos no son iguales entre sí ya que tienen núcleos distintos. A estos átomos diferentes del mismo elemento se les llama isótopos.

Sin embargo, a pesar de tener las mismas propiedades químicas, distintos isótopos del mismo elemento químico tienen distintas propiedades nucleares. Esto es así ya que las fuerzas que mantienen unido al núcleo, las llamadas fuerzas nucleares, se manifiestan de diferentes maneras si el número de las partículas que están en el núcleo es distinto. En efecto, no da lo mismo, en lo que a las fuerzas nucleares respecta, si en el núcleo hay 11 partículas (6 protones + 5 neutrones), que si hay 12 partículas (6 protones + 6 neutrones). En particular, dependiendo del número de neutrones y protones que haya en el núcleo puede ocurrir que el núcleo no sea estable. Esto significa que las fuerzas nucleares hacen que el núcleo se rompa. Otros núcleos sí son estables. En el ejemplo del carbón mencionado, el isótopo ${}_6\text{C}^{12}$ es un núcleo estable y es el que se encuentra en los núcleos de carbón que conocemos. Sin embargo, el núcleo de ${}_6\text{C}^{11}$ es un isótopo que se rompe, o sea que es inestable. Si se tuviesen 100 g de este isótopo, entonces, después de 20.4 min, solamente tendríamos 37 g del isótopo. A este tiempo se le llama la vida media del isótopo. Las vidas medias de diferentes isótopos son distintas. Así, por ejemplo, la vida media del isótopo ${}_6\text{C}^{14}$ es de 5 730 años, que es distinta a la correspondiente del ${}_6\text{C}^{11}$. Vemos entonces que las propiedades nucleares dependen de manera muy significativa del número de neutrones y protones que tenga el núcleo del átomo.

Los núcleos que no son estables, después de cierto intervalo de tiempo, se rompen en varios fragmentos. Es decir, estos núcleos se desintegran. En un capítulo posterior hablaremos sobre este proceso de desintegración nuclear.



IX. COMPARACIÓN ENTRE RAYOS X Y NEUTRONES

COMO se mencionó en el capítulo anterior, además de los rayos X también se utilizan neutrones para encontrar tanto estructuras de sustancias cristalinas como otras propiedades de sus movimientos microscópicos. En esta sección compararemos las características de la difracción de rayos X con la de neutrones.

En primer lugar, queremos mencionar que al incidir tanto rayos X como un haz de neutrones sobre la materia, estas radiaciones interactúan de maneras diferentes con los átomos que la componen.

Antes que nada, recordemos que un átomo está compuesto de un núcleo con carga eléctrica positiva que está rodeado de una nube de electrones, que tienen carga eléctrica negativa. En conjunto el átomo es eléctricamente neutro.

Al incidir un haz de rayos X sobre un átomo, esta radiación interactúa solamente con los electrones del átomo; no interactúa con el núcleo. Ahora bien, resulta que mientras más electrones tenga el átomo, mayor será la intensidad de la interacción. Para átomos de muy pocos electrones, la radiación de rayos X casi no experimenta interacción alguna. Así, por ejemplo, si la muestra contiene átomos de hidrógeno, que recordamos tienen solamente un electrón alrededor de su núcleo, prácticamente "siente" a los rayos X. En consecuencia, usar los rayos X para determinar estructuras de sustancias que contengan muchos átomos de hidrógeno es muy difícil porque la intensidad de los haces difractados resulta ser muy baja. Sin embargo, determinar estructuras que contengan átomos de muchos electrones, por ejemplo cloro, que contiene 35 electrones, es relativamente fácil porque la interacción entre los rayos X y el átomo es muy fuerte y el patrón de difracción correspondiente es muy intenso.

La intensidad del haz difractado por los rayos X es proporcional al cuadrado del número de electrones. Esto significa que al aumentar al doble el número de electrones, la intensidad difractada aumenta cuatro veces, o sea dos al cuadrado; al aumentar al triple el número de electrones, la intensidad aumenta nueve veces, o sea tres al cuadrado, etcétera.

Por otro lado, al incidir un neutrón sobre un átomo, en virtud de su neutralidad eléctrica no interactúa con los electrones. Debido a ello, el neutrón puede penetrar con toda facilidad dentro del átomo, cruzar su nube electrónica y llegar al núcleo. Cuando el neutrón se encuentra a distancias muy pequeñas del núcleo se provoca una reacción entre el núcleo del átomo y el neutrón, interacción que es de origen nuclear. En consecuencia, un neutrón solamente interactúa con el núcleo de los átomos. La intensidad de la interacción depende del tipo de núcleo; de hecho, esta interacción depende de cuántos protones y neutrones se encuentren dentro del núcleo. Así resulta que, por ejemplo, al incidir un neutrón sobre un núcleo de hidrógeno, que contiene solamente un protón, interactúa muy intensamente. Esto significa que el neutrón "siente" fuertemente al hidrógeno y puede dar información acerca de sus características dentro del cristal. En general, la interacción que ocurra entre el neutrón y el núcleo dependerá de qué isótopo se trate. Distintos isótopos de un mismo átomo interactúan de maneras diferentes con un neutrón.

Por lo tanto, al hacer experimentos para determinar estructuras, la utilización de rayos X y la de neutrones resultan ser complementarias. Cada una de estas radiaciones pone de relieve diferentes características de una estructura.

Existe otro tipo de consideración muy importante. De acuerdo con la moderna teoría microscópica de la materia que queda descrita por la mecánica cuántica, cualquier haz de luz y, más generalmente, cualquier haz formado de ondas electromagnéticas, está compuesto por un conjunto de partículas llamadas fotones, [1](#) que son partículas muy especiales en el sentido de que no tienen masa. Lo anterior significa que las ondas electromagnéticas tienen, además, características materiales. De hecho su naturaleza es dual: onda-partícula

En cierto sentido, de manera inversa, también ocurre que bajo determinadas circunstancias las partículas materiales que existen en la naturaleza se comportan como si fuesen ondas [2](#) y se les pueden asociar características ondulatorias como, por ejemplo, longitud de onda. Resulta que esta última cantidad depende de su energía: mientras mayor sea la energía de la partícula menor será su longitud de onda y viceversa. En particular, los neutrones muestran este comportamiento ondulatorio. Es justamente esta propiedad ondulatoria de los neutrones la que da posibilidad de que puedan difractarse al incidir sobre un cristal, que al igual que con los rayos X, funciona como una rejilla de difracción. Recordemos que el fenómeno de la difracción ocurre solamente con entes que tienen propiedades ondulatorias. Al hablar arriba de que los neutrones se difractan en un cristal estábamos pensando en que tienen propiedades ondulatorias.

Ahora bien, los fotones que componen un haz de ondas electromagnéticas tienen una energía que depende de su longitud de onda. Esta dependencia es inversamente proporcional, o sea que mientras mayor sea la longitud de onda menor será la energía del fotón y viceversa. En el caso particular de los rayos X, dado que sus longitudes de onda son muy pequeñas, como ya lo vimos anteriormente, los fotones que componen esta radiación son partículas que tienen una energía muy alta comparada con la energía que tiene cada uno de los átomos o moléculas en una estructura cristalina. El valor de la energía de un fotón de rayos X es alrededor de un millón de veces más grande que la de los átomos en cuestión. Por lo tanto, al pasar este fotón energético por la posición en que se encuentra el átomo en el cristal, lo único que percibe es su posición media en la red. Por decirlo así, el fotón, por ser tan energético, pasa tan rápidamente por la posición donde se encuentra el átomo que casi no se da cuenta que este átomo se está moviendo. El fotón "ve" al átomo prácticamente en reposo. En consecuencia, la única información que se lleva el fotón y que en última instancia nos puede proporcionar, es sobre la posición del átomo. Una analogía a esta situación ocurre cuando viajamos en una carretera en un vehículo que va a una velocidad muy alta y rebasamos a otro vehículo que va a una velocidad muy baja. Nuestra impresión es que está en reposo. Antes de poder percibir cualquier característica del movimiento del vehículo lento, por ejemplo el giro de sus llantas, ya estamos muy lejos de él. Lo único que podríamos decir es dónde se encuentra el vehículo lento y nada más.

Por otro lado, resulta que un neutrón que tenga longitud de onda del orden de angstroms tiene una energía que es muy parecida a la que tienen los átomos en el cristal. A estos neutrones se les denomina lentos. En consecuencia, al pasar un haz de neutrones lentos por un cristal, éstos tienen la oportunidad de "ver" con todo detalle los movimientos que realiza dicho átomo ya que, por así decirlo, pasan en forma suficientemente lenta. En consecuencia, de un análisis de los cambios de energía que experimenta el neutrón a causa de su interacción con los átomos, es posible deducir el tipo de movimientos que realizan los átomos. En particular, dado que los átomos oscilan alrededor de los puntos de la red, es posible obtener información con neutrones, como, por ejemplo, acerca de las frecuencias de oscilación de los átomos. Más adelante hablaremos con mayor detalle sobre esto.

De lo que se ha mencionado se podría pensar que los neutrones son más útiles que los rayos X, ya que además de poder determinar la estructura cristalina de un sólido, también proporcionan información acerca de las características de los movimientos que realizan los átomos en el cristal. Sin embargo, como veremos en el próximo capítulo, resulta que las intensidades de los flujos de neutrones disponibles en la práctica son relativamente bajas, mientras que las intensidades de la radiación de rayos X que se pueden conseguir son muy altas. Por este motivo, la determinación precisa de estructuras se puede hacer de mejor manera con rayos X.

En resumen, con la utilización de rayos X se obtiene información de cierta naturaleza acerca de estructuras microscópicas de cristales, mientras que con neutrones se puede obtener información de otra naturaleza como los movimientos de los átomos que componen al cristal. Asimismo, ciertas estructuras no se pueden determinar con facilidad con la radiación X y si con neutrones y viceversa. Lo ideal es, entonces, utilizar tanto rayos X como neutrones para determinar propiedades estructurales de cristales, ya que así se complementan las informaciones obtenidas.

NOTAS

[1](#) Véase, por ejemplo. E. Braun, *op. cit.*, capítulo IX.

[2](#) *Ibid*, capítulo XII.



X. FUENTES DE NEUTRONES

ANTES de examinar la forma en que se usan los neutrones para extraer información sobre las características microscópicas de las sustancias, hablaremos de cómo se los puede obtener y cómo formar un haz de ellos.

Recordemos que los neutrones atómicos deben ser la fuente primaria de neutrones. ¿Cómo podemos sacar a los neutrones de los núcleos?

Para poder entender el mecanismo en que se basan las fuentes de neutrones, hablaremos primero, de manera breve, acerca de las reacciones nucleares.

Como se mencionó en el capítulo VIII, algunos isótopos de ciertas sustancias no son estables. Esto tiene como consecuencia que el núcleo correspondiente se rompe en varios fragmentos. Al desprenderse estos fragmentos se dice que el núcleo decae o se desintegra. Ahora bien, cuando un núcleo se desintegra se transforma en otro núcleo ya que, en general, pierde protones. Hacemos notar que esta desintegración es espontánea. Por ejemplo, el núcleo de uranio, que tiene 92 protones, no es estable; al romperse se emiten dos partículas: una de ellas, llamada partícula alfa (α) y otra, un núcleo del elemento torio. La partícula alfa está compuesta de dos protones y de dos neutrones, por lo que la otra partícula debe tener $92-2 = 90$ protones. Un núcleo con este número de protones corresponde al torio. Vemos entonces que al desintegrarse un núcleo se transforma en otro núcleo. De esta manera un elemento químico se transforma en otro (el viejo sueño de los alquimistas al fin realizado). Se escribe esta reacción como sigue:



Este tipo de transformaciones en los núcleos atómicos se llama *reacción nuclear*. Como consecuencia de esta reacción nuclear el uranio se transmuta en torio. Además de la desintegración, existen también otros tipos de reacciones nucleares.

Cuando una partícula microscópica choca con el núcleo de un átomo puede ocurrir que después de la colisión salgan partículas completamente distintas a las que iniciaron la colisión. Este proceso es otro tipo de reacción nuclear.

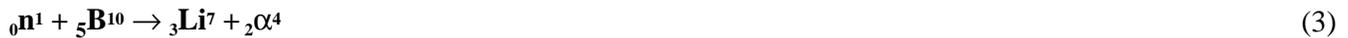
Las reacciones nucleares son análogas a los procesos que ocurren entre átomos o moléculas y que dan lugar a reacciones químicas. La diferencia es que ahora los procesos ocurren en núcleos atómicos en lugar de ocurrir en átomos o moléculas.

Las colisiones entre partículas que dan lugar a reacciones nucleares se pueden lograr bombardeando núcleos de átomos con otras partículas. Por ejemplo, si se bombardea nitrógeno con partículas alfa.



se obtiene un núcleo de oxígeno y un protón.

Otro ejemplo sería bombardear un núcleo de boro con un neutrón. En este caso se obtiene un núcleo de litio y una partícula alfa



Otro ejemplo ocurre cuando se bombardea uranio con una partícula alfa. Como resultado de esta reacción nuclear se obtiene un núcleo de plutonio y un neutrón:



Obsérvese que este es un ejemplo de una reacción nuclear en la que se obtiene como producto un neutrón. Hemos de mencionar que existen otras reacciones nucleares en las que también se obtienen neutrones.

En las reacciones nucleares que hemos mencionado se ha determinado en cada caso, explícitamente, qué isótopo es el bombardeado. Esto es muy importante porque si se cambia el isótopo, aunque sea del mismo elemento químico, el resultado de la reacción será, en general, distinto.

Un caso muy interesante y de suma importancia ocurre al bombardear núcleos de uranio con neutrones. ¿De dónde se pueden sacar estos neutrones para usarlos como proyectiles sobre los núcleos de uranio? Pues, simplemente, estos neutrones pueden ser los que se obtienen de reacciones nucleares cuyos productos sean neutrones y que ejemplificamos en la reacción (4). El proyectil incidente en esta reacción nuclear es una partícula alfa, que puede ser la que emite espontáneamente un núcleo de uranio, como se ve en la reacción nuclear (1) que mencionamos arriba.

En resumen, las partículas alfa que se emiten de la desintegración espontánea del ${}_{92}\mathbf{U}^{238}$ [véase la reacción (1)] se hacen incidir sobre otros núcleos de ${}_{92}\mathbf{U}^{238}$ [véase la reacción (4)]. El resultado es que se obtienen neutrones. Esta sería una manera de sacar neutrones de núcleos del átomo.

Por otro lado, existen en la naturaleza, al menos, dos isótopos de uranio. Ambos tienen en sus núcleos 92 protones y 92 electrones, que los hacen uranio. Uno de los isótopos tiene en su núcleo 146 neutrones, mientras que el otro tiene 143. De esta forma, uno de ellos tiene $92 + 146 = 238$ partículas en el núcleo, mientras que el otro tiene $92 + 143 = 235$ partículas en el núcleo. Al primero se le llama uranio 238 (mismo que apareció en las reacciones nucleares que mencionamos arriba) y al otro, uranio 235. Se denotan como ${}_{92}\mathbf{U}^{238}$ y ${}_{92}\mathbf{U}^{235}$, respectivamente. Resulta que en una muestra cualquiera de uranio el isótopo 238 es muchísimo más abundante que el 235.

Ahora bien, si un neutrón lento (obtenido de alguna reacción nuclear) choca con un núcleo de \mathbf{U}^{235} , este núcleo se divide en otros dos núcleos: uno de bario y otro de kriptón. Es decir, el núcleo de uranio se parte transformándose en otros dos núcleos. Al mismo tiempo, también se liberan tres neutrones. Esta reacción nuclear se puede escribir como



Una reacción nuclear como la que acabamos de mostrar se llama *fisión nuclear*: proceso en el que un núcleo se fragmenta en dos o más núcleos.

En la reacción de fisión del núcleo de uranio de arriba resulta que la masa de las partículas antes de la reacción NO es igual a la masa de las partículas después de la reacción. Después de la reacción, la masa

total es menor que la que había antes de la reacción. ¿Qué ocurre con la masa que se pierde? Según la teoría de la relatividad de Einstein, la masa que se pierde se transforma en energía. Además, resulta que esta energía, llamada nuclear pues proviene del núcleo, es extraordinariamente grande. Es justamente esta energía la que se puede utilizar para diversos fines. Uno de ellos es, por ejemplo, transformarla en energía eléctrica.

Por otro lado, notamos que en la reacción nuclear (5) de fisión del uranio 235 se emiten varios neutrones; es decir, por cada neutrón incidente aparecen más de un neutrón. Imaginemos ahora que cada uno de estos neutrones que salen de la reacción chocaran con otros tres núcleos de uranio 235. Como consecuencia, estos tres núcleos de uranio se fisionarían, emitiendo cada uno de ellos, a su vez, energía y tres neutrones. Ahora tendríamos nueve neutrones en lugar de los tres originales. Si se permite que los neutrones que se producen en cada reacción de fisión de uranio incidan sobre otros núcleos de uranio, nos damos cuenta de que se liberará una cantidad muy grande de energía nuclear, así como un buen número de neutrones. A este proceso se le llama Una *reacción en cadena* (Figura 23).

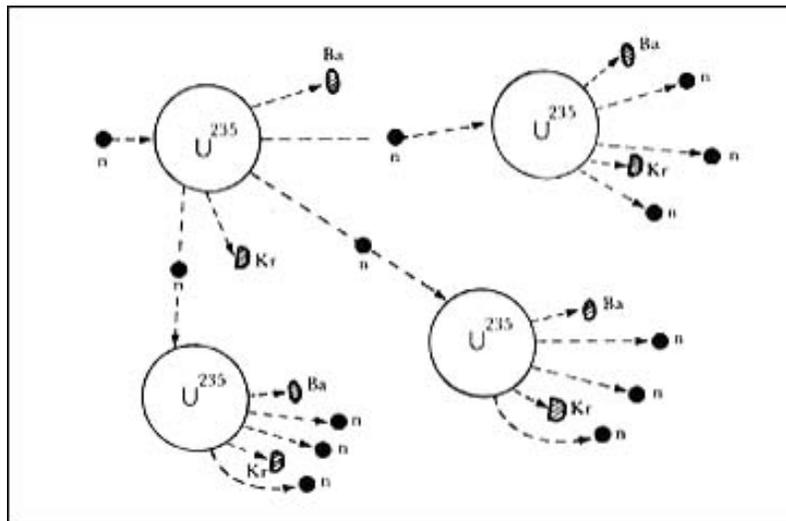


Figura 23. Esquema de una reacción en cadena en la que cada núcleo de U²³⁵ se fisiona generando energía y produciendo tres neutrones. Este proceso constituye una fuente tanto de energía como de neutrones.

Si en una muestra de uranio 235 se dejara que todos los neutrones obtenidos en cada reacción fisionaran otros núcleos de uranio, en poco tiempo se liberaría una cantidad tan grande de energía, que ocurriría una explosión. Esto es lo que justamente pasa en una bomba atómica.

Por otro lado, si se controla la reacción en cadena, permitiendo que por cada núcleo de uranio solamente un neutrón de los que salen fisione a otro núcleo de uranio absorbiendo de alguna manera los otros neutrones, entonces se liberará mucha energía pero no habrá explosión. Un aparato que funciona de esta manera es un reactor nuclear. El control se logra por ejemplo, introduciendo barras de cadmio que absorben neutrones.

En un reactor nuclear hay, por lo tanto, una gran cantidad de neutrones. Cierta cantidad de estas partículas se pueden guiar, por medio de tuberías adecuadamente diseñadas, hacia el exterior, a lo que se llama un puerto del reactor, logrando así un haz de neutrones disponible para lo que se ofrezca. De esta manera vemos que un reactor nuclear es una fuente de neutrones que ha sido utilizada para estudiar estructuras y propiedades microscópicas de diversas sustancias. En el siguiente capítulo examinaremos con detalle la manera como esto se hace.

Indice



XI. ESPECTROMETRÍA DE NEUTRONES

LA ESPECTROMETRÍA de neutrones es una técnica experimental para determinar, por medio de neutrones, ciertas propiedades microscópicas de sustancias tanto cristalinas como de otros tipos, por ejemplo líquidos. Para ello es necesario, en primer lugar, disponer de una fuente de neutrones (véase el capítulo anterior). Usando como fuente un reactor nuclear existen, por lo menos, dos técnicas para analizar las características de una estructura: la de tiempo de vuelo y la del monocromador de cristal.

En primer lugar, para ambas técnicas se requiere determinar la longitud de onda de los neutrones (véase el capítulo IX) que van a incidir sobre la muestra que se va a analizar. Esto mismo ocurre al usar radiación X. Para este último caso, se puede lograr un haz de una sola longitud de onda por medio de técnicas relativamente sencillas. Es cuestión de controlar adecuadamente el voltaje de operación de un tubo de rayos X para obtener la longitud de onda deseada.

Para el caso de neutrones, éstos se hacen salir del reactor nuclear a través de un tubo largo y angosto, llamado *colimador*. De esta manera se obtiene un haz de partículas que se mueven todas prácticamente en la misma dirección. Sin embargo, este haz colimado contiene partículas con muchísimas energías. Para extraer de este haz otro que contenga solamente partículas de la misma energía, se utilizan dos técnicas:

i) *Tiempo de vuelo*. Una versión muy común es construir dos discos, llamados de Fermi, de la siguiente manera: cada disco se forma de una sucesión de capas de dos metales, cadmio y aluminio (Figura 24). El cadmio absorbe neutrones, mientras que el aluminio es prácticamente transparente a ellos. Los dos discos giran al unísono alrededor de un eje perpendicular al haz de neutrones (Figura 25). Las partículas pasarán el primer disco, el de la izquierda en la figura, solamente cuando las capas sean paralelas a la dirección del rayo incidente. El segundo disco, separado del primero a una distancia conocida, usualmente de varios metros, gira junto con el primero, y a una diferencia de inclinación apropiada. Así, el primer disco permite el paso de neutrones de muchas velocidades. De todas estas partículas solamente aquellas que tengan un valor preciso de la velocidad lograrán llegar al segundo disco justamente en el instante en que éste tenga sus capas paralelas a la dirección del movimiento de la partículas y, en consecuencia, estos neutrones se transmitirán. Los neutrones que tienen otras velocidades llegarán al segundo disco pero lo encontrarán con sus capas formando un ángulo con la dirección de movimiento, por lo que cruzarán las capas de cadmio y serán absorbidos.

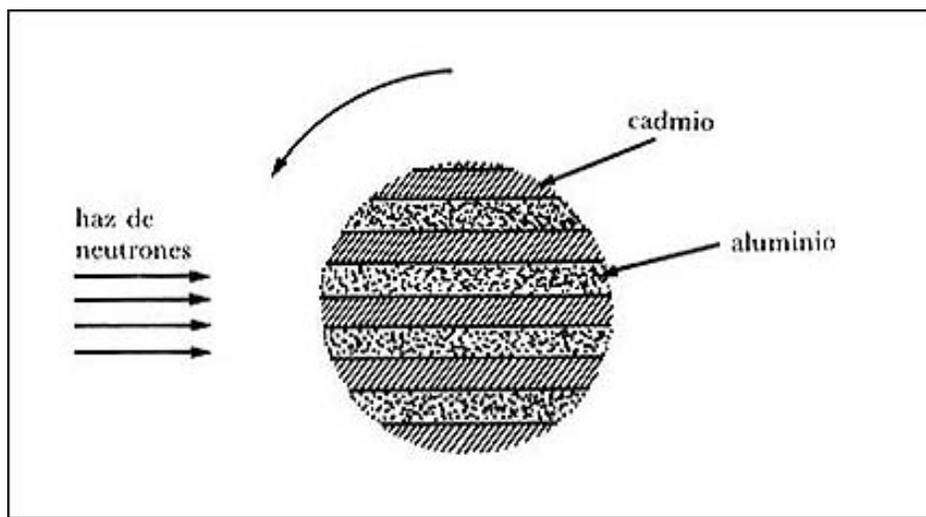


Figura 24. Estructura de los discos que componen el sistema de espectrometría de tiempo de vuelo.

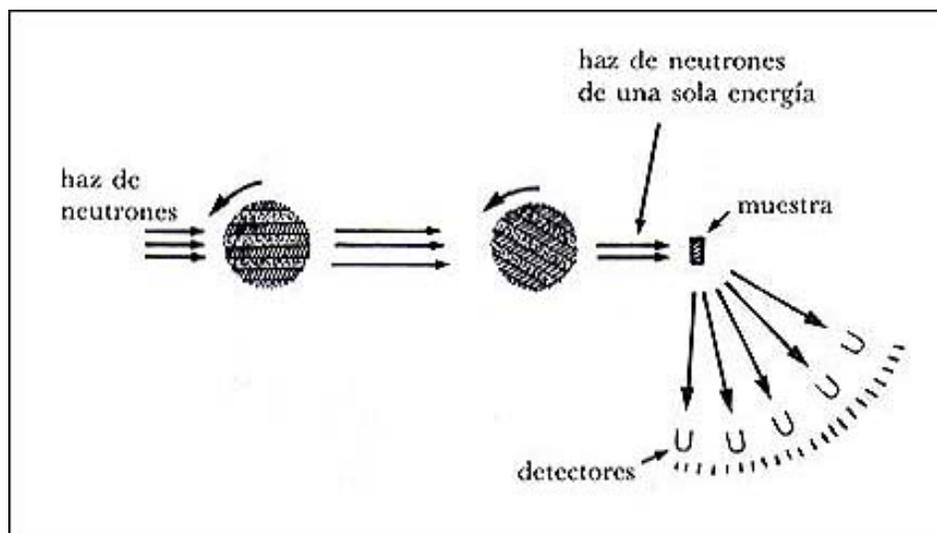


Figura 25. Esquema de un espectrómetro de tiempo de vuelo para el análisis microscópico de una muestra.

De esta manera, las partículas que cruzan el segundo disco e inciden sobre la muestra tienen todas la misma velocidad, y por lo tanto, la misma energía.

Escogiendo adecuadamente la distancia entre los discos así como la frecuencia con que deben girar, se puede lograr que salgan del lado derecho de la figura 26 neutrones con la energía que nos interesa. Este aparato es, de hecho, un filtro que escoge del haz incidente neutrones que tengan la energía deseada; se le llama *monocromador* [1](#)

Se construye el monocromador de manera que los neutrones que seleccione tengan longitudes de onda de varios angstrom, para poder lograr el fenómeno de difracción, ya que las distancias entre las partículas de los cristales son de ese orden de magnitud. De esta forma se logra un haz de neutrones lentos.

Cuando los neutrones inciden sobre la muestra, interaccionan con sus núcleos, dependiendo de sus características, cambian su energía. Además, si los neutrones tienen longitud de onda de angstroms, entonces se difractan, es decir, cambian de dirección. Las partículas que salen de la muestra se pueden detectar colocando, a cierta distancia (Figura 25) un conjunto de detectores de neutrones.

Conociendo el tiempo que tardan los neutrones en llegar al detector se puede determinar también su energía. Este tiempo se puede medir por medios electrónicos. Mientras más tardan, menor será su velocidad y menor su energía. Midiendo los diferentes tiempos que tardan los neutrones en llegar al detector, se puede saber cuántos neutrones de cada energía llegan al detector, y como se conoce la energía de los neutrones incidentes sobre la muestra, se puede determinar el cambio de energía que indujo la muestra sobre los neutrones. Esto se hace para un ángulo de dispersión fijo. Es posible seguir este mismo procedimiento para diferentes ángulos de dispersión, ya sea repitiendo el experimento con un solo detector o haciendo las mediciones simultáneamente, colocando un conjunto de detectores en distintos ángulos.

Como se puede apreciar, en esta técnica lo que se mide es el tiempo que tardan las partículas en ir de un disco al otro, así como el tiempo que tardan los neutrones en ir de la muestra al detector. Por este motivo se llama técnica de tiempo de vuelo.

Conociendo las intensidades de los neutrones dispersados en distintos ángulos y con diferentes cambios de energía, se puede encontrar el patrón de difracción que produce la estructura cristalina. En consecuencia, es posible determinar las características geométricas o estáticas de la estructura. Asimismo, con esta información se pueden determinar otras propiedades dinámicas, no geométricas, de la estructura. Esto lo veremos en el siguiente capítulo.

Hacemos notar que con este procedimiento se están realizando dos actividades. En primer lugar, la selección de todos los neutrones que salen de la fuente, de un haz que tenga una energía determinada. En segundo lugar, se miden las energías de los neutrones que salen de la muestra con el fin de determinar qué cambio de energía experimentaron.

ii) *Espectrómetro de triple eje*. Otro método es utilizar cristales para seleccionar, en primer lugar, la energía requerida y, posteriormente, analizar la energía de los neutrones que salen de la muestra. Estos cristales se escogen de tal forma que tengan estructuras adecuadas para realizar las funciones deseadas. Se utilizan con mucha frecuencia cristales de germanio.

El arreglo usado se muestra en la figura 26. El haz colimado que sale del reactor nuclear se hace incidir sobre un cristal, llamado *monocromador*, que dispersa neutrones en un ángulo determinado con una energía determinada. Para ello se usa la difracción de los neutrones por el cristal. Sobre este cristal inciden neutrones que tienen muchos valores de sus longitudes de onda, es decir que tienen muchas energías. En un ángulo dado se difractan solamente neutrones de una sola longitud de onda. Como la longitud de onda está relacionada con su energía, en la dirección dada por dicho ángulo salen entonces neutrones de una sola energía. Es decir, a lo largo de la línea MN emergen neutrones de una energía bien definida.

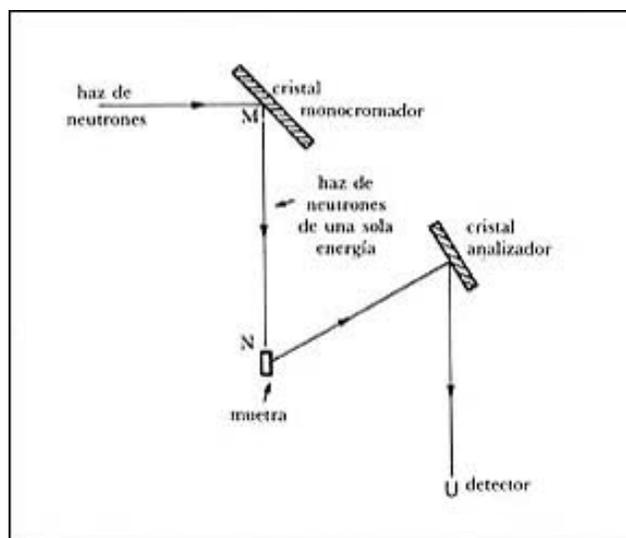


Figura 26. Esquema de un espectrómetro de neutrones de tres ejes.

Este haz ya monoenergético se hace incidir sobre la muestra, que dispersa los neutrones en muchos ángulos y en cada dirección hay partículas de muchas energías.

El siguiente paso es determinar las energías de los neutrones que salieron de la muestra, en cada dirección. Esto se hace por medio del otro cristal, llamado *cristal analizador*.

Por medio del analizador se determinan las energías que contiene el haz que sale en cada dirección. Nuevamente se vuelve a usar el fenómeno de difracción. Las partículas que salen del analizador tienen una sola energía, y su número se llega a conocer por medio del detector mostrado en la figura.

Para efectuar el análisis completo por medio de esta técnica se requiere girar tanto el cristal monocromador, como la sustancia bajo estudio y el cristal analizador. Cada uno de estos elementos gira alrededor de un eje perpendicular al plano que se muestra. Por ello se llama a este arreglo un espectrómetro de neutrones de triple eje.

Analizando las intensidades de los elementos en cada dirección se puede, al igual que con la técnica de tiempo de vuelo, determinar la estructura de la muestra, que da lugar al patrón de difracción obtenido en el experimento. Como se verá en el siguiente capítulo, también es posible encontrar otras características microscópicas de la muestra.

En algunos laboratorios se han combinado diversos elementos de las dos técnicas, con el fin de mejorar los resultados experimentales.

NOTAS

1 La palabra monocromático quiere decir de un solo color. En el caso de un haz luminoso, a un color le corresponde una longitud de onda y por tanto una energía determinada. Lo mismo ocurre para partículas: una energía corresponde a una longitud de onda.



XII. ¿QUÉ OTRA INFORMACIÓN SE PUEDE OBTENER?

EN ALGUNOS de los capítulos anteriores ya vimos que con difracción de rayos X o de neutrones es posible encontrar tanto la estructura como las distancias características de un cristal o de una molécula. Además de estas propiedades, hay otras que también se pueden determinar utilizando la difracción de neutrones por alguna de las técnicas arriba descritas.

Espectro de frecuencias

Una propiedad de los cristales que resulta ser de suma importancia está relacionada con las vibraciones que realizan los átomos que los componen. Hemos de aclarar lo siguiente: al hablar de la estructura de un cristal nos estamos refiriendo a un conjunto de puntos en los que se encuentran los átomos que lo componen. Así, por ejemplo, en el caso del cloruro de sodio (sal común) la estructura es un cubo. Hemos dicho que los átomos de cloro y de sodio se encuentran en ciertos puntos del cubo (Figura 20(a)). En realidad lo que ocurre es que los átomos no se encuentran fijos, inmóviles en estos puntos del cubo, sino que realizan ciertos movimientos, más específicamente, oscilan alrededor de estos puntos. La amplitud de la oscilación es pequeña comparada con la longitud del lado del cubo. De esta manera tiene sentido el hecho de que cada átomo esté localizado alrededor de un punto. Si la amplitud de la oscilación no fuese pequeña, entonces ya no se podría asociar un punto de una red con un átomo y, de hecho la sustancia ya no sería cristalina. La amplitud de las oscilaciones de los átomos depende de la temperatura a la que se encuentre la muestra. Mientras mayor sea esta temperatura, mayor será también la amplitud con la que oscilen.

Al oscilar los átomos alrededor de los puntos de la red lo hacen con cierta frecuencia. Ahora bien, dado que en un cristal hay muchísimos átomos, las frecuencias de oscilación también son muy variadas. Hay muchísimos valores de estas frecuencias. Una cantidad que podemos considerar es el número de oscilaciones en el cristal para cada valor de la frecuencia. Es decir, saber cómo están repartidas las frecuencias en un cristal dado. A esta cantidad se le llama técnicamente espectro de frecuencias de la sustancia.

Cada cristal tiene su espectro de frecuencias que depende de la estructura que tenga, así como del tipo de átomos de que esté compuesto. Diferentes cristales tienen distintos espectros de frecuencias. Además, resulta que muchas propiedades termodinámicas del cristal dependen del espectro de frecuencias; podemos citar por ejemplo, cantidades como el valor de su presión, el calor específico, etcétera.

Por medio de la espectrometría de neutrones es posible encontrar el espectro de frecuencias de un cristal. Los neutrones de longitud de onda de varios angstrom tienen una energía bastante pequeña de manera que su velocidad también es relativamente pequeña; por lo tanto, al pasar por el cristal e interactuar con los núcleos de sus átomos, el neutrón tiene tiempo suficiente para "darse cuenta" de que el núcleo está oscilando y registrar este fenómeno 1. Por medio de la interacción del neutrón con el núcleo se incorporan las características de las oscilaciones en el cambio de energía que experimenta el neutrón.

Al interactuar neutrones con núcleos que oscilan a diferentes frecuencias, cambiarán su energía de maneras distintas. Como ya se dijo, es este cambio de energía del neutrón el que se puede medir por medio de las técnicas descritas anteriormente. En consecuencia, es posible encontrar así el espectro de frecuencias de un cristal.

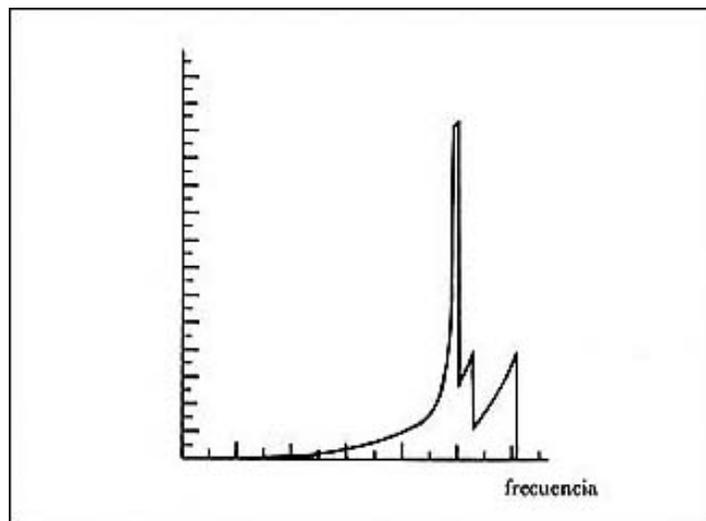


Figura 27. Espectro de frecuencias del sodio, obtenido por medio de espectrometría de neutrones.

En la figura 27 se muestra el espectro de frecuencias del sodio. Podemos darnos cuenta de que este espectro tiene ciertos máximos. Esto quiere decir que hay valores de la frecuencia para los cuales hay mayor número de oscilaciones. O, dicho en otras palabras, un buen número de oscilaciones en la red se lleva a cabo con estos valores de la frecuencia. La forma de la gráfica así como las posiciones de estos máximos depende de la estructura cristalina del sodio. Otros cristales con otras estructuras cristalinas distintas a la del sodio tienen espectros de frecuencias que tienen forma diferente a la mostrada en la figura 28.

NOTAS

1 Por supuesto que al oscilar el átomo, su núcleo oscila junto con él.



XIII. APLICACIÓN A LÍQUIDOS

COMO se vio en capítulos anteriores el estado cristalino se caracteriza por tener un alto grado de orden interno. Este se da debido a la repetición prácticamente idéntica del arreglo de los átomos del cristal. Esta repetición ocurre a lo largo de distancias macroscópicas, del orden de centímetros o aun de metros. Esto significa que, desde el punto de vista microscópico, hay orden a largo alcance. Este concepto implica lo siguiente: la celda unitaria, o sea el "ladrillo" básico con el que se construye el cristal, se repite muchos miles de millones de veces a lo largo de toda la sustancia.

Una consecuencia del orden a largo alcance que existe en un cristal es que si movemos un extremo del cristal, casi instantáneamente se mueve su otro extremo. Se dice que hay una *correlación de largo alcance*. Lo anterior significa que el átomo de un extremo, el que recibió nuestro movimiento, está íntimamente ligado con el átomo que se encuentra en el otro extremo del cristal, de manera tal que al mover el primero, el segundo a pesar de encontrarse muy lejos de él también "siente" la acción que aplicamos nosotros al cristal. Estos dos átomos no son independientes. Uno de ellos será afectado por lo que haga el otro.

El orden que muestra una sustancia cristalina no existe en los líquidos, los gases, los vidrios y otra clases de sustancias amorfas. Nos dedicaremos primero a hablar de algunas características de los líquidos.

Se han realizado experimentos en los cuales se hace incidir sobre un líquido un haz de rayos X o de neutrones. Resulta que el líquido sí difracta estas radiaciones. En cierta forma lo que ocurre es algo análogo a lo mostrado en la figura 15, donde se ve la difracción de luz por una rejilla en dos dimensiones en la cual las rendijas no están ordenadas. En este caso sí hay difracción.

El patrón de difracción que produce un líquido es muy distinto al producido por un cristal. De un análisis muy detallado de estos patrones de difracción se ha podido inferir que el líquido es una sustancia que tiene cierto orden. En efecto, resulta que en la cercanía (hablando en términos microscópicos) de un átomo hay cierta estructura, que a medida que se va uno alejando de él se va perdiendo (véase la figura 28). Esto quiere decir que en un líquido existe únicamente orden a corto alcance. Este alcance corresponde sólo a distancias de unos cuantos angstrom.

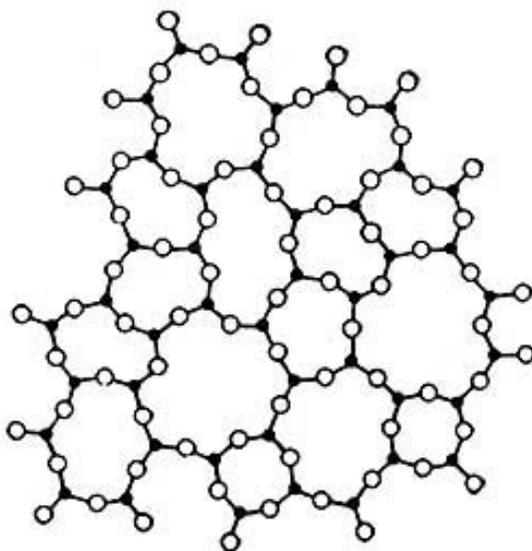


Figura 28. Esquema de la estructura de un líquido.

Cuando hablamos de orden a largo alcance nos referimos a la existencia de regularidad a través de distancias macroscópicas, digamos del orden de centímetros. Recuérdese que un centímetro es igual a cien millones de angstrom. Cuando decimos que hay orden de corto alcance, éste solamente se extiende a lo

largo de distancias de unos cuantos angstrom (10^{-8} cm), o sea que es un orden microscópico.

Debido a que en un líquido no hay orden a largo alcance, entonces tampoco hay seguridad de que a cierta distancia de un átomo esté colocado otro átomo, como ocurre en un cristal. A causa de ello solamente se puede describir la estructura de un líquido en términos de la probabilidad de encontrar un átomo a cierta distancia de otro. Esta probabilidad queda dada por una cantidad que se llama la *función de correlación de posiciones*. La correlación es una medida del grado de dependencia de un átomo con otro colocado a cierta distancia. Esta cantidad es tal que si su valor es distinto a uno, entonces hay correlación entre dos átomos, es decir, en este caso los átomos no son independientes uno del otro. Si su valor es igual a uno, entonces los dos átomos son independientes, es decir, no están correlacionados.

Por medio de la espectrometría de neutrones se ha podido encontrar la función de correlación en diferentes líquidos. En la figura 29 se muestra, por ejemplo, la función de correlación de posiciones para el argón líquido a una temperatura de -125°C , 1 como función de la distancia entre dos átomos. El argón, aun en el estado líquido, no se agrupa en moléculas por lo que únicamente se encuentra con un solo átomo.

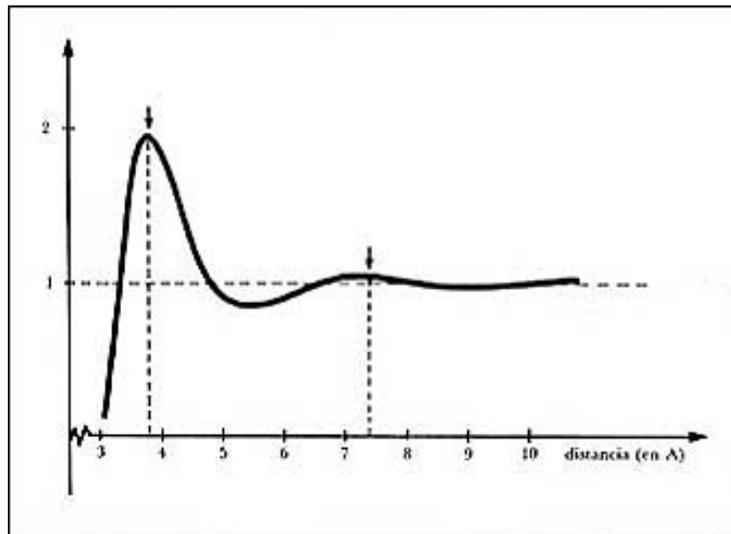


Figura 29. Función de correlación de posiciones del argón líquido a -125°C . Los picos muestran una estructura a corto alcance.

Nos damos cuenta de que esta gráfica tiene varios picos: el primero está centrado a la distancia de 3.8 \AA y el segundo a 7.4 \AA . A medida que la distancia entre los átomos aumenta, después del segundo pico, la correlación oscila muy levemente y se acerca paulatinamente al valor uno. Estos resultados significan que, efectivamente, hay una correlación de corto alcance. A una distancia de 3.8 \AA de cualquier átomo del líquido hay una probabilidad muy alta de que haya otro átomo. Hay también una probabilidad menor, de que haya otro átomo a una distancia de 7.4 \AA del primer átomo mencionado. Este hecho es, por decirlo así, una herencia de la estructura cristalina que tiene la sustancia cuando, habiendo solidificado, forma un cristal. Sin embargo, al aumentar la distancia entre los átomos ya casi no hay probabilidad de encontrar otro átomo a una distancia mayor. De hecho, para distancias de 8 \AA o mayores, como se ve en la gráfica, los átomos son prácticamente independientes. Es decir, ya no hay ni siquiera restos de algún orden en la sustancia. El orden en el argón líquido es entonces de corto alcance ya que se mantiene solamente hasta distancias de alrededor de 8 \AA , que es una distancia microscópica.

Otro ejemplo interesante es la función de correlación de posiciones para el agua a una temperatura de 20°C , que se muestra en la figura 30. A diferencia del caso anterior en que tratamos un líquido de un solo átomo, ahora tenemos un líquido compuesto de moléculas, H_2O . La gráfica muestra dos picos muy intensos a las distancias de 1 \AA y de 2.9 \AA . Asimismo, hay otros dos picos leves a las distancias de 4.5 \AA y de 7 \AA . Veamos lo que significan estos picos.

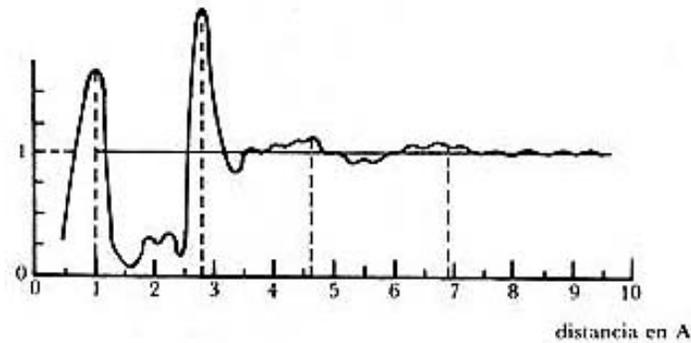


Figura 30. Función de correlación de posiciones de agua a 20°C. El primer pico da la distancia entre los átomos de oxígeno y de hidrógeno dentro de la molécula. Los otros picos muestran estructura microscópica entre las moléculas de agua.

El pico en 1 Å representa la distancia que hay entre cada átomo de hidrógeno y el de oxígeno en la molécula de agua. Es decir, es la distancia dentro de la molécula.

El pico a la distancia de 2.9 Å representa la distancia entre dos moléculas de agua. Este segundo pico implica que hay un orden de corto alcance. Los otros dos picos a distancias mayores indican un remanente de la estructura del agua cristalina, o sea del hielo. Por lo tanto, se puede decir que el agua en cuestión tiene una estructura como sigue: alrededor de una molécula hay tres capas de moléculas y cualquier molécula situada a distancias mayores de 8 Å es independiente, es decir, a distancias de 8 Å se tiene ya un líquido sin estructura.

Una sustancia muy interesante es el vidrio. Se ha estudiado su estructura microscópica y resulta que el vidrio no es un cristal. Esto quiere decir que no tiene una estructura microscópica ordenada y repetitiva. Su estructura es amorfa y muy parecida a la que tienen los líquidos. Se ha obtenido experimentalmente la función de correlación para vidrios y resulta sorprendentemente parecida a la de los líquidos. Se puede decir que el vidrio es un líquido que se ha "congelado" y que sus moléculas no tuvieron tiempo suficiente para ordenarse y formar un cristal. De hecho, se le puede también describir como un líquido que tiene una viscosidad extremadamente alta por lo que no puede fluir como lo hace un líquido común y corriente.

Lo anterior significa que no todas las sustancias sólidas son cristales. Existen también sólidos que son amorfos. Sus átomos o moléculas no forman una estructura regular, ordenada o repetitiva de largo alcance.

NOTAS

1 A la temperatura ambiente, digamos 20°C, y la presión de la atmósfera, el argón no es líquido sino gaseoso.



XIV. COMENTARIOS FINALES

EN EL desarrollo de nuestro relato se expuso la forma en la que los científicos han podido encontrar diferentes propiedades microscópicas de sustancias cristalinas, líquidos, vidrios, etc., aplicando conocimientos obtenidos de varios campos de la física. Este trabajo detectivesco ha requerido del concurso de mucha gente a partir del momento en que se hicieron las primeras preguntas sobre cómo estaba construida la materia. La labor que se llevó a fin fue una inferencia inteligente, en la que se ataron muchos cabos para poder llegar a conclusiones concretas. La base esencial por la que ha tenido éxito es que la estructura microscópica de una sustancia, de alguna manera, se desenmascara al entrar en interacción con ondas o partículas. El resultado de esta interacción es que al salir estas ondas o partículas de la muestra llevan contenida información acerca de las características de las sustancias que se desea analizar. Así por ejemplo, hemos visto que la interacción de rayos X con los átomos o moléculas que componen un cristal da lugar a un patrón de difracción que contiene la información acerca de la estructura geométrica en que se hallan dispuestos dichos átomos o moléculas en la muestra bajo estudio.

La idea de hacer incidir haces ya sea de rayos X o de neutrones sobre una muestra consiste en meter en la sustancia sondas para que "vean" lo que hay dentro de ella. Es justamente la información que llevan a su salida la que debemos extraer y darle sentido. Por supuesto que la sonda que se introduzca debe ser la apropiada para que se pueda registrar el fenómeno que se quiere analizar. Como se hizo ver ampliamente, de todas las posibles ondas electromagnéticas son justamente los rayos X las sondas apropiadas para los propósitos de encontrar estructuras. Si se usan neutrones, los idóneos son los lentos.

Nos hemos dedicado a hablar acerca de los principios físicos en que se basan los científicos para obtener las conclusiones sobre las estructuras y otras características de las sustancias. Hemos de añadir que una vez entendidas estas bases y convencidos de su exitosa aplicación, se han desarrollado técnicas rutinarias para la identificación de estructuras de sustancias. Una vez que se conocen los patrones de difracción por rayos X de cristales, se recopilan sistemáticamente en algo análogo a tablas de referencia. Así, al analizarse una muestra cuya estructura es desconocida, se compara su patrón de difracción por rayos X con los ya conocidos y así es como se puede saber cuál es la estructura de la muestra. De esta manera se tiene una especie de catálogo de "huellas digitales" con las que se puede identificar estructuras de sustancias. Este tipo de identificación tiene muchas aplicaciones tanto científicas como industriales.

Hemos llegado al final de nuestra exposición en la que se ha mostrado una bella experiencia de la historia de la ciencia. Esperamos que el lector haya tenido una placentera y fructífera lectura, que le haya interesado y le sirva de estímulo para continuar informándose sobre estos temas científicos.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de junio de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 2000 ejemplares.

La Ciencia para Todos

es una colección coordinada editorialmente

por *Marco Antonio Pulido*

y *María del Carmen Farías.*



Nos dice el doctor Eliezer Braun en *Arquitectura de sólidos y líquidos* que en nuestra vida diaria escuchamos hablar de algunos ingenios producto de la más refinada tecnología moderna, como los transistores y los "chips" —módulos electrónicos integrados que constituyen uno de los componentes básicos de las computadoras—, contruidos de silicio y germanio. De estas sustancias se menciona, incluso, sus características microscópicas, por ejemplo, que sus átomos están colocados en cierta forma. Ahora bien, si incluso con los microscopios más potentes resulta imposible la observación de átomos y moléculas ¿cómo se sabe que poseen las características que se les atribuyen?

Los científicos nos dice Braun, han realizado una tarea detectivesca en el mejor estilo de Sherlock Holmes, para poder llegar a deducir las características microscópicas de los cuerpos. Y uno de los principales propósitos de este libro es hacer el relato de cómo ha sido posible determinar la estructura microscópica de varios tipos de sustancias que, como los criminales avezados eluden a la simple investigación química la que, por otra parte, tiene la desventaja de destruir al objeto de su investigación.

Las técnicas de investigación han mejorado, por supuesto, y el doctor Braun nos habla de la forma como los rayos X se usan para determinar las estructuras o microscópicas; para el mismo fin se emplean los rayos formados por haces de neutrones. Con estas, digamos, armas, se ha podido descubrir características diferentes de los movimientos que realizan las partículas microscópicas en el cristal, en los líquidos y, sorprendentemente, en sustancias amorfas, es decir, las que no tienen estructura cristalina, como los vidrios. Con tales recursos a su disposición, los científicos han establecido una especie de "catálogo de huellas digitales" con el que pueden identificar numerosas estructuras de sustancias. Este tipo de identificación tiene muchas aplicaciones tanto científicas como industriales.

El doctor Braun es físico graduado en la UNAM. Se doctoró en la Universidad de Leiden, Holanda. Ha trabajado en la Universidad Libre de Bruselas, en el Centro Nuclear de Salazar, en la Universidad Autónoma de Puebla y en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Actualmente desarrolla labores docentes y de investigación científica en la UAM Iztapalapa. En 1978 se le otorgó el Premio de Ciencias de la Academia de la Investigación Científica.

