

LA FISICA DE LOS RAYOS X

Juan F. Evertsz

Profesor T.C. del Depto. de Física de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (UNPHU) en Santo Domingo
Secretario General de la Sociedad Dominicana de Física, Inc. (SODOFI)

Este artículo trata de mostrar en forma simple el comportamiento de los rayos X. El mismo está dirigido a estudiantes de Medicina, así como a graduados y especialistas en Radiología u otra área afín con las radiaciones físicas.

GLOSARIO DE TERMINOS

1. REFLEXION: El rechazo que experimentan las ondas o cuerpos elásticos al chocar con la superficie que limita a un medio.
 2. REFRACCION: Cambio de dirección que experimentan las ondas o rayos al atravesar las superficies que sirven de límite a medios con distinta velocidad de propagación (la onda, etc.).
 3. INTERFERENCIA: El estado que resulta de la superposición de varias ondas coherentes con una diferencia de espacio constante. Casi siempre, el concepto de interferencia se refiere a ondas de la misma longitud de onda.
 4. LONGITUD DE ONDA: La distancia entre dos puntos consecutivos de igual fase de una onda.
 5. FLUORESCENCIA: Es una situación especial del fenómeno de luminiscencia (fenómenos luminosos sin desarrollo término-luz-fría-), en el cual la fluorescencia sólo dura lo que dura la excitación del sistema.
 6. RADIOACTIVIDAD NATURAL: La desintegración espontánea (desintegración nuclear) de los núcleos atómicos (radionúclidos) con emisión de partículas alfa, electrones, positrones y radiación electromagnética (radiación nuclear).
 7. RADIACION: Propagación de la energía en el espacio.
 8. ELECTRONES TERMOIONICOS: Son los electrones que son emitidos por calentamiento de un material (por ejemplo, el cátodo).
 9. CATODO: Electrodo negativo en los tubos de rayos catódicos.
 10. DIFERENCIA DE POTENCIAL: Es el voltaje que se obtiene al aplicar una tensión eléctrica.
 11. ENERGIA CINETICA (E_K): Capacidad de realizar trabajo que posee un cuerpo de masa M y velocidad V .
 12. FOTON: La porción más pequeña de energía de una radiación electromagnética. Es considerado como una partícula elemental.
 13. CONSTANTE DE PLANCK: Magnitud de validez general dada con la existencia de las cosas no reductible a otra y siempre independiente de las condiciones de experimentación. Tiene las dimensiones de una "acción" (energía x tiempo). Su valor es 6.63×10^{27} ergio/seg.
 14. FRECUENCIA: Número de oscilaciones por unidad de tiempo.
 15. ELECTRON-VOLTIO (eV): Unidad de energía empleada en física atómica; un electrón-voltio es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un voltio en el vacío.
 16. TRANSICIONES: Pasar de un nivel energético a otro.
 17. HUECOS: Es el espacio dejado por un electrón cuando sale emitido de un nivel energético.
- Como sabemos, los Rayos X fueron descubiertos en noviembre de 1895, en forma accidental por Wilhem Roentgen* y en su estudio sobre el comportamiento de éstos encontró las siguientes propiedades características de ellos:
- 1) Hay muchas sustancias bastante transparentes a los Rayos X.
 - 2) Los Rayos X no pueden ser reflejados¹ ni refractados² y no muestran efectos de interferencia.³ Estos fenómenos estaban presentes pero eran demasiado sutiles para que Roentgen los observara en aquel tiempo.
 - 3) Las placas fotográficas pueden ser veladas por los Rayos X. Debido a esto, la técnica de radiografía por Rayos X existe hoy día.
- (* La historia del descubrimiento de los Rayos X aparece normalmente en cualquier libro de física, libro de radiología como también en las enciclopedias; el lector interesado puede consultarlo para una ampliación de dicha historia.

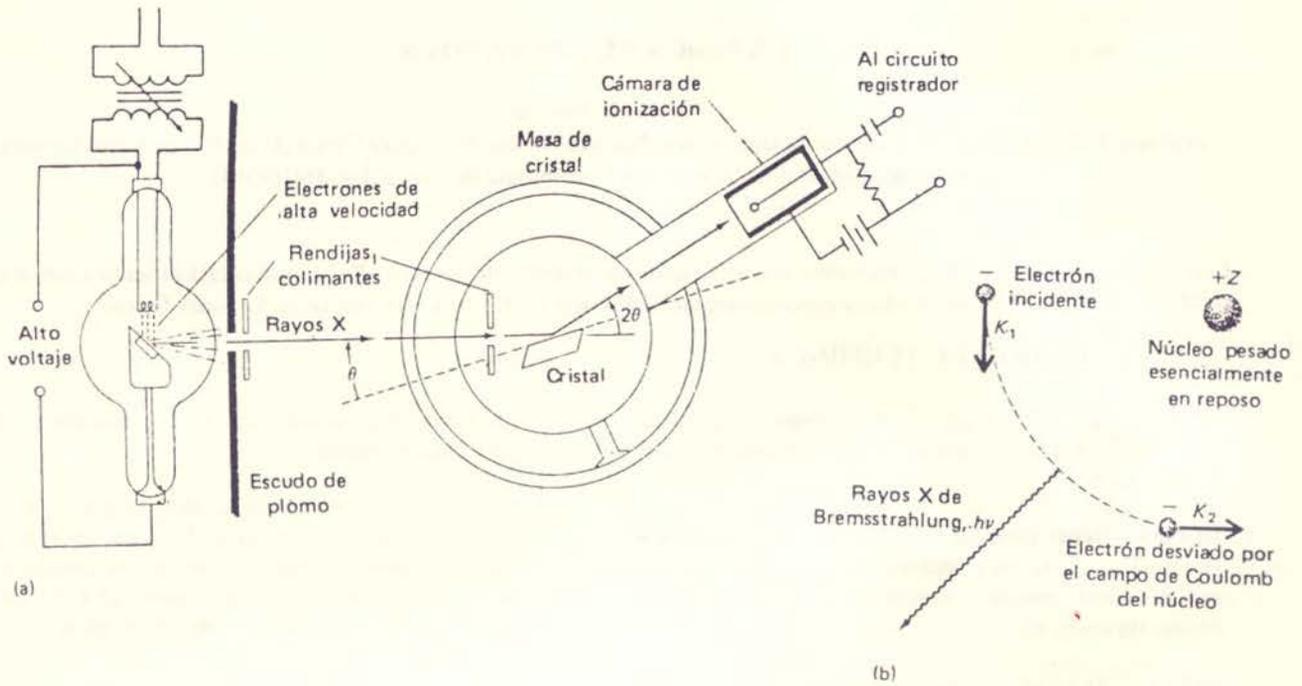


FIG. 1. (a) Esquema del espectrómetro de cristal de Bragg para la investigación del espectro de los Rayos X. (b) Bremsstrahlung producida por la aceleración de un electrón en un campo coulombiano.

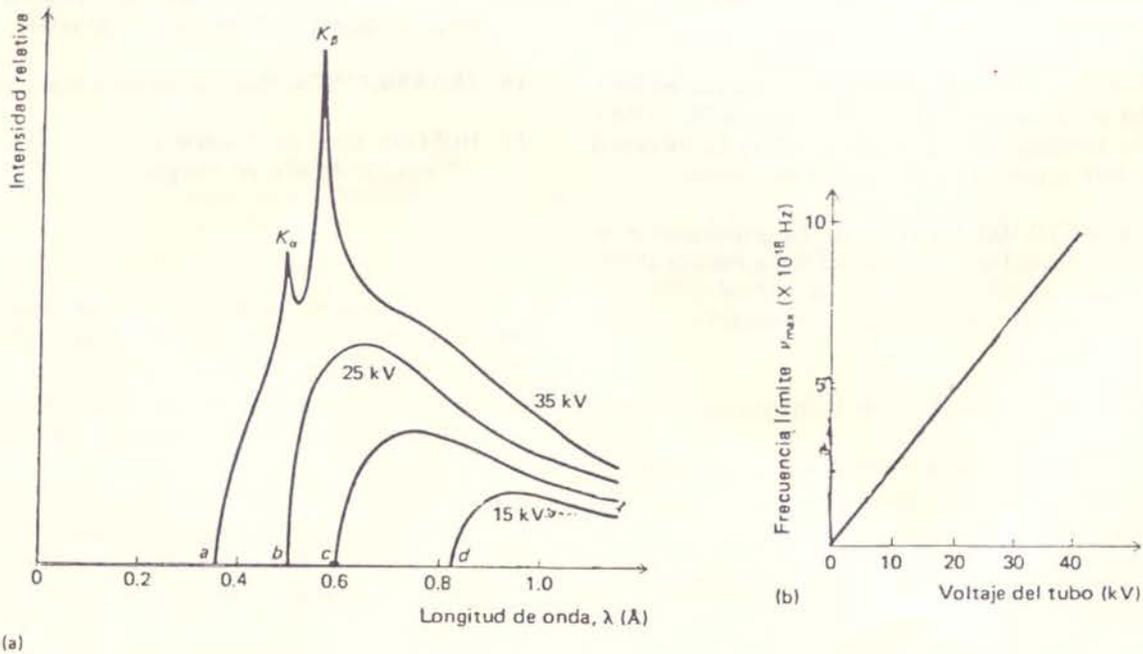


FIG. 2. (a) El espectro de rayos X de la plata muestra los espectros Bremsstrahlung y característico, y la dependencia del límite de la longitud de onda más corta del potencial acelerador a través del tubo. (b) Simple relación lineal entre la frecuencia de corte máxima y el voltaje del tubo.

- 4) Los Rayos X no pueden ser desviados (de su trayectoria) ni por campos eléctricos, ni por campos magnéticos. Esto se debe a que los Rayos X no poseen cargas, son radiaciones electromagnéticas de muy corta longitud de onda⁴ producidas por la colisión de electrones de alta velocidad (la velocidad de dichos electrones es producida por la fuente de alto voltaje del sistema de Rayos X) con las paredes del tubo de cristal.**
- 5) Los cuerpos electrificados, positivos o negativos, son descargados por los Rayos X.
- 6) Los Rayos X provocan fluorescencia⁵ en muchas sustancias.

Es bueno hacer notar que el descubrimiento de los Rayos X abrió una nueva era en la física junto con el descubrimiento de la radioactividad natural⁶ (realizado por los esposos Curie) y las radiaciones⁷ que penetraban fácilmente en la materia.

Presentamos para mayor claridad en la figura 1(a) un moderno y típico tubo de Rayos X, en el cual los electrones termoiónicos⁸ en el cátodo⁹ son acelerados a altas velocidades a través de una diferencia de potencial¹⁰ (voltaje) y después detenidos al chocar contra un blanco de metal. Cuando estos electrones interaccionan con el campo coulombiano (campo electromagnético), como se ve en la figura 1(b), son desacelerados y la radiación producida es la predicha por la teoría electromagnética clásica para una carga acelerada.

A medida que el electrón incidente frena y pierde energía cinética,¹¹ la energía perdida es usada para crear un fotón¹² con una energía dada por:

$$\text{ENERGIA DEL FOTON} = h \nu = E_{c1} - E_{c2}$$

donde h es la llamada constante de Planck,¹³ ν es la frecuencia¹⁴ y E_{c1} y E_{c2} son las energías cinéticas del electrón incidente y del electrón desviado respectivamente por el campo de coulomb del núcleo.

La radiación producida por la aceleración producida de una partícula cargada es la llamada "BREMSSTRAHLUNG" (palabra alemana que significa "radiación por frenado").

El potencial acelerador (el voltaje) es del orden de varios miles de voltios (inclusive a veces de cientos de miles). Pero cerca del 28% de la energía cedida por los electrones cuando chocan con el blanco se transforman en "energía calorífica".

Los electrones en un átomo están ordenados en capas alrededor del núcleo (véase figura No. 3).

Los electrones más cercanos al núcleo, los más fuertemente ligados debido a las fuerzas electromagnéticas, están

(**) Realmente al chocar los electrones con el tubo de cristal produce Rayos X de baja energía, por lo cual normalmente los equipos de Rayos X tienen un metal (por ejemplo el cobre) el cual es bombardeado por los electrones y éstos a su vez emiten Rayos X de alta energía.

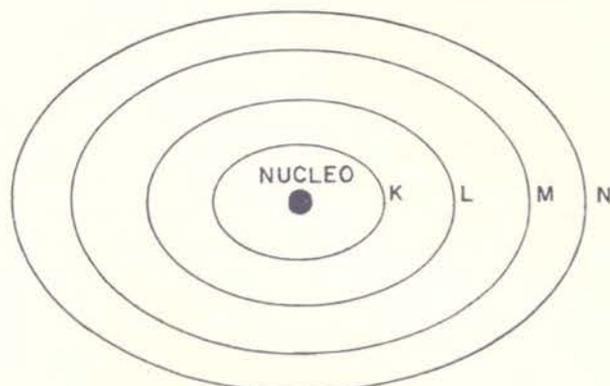


Figura No. 3

en la capa K. Aquellos en la siguiente posición de mayor enlace están en la capa L, y después en la capa M, luego en la N, y así sucesivamente. Cuando electrones incidentes altamente energéticos (miles de electrón voltios de energía¹⁵) botan un electrón de la capa K, un electrón en la capa L cede energía; entonces en la forma de "Rayos X" cuando pasa a llenar la vacante dejada en la capa K. Esta radiación, característica del material del blanco, se denomina línea K α . El electrón de la capa M que llena la vacante en la capa K cede energía en la forma de otro "Rayo X" llamado línea K β . Estas transiciones¹⁶ de las capas L, M, N, etc. a la capa K dan lugar a la serie de líneas K α , K β , K γ , etc. llamadas la serie K. Cuando los electrones incidentes desalojan electrones de la capa L y los huecos¹⁷ son llenados por electrones de las restantes capas M, N, O, estas transiciones dan lugar a la serie L, la primera línea de la cual es L α . La nomenclatura de estas transiciones se ilustran en la figura No. 4.

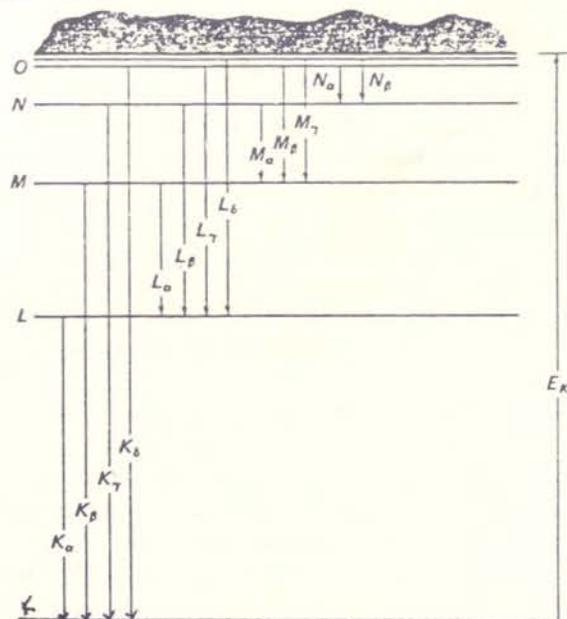


FIG. 4. Transiciones electrónicas para las capas cercanas al núcleo, que dan lugar a los espectros característicos de los Rayos X.

A medida que aumenta el voltaje acelerador en el tubo de Rayos X, los electrones incidentes producen un espectro continuo de "radiación de frenado" (véase figura No. 2) hasta que, a cierto voltaje "crítico", los electrones adquieren suficiente energía para desalojar electrones de las capas interiores, o sea, de las capas K, L o M. Sólo cuando alcanzado el potencial "crítico" V_C será suficientemente energético los electrones incidentes para que ocurran las transiciones K. Así

$$e^-V_C \geq E_C$$

Donde e^- es la carga del electrón, V_C el voltaje crítico y E_K la energía necesaria para sacar o liberar un electrón de la capa K de un átomo.

Para finalizar queremos informar que los Rayos X asociados con la serie K más energético son llamados "Rayos X duros" y los asociados con las series menos energéticas L, M, N, son llamados "Rayos X suaves o blandos". Los Rayos X duros son indudablemente los más penetrantes.