

Radiación electromagnética penetrante, con una longitud de onda menor que la luz visible, producida bombardeando un blanco generalmente de volframio con electrones de alta velocidad.

Los rayos X fueron descubiertos de forma accidental en 1895 por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen mientras estudiaba los rayos catódicos en un tubo de descarga gaseosa de alto voltaje. A pesar de que el tubo estaba dentro de una caja de cartón negro, Roentgen vio que una pantalla de platinocianuro de bario, que casualmente estaba cerca, emitía luz fluorescente siempre que funcionaba el tubo.

Tras realizar experimentos adicionales, determinó que la fluorescencia se debía a una radiación invisible más penetrante que la radiación ultravioleta. Roentgen llamó a los rayos invisibles rayos X por su naturaleza desconocida. Posteriormente, los rayos X fueron también denominados rayos Roentgen en su honor.

NATURALEZA DE LOS RAYOS X.

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm (1 nm o nanómetro equivale a 10^{-9} m). Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración.

Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como rayos X blandos; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma o incluso se solapan con ésta, se denominan rayos X duros. Los rayos X formados por una mezcla de muchas longitudes de onda diferentes se conocen como rayos X 'blancos', para diferenciarlos de los rayos X monocromáticos, que tienen una única longitud de onda.

Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos.

En el caso de la radiación de frenado o bremsstrahlung, los rayos X se producen por el frenado o deflexión de electrones libres que atraviesan un campo eléctrico intenso. Los rayos gamma, cuyos efectos son similares a los de los rayos X, se producen por transiciones de energía en el interior de núcleos excitados.

Los rayos X se producen siempre que se bombardea un objeto material con electrones de alta velocidad. Gran parte de la energía de los electrones se pierde en forma de calor; el resto produce rayos X al provocar cambios en los átomos del blanco como resultado del impacto.

Los rayos X emitidos no pueden tener una energía mayor que la energía cinética de los electrones que los producen. La radiación emitida no es monocromática, sino que se compone de una amplia gama de longitudes de onda, con un marcado límite inferior que corresponde a la energía máxima de los electrones empleados para el bombardeo. Este espectro continuo se denomina a veces con el término alemán bremsstrahlung, que significa 'radiación de frenado', y es independiente de la naturaleza del blanco.

Si se analizan los rayos X emitidos con un espectrómetro de rayos X, se encuentran ciertas líneas definidas superpuestas sobre el espectro continuo; estas líneas, conocidas como rayos X característicos, corresponden a longitudes de onda que dependen exclusivamente de la estructura de los átomos del blanco.

En otras palabras, un electrón de alta velocidad que choca contra el blanco puede hacer dos cosas: inducir la emisión de rayos X de cualquier energía menor que su energía cinética o provocar la emisión de rayos X de energías determinadas, que dependen de la naturaleza de los átomos del blanco.

PRODUCCIÓN DE RAYOS X

El primer tubo de rayos X fue el tubo de Crookes, llamado así en honor a su inventor, el químico y físico británico William Crookes; se trata de una ampolla de vidrio bajo vacío parcial con dos electrodos. Cuando una corriente eléctrica pasa por un tubo de Crookes, el gas residual que contiene se ioniza, y los iones positivos golpean el cátodo y expulsan electrones del mismo. Estos electrones, que forman un haz de rayos catódicos, bombardean las paredes de vidrio del tubo y producen rayos X. Estos tubos sólo generan rayos X blandos, de baja energía.

Un primer perfeccionamiento del tubo de rayos X fue la introducción de un cátodo curvo para concentrar el haz de electrones sobre un blanco de metal pesado, llamado anticátodo o ánodo. Este tipo de tubos genera rayos más duros, con menor longitud de onda y mayor energía que los del tubo de Crookes original; sin embargo, su funcionamiento es errático porque la producción de rayos X depende de la presión del gas en el tubo.

La siguiente gran mejora la llevó a cabo en 1913 el físico estadounidense William David Coolidge. El tubo de Coolidge tiene un vacío muy alto y contiene un filamento calentado y un blanco. Esencialmente, es un tubo de vacío termoiónico en el que el cátodo emite electrones al ser calentado por una corriente auxiliar, y no al ser golpeado por iones, como ocurría en los anteriores tipos de tubos.

Los electrones emitidos por el cátodo calentado se aceleran mediante la aplicación de una alta tensión entre los dos electrodos del tubo. Al aumentar la tensión disminuye la longitud de onda mínima de la radiación.

La mayoría de los tubos de rayos X que se emplean en la actualidad son tubos de Coolidge modificados. Los tubos más grandes y potentes tienen anticátodos refrigerados por agua para impedir que se fundan por el bombardeo de electrones.

El tubo antichoque, muy utilizado, es una modificación del tubo de Coolidge, con un mejor aislamiento de la carcasa (mediante aceite) y cables de alimentación conectados a tierra. Los aparatos como el betatrón se emplean para producir rayos X muy duros, de longitud de onda menor que la de los rayos gamma emitidos por elementos naturalmente radiactivos.

PROPIEDADES DE LOS RAYOS X.

Los rayos X afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz. La absorción de rayos X por una sustancia depende de su densidad y masa atómica. Cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a los rayos X de una longitud de onda determinada.

Cuando se irradia el cuerpo humano con rayos X, los huesos compuestos de elementos con mayor masa atómica que los tejidos circundantes absorben la radiación con más eficacia, por lo que producen sombras más oscuras sobre una placa fotográfica.

En la actualidad se utiliza radiación de neutrones para algunos tipos de radiografía, y los resultados son casi los inversos. Los objetos que producen sombras oscuras en una imagen de rayos X aparecen casi siempre claros en una radiografía de neutrones.

FLUORESCENCIA.

Los rayos X también producen fluorescencia en determinados materiales, como el platinocianuro de bario o el sulfuro de cinc. Si se sustituye la película fotográfica por uno de estos materiales fluorescentes, puede observarse directamente la estructura interna de objetos opacos. Esta técnica se conoce como fluoroscopia.

IONIZACIÓN.

Otra característica importante de los rayos X es su poder de ionización, que depende de su longitud de onda. La capacidad de ionización de los rayos X monocromáticos es directamente proporcional a su energía. Esta propiedad proporciona un método para medir la energía de los rayos X.

Cuando se hacen pasar rayos X por una cámara de ionización se produce una corriente eléctrica proporcional a la energía del haz incidente. Además de la cámara de ionización, otros aparatos más sensibles como el contador Geiger o el contador de centelleo también miden la energía de los rayos X a partir de la ionización que provocan.

Por otra parte, la capacidad ionizante de los rayos X hace que su trayectoria pueda visualizarse en una cámara de niebla o de burbujas.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Los rayos X pueden difractarse al atravesar un cristal, o ser dispersados por él, ya que el cristal está formado por redes de átomos regulares que actúan como redes de difracción muy finas.

Los diagramas de interferencia resultantes pueden fotografiarse y analizarse para determinar la longitud de onda de los rayos X incidentes o la distancia entre los átomos del cristal, según cuál de ambos datos se desconozca.

Los rayos X también pueden difractarse mediante redes de difracción rayadas si su espaciado es aproximadamente igual a la longitud de onda de los rayos X.

INTERACCIÓN CON LA MATERIA.

En la interacción entre la materia y los rayos X existen tres mecanismos por los que éstos son absorbidos; los tres demuestran la naturaleza cuántica de los rayos X.

EFFECTO FOTOELÉCTRICO.

Cuando un cuanto de radiación o fotón correspondiente a la zona de rayos X del espectro electromagnético choca contra un átomo, puede golpear un electrón de una capa interna y expulsarlo del átomo.

Si el fotón tiene más energía que la necesaria para expulsar el electrón, le transferirá esta energía adicional en forma de energía cinética. Este fenómeno, denominado efecto fotoeléctrico, tiene lugar principalmente en la absorción de rayos X de baja energía.

EFFECTO COMPTON

El efecto Compton, descubierto en 1923 por el físico y educador estadounidense Arthur Holly Compton, es una manifestación importante de la absorción de rayos X de menor longitud de onda. Cuando un fotón de alta energía choca con un electrón, ambas partículas pueden ser desviadas formando un ángulo con la trayectoria de la radiación incidente de rayos X.

El fotón incidente cede parte de su energía al electrón y sale del material con una longitud de onda más larga. Estas desviaciones acompañadas por un cambio en la longitud de onda se conocen como dispersión Compton.

PRODUCCIÓN DE PARES.

En el tercer tipo de absorción, que se observa especialmente cuando se irradian elementos de masa atómica elevada con rayos X de muy alta energía, se produce el fenómeno de producción de pares. Cuando un fotón de alta energía penetra en la capa electrónica cercana al núcleo, puede crear un par de electrones, uno con carga negativa y otro con carga positiva; los electrones con carga positiva se conocen también como positrones.

La producción de pares es un ejemplo de la conversión de energía en masa. El fotón necesita una energía de al menos 1,2 MeV para proporcionar la masa del par. Si el fotón incidente posee más energía de la necesaria para la producción del par, el exceso de energía se cede al par de electrones en forma de energía cinética. Las trayectorias de las dos partículas son divergentes.

APLICACIONES DE LOS RAYOS X.

Los rayos X se emplean sobre todo en los campos de la investigación científica, la industria y la medicina.

INVESTIGACIÓN

El estudio de los rayos X ha desempeñado un papel primordial en la física teórica, sobre todo en el desarrollo de la mecánica cuántica. Como herramienta de investigación, los rayos X han permitido confirmar experimentalmente las teorías cristalográficas.

Utilizando métodos de difracción de rayos X es posible identificar las sustancias cristalinas y determinar su estructura. Casi todos los conocimientos actuales en este campo se han obtenido o verificado mediante análisis con rayos X.

Los métodos de difracción de rayos X también pueden aplicarse a sustancias pulverizadas que, sin ser cristalinas, presentan alguna regularidad en su estructura molecular. Mediante estos métodos es posible identificar sustancias químicas y determinar el tamaño de partículas ultramicroscópicas.

Los elementos químicos y sus isótopos pueden identificarse mediante espectroscopia de rayos X, que determina las longitudes de onda de sus espectros de líneas característicos. Varios elementos fueron descubiertos mediante el análisis de espectros de rayos X.

Algunas aplicaciones recientes de los rayos X en la investigación van adquiriendo cada vez más importancia. La microrradiografía, por ejemplo, produce imágenes de alta resolución que pueden ampliarse considerablemente.

Dos radiografías pueden combinarse en un proyector para producir una imagen tridimensional llamada estereorradiograma. La radiografía en color también se emplea para mejorar el detalle; en este proceso, las diferencias en la absorción de rayos X por una muestra se representan como colores distintos. La microsonda de electrones, que utiliza un haz de electrones muy preciso para generar rayos X sobre una muestra en una superficie de sólo una micra cuadrada, proporciona también una información muy detallada.

INDUSTRIA.

Además de las aplicaciones de los rayos X para la investigación en física, química, mineralogía, metalurgia y biología, los rayos X también se emplean en la industria como herramienta de investigación y para realizar numerosos procesos de prueba.

Son muy útiles para examinar objetos, por ejemplo piezas metálicas, sin destruirlos. Las imágenes de rayos X en placas fotográficas muestran la existencia de fallos, pero la desventaja de este sistema es que el equipo de rayos X de alta potencia que se necesita es voluminoso y caro. Por ello, en algunos casos se emplean radioisótopos que emiten rayos gamma de alta penetración en vez de equipos de rayos X.

Estas fuentes de isótopos pueden albergarse en contenedores relativamente ligeros, compactos y blindados. Para la radiografía industrial se suelen utilizar el cobalto 60 y el cesio 137. En algunas aplicaciones médicas e industriales se ha empleado tulio 70 en proyectores isotópicos pequeños y cómodos de usar.

Muchos productos industriales se inspeccionan de forma rutinaria mediante rayos X, para que las unidades defectuosas puedan eliminarse en el lugar de producción. Existen además otras aplicaciones de los rayos X, entre las que figuran la identificación de gemas falsas o la detección de mercancías de contrabando en las aduanas; también se utilizan en los aeropuertos para detectar objetos peligrosos en los equipajes. Los rayos X ultrablandos se emplean para determinar la autenticidad de obras de arte y para restaurar cuadros.

MEDICINA

Las fotografías de rayos X o radiografías y la fluoroscopia se emplean mucho en medicina como herramientas de diagnóstico. En la radioterapia se emplean rayos X para tratar determinadas enfermedades, en particular el cáncer, exponiendo los tumores a la radiación.

La utilidad de las radiografías para el diagnóstico se debe a la capacidad de penetración de los rayos X. A los pocos años de su descubrimiento ya se empleaban para localizar cuerpos extraños, por ejemplo balas, en el interior del cuerpo humano.

Con la mejora de las técnicas de rayos X, las radiografías revelaron minúsculas diferencias en los tejidos, y muchas enfermedades pudieron diagnosticarse con este método. Los rayos X eran el método más importante para diagnosticar la tuberculosis cuando esta enfermedad estaba muy extendida. Las imágenes de los pulmones eran fáciles de interpretar porque los espacios con aire son más transparentes a los rayos X que los tejidos pulmonares.

Otras cavidades del cuerpo pueden llenarse artificialmente con materiales de contraste, de forma que un órgano determinado se vea con mayor claridad. El sulfato de bario, muy opaco a los rayos X, se utiliza para la radiografía del aparato digestivo. Para examinar los riñones o la vesícula biliar se administran determinados compuestos opacos por vía oral o intravenosa.

Estos compuestos pueden tener efectos secundarios graves, por lo que sólo deben ser empleados después de una consulta cuidadosa. De hecho, el uso rutinario de los rayos X se ha desaconsejado en los últimos años, ya que su utilidad es cuestionable.

Un aparato de rayos X de invención reciente, y que se emplea sin compuestos de contraste, proporciona visiones claras de cualquier parte de la anatomía, incluidos los tejidos blandos. Se conoce como escáner (scanner) o aparato de tomografía axial computerizada; gira 180° en torno al cuerpo del paciente emitiendo un haz de rayos X del grosor de un lápiz en 160 puntos diferentes. Unos cristales situados en los puntos opuestos reciben y registran la absorción de los distintos espesores de tejido y huesos. Estos datos se envían a un ordenador o computadora que convierte la información en una imagen sobre una pantalla.

Con la misma dosis de radiación que un aparato de rayos X convencional, puede verse todo un corte de espesor determinado del cuerpo con una claridad aproximadamente 100 veces mayor. El escáner fue inventado en 1972 por el ingeniero electrónico británico Godfrey Hounsfield, y en 1979 ya se había generalizado su uso.

FIN.