

¿QUÉ SON Y CÓMO SE PRODUCEN LOS RAYOS X?

En 1895, W. C. Roentgen descubrió que cuando electrones eran acelerados por un alto voltaje en un tubo al vacío y se dejaba que incidieran sobre una superficie de vidrio o de metal, a cierta distancia brillaban minerales fluorescentes y las películas fotográficas se velaban. Roentgen atribuyó estos efectos a un nuevo tipo de radiación (diferente a la de los rayos catódicos).

Esta radiación se encuentra entre las de mayor frecuencia del espectro electromagnético y tienen una energía del orden de 1 keV a 100 keV.

La producción de rayos X tiene lugar en el interior de un tubo de Coolidge, que está lleno de un gas a baja presión. A la vez éste se encuentra aislado por un estuche plomado.

En el diagrama podemos identificar las partes del tubo. **1** el cátodo, un filamento incandescente o fuente de electrones **2**, el foco **3**, el ánodo **4** y el espacio en el que se ha practicado el vacío **5**. El estuche de plomo que lo rodea presenta un diafragma **6**. Éste tubo va conectado a una fuente de alta tensión **7**, un amperímetro **8** y un voltímetro **9**. Esto da como resultado la producción de fotones X **10**.

La fuente de alta tensión produce la corriente eléctrica que pasa por la fuente de electrones, constituida por un filamento que al ser calentado genera una nube de electrones. De la variación de corriente depende la cantidad de rayos X producidos.

Los electrones se aceleran en función de la tensión aplicada en el interior del tubo entre el filamento (cátodo) y la pieza metálica (ánodo). De la variación de la tensión depende la calidad de los rayos X.

Los electrones acelerados chocan a gran velocidad contra la placa metálica (generalmente es una placa de un metal de número atómico Z elevado, uno de los más frecuentes es el tungsteno con $Z = 74$) y su energía cinética se transforma en fotones X mediante dos fenómenos diferentes: colisión (interacción entre un electrón del haz incidente y un electrón de un átomo del ánodo) y frenada (radiación producida por la desaceleración de un electrón incidente en las proximidades del núcleo de un átomo).

Siempre que una carga es acelerada, produce una radiación que, de acuerdo con la descripción cuántica aparecerá en forma de un fotón de energía cinética del electrón, es decir, $h\nu = K_i - K_f$

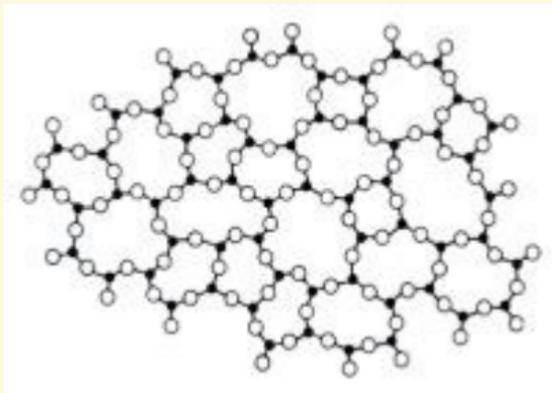
La energía cinética de los electrones en el cátodo es despreciable, por lo que un electrón al perder toda su energía en una sola colisión su energía cinética es $K = eV$ por lo que $h\nu = eV$ y teniendo que $\nu = c / \lambda$ podemos saber la longitud de onda de los rayos X generados a partir de la tensión como:

$$\lambda = \frac{hc}{eV}$$

El tubo se encuentra cerrado en un estuche plomado y sólo una ventana deja pasar los fotones de rayos X útiles.

ESTRUCTURA CRISTALINA

Existen 2 tipos de formaciones en la estructura de los materiales: Orden de corto alcance y orden de largo alcance. En el orden de corto alcance el arreglo espacial de los átomos o moléculas se extiende sólo a los vecinos más cercanos de éstos. A estas estructuras se les denomina estructuras no cristalinas. Ejemplos de estas estructuras son los vidrios, geles y recubrimientos por deposición de vapor. La siguiente imagen muestra un arreglo atómico en vidrio.



El orden de largo alcance es el arreglo espacial de los átomos o moléculas que se extiende por todo el sólido, este forma un patrón repetitivo que resulta en una red. Los materiales pueden diferenciarse entre sí por el tipo de red que posean. El tipo de red de un material depende del tamaño de los átomos o iones, y del tipo de enlace.

Al patrón geométrico que sigue una red de un material se le denomina estructura cristalina, y se define en función de su tamaño, forma y ordenamiento atómico.

Estructura cristalina de los materiales

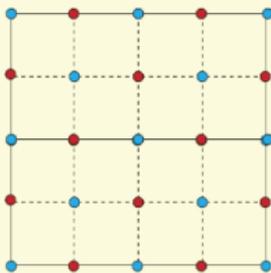
Los materiales sólidos se pueden clasificar de acuerdo a la regularidad con que los átomos o iones están ordenados uno con respecto al otro. Un material cristalino es aquel en que los átomos se encuentran situados en un arreglo repetitivo o periódico dentro de

grandes distancias atómicas; tal como las estructuras solidificadas, los átomos se posicionarán de una manera repetitiva tridimensional en el cual cada átomo está enlazado al átomo vecino más cercano. Todos los metales, muchos cerámicos y algunos polímeros forman estructuras cristalinas bajo condiciones normales de solidificación.

La celda Unitaria es el agrupamiento más pequeño de átomos que conserva la geometría de la estructura cristalina, y que al apilarse en unidades repetitivas forma un cristal con dicha estructura. La estructura cristalina de un sólido depende del tipo de enlace atómico, del tamaño de los átomos (o iones), y la carga eléctrica de los iones en su caso).

Existen siete sistemas cristalinos los cuales se distinguen entre sí por la longitud de sus aristas de la celda (llamados constantes o parámetros de la celda) y los ángulos entre los bordes de ésta. Estos sistemas son: cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrica (o trigonal), hexagonal, monoclinico y triclinico.

Las estructuras de los cristales que nos interesa analizar son conocidas como red cúbica de cara centrada, como ejemplo de estas estructuras tenemos el cloruro de sodio (NaCl), cada átomo de cloro y sodio están dispuestos de tal forma que se entrelazan uno con otro, pero nunca dos iguales.



Existen materiales con una estructura muy complicada y dependiendo de su orientación es posible medir distancias entre planos diferentes para cada orientación, cosa que para los cristales como el NaCl, KBr y KCl que tienen la estructura cúbica de cara centrada, no ocurre esto.

Ley de Bragg

Si un haz de rayos X incide sobre un cristal como el NaCl a un ángulo θ formado con el plano de la superficie del cristal y los rayos se reflejan en dos planos subsecuentes, como se ve en la figura los dos rayos pueden interferir destructivamente si la distancia adicional que el rayo 1 recorre es diferente de un número entero de longitudes de onda.

En la figura la distancia adicional es $s = d \sin\theta$, como se puede ver el rayo recorre dos veces la distancia s por lo tanto ocurrirá interferencia constructiva cuando se cumpla que: $m\lambda = 2d \sin\theta$, $m=1, 2, 3$. λ es la longitud de onda de los rayos incidentes y la ecuación recibe el nombre de ecuación de Bragg. Si se conoce la longitud de onda λ y el ángulo, podemos obtener el espacio entre planos de un cristal.

El primer máximo de intensidad del patrón de difracción ocurre cuando $m=1$, los siguientes máximos se encuentran para $m=2, m=3$, etc. Si despejamos $\sin\theta$ de la ecuación de Bragg tenemos:

$$\frac{m\lambda}{2d} = \sin\theta < 1$$

Donde el resultado de la división es menor que 1 debido a la restricción del seno por lo que cualquier λ no es buena para medir el espacio entre planos.

Para $m=3$, tendremos $\lambda < 2/3 d$. Como esperamos distancias de alrededor de 0.3nm, esto indicara que $\lambda < 0.2 \text{ nm}$, lo cual concuerda ya que las longitudes de onda utilizadas son de 0.138nm y 154nm.

Como la fuente emite dos longitudes de onda en la gráfica de la intensidad contra el ángulo, encontraremos picos correspondientes a cada longitud, esperamos en total 3 pares de picos en un recorrido de 5° a 60° para el ángulo θ correspondiente a $m=1,2$ y 3 .

Difracción de Bragg

La difracción de Bragg esta generalmente asociada con la difracción de rayos X por cristales donde las longitudes de onda son del orden de las distancias interatómicas en los sólidos (aprox. 1 Å).

Con la siguiente interacción y conociendo la ecuación de Bragg $2d \text{ Sen}\theta = n\lambda$, $d=0.282 \text{ nm}$, (la distancia entre los átomos de cristal) y modificando θ que es el ángulo con el que inciden los rayos, verifica que los ángulos a los cuales la interferencia es constructiva son:

$$\Theta_1=16, \Theta_2=33, \Theta_3=55 \text{ para } \lambda=0.154 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\Theta_1=14, \Theta_2=29, \Theta_3=47 \text{ para } \lambda=0.138 \times 10^{-9} \text{ m}$$