

Dispositivo para irradiación con rayos X

E.F. AGUILERA, R. POLICRONIADES

*Departamento del Acelerador, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Apartado postal 18-1027, México, D.F., México*

Y

M.E. DE LA ROSA

*Departamento de Radiobiología, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Apartado postal 18-1027, México, D.F., México*

Recibido el 17 de junio de 1992; aceptado el 1 de septiembre de 1992

RESUMEN. Se diseñó un dispositivo para generar rayos X cuasi-monoenergéticos a partir del bombardeo con partículas cargadas. Utilizando Fe como blanco y protones como proyectiles, se obtuvieron razones de exposición de hasta 10800 roentgen/hora.

ABSTRACT. A device is designed to generate cuasi-monoenergetic x-rays out from bombardment with charged particles. By using Fe as the target and protons as projectiles, exposure rates of up to 10800 roentgen/h are obtained.

PACS: 07.85.+n; 87.80.+s; 35.80.+s

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los efectos producidos por radiación ionizante en las células vivas constituye un área de investigación activa en el campo de la radiobiología [1,2]. Este campo tiene entre sus objetivos estimar el riesgo biológico por la exposición a radiaciones, conjuntando la información de diferentes áreas tales como la genética epidemiológica, la radiogenética de bioensayos expuestos y la dosimetría. La necesidad de conocer los mecanismos de respuesta a la acción de las radiaciones, ha inducido a la realización de numerosas investigaciones, que por una parte se proponen identificar cuáles son los cambios en diferentes parámetros biológicos, tanto genéticos como fisiológicos para cada estado de desarrollo y funcionamiento celular y, por otra parte, intentan detectar y cuantificar los efectos de la irradiación de las células germinales sobre los componentes adaptativos y otras características que se manifiestan en generaciones posteriores en las poblaciones expuestas [3-5].

Una parte importante de la investigación en radiobiología consiste en estudiar el efecto atenuante o protector que algunos compuestos químicos tienen sobre el daño biológico inducido por la radiación [6,7]. Utilizando una fuente intensa de ^{60}Co , en el Centro Nuclear de México se ha encontrado evidencia de que la clorofilina, un derivado de la clorofila, produce un efecto radioprotector en ciertas células somáticas ante la irradiación con rayos γ [8,9]. Por otro lado, un estudio reciente indica que la energía lineal transferida (LET) de la radiación ionizante no resulta ser un parámetro adecuado o suficiente en la cuantificación del daño inducido por radiación de diferente tipo [10], contrariamente a la creencia prevaleciente hasta hace pocos años.

Es pues de interés, estudiar el comportamiento de algunos compuestos ante irradiación con fotones de diferente energía, en particular con rayos X de energías menores a 100 keV. Debido a los cortos tiempos de desarrollo de la mayoría de los sistemas biológicos usados, es importante contar con una instalación para irradiación lo suficientemente cercana a los contenedores de las respectivas muestras vivas.

Las relativamente altas secciones eficaces para producción de rayos X por bombardeo de átomos con partículas cargadas, pueden ser aprovechadas para generar haces intensos de fotones. Dado que los rayos X se emiten según líneas características de los átomos bombardeados, es posible producir haces prácticamente monoenergéticos cuya energía puede ser escogida seleccionando el blanco apropiado. En este trabajo describimos la implementación de estas ideas en las instalaciones del acelerador Tandem Van de Graaff del Centro Nuclear de México. La Sec. 2 contiene un breve resumen de la teoría que justifica el diseño del dispositivo. En la Sec. 3 se describe el arreglo experimental utilizado y en la Sec. 4 se da una descripción del procedimiento de calibración dosimétrica, incluyendo los resultados correspondientes. Finalmente, en la Sec. 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. TRASFONDO TEÓRICO

Si N_p partículas cargadas de energía E_p se hacen incidir sobre un blanco grueso, perderán paulatinamente su energía al excitar los electrones atómicos a su paso. Puesto que muchos de los átomos o iones excitados se desexcitan subsecuentemente al estado base mediante la emisión de rayos X característicos, el blanco puede servir como una fuente localizada para generar dichos rayos X. Si después de penetrar una distancia t las partículas tienen energía $E'_p(t)$, el número de rayos X producidos en una capa de grosor diferencial dt saliendo dentro de un ángulo sólido Ω , está dado por

$$dn_x = N_p \Omega \sigma_x(E'_p(t)) dt, \quad (1)$$

donde $\sigma_x(E'_p)$ es la sección eficaz diferencial para producción de rayos X del blanco dado, por las partículas de energía E'_p .

Para un blanco plano orientado a 45° respecto al haz y al detector, los rayos X viajarán también una distancia t dentro del blanco, de manera que sufren una atenuación por un factor $e^{-\mu_b t}$, donde μ_b es el coeficiente de atenuación lineal para dichos rayos X en el material del blanco. El número de fotones saliendo del blanco a 90° respecto a la dirección del haz es entonces

$$n'_x = N_p \Omega \int_0^{t_0} \sigma_x(E'_p(t)) e^{-\mu_b t} dt, \quad (2)$$

donde t_0 es el alcance de las partículas en el blanco, es decir, $E'_p(t_0) = 0$. Es claro también que $E'_p(0) = E_p$.

Después de atravesar una ventana de algún material de grosor t_m y viajar una distancia t_a en aire, sólo llegará al detector un número N_x de rayos X dado por

$$N_x = e^{-\mu_m t_m - \mu_a t_a} n'_x, \quad (3)$$

donde μ_m y μ_a son los coeficientes de atenuación lineal en el material de la ventana y en el aire, respectivamente. Si d es la distancia del blanco al detector y la mancha del haz en el blanco puede considerarse como puntual, es entonces fácil demostrar que N_x puede escribirse en la forma

$$N_x = KAN_p \exp(-\mu_a d)/d^2, \quad (4)$$

donde

$$K = \exp(-\mu_m t_m + \mu_a d_0) \int_0^{t_0} \sigma_x(E'_p(t)) \exp(-\mu_b t) dt \quad (5)$$

y A , d_0 son el área del detector y la distancia que los fotones viajan antes de entrar al aire, respectivamente. Para un blanco dado, con E_p , t_m y d_0 fijos, K es una constante que puede ser experimentalmente determinada de una gráfica de N_x/N_p vs d .

Si N_d rayos X se registran en el detector en un tiempo Δt y la eficiencia intrínseca del detector para dichos rayos X es e , se tendrá que $N_x = N_d/e$ y el número de fotones por cm^2 por s en la posición del detector estará dado por

$$\phi = N_d/(Ae\Delta t). \quad (6)$$

Para un campo de radiación de ϕ fotones/ cm^2 /s en aire, cada uno de energía E (MeV), la rapidez de exposición \dot{X} está dada por [11]

$$\dot{X} = 1.826 \times 10^{-11} \frac{\mu_a \phi E \text{ roentgen}}{\rho_a \text{ s}}, \quad (7)$$

donde ρ_a es la densidad del aire (kg/cm^3) y el coeficiente de absorción μ_a está dado en cm^{-1} . A partir de esta expresión es posible calibrar la rapidez de exposición mediante mediciones del campo de radiación con detectores convencionales.

3. ARREGLO EXPERIMENTAL

En la Fig. 1 se muestra un esquema de la cámara de bombardeo utilizada para la irradiación primaria. Un par de colimadores de tantalio colocados a la entrada sirven para definir el haz. El primero de ellos está eléctricamente aislado, permitiendo así medir la corriente incidente para propósitos de enfoque. Por un lado de la cámara entra una barra metálica, eléctricamente aislada, en cuyo extremo interno se coloca el blanco y a través de la cual la corriente del haz incidente puede ser medida. En el lado opuesto, una ventana de 39 mm de diámetro, hecha de *mylar* de 127 μm , permite el paso de la radiación secundaria utilizada para irradiar las muestras. Otra ventana de 30 mm de diámetro en la parte superior de la

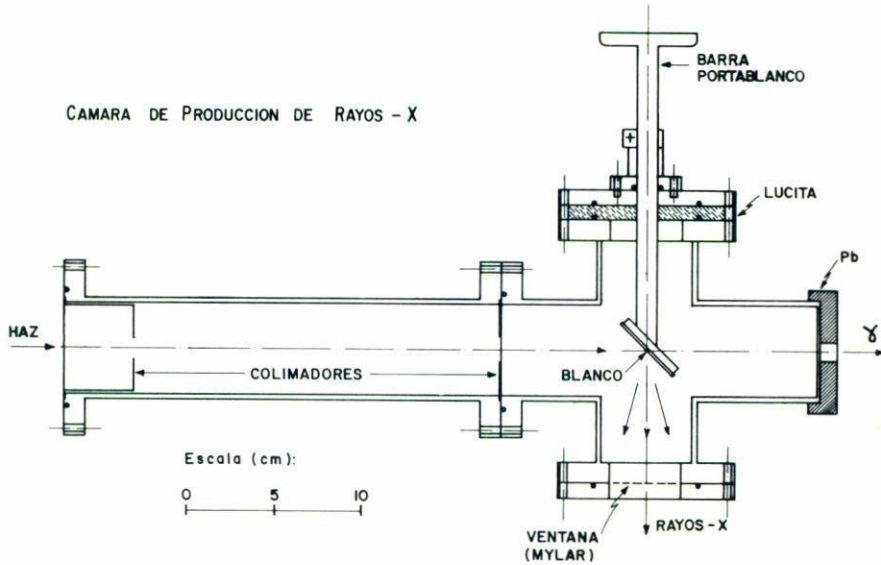


FIGURA 1. Esquema mostrando una vista de la cámara de bombardeo donde se generan los rayos X mediante la irradiación de un blanco con protones.

cámara (no mostrada en la Fig. 1), hecha también de *mylar* del mismo espesor, sirve para monitorear dicha radiación mediante una cámara de ionización (CI) colocada encima.

Como un monitoreo adicional, un detector de Ge(HP) de 13% de eficiencia (DGe) se coloca horizontalmente enfocado hacia el fondo de la cámara (véase Fig. 2), permitiendo así medir la radiación γ producida por la excitación nuclear del blanco. Con el objeto de minimizar el fondo de radiación γ proveniente de las colisiones de las partículas del haz con los colimadores, la zona donde éstos se encuentran se envuelve con un blindaje de plomo de aproximadamente 8 mm de espesor. Adicionalmente, la muestra se encasilla dentro de un bloque de plomo de $112 \times 112 \times 49$ mm y se coloca un colimador de 19 mm de espesor (9.5 mm ϕ), hecho del mismo material, enfrente del DGe. Para efectos de calibración, un detector Si(Li) (DSi) o la CI pueden colocarse a diferentes distancias orientados horizontalmente hacia la ventana lateral de la cámara de bombardeo (Fig. 2).

La barra portablancos puede ser girada sin afectar al vacío dentro de la cámara de bombardeo y se fija de tal manera que el plano del blanco presente una sección considerable tanto al haz de partículas cargadas como a la muestra, cuidando que la sección presentada hacia la ventana superior sea también suficiente para propósitos de monitoreo. Puesto que la energía del haz de partículas cargadas no es un factor crítico en estos experimentos, la cámara de bombardeo se coloca directamente alineada con la sección de alta energía del acelerador (Fig. 2), con lo cual se maximiza la corriente en el blanco al ahorrarse las pérdidas de transmisión que ocurrirían si se usara el imán analizador.

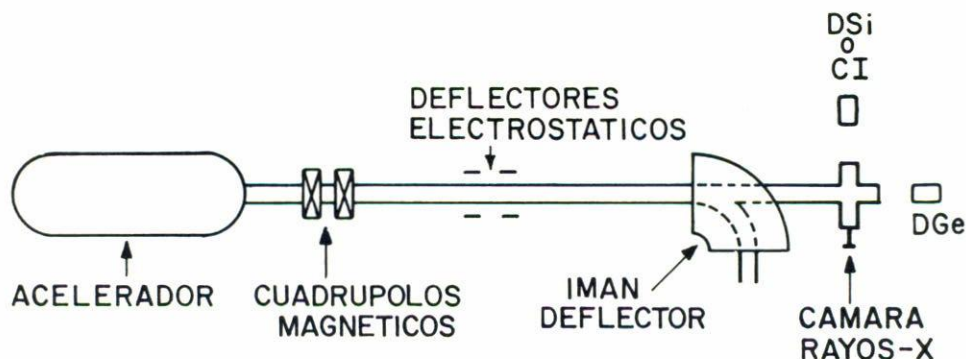


FIGURA 2. Esquema mostrando la colocación de la cámara de bombardeo con respecto al acelerador y los correspondientes sistemas de enfoque.

4. CALIBRACIÓN

Para probar el funcionamiento del dispositivo descrito se utilizó típicamente un haz de protones de 4 MeV incidiendo sobre un blanco grueso de Fe para obtener rayos X de las líneas K_{α} (6.4 keV) y K_{β} (7.1 keV) de este elemento. El espectro presentado en la Fig. 3, obtenido con el DSi, claramente muestra que dichas líneas aparecen prácticamente libres de fondo. La joroba a la izquierda del pico denominado K_{α} corresponde a radiación en el continuo, provocada por el frenado de electrones secundarios (*bremstrahlung*), con una contribución adicional del pico de escape de los rayos X del Si, localizado a 1.8 keV por abajo del pico de energía total (*full energy peak*). Al hacer una calibración dosimétrica, es necesario tomar en cuenta que cada evento en la joroba corresponde a un fotón real de la energía total (en el caso del pico de escape), o cercana a ella.

Por otra parte, el espectro de rayos γ (Fig. 4) aparece con el fondo Compton inherente a este tipo de mediciones. El espectro claramente muestra un pico prominente a 847 keV, correspondiente a la transición $2^+ \rightarrow 0^+$ en ^{56}Fe . El pico a 1015 keV, identificado como ^{27}Al ($3/2^+ \rightarrow 5/2^+$), proviene probablemente de excitar el soporte de aluminio de los colimadores. Es entonces factible que la línea ($1/2^+ \rightarrow 5/2^+$) a 844 keV en ^{27}Al esté también presente en el espectro, traslapándose con la línea del ^{56}Fe . Por lo tanto, a pesar de que es de esperarse una contribución dominante del Fe, no es en principio confiable utilizar esta última línea para efectuar una determinación absoluta del número de protones incidentes sobre el blanco de Fe. Puesto que la idea fue utilizar al DGe para realizar un monitoreo simple en línea, no se tomó mayor provisión para evitar la presencia de las líneas del Al. Sin embargo, la correlación encontrada entre las γ 's de 847 keV y el número de protones incidentes en el blanco fue muy buena, como se desprende de los dos párrafos siguientes.

Si la energía de las partículas cargadas se mantiene constante, como en estos experimentos, la carga integrada del haz en el blanco, Q (la cual, para una buena integración, es proporcional a N_p), debe ser directamente proporcional al número de fotones producidos en el mismo y por lo tanto a la respectiva dosis recibida a una distancia dada de él [véanse Ecs. (4)-(7)]. Como un primer paso en la calibración del sistema, se hizo una comprobación

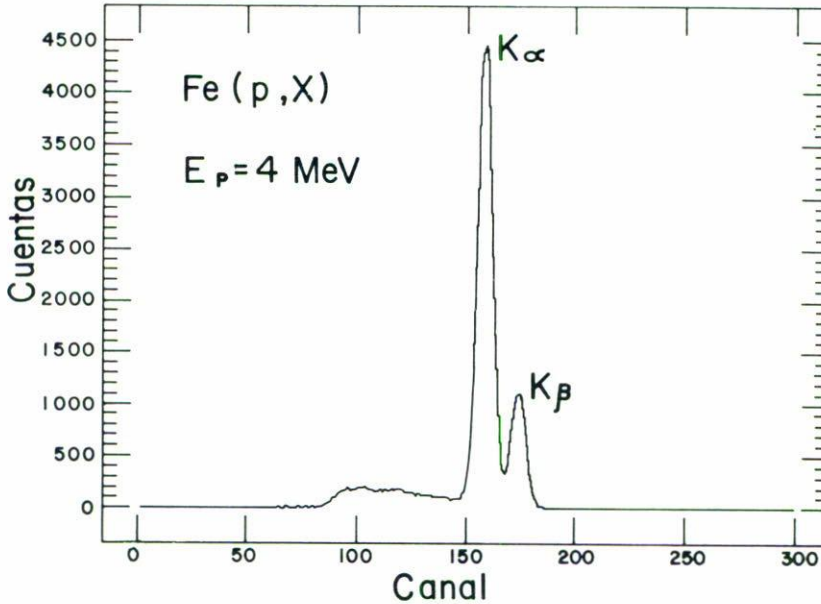


FIGURA 3. Espectro de rayos X característicos obtenido con el detector Si(Li) colocado a 122.8 cm del blanco, al bombardear Fe con protones de 4 MeV.

experimental de lo anterior. Para ello se realizaron diversas pruebas midiendo siempre Q simultáneamente con el área de los picos obtenidos en el DSi ($K_{\alpha} + K_{\beta} + \text{bremsstrahlung} + \text{escape}$) y/o en el DGe (línea de 847 keV) y/o con la exposición registrada en la CI. Se probaron diferentes configuraciones en las que se variaron las posiciones del DSi y de la CI, así como la orientación del blanco, manteniendo siempre la misma posición del DGe.

Tomando varias mediciones para cada configuración, se encontró que la relación de proporcionalidad entre Q y las lecturas de los diferentes monitores podía ser reproducida dentro de 2% para el DSi y la CI y dentro de 3% para el DGe; conclusiones obtenidas de una estadística sobre un total de 80 puntos. Esto indica una integración confiable y se justifica, por lo tanto, calibrar la dosis de rayos X recibida a una distancia dada del blanco de acuerdo a la carga integrada del haz en el mismo.

Utilizando las Ecs. (6) y (7), el DSi se usó para calibrar la exposición por unidad de Q a distancias grandes del blanco. Cerca del blanco, donde el DSi presenta problemas serios de apilamiento, la calibración se efectuó midiendo directamente con la CI, cuyas lecturas fueron normalizadas a los resultados del DSi en la región de traslape. Se tuvo cuidado de comprobar que la radiación γ producida en el dispositivo no afectara apreciablemente las lecturas de la CI. Para ello, se tomaron lecturas con y sin un absorbedor de rayos X de baja energía colocado enfrente de la CI. Las mediciones con el absorbedor produjeron lecturas nulas en la CI, indicando una contribución despreciable de la radiación γ . Esto garantiza que las dosis recibidas por las muestras biológicas serán debidas enteramente a los rayos X provenientes del blanco bombardeado.

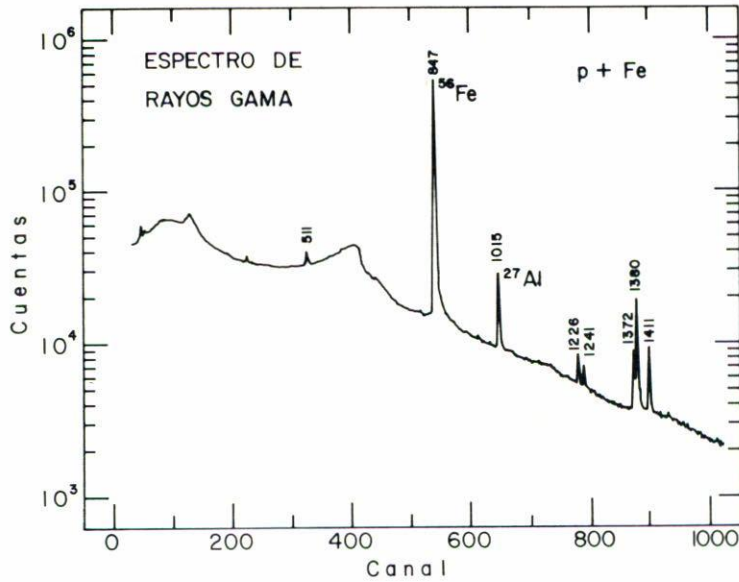


FIGURA 4. Espectro de rayos γ obtenido con el detector de Ge(HP) colocado a 35.3 cm atrás del blanco de Fe. Los números sobre los picos indican la energía correspondiente (keV).

TABLA I. Fuentes usadas para la calibración del detector Si(Li).

Fuente	E (KeV)	%/desint.	Actividad (μCi)
^{241}Am	13.90	13.50	11.06
	17.80	21.00	
	20.80	5.00	
	26.35	2.50	
	59.54	35.30	
^{133}Ba	4.30	16.80	7.35
	30.80	97.67	
	35.00	22.76	
	53.16	2.14	
^{54}Mn	5.40	7.43	0.13
^{57}Co		intens. rel.	no-calibrada
	6.40	49.43	
	14.40	9.40	

El producto Ae en (6) y la posición del cristal de Si(Li) dentro del DSi se determinaron de la siguiente forma: Se colocó una fuente de ^{241}Am de actividad conocida (véase Tabla I)

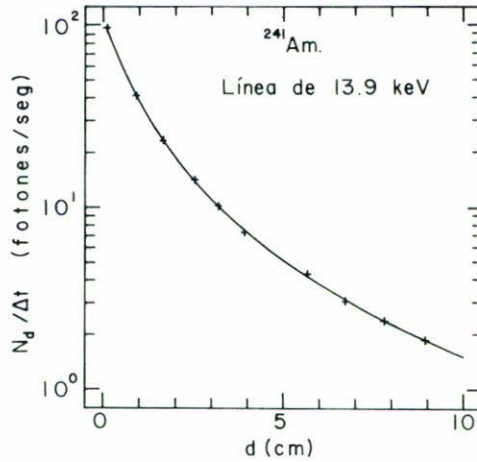


FIGURA 5. Determinación de parámetros geométricos del detector Si(Li). La curva continua es el resultado de un ajuste con 3 parámetros de la Ec. (8).

a diferentes distancias, d , del frente del detector. El número de fotones detectados por unidad de tiempo cumple en este caso una relación equivalente a (4), dada por

$$\frac{N_d}{\Delta t} = AeS \frac{\exp[-\mu_a(d + d_0)]}{4\pi(d + d_0)^2}, \quad (8)$$

donde S (fotones/s) es la intensidad de la fuente y d_0 (cm) es la posición del cristal con respecto al frente del detector. De un ajuste de 3 parámetros (Ae , μ_a , d_0) de esta expresión a los puntos experimentales para la línea de 13.9 keV, según se muestra en la Fig. 5, se obtuvo $Ae(13.9 \text{ keV}) = 5.24 \text{ mm}^2$, $\mu_a = 0.016 \text{ cm}^{-1}$ y $d_0 = 1.43 \text{ cm}$. El producto Ae para la línea de interés se dedujo entonces con ayuda de la curva de eficiencia para el DSi (Fig. 6), obtenida de una medición con las fuentes indicadas en la Tabla I colocadas a 1 mm del frente del detector. El resultado fue $Ae(6.4 \text{ keV}) = 1.75 \text{ mm}^2$.

La Fig. 7 muestra la calibración obtenida para la exposición por unidad de carga integrada del haz, para diferentes distancias del blanco, utilizando el DSi (círculos) y la CI (cuadrados). La curva continua es un ajuste de 2 parámetros (a_1 , μ_a) de la expresión

$$X/Q = a_1 \exp(-\mu_a d)/d^2, \quad (9)$$

que puede ser obtenida de (4), (6) y (7), tomando en cuenta que la carga integrada, Q , es proporcional al número de protones, N_p . La desviación sistemática de los puntos experimentales respecto a dicha curva a distancias pequeñas, indica que la aproximación de fuente puntual deja de ser válida a esas distancias.

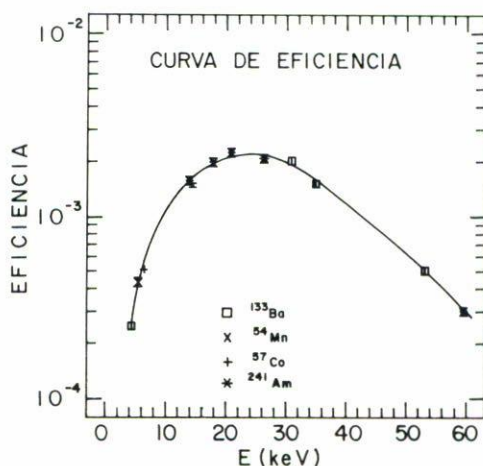


FIGURA 6. Curva de eficiencia del detector Si(Li) obtenida colocando las fuentes indicadas en la Tabla I a 1 mm del detector. La curva continua que une los puntos es sólo una guía para el ojo.

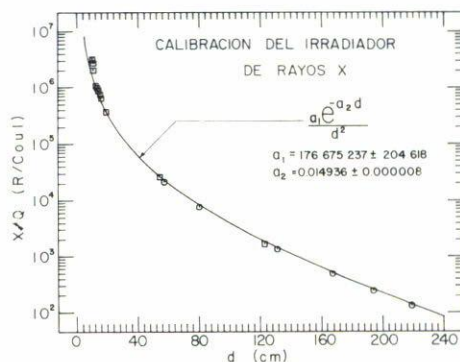


FIGURA 7. Curva de calibración de dosis de rayos X para un blanco de Fe. La ordenada da la exposición por unidad de carga depositada en el blanco, como función de la distancia a la muestra, obtenida con el detector Si(Li) (círculos) y la cámara de ionización (cuadrados), según se explica en el texto.

5. CONCLUSIONES

Las partículas cargadas aceleradas pueden ser usadas para generar haces intensos de rayos X característicos del material del blanco. Usando Fe como blanco y protones como proyectiles, se demostró que pueden obtenerse haces de rayos X de 6.4 keV capaces de producir exposiciones de hasta 3×10^6 roentgen/coul (véase Fig. 7). Para una corriente típica del haz de 1 μ Amp, esto implica que pueden obtenerse razones de exposición de hasta 3 roentgen/s o 180 roentgen/mín. El dispositivo diseñado permite escoger la energía de los rayos X mediante una selección apropiada del blanco correspondiente. La utilización

del dispositivo para investigar los efectos de las radiaciones y su interacción con diferentes compuestos químicos está en proceso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al técnico Pedro Villaseñor por su valiosa ayuda en la construcción y adaptación de algunos componentes de la cámara de bombardeo.

REFERENCIAS

1. V. Bier, *Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation*, U.S. National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington, D.C. (1990).
2. K. Sankaranarayanan, *Genetic effects of ionizing radiation in multicellular eukariotes and the assessment of genetic radiation hazards in man*, Commission of the European Communities, Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, The Netherlands (1982).
3. D.R. Oliveri, *Biochemical studies of DNA strand break repair and molecular characterization of mei-41, a gene involved in DNA break repair*, PhD Thesis, California Univ. Davis (1989).
4. I. Yoshikawa and T. Ayaki, *Nagasaki Igakkai Zasshi* **65** (1990) 597.
5. K. Sankaranarayanan, "Ionizing radiation and genetic risks", *Mutation Research* **258** (1991) 3.
6. R. Felix, O. Olvera, J. Guzmán and M.E. de la Rosa, *Proc. Int. Cong. of Genetics, Genetics* **74** (1973) 578.
7. F.E. Murgler, *Mutation Research* **250** (1991) 275.
8. S. Zimmering, O. Olvera, M.E. Hernández, M.P. Cruces, C. Arceo, and E. Pimentel, *Mutation Research* **245** (1990) 4749.
9. O. Olvera, M.P. Cruces, C. Arceo, E. Pimentel, M.E. de la Rosa, and J. Guzmán, *Environmental Mutagen Society annual Meeting* (1992). Reno/Sparks, Nevada.
10. M. Belli, R. Cherubini, S. Finotto, G. Moschini, O. Sapora, G. Simone and M.A. Tabocchini, *Int. J. Radiat. Biol.* **55** (1989) 93.
11. H. Cember, *Introduction to Health Physics*, Pergamon Press Inc. (1983).