

# DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ALBEDO MEDIANTE EXPERIENCIAS DE RETRODISPERSIÓN DE RADIACIÓN GAMMA EN HIERRO Y ALUMINIO

Graciela Pereyra, Rafael Ferragut y Alberto Somoza

Instituto de Física de Materiales Tandil (IFIMAT), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399, (7000) Tandil, Argentina  
e-mail: [asomoza@exa.unicen.edu.ar](mailto:asomoza@exa.unicen.edu.ar)

En el presente trabajo se analizan los espectros resultantes de la radiación gamma retrodispersada en hierro y aluminio comerciales, para radiación incidente de 662 keV proveniente de una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ , a diferentes ángulos  $\theta$  entre la normal a la superficie del dispersor y el eje del detector de NaI(Tl) de grandes dimensiones. Se presentan resultados del número diferencial de albedo en función del ángulo  $\theta$  y del número total de albedo en función del espesor de las placas dispersoras. Los resultados obtenidos se discuten en función de los previamente reportados.

Spectra of backscattered gamma radiation in commercial iron and aluminum at different  $\theta$  angles between the normal to the face of the scatterer and the detector axis are analyzed. The incident energy of 662 keV, obtained from a  $^{137}\text{Cs}$  source, was measured with a big NaI(Tl) detector. Results on the differential number albedo as a function of  $\theta$  and the total number albedo as a function of scatterer slabs thickness are presented and discussed.

## I. INTRODUCCIÓN

Para el diseño de blindajes en instalaciones nucleares y recubrimientos de protección de radiación X y gamma en general, es necesario contar con información de la radiación dispersada proveniente de la materia circundante a una dada fuente radioactiva; información que es relevante, además, en laboratorios donde se realizan mediciones con fuentes de radiación (dispersión Compton, espectroscopía de aniquilación de positrones, etc.), para evitar la contribución espúrea del entorno.

Es conocido que la distribución espectral de la radiación proveniente de una fuente puntual en función de la energía, se ve modificada si la fuente se encuentra cerca de un material homogéneo; este fenómeno es debido a la radiación difundida por el material. Es decir, la radiación proveniente de la fuente de energía interactúa con el material dispersor y es difundida en todas direcciones; a la que es difundida hacia atrás, en un ángulo entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , con respecto a la normal entrante al material dispersor, se la llama radiación retrodispersada, que es objeto de análisis en el presente trabajo. Si bien desde los años 60' se llevan a cabo estudios del comportamiento de la interacción de la radiación gamma con la materia [1,2,3] (incluso mediante simulación con el método numérico de Monte Carlo [4]), respecto de la obtención de coeficientes de retrodispersión (número diferencial y total de albedo) como así también de la distribución en energía de la radiación retrodispersada, la información disponible es escasa.

En este trabajo se presenta información de la radiación retrodispersada en hierro y aluminio comerciales, mostrándose la variación del número diferencial de albedo en función del ángulo de dispersión y del número total de albedo en función del espesor de los dispersores; además se obtuvieron las distribuciones espectrales en energía, especialmente para aluminio de diferentes

espesores, que no habían sido relevadas en trabajos previos.

## II. EXPERIMENTAL

El arreglo experimental utilizado constó de un detector NaI(Tl) de 5" de diámetro y 2" de espesor y un goniómetro en donde se colocaron los dispersores de material a estudiar junto con la fuente radioactiva, los cuales se montaron sobre una mesa de madera terciada, poco masiva, de 1 m x 1 m. Sobre el goniómetro se giraron los dispersores para un dado ángulo  $\theta$  entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre la normal al plano del dispersor que pasa por la fuente puntual de radiación y el eje del detector, como se muestra en la Fig. 1. La distancia fuente-detector fue de 1 m. El intervalo angular  $\Delta\theta$  entre mediciones con dispersores de Al fue de  $15^\circ$ , para ángulos entre  $0^\circ$  y  $60^\circ$ , y de  $10^\circ$  para ángulos mayores, y con dispersores de Fe fue de  $10^\circ$  en todo el intervalo.

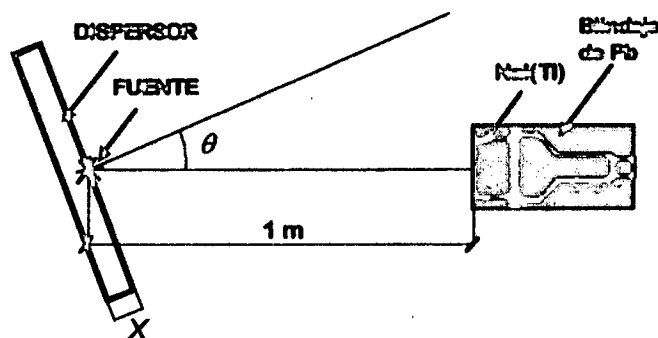


Figura 1: Esquema del arreglo experimental utilizado para la medición de la radiación retrodispersada.

Se utilizaron dispersores de aluminio (Al) y de hierro dulce (Fe) comerciales (~98%). Las dimensiones laterales de los dispersores utilizados para el relevamiento de las distribuciones en energía de la radiación retrodispersada fueron de 50 cm de lado, en dispersores de sección cuadrada, y 13 cm de diámetro, en dispersores de sección circular, para Al y Fe, respectivamente. Se estimó para este tipo de experiencias que la dimensión lateral de los dispersores fuese superior (o del orden en el caso del Fe) a la de saturación [1-3,5]. Para las mediciones mencionadas, el espesor de los dispersores de Al varió entre 1 cm y 10 cm, cuyo límite superior ha sido generalmente considerado como espesor de saturación [1,2], mientras que el espesor de los dispersores de Fe fue 4 cm, el cual es superior al de saturación. Particularmente para la determinación del número total de albedo en Fe en función del espesor del dispersor, se utilizaron placas de sección cuadrada de 32 cm de lado y espesores entre 0.5 cm y 4 cm.

Como emisor de radiación gamma se utilizó una fuente calibrada de  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV), con una actividad de ~10  $\mu\text{Ci}$  la cual, de acuerdo a la geometría del dispositivo experimental utilizado, puede considerarse puntual. Para la calibración en energía se usaron además las fuentes de  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  y  $^{40}\text{K}$ .

Se obtuvieron espectros de energía utilizando como parámetros el espesor del dispersor y el ángulo de retrodispersión  $\theta$ . El área bajo cada espectro fue de  $\sim 3 \times 10^6$  eventos, los cuales se colectaron en un tiempo de ~2 horas. También fue necesario obtener información espectral por separado del fondo de radiación y de la fuente radioactiva utilizada.

### III. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Las Figs. 2 y 3 muestran las distribuciones más representativas de la radiación retrodispersada  $N(E, \theta)$  para distintos ángulos  $\theta$  ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ ) en dispersores de Al y Fe, respectivamente. En general, se observa que, con el incremento del ángulo  $\theta$ , las distribuciones tienden a aplanarse, además de alcanzar progresivamente formas más extensamente distribuidas en energía. Estas distribuciones espectrales se obtuvieron luego de sustraer la contribución propia de la fuente y del fondo de radiación, habiéndose normalizado el valor de  $N(E, \theta)$  por unidad de ángulo sólido y por fotón primario incidente [1,6]. La distribución de la radiación retrodispersada fue corregida (canal por canal) considerando la eficiencia intrínseca del detector; esta corrección también se efectuó sobre los espectros de la fuente emisora, los cuales sólo fueron corregidos para su energía propia (662 keV), como es habitualmente aceptado [7]. La curva de eficiencia intrínseca en función de la energía se obtuvo a partir del criterio propuesto por Stanford y Rivers [8], para la distancia fuente-detector y las dimensiones del cristal detector utilizadas en estas mediciones.

En la Fig. 2 pueden verse las distribuciones de  $N(E, \theta)$  para tres espesores del dispersor de Al (1 cm, 6 cm y 10 cm); puede notarse que a medida que se incrementa el espesor aumenta el área bajo los histogramas, modificándose su forma, especialmente en la zona de baja energía de la distribución ( $E < 180$  keV), en donde se

evidencia la aparición de "picos secundarios". El cambio en la forma de las distribuciones de baja energía promueve un corrimiento en los centroides de las distribuciones hacia menores energías. Este efecto puede entenderse si se considera un crecimiento en la producción de procesos de dispersión Compton secundarios, o de orden múltiple, a medida que crece el espesor de los dispersores.

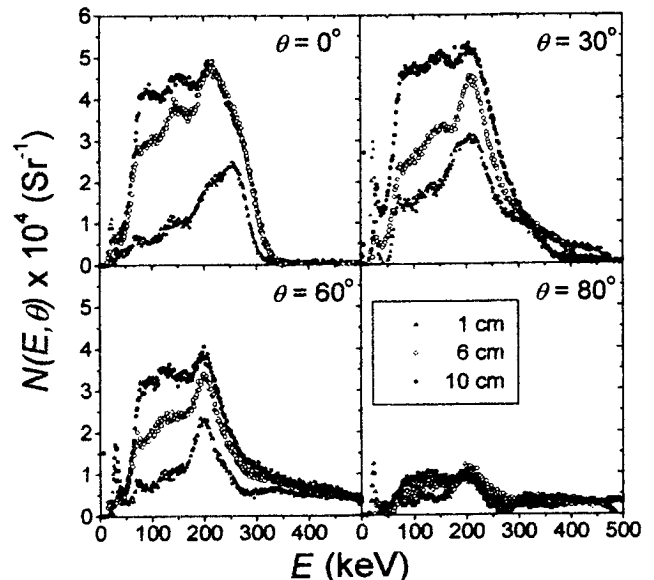


Figura 2: Distribución energética de la radiación retrodispersada, para diferentes ángulos  $\theta$ , en dispersores de Al de 1 cm, 6 cm y 10 cm de espesor.

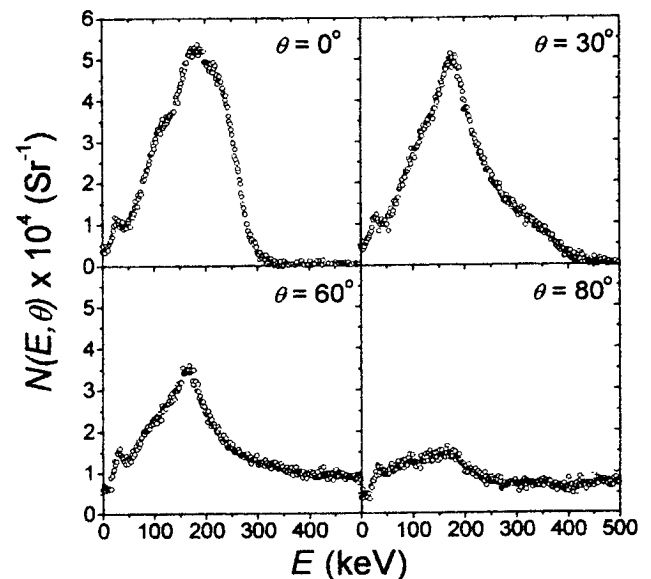


Figura 3: Distribución energética de la radiación retrodispersada, para diferentes ángulos  $\theta$ , en dispersores de Fe de 4 cm de espesor.

Comparando las distribuciones obtenidas en Al y Fe de las Figs. 2 y 3 para el mayor espesor, considerados en cada caso espesores de saturación [1,2], se observa una diferente forma espectral y, además, que el máximo principal de los espectros se encuentra a menor energía para dispersores de Fe que los correspondientes para Al; mostrándose, de este modo, una clara dependencia de la

distribución espectral con el número atómico del material dispersor.

Por otra parte, la probabilidad que la energía de un fotón sea totalmente absorbida por el detector, denominada habitualmente fotofracción, depende de la energía del fotón incidente y de las características del detector. En este sentido, a partir de las expresiones propuestas por Cesara y Terrani [9] para la fotofracción puede estimarse que, en el detector utilizado, cuando la energía incidente es menor a 300 keV (donde en este caso los dispersores actúan como una fuente secundaria de radiación), aproximadamente entre un 90% y un 100% de los fotones serán absorbidos por el cristal. Por este motivo, el grueso de la distribución  $N(E, \theta)$  estaría conformada por la contribución de eventos de retrodispersión.

El número diferencial de albedo  $N_d$  se define como la fracción de fotones que emergen de la superficie del dispersor para un dado ángulo  $\theta$ , por fotón primario incidente y por unidad de ángulo sólido. Así es que, este parámetro, se calculó como el área bajo las distribuciones de  $N(E, \theta)$  que se muestran en las Figs. 2 y 3. Por su parte, el número total de albedo  $N_t$  está dado por la siguiente expresión:

$$N_t = 2\pi \int_0^{\pi/2} N_d \sin \theta . d\theta ,$$

la cual, en el presente trabajo, se evaluó mediante una suma considerando intervalos angulares finitos  $\Delta\theta$  [6]; el valor obtenido representa el coeficiente total de retrodispersión.

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento del número diferencial de albedo  $N_d$  en función del ángulo  $\theta$ , para dispersores de Al y de Fe. En general se observa que, con un incremento del ángulo para  $\theta \geq 60^\circ$ ,  $N_d$  disminuye abruptamente.

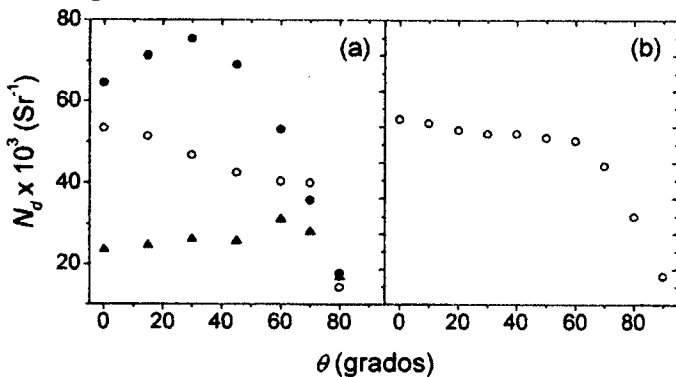


Figura 4: Variación del número diferencial de albedo  $N_d$  en función del ángulo  $\theta$ . (a) para dispersores de Al de 1 cm (▲), 6 cm (○) y 10 cm (●). (b) para dispersores de Fe de 4 cm de espesor.

La Fig. 5 muestra la variación del número total de albedo  $N_t$  en función del espesor de los dispersores de Al y Fe. Se han reportado resultados que dan cuenta de un incremento en el número total de albedo con el espesor hasta alcanzar, para espesores suficientemente grandes, un valor de saturación [1,5]. Los resultados obtenidos, en este trabajo muestran el mismo comportamiento, si bien no es claro que para Al se alcance una saturación para un

espesor de  $\sim 8$  cm, tal cual había sido anteriormente reportado [1,6]. Con los resultados obtenidos hasta el momento, puede afirmarse que  $N_t$  para el espesor de saturación sería mayor que 0.24, y que, además, el espesor de saturación alcanzaría un valor mayor al estimado en trabajos previos. En este punto, vale la pena mencionar que los valores de  $N_t$  obtenidos por otros autores [1,2,6,10] muestran gran dispersión ( $0.31 < N_t < 0.59$ ), lo cual justifica la necesidad de contar con mayor información experimental que refleje un relevamiento exhaustivo de la retrodispersión de radiación gamma en este material.

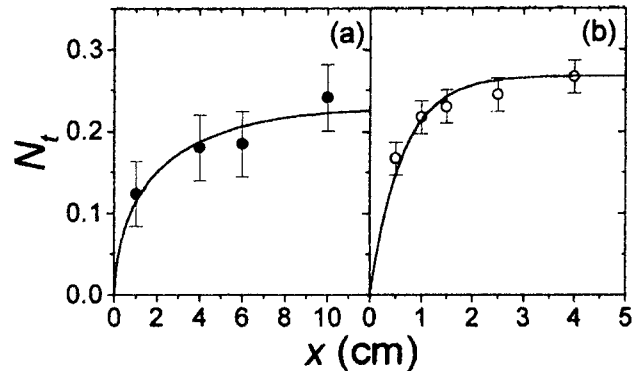


Figura 5: Variación del número total de albedo  $N_t$  con el espesor de los dispersores, para dimensiones laterales de saturación. (a) para dispersores de Fe (las líneas continuas son una ayuda visual).

También se encuentra en este trabajo que para dispersores de Fe, el valor de  $N_t$  correspondiente al espesor de saturación ( $\sim 3$  cm) es algo menor que los reportados anteriormente [1,2,6]; si bien cabe destacar que los resultados experimentales obtenidos en este trabajo poseen un mayor grado de detalle respecto al relevamiento de la información espectral.

#### IV. REFERENCIAS

- [1] Hyodo T. *Nucl. Sci. Eng.* **12**, 178 (1962).
- [2] Pozdnev D. B. *J. Nucl. Energy* **21**, 197 (1967).
- [3] Sinha A. K. y Bhattacharjee A. *Health Physics* **61**, 609 (1991).
- [4] Berger J.M. y Raso D.J. *Radiat. Res.* **12**, 20 (1960).
- [5] Ferragut R., Romero R. y Somoza A. *Anales AFA* **3**, 412 (1991).
- [6] Bhattacharjee A. y Sinha A. K. *Nucl. Instrum. Meth.* **B34**, 9 (1988).
- [7] Knoll G. F. en "*Radiation Detection and Measurement*". Ed. John Wiley & Sons, New York (1979).
- [8] Stanford A. L. y River W. K. (Jr.) *Rev. Sci. Instr.* **29**, 406 (1958).
- [9] Cesara A. y Terrani M. *Nucl. Instrum Meth.* **A281**, 172 (1989).
- [10] Biswas M., Sinha A. K. y Roy S. C. *Nucl. Instrum Meth.* **159**, 157 (1979).