

UNA FUENTE DE RAYOS-X DE ENERGÍA VARIABLE USANDO ^{90}Sr

M.A. Chesta, T.S. Plivelic[†] y R.T. Mainardi*

Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FAMAF) – Universidad Nacional de Córdoba
Ciudad Universitaria (5000) – Córdoba – Argentina

^(†) Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (L.N.L.S.)-Caixa Postal 6192-CEP:13083-970-Campinas-SP-Brasil.

^(*) Investigador del CONICET

e-mail: mainardi@mail.famaf.unc.edu.ar

La inducción de rayos-X característicos por partículas beta de alta energía (10^5 - 10^6 eV) tiene una probabilidad apreciable en cualquier elemento químico, con secciones eficaces de ionización atómica en general superiores a las correspondientes por excitación gamma (excepto quizás en los casos de excitación selectiva). En este trabajo se presenta un dispositivo generador de rayos-X de energía variable, que utiliza ^{90}Sr como fuente de partículas beta y una cámara multiblanco, en un arreglo geométrico de fuente transparente. El flujo de fotones de rayos-X generado, para cualquier valor de energía, cae en el rango de 10^3 - 10^4 s⁻¹ sr⁻¹ por cada milicurie de actividad de la fuente beta. Nuestro diseño, un dispositivo compacto y portable con más de treinta elecciones posibles de energía, nos permite cubrir los primeros 100 keV del espectro de radiación. Se muestra que, como una consecuencia de la particular fuente de excitación utilizada, existen notables ventajas por sobre aquellos generadores que utilizan ^{241}Am (u otra fuente-X o -gamma) como modo de excitación primario: una eficiencia de producción-X muy superior, requiere de una única fuente radiactiva para todo el rango de energías, y presenta poca dependencia de la intensidad con la energía de los rayos-X.

The emission of characteristic x-rays induced by high energy beta particles (10^5 - 10^6 eV) for any chemical element are much higher as compared with photon excitation with the exception of selective excitation. This work describes a variable energy x-ray generator that uses ^{90}Sr as a source of beta particles and a multi-target array in a geometrical transparent source set up. The x-ray photon flux thus generated has an intensity between 10^3 - 10^4 s⁻¹ sr⁻¹ per millicurie of activity of the beta source. This compact device by suitable selection of the target material provides over thirty mono-energetic lines spread uniformly over the energy range between 6 and 100 keV. It is shown that with this only beta source the x-ray yield in the above energy range is higher as compared with generators using ^{241}Am or other x and gamma sources and the line's intensity is nearly uniform over the whole energy range.

I. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de rayos-x portables y monocromáticas, con intensidades moderadas (10^4 - 10^5 s⁻¹ sr⁻¹) son necesarias para un número de aplicaciones tales como: instrumental de rayos-x portátil; laboratorios de enseñanza; fluorescencia de rayos-x (XRF); monitoreo ambiental; calibración de instrumentos; investigación con rayos-x; etc. En altas intensidades (10^6 - 10^9 s⁻¹ sr⁻¹) las aplicaciones serían más diversas como lo explica en detalle G. Arduini *et al.*⁽¹⁾ y en las referencias allí citadas: en técnicas de análisis elemental, debido a la posibilidad de obtener excitación selectiva; en el campo de las ciencias de la superficie son útiles en la espectroscopía de fotoemisión de rayos-x (XPS) para investigar las propiedades electrónicas de los sólidos; en técnicas de microscopía de rayos-x; en radiografías médicas; etc.

Muchos tipos diferentes de excitación pueden utilizarse para producir rayos-x en una dada muestra^(2,3). En la técnica de emisión de rayos-x inducidos por radioisótopos las fuentes más comunes son emisoras de fotones ya sean rayos gamma de baja energía o los rayos-x mismos. Esos tipos de excitación producen despreciables cantidades de fondo de radiación por

bremsstrahlung, el cual se produce como consecuencia de la desaceleración de los fotoelectrones creados por captura fotónica en la muestra. Sin embargo este tipo de excitación necesariamente requiere de geometrías de irradiación muy poco eficientes, referidas en la literatura⁽³⁾ como: fuente central, fuente lateral o fuente anular. Esas geometrías producen un bajo flujo de rayos-X característicos, relativo a la actividad de la fuente de excitación primaria. Por otra parte, acorde al proceso fotoeléctrico, un mismo radioisótopo emisor de fotones, puede excitar apreciablemente sólo aquellos elementos químicos cuyos umbrales de ionización estén próximos a la energía de excitación (por debajo), pero muy pobremente a aquellos de umbrales más alejados, resultando en una radiación de intensidad muy dependiente de la energía de los rayos-X generados. En otras palabras para excitar eficientemente las capas atómicas internas de cualquier elemento químico se hace necesario utilizar distintas fuentes emisoras de fotones. En este trabajo nos proponemos demostrar que esos problemas pueden ser superados en gran medida utilizando un adecuado radioisótopo, emisor beta, como fuente de excitación primaria. De la variedad de fuentes beta posibles, se ha seleccionado ^{90}Sr por razones que se aclaran más adelante en el texto.

II. TEORÍA

Cuando los electrones provenientes de un radioisótopo penetran un material, se produce una fuerte interacción entre éstos y los electrones y núcleos atómicos. En esos encuentros los electrones primarios pierden energía por radiación y por colisión, con una probabilidad relativa que depende de su energía cinética tanto como del tipo de átomo encontrado. Como una consecuencia de esas interacciones hay ionizaciones de capas profundas que generan vacancias atómicas en la capa-K, L, etc.

Recientemente, Long et al⁽⁴⁾ han recopilado la mayoría de los datos experimentales acerca de secciones eficaces de ionización de capa-K por impacto de electrones χ_K , para varios átomos y energías cinéticas, desde el umbral de ionización hasta 1 GeV. Por otra parte Khare y Wadehra⁽⁵⁾ han calculado la sección eficaz de ionización por colisión hasta 1 GeV en algunos metales nobles en el marco de trabajo de la aproximación de onda plana de Born, con correcciones por intercambio y efectos de Coulomb y relativistas. Sus resultados reproducen correctamente los datos experimentales recopilados por Long et al⁽⁴⁾. Esos resultados muestran que en átomos pesados ($Z \geq 50$) la sección eficaz de ionización de capas atómicas internas por colisión de electrones, particularmente de la capa-K, es una función monótona creciente con la energía cinética beta, con un punto de inflexión próximo a 1 MeV donde los efectos relativistas comienzan a ser importantes^(4,5). En elementos más livianos la función es mayoritariamente creciente, con un mínimo local en la misma región de energías^(4,5). La particularidad de ser una función, en general, creciente es doblemente beneficioso para nuestro propósito: es posible aumentar la intensidad relativa de los rayos-X inducidos, utilizando radioisótopos que emitan partículas beta con altas energías (del orden de 1 MeV o superior); y por otra parte esa energía está lo suficientemente lejos de los umbrales de ionización de capas profundas de cualquier átomo, lo cual se traduce en una reducción en la selectividad de la excitación beta. La fuente doble ⁹⁰Sr-⁹⁰Y, emisora pura de partículas beta en un continuo de energías hasta 2.28 MeV, que ha sido usada en este trabajo, llenaría esos requisitos.

Ocurren además, diferentes procesos secundarios; el más importante de ellos (por contribuir a la producción de vacancias atómicas) es la fotoionización por bremsstrahlung, principalmente en muestras de alto número atómico Z, dado que la probabilidad de emisión de radiación, ϕ_B , crece cuadráticamente con Z. Esta ionización por radiación de electrones en un material es un mecanismo indirecto, responsable de lo que se denomina "fluorescencia del continuo"; la sección eficaz de capa-K para este proceso χ_K^r está dada por⁽⁶⁾:

$$\chi_K^r(E) = \int_{U_K}^E \frac{d\phi_B(E, k)}{dk} a(k) \frac{\tau_K(k) + \sigma_K(k)}{\mu(k)} dk \quad (1)$$

donde:

$d\phi_B/dk$ = sección eficaz diferencial⁽⁷⁾ para bremsstrahlung de partículas- β [cm^2/keV],
 E = energía cinética beta [keV],
 U_K = energía del umbral-K de ionización [keV],
 $a(k)$ = probabilidad de absorción media del bremsstrahlung de energía k ,
 τ_K = sección eficaz fotoeléctrica capa-K⁽⁸⁾ [cm^2],
 σ_K = sección eficaz Compton capa-K⁽⁹⁾ [cm^2],
 μ = sección eficaz de atenuación de fotones⁽¹⁰⁾ [cm^2].

El bremsstrahlung de partículas- β puede contribuir a inducir la emisión de rayos-X característicos por efecto fotoeléctrico y además por efecto Compton en elementos de bajo Z y altas energías⁽¹¹⁾.

En la Fig. 1 se comparan para el caso de Au y Ag, hasta 2 MeV, las dos secciones eficaces de ionización: por colisión⁽⁵⁾ y por radiación calculada a partir de la ec.(1), con datos de las ref. (7-10) y tomando $a(k)=1/2$ resultante de suponer (siguiendo las líneas de Reed⁽¹²⁾) que el bremsstrahlung se origina próximo a la superficie de la muestra. Se observa en la Fig. 1, que ambos procesos de ionización son del mismo orden de magnitud produciéndose una transición en la importancia relativa de ambas secciones eficaces al pasar de Ag a Au. Así, para blancos de bajo Z, las secciones eficaces por impacto superan en importancia a las de radiación, produciéndose una inversión en esta tendencia alrededor de $Z = 63$, a partir del cual la ionización por radiación comienza a ser el modo preponderante.

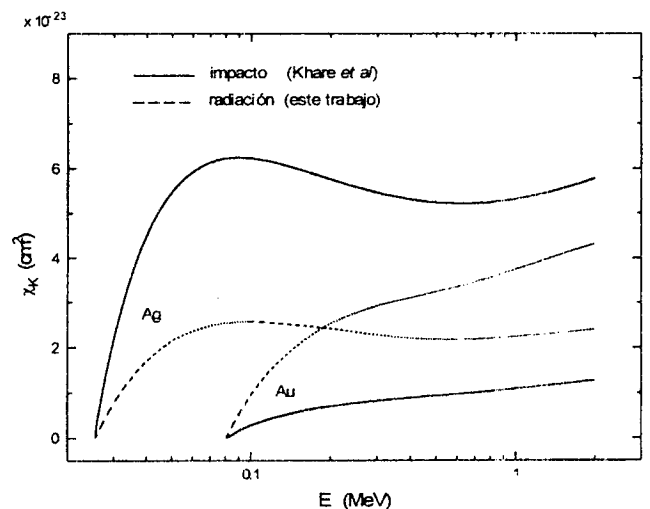


Figura 1: Secciones eficaces de ionización capa-K en función de la energía cinética hasta 2 MeV, por colisión⁽⁵⁾ (línea continua) y por radiación de electrones (línea de trazos) calculada según la ec.(1) del texto.

III. EXPERIMENTAL

Fuente radiactiva

La fuente de electrones fue preparada partiendo de una solución acuosa de $^{90}\text{SrCl}_2$, conteniendo una actividad conocida por unidad de volumen y entonces depositada en microgotas sobre un sustrato de Mylar de 1 mg/cm^2 de espesor. El agua es evaporada con luz infrarroja dejando las sales radioactivas adheridas al sustrato; posteriormente la fuente fue sellada con otra lámina idéntica del mismo material. Se obtuvo una fuente plana con una superficie radiactiva de $\sim 2 \text{ mm}^2$ de área. La fuente beta construida de ésta manera es simétrica en sus caras y considerando el rango de penetración media de los electrones del ^{90}Sr - ^{90}Y en Mylar (del orden de los milímetros) permite un escape del 99% de las partículas⁽¹³⁾. La actividad de la fuente usada en este trabajo fue baja ($12 \text{ } \mu\text{Ci}$) por una cuestión de conveniencia experimental en el manipuleo del material radiactivo, pero es posible fabricar por el mismo procedimiento descrito, fuentes con intensidades superiores en varios órdenes de magnitud.

Geometrías de irradiación y emisión

En este trabajo consideramos muestra gruesa aquella cuyo espesor sea superior a la longitud de atenuación de sus propios rayos-x característicos-K. Esta longitud depende de cada material y esta dada por la inversa del coeficiente de atenuación de rayos-x.

En la geometría de fuente transparente^(6,14) la fuente de electrones es posicionada en contacto directo con la superficie plana de una muestra gruesa del elemento a irradiar, la cual subtende un ángulo sólido $2\pi \text{ sr}$ desde la fuente. Las vacancias atómicas que producen en el blanco de acuerdo a los mecanismos discutidos en la sección anterior y los fotones característicos emergen isotrópicamente de la muestra por la cara irradiada. La fuente radiactiva es transparente para los rayos-x, por lo que la atraviesan con despreciable atenuación. En tanto las partículas son frenadas en un posterior absorbente de Mylar. Este absorbente es elegido además para producir la más baja atenuación posible en los rayos-x. La radiación-x obtenida consiste de líneas características $K\alpha$ y $K\beta$ montadas sobre un fondo continuo de bremsstrahlung como se muestra en la Fig. 2 para el caso de un blanco de Cu. Esos espectros fueron tomados con detector de Ge-HP (de $180\text{eV}@5.9\text{keV}$ de resolución) interponiéndole un absorbente beta de Mylar de $300 \text{ } \mu\text{m}$ de espesor. De ser necesario la radiación puede ser monocromatizada por la utilización de filtros adecuados. Como ejemplo, 200 mg/cm^2 de Pt y 50 mg/cm^2 de Ag, serían absorbentes convenientes de los rayos-x $K\beta$ de Pb y Sn respectivamente.

Las intensidades emitidas (*i.e.* detectadas y corregidas por atenuación en el absorbente beta) de los elementos químicos con números atómicos comprendidos entre

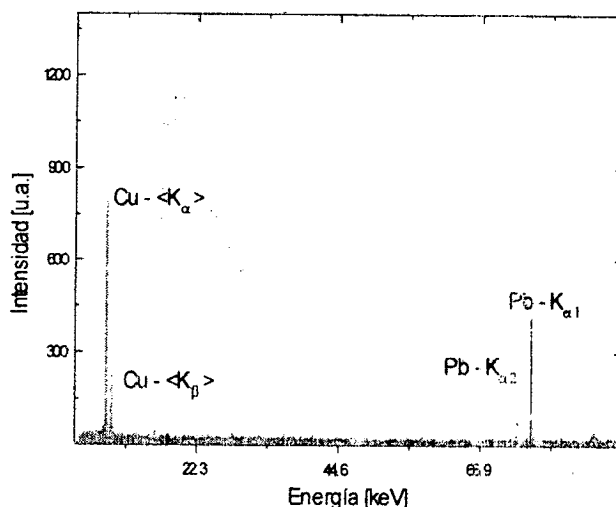


Figura 2: Espectro de emisión de un blanco de Cu excitado por electrones, tomado con detector de Ge con un absorbente beta de $300 \text{ } \mu\text{m}$. Las líneas del Pb provienen del colimador.

22 y 82, se presentan en la Fig. 3 como función de la energía media de las líneas $K\alpha$. Las intensidades de línea, han sido obtenidas experimentalmente en este trabajo para los siguientes elementos químicos puros: Ti, V, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Ba, Ce, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Hf, Ta, W, Re, Au y Pb. La intensidad de línea de todo otro elemento químico en la Fig. 3, ha sido interpolada de los datos experimentales usando la ecuación derivada por Chesta et al⁽⁶⁾.

Generador de rayos-x

En la Fig. 4 se presenta el diagrama esquemático de un prototipo del generador. Se trata de un arreglo compacto que contiene una fuente primaria de partículas-beta, en la configuración de fuente transparente, la cual induce los rayos-X característicos

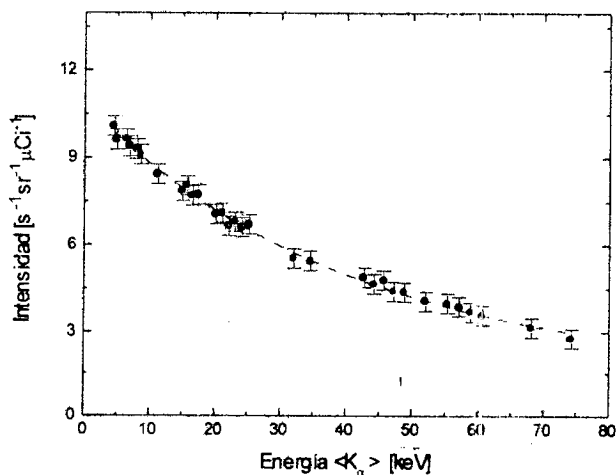


Figura 3: Intensidad de la línea $K\alpha$ en función de la energía media emitida por elementos químicos con $6 \leq Z \leq 82$.

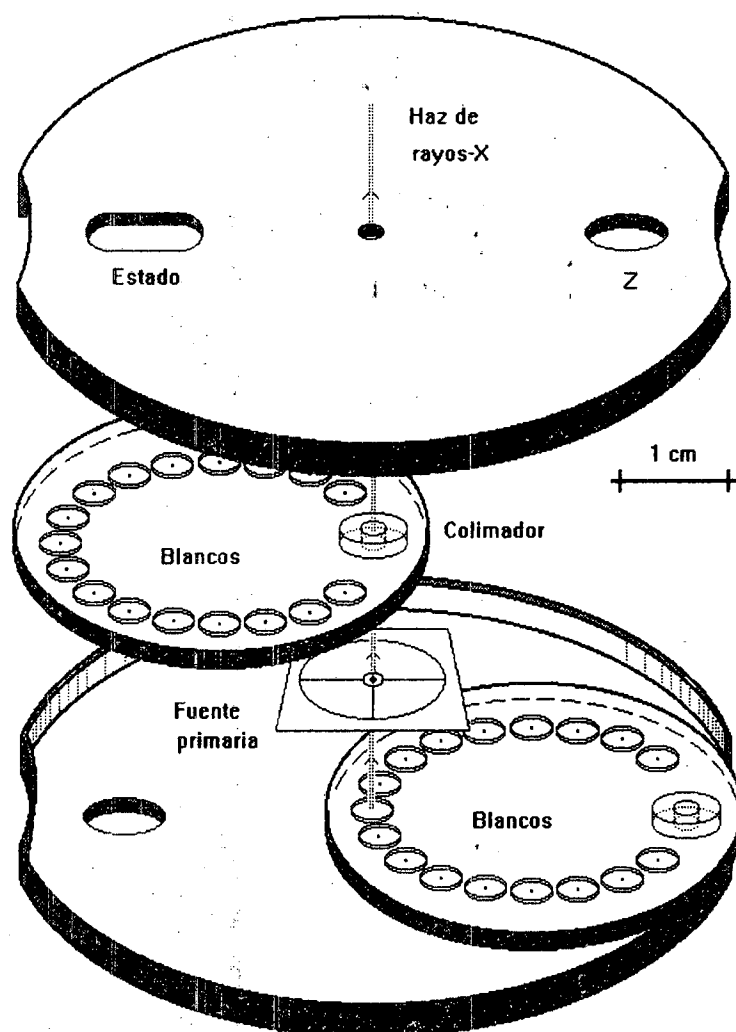


Figura 4: Diagrama esquemático de un generador de rayos-x. El dispositivo es reversible en sus caras y genera 34 energías monocromáticas distintas cubriendo los primeros 100 keV del espectro de radiación. En la figura el blanco ha sido seleccionado de la rueda inferior y la radiación-x emerge por el colimador ubicado en la rueda superior.

de 34 elementos químicos puros en una cámara multiblanco. La fuente radiactiva se posiciona de manera única sobre cada uno de los blancos elegidos y los rayos-X emergen por un colimador de plomo cuya apertura es variable para permitir diferentes divergencias del haz acorde a la necesidad del experimento. Los blancos y los colimadores están montados sobre dos ruedas giratorias descentradas, que son presentados a la fuente de a uno por vez; cuando un blanco es presentado en una rueda un colimador debe ser presentado por la otra a los efectos de permitir la emisión hacia el exterior. La simetría de la fuente radiactiva permite que el generador sea reversible, duplicando así el número de blancos que puede contener la cámara de irradiación. Por las dimensiones de la fuente primaria ($\sim 2 \text{ mm}^2$ de área) es posible montar hasta 17 blancos de 4 mm de diámetro cada uno, mas un colimador en cada rueda, para dar un

dispositivo cilíndrico de 6 cm de diámetro por 1.5 cm de espesor.

IV. CONCLUSIONES

Usando ^{90}Sr es posible preparar fuentes de rayos-x constantes (en el tiempo) y monocromáticas, que pueden utilizarse para aplicaciones muy variadas que van desde la calibración de instrumental de rayos-x, o la incorporación en espectrómetros de radiaciones para mediciones *in situ*, hasta usos tales como la radiografía médica o en estudios básicos de Física de superficies cuando la actividad de la fuente sea del orden de algunos curies (*i.e.* $\sim 10^{10}$ desintegraciones por segundo).

Esta clase de generador de rayos-x se diferencia de aquellos que utilizan fotones como modo de excitación

primaria⁽¹⁵⁾ en muchos aspectos. La intensidad es poco dependiente de la energía de los rayos-x debido a la presencia de dos procesos mayoritarios de excitación de capas atómicas internas (colisión y radiación) cuyas importancias relativas en cierto grado se compensan a lo largo de los diferentes elementos químicos de la tabla periódica, y que se traduce en una disminución de selectividad en la excitación atómica. Las elevadas energías cinéticas que alcanzan los electrones emitidos de la fuente ⁹⁰Sr-⁹⁰Y dan secciones eficaces de ionización considerables (del orden de 1 barn) en blancos de cualquier material; este hecho, sumado a la posibilidad de ionizaciones múltiples y al uso de la geometría de fuente transparente producen un método de excitación altamente eficiente: 10⁻³-10⁻² dependiendo del material. Por otra parte, las características geométricas de la fuente beta (simétrica en sus caras y de escasas dimensiones) permite diseñar un generador de rayos-x muy compacto y de gran cantidad de energías posibles de seleccionar.

15 - Amersham Catalog, Instrument Calibration Sources (Amersham International plc) 44 (1990).

Referencias

1 - Arduini G., C. Cicardi, M. Milazzo, L. Sangaletti and M. Silari, Nucl. Instr. and Meth. B **99**, 281 (1995).

2 - Labrecque J.J., Prog. Analyt. Atom. Spectrosc. **4**, 191 (1981).

3 - Watt J.S. en "Handbook of X-ray Spectrometry", Eds. Marcel Dekker, N.Y. 360 (1993).

4 - Long X., M. Liu, F. Ho and X. Peng, "At. Data Nucl. Data Tables" **45** 353 (1990).

5 - Khare S.P., V. Saksena, and J.M. Wadehra, Phys. Rev. A, **48**, 1209 (1993).

6 - Chesta M.A., T.S. Plivelic and R.T. Mainardi, Nucl. Instr. and Meth. B, **145**, 459-468 (1998).

7 - Pratt R.H., H.K. Tseng, C.M. Lee and L. Kissel, "Atomic Data and Nuclear Data Tables" **20**, 175 (1977).

8 - Scofield J.H., Theoretical Photoionization Cross Sections, UCRL-51326 (1973).

9 - Stutz G., private communication (2000).

10 - McMaster W.H., N. Kerr del Grande, J.H. Mallet and J.H. Hubell, Compilation of X-ray Cross Sections, UCRL-50174, Sec. II, Rev. 1 (1969).

11 - Stutz G., en "Anales del IV Sem. de Técnicas por Rayos-x" **10**, 286 (1998).

12 - Reed S.J.B., in "Electron Microprobe Analysis", 2nd ed., Cambridge University Press, UK, 251 (1993).

13 - Brandt W. and R. Paulin, Phys. Rev. B, **15**, 2511 (1977).

14 - Chesta M.A., T.S. Plivelic and R.T. Mainardi, Proc. of IV ENAN (MG, Brazil, 1997).