

**ASIGNATURA:**

**FÍSICA III**

**ESPECIALIDAD:**

**Bioingeniería**

**APUNTE DE CÁTEDRA**

**RAYOS X. PRODUCCIÓN Y  
PROPIEDADES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**2017**

# Rayos X: Producción y Propiedades

## Introducción

Wilhelm Roentgen (1845-1923) – en 1895 – trabajando con un tubo de rayos catódicos, descubrió los rayos X al advertir que se producía una fluorescencia en una pantalla de platinocianuro de bario, lo que consideró debido a un cierto tipo de radiación que se originaba en las zonas del tubo contra las cuales chocaban los rayos catódicos (flujo de electrones).

Roentgen estudió esta nueva radiación y encontró que:

- Son invisibles.
- Se propagan en línea recta a la velocidad de la luz.
- No era desviada ni por los campos eléctricos ni por los magnéticos, lo que indicaba que su carga debía ser nula;
- las emulsiones fotográficas eran sensibles a ella;
- su paso a través de un gas aumentaba la conductividad de éste;
- los elementos ligeros son más transparentes a esta radiación que los elementos pesados, y
- no pudo observar fenómenos de refracción e interferencia.

De todo ello, resultaba ser una incógnita la naturaleza de estos rayos, por lo que se los denominó rayos X. Roentgen colocó la mano de su esposa sobre una placa fotográfica y la sometió a una exposición de rayos X, el revelado puso de manifiesto toda la estructura interna de la mano (Figura 1), Roentgen había obtenido la primera radiografía.

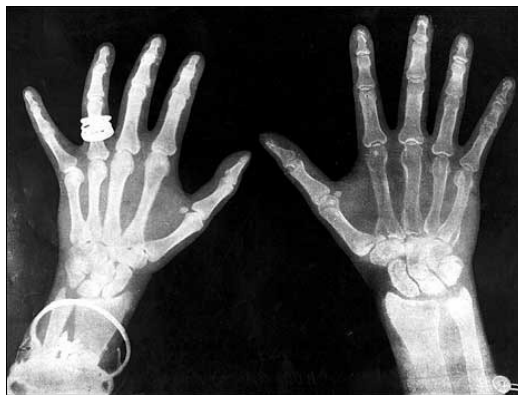


Figura 1: Una de las primeras imágenes logradas por Roentgen usando rayos X (22 de diciembre de 1895).

Algunos hitos importantes:

**1899:** Haga y Wind observaron que los rayos X se difractaban al atravesar una rendija de unas milésimas de milímetro de espesor, deduciendo que la longitud de onda debía estar próxima al angstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

**1906:** Charles Barkla consiguió la polarización de los rayos X.

**1912:** Max von Laue, Friedrich y Knipping al hacer pasar un estrecho haz de rayos X a través de un cristal de sulfuro de cinc, detrás del cual estaba situada una placa fotográfica, que quedó impresionada con una figura de difracción, quedando así definitivamente encuadrados los rayos X dentro del espectro de radiación electromagnética. Esta experiencia puso a la vez de manifiesto la distribución regular de los átomos dentro de un cristal.

**1912:** W. L. Bragg propuso una manera sencilla de estudiar la difracción por los cristales, para lo cual deben considerarse dentro del cristal series de planos paralelos que contienen los átomos del cristal.

Suponga planos consecutivos de átomos, como se muestra en la Figura 2:

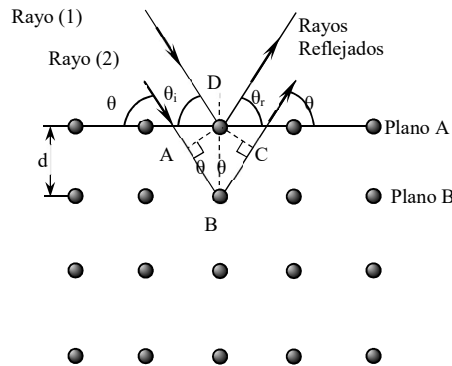


Figura 2: Reflexión de Bragg de rayos X en planos planos paralelos. Ocurre interferencia constructiva cuando  $ABC$  es igual a un número entero de longitudes de onda.

Estos planos reflejan los rayos X de acuerdo con la ley de reflexión. Los rayos reflejados en la misma dirección por planos paralelos interfieren y la interferencia será constructiva cuando la diferencia de camino en la trayectoria de los rayos 1 y 2 sea un número entero de longitudes de onda  $n\lambda$ . A partir del diagrama, vemos que ocurre interferencia constructiva cuando

$$AB + BC = n\lambda; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Y como  $AB = BC = d \sin\theta$ , se concluye que

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{(Ecuación 1) Condición de Bragg}$$

Donde  $n$  es el orden máximo de intensidad,  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo X,  $d$  es la distancia entre planos y  $\theta$  el ángulo del máximo de intensidad medido desde el plano A. Ella nos permite determinar el espaciado reticular del cristal si se conoce  $\lambda$  o viceversa.

Observe que hay varios máximos a ángulos diferentes para  $d$  y  $\lambda$  fijos, correspondientes a  $n = 1, 2, 3, \dots$ . La ecuación 1 se conoce como condición de Bragg, y fue utilizada con gran éxito por los Bragg para determinar las posiciones atómicas en los cristales. En la figura 3 se muestra un diagrama de un espectrómetro de rayos X de Bragg.

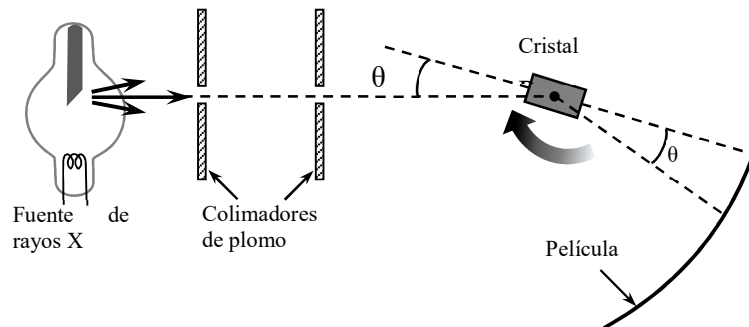


Figura 3: Espectrómetro de cristal de rayos X de Bragg. El cristal se hace girar alrededor de un eje que pasa por P.

El cristal se hace girar lentamente hasta que se observa una reflexión intensa, lo cual significa que la ecuación 1 es válida. Si se conoce  $\lambda$ , es posible calcular  $d$  y, a partir de las serie de valores  $d$  encontrados, es posible determinar la estructura del cristal. Si las mediciones se realizan con un cristal con  $d$  conocida, entonces es posible determinar la intensidad en función de la longitud de onda de los rayos X y puede analizarse el espectro de emisión de rayos X.

## Principios físicos del uso de rayos X en diagnóstico y tratamiento médico

Los rayos X son cualitativamente análogos a la luz visible y ultravioleta. La diferencia fundamental radica en su mayor energía (frecuencia), lo cual lleva asociada una menor longitud de onda.

Ahora bien, distintos materiales varían en sus propiedades de transmisión o absorción para estas ondas electromagnéticas: el agua es transparente a la luz visible, nosotros no. Las microondas de alta frecuencia (2400 MHz) penetran varios centímetros en tejidos biológicos depositando energía, lo cual tiene aplicaciones tan variadas como las cocinas a microondas y la diatermia usada en tratamientos de bursitis, artritis y otras inflamaciones.

Los materiales orgánicos son en general bastantes transparentes a los rayos X, es decir que la absorción es baja. Como veremos enseguida cuando describamos los procesos a nivel atómico, la absorción de rayos X es más importante para elementos pesados, que tienen más electrones.

Lo que está proyectado en una placa fotográfica es la sombra de los átomos que son los que absorben la radiación. Como los huesos tienen calcio, se ven con más facilidad. Pero también es posible producir imágenes de otros tejidos infiltrándolos con agentes de contraste, es decir aprovechando la diferente absorción de distintas sustancias.

A continuación necesitamos describir los procesos atómicos que producen los rayos X y luego la interacción de esa radiación con los átomos y moléculas que componen la materia, es decir los procesos de absorción que son los que generarán la imagen radiográfica, y que producirán los efectos biológicos.

## Fotones y producción de un haz de rayos X

Los rayos X se producen siempre que electrones de alta energía choquen contra un blanco determinado (generalmente un metal). El electrón, al penetrar en el metal, sufre una desaceleración y de acuerdo con la teoría electromagnética clásica emite radiación: un nuevo tipo extremadamente penetrante. En un tubo moderno de rayos X (Figura 4) los electrones “hierven” y salen de un filamento metálico caliente, en un proceso llamado emisión termiónica (descubierto por Edison, al trabajar con sus focos luminosos). A continuación, esos electrones se aceleran a través de una diferencia de potencial que va desde  $10^4 V$  a  $10^6 V$ , en el vacío, y chocan en un ánodo metálico, desacelerándose e irradiando.

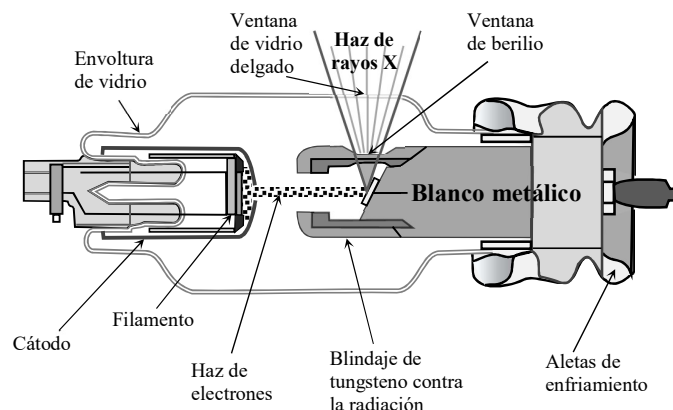


Figura 4: *Tubo moderno de rayos X.* Un haz de electrones choca con un blanco metálico (comúnmente cobre, tungsteno y molibdeno) y se emiten rayos X.

Los rayos X muestran el comportamiento típico de las ondas transversales -de polarización, interferencia y difracción- que se encuentran en la luz y en el resto de la radiación electromagnética además de interactuar en forma de partículas (fotones) con la materia como decíamos. Aquí nos centraremos en esta última.

Para entender la operación de un tubo de rayos X en un circuito, es importante conocer como la corriente depende del voltaje – en el tubo mismo – para generar una excitación del filamento metálico.

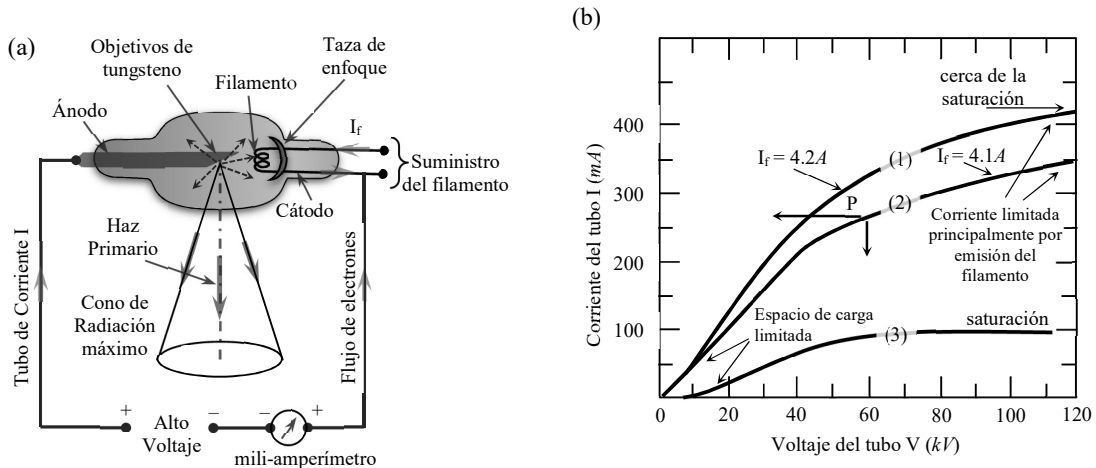


Figura 5: (a) Esquema del circuito formado en un tubo de rayos X. (b) Gráfica de corriente en el tubo vs. voltaje en el tubo de rayos X.

La figura 5(b) muestra datos típicos de un tubo de rayos X. Cuando se aplica poco voltaje ( $\approx kV$ ) al tubo, la corriente es pequeña comparada con el efecto de las cargas. Alrededor del filamento se genera una lluvia de electrones que tiende a repeler los electrones internos del filamento hasta conseguir un voltaje suficiente entre el ánodo y cátodo que los expulse del filamento tan rápido como sean producidos. Esta lluvia de electrones es conocida como *espacio de carga*. Como el voltaje crece, el efecto del espacio de cargas es gradualmente atenuado y la corriente crece hasta que todos los electrones liberados del filamento son expulsados hacia el ánodo.

Finalmente, cuando la región de saturación alcanza voltajes elevados todos los electrones liberados son expulsados hacia el ánodo. Muchos de los diagnósticos de rayos X, operando a elevadas corrientes (punto P), están limitados a la región alrededor del espacio de cargas y entre la región de saturación. Aquí la corriente se determina para ambos, así como el voltaje y la emisión del filamento.

Cuando los tubos operan con bajas corrientes, como en la fluoroscopia o en terapia, la acción se encuentra cerca de la región de saturación y la corriente del tubo sólo está determinada en función de la emisión del filamento (curva 3).

En la Figura 5(b) podemos observar que un cambio de un 2,5% en la corriente del filamento altera la corriente del tubo en un 23% para un voltaje fijo de 100 kV.

El espectro de emisión de rayos X producido por un metal objetivo bombardeado por electrones es interesante de por sí y se muestra en la Figura 6. El espectro emitido se compone de un espectro continuo sobre el que aparecen líneas espectrales intensas. Es decir, cuando un electrón con gran energía cinética (acelerado) choca con un átomo, pueden ocurrir dos tipos de procesos en los que se emite radiación X:

-Radiación de frenado.

-Rayos X característicos.

El amplio *espectro continuo* de rayos X resulta de la *dispersión indirecta de los electrones* con los átomos de metal. En tales colisiones sólo una parte de la energía de los electrones se transforma en radiación. Este proceso se denomina *bremsstrahlung* (palabra alemana que significa *radiación de frenado*), y se refiere a la radiación emitida por cualquier partícula cargada cuando se frena. Los rayos X continuos se producen cuando electrones u otras partículas cargadas de alta energía, como protones o partículas  $\alpha$ , pierden energía al interactuar con el campo coulombiano de un núcleo; esa energía recibe el nombre de Bremsstrahlung. Los electrones presentan una producción de Bremsstrahlung mayor dado que su masa es pequeña y pueden ser deflectados fácilmente.

Si el proyectil es suficientemente energético, puede ocurrir que como consecuencia del choque, arranque uno de los electrones de las capas atómicas internas y que ambos salgan disparados en distintas direcciones.

Pero al quedar una vacante en esa capa interna, alguno de los electrones de las capas más externas “caerá” en ella, con la emisión de una radiación que, a diferencia del caso anterior, tendrá valores precisos de frecuencia, pues será la correspondiente a la diferencia de energía entre dos “niveles atómicos”. Estos se llaman rayos X característicos. Los picos de las curvas se deben a la estructura atómica del blanco específico.

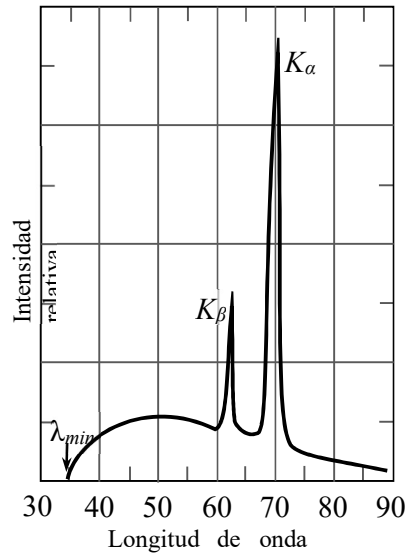


Figura 6: El espectro de rayos X de un blanco metálico consta de un amplio espectro continuo más un número de líneas definidas, que se deben a los rayos X característicos. Las muestras fueron obtenidas al bombardear un blanco de molibdeno con electrones de  $35\text{keV}$ . Observe que  $1\text{pm} = 10^{-12}\text{m} = 10^{-3}\text{nm}$ .

Aunque la teoría electromagnética clásica explica bien el amplio espectro continuo, una característica de la Figura 6,  $\lambda_{\text{min}}$ , constituye una prueba de la teoría corpuscular.

La forma del espectro continuo depende del potencial que acelera a los electrones y, en mucha menor medida, del tipo de metal que forma el blanco (Figuras 7: A y B).

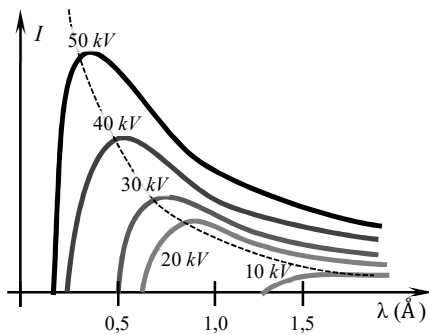


Figura 7A: Espectro continuo según potencial.

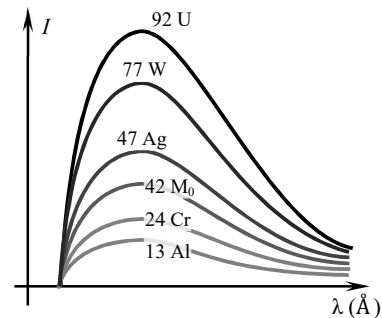


Figura 7B: Espectro continuo según material.

Por el contrario, las rayas espectrales sobrepuestas al espectro continuo son características del metal que forma el blanco y no dependen de la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo.

Tanto el proceso de producción de rayos X como el efecto fotoeléctrico sólo pueden ocurrir en presencia de átomos pesados que puedan absorber algo de cantidad de movimiento (**p**). Usando

la noción de cuantos de luz, Einstein predijo que debería existir un límite de alta frecuencia para la radiación; o si se prefiere, una mínima longitud de onda. Es decir, este espectro continuo no se produce por debajo de cierta longitud de onda o bien por encima de cierta frecuencia, que se denomina *frecuencia máxima o de corte*, poniéndose de manifiesto que la frecuencia máxima (o  $\lambda_{\min}$ ) es independiente de la composición del blanco y que sólo depende del potencial acelerador (Figura 7B) del tubo, V.

Imaginemos un electrón incidente, que llega con una energía: eV después de ser acelerado a través de un potencial V. Conforme se frena dentro del blanco, irradia uno o más fotones. La frecuencia máxima de los fotones se presenta cuando se irradia toda la energía cinética del electrón en forma de un solo fotón.

Esto puede explicarse si se le atribuye al caso de una colisión frontal electrón-átomo, en donde toda la energía cinética del electrón incidente (como decíamos) se convierte en energía de la radiación en forma de un solo fotón de rayos X. Para este caso se tiene:

$$\begin{aligned}\Delta E &= 0 \\ \Delta E_c + \Delta E_{\text{rad.}} &= 0 \\ eV &= hf = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \\ \text{O bien,} \\ \lambda_{\min} &= \frac{hc}{eV} \quad (3)\end{aligned}$$

Donde V es el potencial del tubo de rayos X.

Simultáneamente puede verificarse que se pone de manifiesto también que la frecuencia máxima depende únicamente del potencial acelerador y es proporcional a él. Esa relación nos proporciona un método preciso para determinar el valor de  $e/h$ .

El espectro continuo se explica porque el electrón puede disipar su energía en otros mecanismos distintos a la producción de fotones, como es la vibración de los átomos dentro del retículo cristalino o la ionización o excitación de aquellos.

En el espectro continuo, se observan líneas definidas de rayos X identificadas por  $K_\alpha$  y  $K_\beta$ ; que son líneas emitidas en el espectro de la luz visible. Estas líneas dependen de la composición del blanco y son evidencia de los niveles discretos de energía atómica separados por miles de electrón-volts.

Así, el umbral de longitud de onda representa la conversión total de la energía cinética del electrón en radiación de rayos X. La ecuación (3) muestra claramente que si  $h \rightarrow 0$  entonces  $\lambda_{\min} \rightarrow 0$ , que es la predicción de la teoría clásica. Esto demuestra que la existencia misma de la longitud de onda mínima es un fenómeno cuántico. En otras palabras, el electrón no puede hacer que se emita más energía de la que tiene, y esa cantidad máxima corresponde al extremo de frecuencia máxima de la curva de radiación de frenado.

La existencia de la frecuencia máxima fue confirmada experimentalmente en 1915 por W. Duane y F. Hunt en Harvard: Aplicando la ecuación fotoeléctrica de Einstein, estimaron  $h$  con una precisión mejor que el 4%.

El *proceso bremsstrahlung* no ocurre únicamente en los tubos de rayos X, sino dondequiera que los electrones choquen a altas velocidades con la materia, como en el caso de los rayos cósmicos, en los cinturones de radiación de Van Allen que circundan a la Tierra, y en el frenado de los electrones que emergen de los aceleradores o de los núcleos radioactivos. A veces se considera el proceso bremsstrahlung como la inversa del proceso Compton: en el primero un electrón pierde parte de su energía (cinética) para (crear) un fotón; en el segundo, un fotón pierde parte de su energía para dársela a un electrón. Sin embargo, existe una analogía más poderosa con el efecto fotoeléctrico, y generalmente se considera que el proceso bremsstrahlung es un efecto fotoeléctrico inverso: en el

efecto fotoeléctrico se absorbe un fotón, y su energía y cantidad de movimiento van a un electrón y a su átomo de enlace; en el proceso bremsstrahlung se crea un fotón, y su energía y cantidad de movimiento vienen del electrón y del núcleo de impacto. En cualquier caso, en el proceso bremsstrahlung se estudia la creación de los fotones, en vez de su absorción o dispersión por la materia.

## Procesos de interacción con la materia

Veamos ahora qué procesos ocurren cuando la radiación X incide sobre un material – que puede ser nuestro cuerpo –.

Recordemos:

La **atenuación** de un haz de rayos X – por ejemplo – es la disminución de la irradiancia.

La **energía que se deposita en los tejidos es la causante primaria de los efectos biológicos de la radiación**.

Los principales procesos microscópicos de atenuación y absorción de la radiación X son:

- Dispersión de los fotones al chocar con los átomos,
- Absorción de los fotones. Éste proceso

Figura 8: Intensidad transmitida porcentual en función del espesor de la chapa absorbente de aluminio.

A: Haz de rayos X

B: Haz de rayos X

Monoenergético, nótese la mayor atenuación en este caso; se reduce en un factor de  $\approx 2$ ".

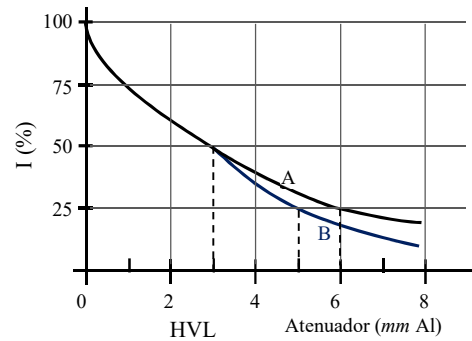
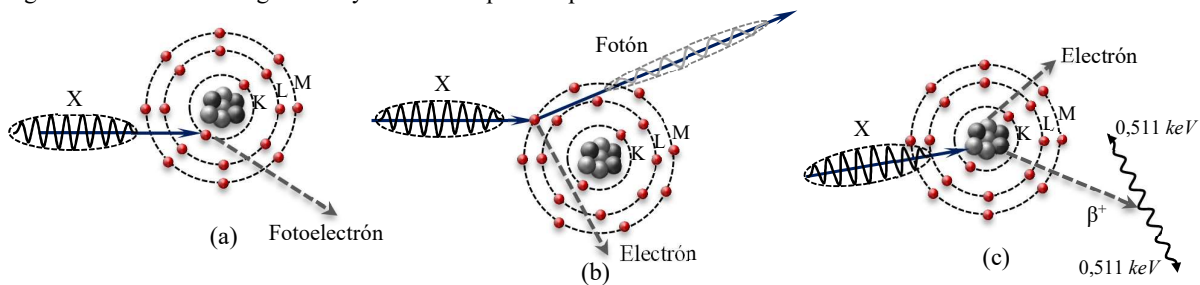


Figura 9: Pérdida de energía de Rayos X ocurre por tres procesos.



- (a) En el efecto **fotoeléctrico** toda la energía de la radiación se transforma en energía cinética del electrón atómico que es liberado.
- (b) En el efecto **Compton** parte de la energía es transferida a un electrón atómico liberado y el resto es un fotón dispersado de energía menor (Radiación secundaria).
- (c) Si la radiación es lo suficientemente energética puede **crearse un par electrón-positrón** que salen dispersados en distintas direcciones (el positrón es una partícula idéntica al electrón salvo en su carga que es numéricamente igual y de signo positivo). El positrón no es una partícula estable, y en un tiempo muy breve se aniquila con otro electrón produciendo dos fotones de  $0,511 \text{ keV}$ , de energía cada uno que son emitidos a  $180$  grados uno respecto otro. La aniquilación de positrones producida por el decaimiento de



algunas sustancias radiactivas es el principio de operación de la **tomografía PET** (Positron Emission Tomography: tomografía de emisión de positrones).

## Atenuación de los haces de rayos X

La atenuación de un haz de rayos X depende de la cantidad de fotones que lo componen, así como de la calidad de los mismos. En la práctica un haz de radiación estará compuesto por fotones de muy diferente energía, con una variedad de longitudes de onda, por lo que se dirá que se hacen *polienergéticos, policromáticos o heterogéneos*.

Cuando estudiamos la atenuación que sufre un haz de rayos X al atravesar un medio, para simplificar su estudio, suponemos que se trata de un haz en el que todos los fotones que lo componen tienen la misma energía. Se dirá que es un haz *monoenergético, monocromático u homogéneo*.

Supongamos que un haz de rayos X monoenergético, cuya intensidad de radiación inicial tiene un valor  $I_0$ , al que le hacemos pasar a través de un medio homogéneo de espesor  $x$ , éste actuará como atenuante o filtro del haz ya que reducirá el valor de la intensidad inicial de dicho haz.

Dependiendo del grosor del atenuante, de su número atómico y de la energía de los fotones, la atenuación será mayor o menor. La atenuación sufrida por un haz de rayos se puede calcular teórica o prácticamente.

Supongamos una fuente de RX que emite radiación monocromática<sup>3</sup>. Si se intercepta el haz por medio de una lámina de un material absorbente se observará que la intensidad<sup>4</sup> de los RX será menor.

Sea  $I$  la intensidad de los RX incidentes, esta disminuye en una cantidad  $-dI$  al atravesar un material de espesor  $dx$ .

La variación relativa de la intensidad de los RX atravesando la lámina será:  $-dI/I$ .

<sup>3</sup> En general las fuentes de RX generan radiación policromática, pero podemos obtener una fuente así por ejemplo utilizando un espectrómetro de Bragg para seleccionar una longitud de onda específica (diafragmando el resto).

<sup>4</sup> Medida por ejemplo a partir de la corriente producida en la cámara de ionización.

<sup>5</sup> También puede inferirse a partir de los modelos que representan la absorción que incluyen distintos factores causados por diferentes mecanismos.

Experimentalmente se pudo inferir<sup>5</sup> que:

$$\frac{-dI}{I} = \mu dx \quad (4)$$

Donde  $\mu$  es una constante llamada coeficiente lineal de absorción.

Integrando la Ec. 4 obtenemos la ecuación de la intensidad en función del espesor de la lámina atenuadora:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$
$$(I(x))/I_0 = e^{-\mu x}$$

**Si RX de intensidad  $I_0$  inciden sobre una lámina que tiene un espesor  $x$  la intensidad saliente de la lámina  $I(x)$  será función de  $I_0$  que dependerá del coeficiente lineal de absorción  $\mu$ . (Ver Fig. 10)**

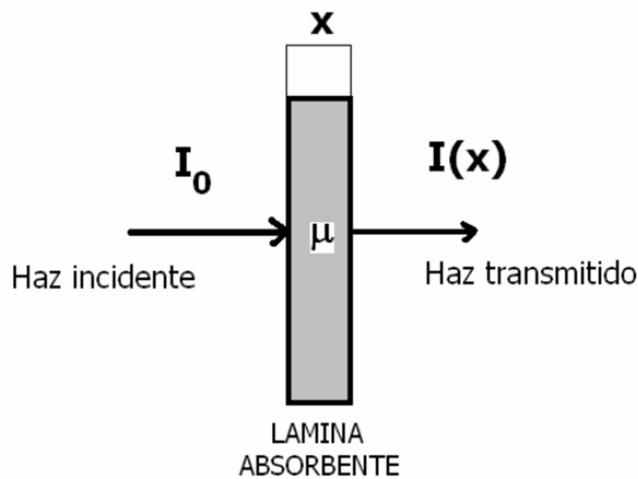


Fig. 10. RX de intensidad  $I_0$  que inciden sobre una lámina de espesor  $x$ .

El coeficiente de absorción lineal  $\mu$  depende de la naturaleza del absorbente. Los valores de  $\mu$  están determinados experimentalmente para cada absorbente en particular. El  $\mu$  depende también de la longitud de onda de la radiación incidente. La Ec. 4 vale solo para rayos X monocromáticos. Para un haz de distintas longitudes de onda la expresión sería una suma de exponenciales con distintos coeficientes de absorción.

Como hemos supuesto que estamos estudiando un haz monoenergético, resultará que cada nuevo espesor de filtro de valor  $x$  que atravesase el haz, sufrirá el mismo porcentaje de reducción de su intensidad, lo cual implica desde un punto de vista estrictamente teórico, que la intensidad no será nula pero puede ser tan pequeña como se desee.

### Coefficiente de absorción específico ( $\mu_e$ )

Se define como el cociente entre el coeficiente de absorción lineal  $\mu$  y la densidad del material absorbente  $\rho$  :

$$\mu_e = \frac{\mu}{\rho}$$

### Coefficiente atómico de absorción ( $\mu_A$ )

Se define como el producto entre el coeficiente de absorción específico ( $\mu_e$ ) y el peso atómico (PA) dividido en el número de Avogadro (N):

$$\mu_A = \frac{\mu_e PA}{N}$$

## Espectros de rayos X

Hasta ahora hemos considerado excitaciones de los electrones de valencia únicamente, las cuales dan por resultado lo que comúnmente se denomina *espectro óptico*. Pero también es posible excitar a los electrones de las capas completas. Vamos a estudiar los átomos con más de un electrón y los movimientos de los electrones que se encuentran en el interior de tales átomos.

Pasamos de una región de relativamente baja energía de enlace (por ejemplo se requieren  $5 \text{ eV}$  de trabajo para extraer el electrón de valencia en el átomo) a otra de más energía (digamos  $70 \text{ keV}$  para extraer un electrón ubicado en la capa más profunda de un átomo de tungsteno). Aun cuando sigan formando parte del espectro electromagnético, la longitud de onda de las radiaciones emitidas por los electrones ubicados en las capas más profundas difieren radicalmente; por ejemplo, de  $6 \times 10^{-7} \text{ m}$  en las líneas del doblete de sodio a  $2 \times 10^{-11} \text{ m}$  en una de las radiaciones características del tungsteno,

una razón aproximada de  $3 \times 10^4$ . La radiación de la tan corta longitud de onda cae dentro de la región de los rayos X del espectro. En la figura 6 se muestra el espectro de los rayos X que se produce cuando se permite que los electrones de  $35 \text{ keV}$  choquen contra un blanco de molibdeno. Estas excitaciones de los electrones interiores son las responsables de los rayos X característicos emitidos o absorbidos por los átomos.

Tanto la emisión como la absorción de rayos X son instrumentos muy útiles para recabar información acerca de las capas internas de un átomo, y entre sus aplicaciones más importantes en ciencias de la salud se encuentran las tecnologías radiológicas que han progresado desde la clásica placa radiográfica de antaño a exámenes como la densitometría ósea, entre otros; cuyos resultados se muestran en forma de imágenes digitalizadas.

## Espectro característico de los rayos X. Ley de Moseley

Desde la época de Mendeleev (1834-1907) los elementos se listaban en la tabla periódica por orden de peso atómico creciente. Un problema consistía en que, en varios casos, había que cambiar el orden riguroso para mantener las semejanzas de las propiedades químicas en las columnas verticales de las tablas. El joven físico británico H. G. J. Moseley, cuya prometedora carrera de investigador fue truncada a los 27 años de edad por la bala de un francotirador durante la Primera Guerra Mundial, creó el concepto de número atómico (símbolo  $Z$ ) y demostró que estos problemas desaparecían si la tabla se organizaba por orden de  $Z$  creciente. En efecto, en 1914 probó como armar los elementos en una línea y asignarles un número. Su método se basaba en la medición y el análisis del espectro característico de rayos X de elementos químicos mediante los métodos de difracción de Bragg.

Sabemos que los electrones que inciden sobre el blanco para producir rayos X son suficientemente energéticos, y que penetran en las capas profundas de los átomos que forman el blanco y hacen saltar un electrón de ellas, creando lo que se denomina un *hueco*. Al ser éste ocupado por electrones de capas exteriores se emite una radiación característica creándose un nuevo *hueco* que es ocupado por electrones de capas aún más exteriores, emitiéndose una nueva radiación característica. El conjunto de ellas constituye el espectro característico de rayos X del elemento que forma el blanco.

En sus investigaciones Moseley midió la longitud de onda de los rayos X representativos del mayor número posible de los elementos (logró encontrar 38), usándolos como blanco para bombardear con electrones en un tubo de rayos X diseñado por él. Después buscó, y fácilmente detectó, regularidades en los espectros al pasar de un elemento a otro en la tabla periódica. En particular observó que aparecía una línea recta, si para una línea espectral de rayos X como  $K\alpha$ , graficaba la raíz cuadrada de la frecuencia  $\sqrt{f} = \sqrt{c/\lambda}$  en función de la posición del elemento dentro de la tabla periódica. La figura 11 contiene parte de sus datos. La conclusión que extrajo del conjunto de datos recabados fue la siguiente:

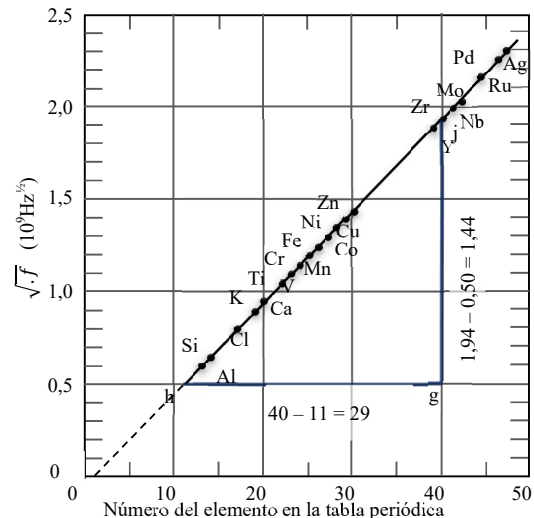


Figura 11: Diagrama de Moseley para la línea  $K\alpha$  del espectro de rayos X de 21 elementos. La frecuencia se determina a partir de la longitud de onda medida.

Tenemos aquí una prueba de que en el átomo hay una magnitud fundamental, que aumenta de forma regular por saltos discretos a medida que pasamos de un elemento al siguiente inmediato. Esta magnitud no puede ser otra que la carga del núcleo central.

Así, Moseley descubrió el concepto y la importancia del número atómico.

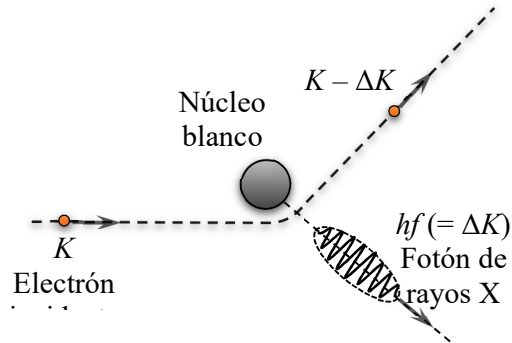
Los datos de Moseley, ofrecidos en la figura 10 pueden representarse mediante la relación lineal  $\sqrt{f} = C(Z - 1)$ , donde  $C$  es una constante, y  $Z$  la posición numérica del elemento de la tabla periódica. Esta ecuación, que puede obtenerse de la teoría cuántica híbrida de Bohr, se adecúa muy bien a los datos.

Todavía no se había descubierto la mecánica cuántica. La tabla periódica contenía varios cuadros vacíos y habían proliferado las propuestas de nuevos elementos. Todavía no se clasificaban debidamente los elementos de tierras raras, por los problemas que planteaban sus propiedades químicas similares. Gracias al trabajo de Moseley, el espectro característico de los rayos X se convirtió en la firma universalmente aceptada de un elemento.

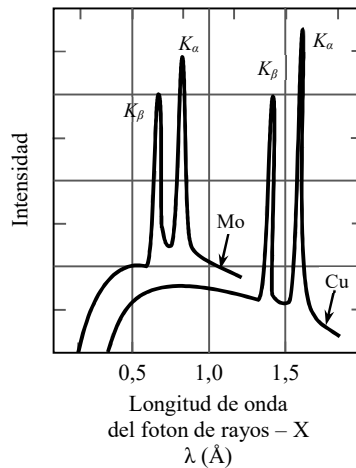
No es difícil entender por qué el espectro característico de los rayos X ofrece regularidades tan notables de un elemento a otro, no así el espectro visible. La clave para identificar un elemento es la carga de su núcleo, esta determina el número de sus electrones y, por consiguiente, sus propiedades químicas. Por ejemplo, la naturaleza del oro se debe a que sus átomos poseen una carga nuclear de  $+79e$ . Si se tuviera una unidad más de carga, ya no sería oro sino mercurio; si tuviera una menos sería platino. Los electrones de la capa K, que intervienen de manera tan importante en la generación de los espectros característicos de los rayos X, se hallan muy cerca del núcleo y son pruebas sensibles de su carga. En cambio, el espectro visible se relaciona con las transiciones de los electrones externos, que están fuertemente blindados o “apantallados” del núcleo por acción de los electrones restantes; no son una prueba sensible de la carga nuclear

## Preguntas

1. Si el momento angular de los electrones de los átomos no estuviera cuantizado, la tabla periódica de los elementos sería distinta. Comente esta afirmación.
2. ¿Cuál es el origen de la longitud de onda de corte  $\lambda_{\min}$  en la siguiente figura? ¿Por qué es un indicio importante de la naturaleza de fotones de rayos X? ¿Por qué el fotón emitido se aleja en la dirección señalada? ¿Podría mostrarse moviéndose en otra dirección cualquiera? Explique sus respuestas.



3. ¿Puede lograrse que el hidrógeno atómico emita rayos X? De ser así, describa el mecanismo. En caso contrario, explique por qué no.
4. De acuerdo con la gráfica dada a continuación compare la distribución de la longitud de onda que resulta cuando se bombardea un blanco de molibdeno y otro de cobre. Examine las longitudes de onda mínima. Concluya.



## **Bibliografía**

- Alonso, M. y Finn, E. (1976) Física Vol. III: Fundamentos cuánticos y estadísticos. Mexico, Fondo Educativo Interamericano, S. A.
- Beutel, J.; Kundel, H. Van Metter, R. (2000) Handbook of Medical Imaging, Physics and Psychophysics, Vol 1. Washington, Spie Pres.
- Delabat, R.; González, J. y Muñoz, C. (1996) Tecnología Radiológica. Madrid, Ed. Paraninfo.
- Johns, H. (1983) The physics of radiology, 4<sup>o</sup> ed. Springfield, Charles Thomas-Publisher.
- Serway, R.; Moses, C.; Moyer, C. (1990) Física Moderna, 3era ed. Thomson.
- Resnick, R. (1976) Conceptos de relatividad y teoría cuántica. México, Ed Limusa.