

## INTERFERÓMETRO FABRY PEROT PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES SUPERSONICAS EN UN VELOCÍMETRO LASER DOPPLER

E. Bello Varela, I. Jodán

Centro Internacional para la Superación de Cuadros Científicos de Países Socialistas del Instituto de Intercambio de Calor y Masa A.V. Lirov,

A.C. Bielorrusia, Minsk, URSS. Interferometro esférico Fabry-Perot.

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el programa EFICUO-I para el cálculo de la eficiencia intrínseca de cuantos  $\gamma$  de cristales cilíndricos de NaI (Tl) de diferentes dimensiones y a distintas distancias de una fuente puntual situada sobre su eje. Los resultados del cálculo efectuado para un cristal de 3,8 cm de diámetro y 2,5 cm de espesor y cuantos con energías entre 0,1 y 2 Mev son comparados con otros valores reportados en la literatura, siendo su error standard de estimación menor al 2%. Para un cristal de 2,5 cm de diámetro y 2,5 cm de espesor se cal-

cula la fotoeficiencia intrínseca y se compara con resultados experimentales.

#### ABSTRACT

In this work is presented the program EPICUO-I for calculating of the gamma ray intrinsic efficiency of the  $\text{NaI (Tl)}$  cylindrical crystal of different dimensions at different distances from the point source, which is situated on the axis of crystal.

This results of calculation according EPICUO-I for 3,8 cm diameter and 2,5 cm high crystal and gamma ray energies between 0,1 and 2 Mev are compared with another values have been reported in the literature, the estimation standard error is of at most 2%. For 2,5 x 2,5 cm crystal intrinsic fotoefficiency is calculated and compared with experimental results.

#### INTRODUCCIÓN

Los parámetros fundamentales de un espectrómetro de cuantos gamma son: la fotoeficiencia y la resolución energética, cuya relación define un factor de mérito de los

mismos. Los espectrómetros de cuantos gamma con cristales de centelleo de  $\text{NaI(Tl)}$  se distinguen por su alta eficiencia. El conocimiento de la eficiencia es de vital importancia en los trabajos relativos a la medición de intensidades de radiación gamma, como por ejemplo, en los métodos absolutos de determinación cuantitativa de elementos a partir de las intensidades gammas inducidas en muestras mediante el análisis por activación con neutrones /1/.

Green y Finn /2/ unifican la terminología empleada por diferentes autores al tratar el tema relativo a la eficiencia de registro de cuantos gamma, la cual usaremos en este trabajo, siendo como sigue:

EFICIENCIA ( $\xi$ ), para cuantos gamma de energía  $E_\gamma$  es la probabilidad de detección de cualquier cuanto emitido por la fuente.

EFICIENCIA INTRÍNSECA ( $\epsilon$ ), es la probabilidad de detección de un cuanto gamma de energía  $E_\gamma$  que incida en el cristal.

FACTOR GEOMÉTRICO ( $G$ ), es la probabilidad de que

cualesquiera de los cuantos emitidos por la fuente incida en el cristal.

FOTOEFICIENCIA ( $\epsilon_f$ ), es la probabilidad de que cualquier cuanto emitido por la fuente sea registrado en el fopico.

FOTOEFICIENCIA INTRÍNSECA ( $\epsilon_f$ ), es la probabilidad de que un cuanto incidente en el cristal sea registrado en el fopico.

Acorde a las definiciones anteriores la eficiencia y la fotoeficiencia intrínsecas se pueden expresar por las fórmulas:

$$\epsilon = \gamma \epsilon_f, \quad \epsilon_f = \gamma G E \quad (1)$$

donde  $\gamma$  es la relación entre el coeficiente de absorción lineal por efecto fotoeléctrico  $\zeta(E_\gamma)$  y el de absorción total  $\mu(E_\gamma)$  de los cuantos de energía  $E_\gamma$  en el cristal.

La eficiencia y la fotoeficiencia intrínsecas se pueden determinar tanto experimentalmente como por medio del cálculo. La vía experimental es más representativa de las condiciones específicas de trabajo del cristal, aunque está vinculada con serias dificultades respecto a las con

diciones de medición exigidas. El cálculo es la vía fundamental en los casos en que no se cuente con todas las fuentes patrones necesarias para una calibración experimental. Es de gran interés comparar, en los casos posibles, los resultados obtenidos por ambas vías pues de esa forma se pueden determinar las influencias de efectos secundarios u otros no considerados en el cálculo.

El presente trabajo tiene por objetivo confeccionar un programa (EPICUO-I) en FORTRAN 10-H para el cálculo de la eficiencia y fotoeficiencia intrínsecas de registro de cuantos gamma en cristales cilíndricos de NaI(Tl) para fuentes puntuales situadas sobre el eje del cristal, utilizando la computadora digital IRIS-10. De esta forma se calibra teóricamente en fotoeficiencia un espectrómetro comparándose con los resultados experimentales.

#### CÁLCULO DE LA EFICIENCIA Y FOTOEFICIENCIA INTRÍNSECAS.

Para una fuente puntual de cuantos gamma de energía  $E_\gamma$ , situada sobre el eje de un cristal cilíndrico de radio  $a$  y espesor  $b$  a una distancia  $\chi$  de su superficie, la eficiencia intrínseca está determinada /3/ por:

$$\epsilon(E_\gamma, X) = 1 - \frac{1}{1 - \cos \theta_2} \left\{ \int_0^{\theta_1} \sin \theta \exp \left[ -\frac{\mu(E_\gamma) b}{\cos \theta} \right] d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \exp \left[ \frac{\mu(E_\gamma) X}{\cos \theta} - \frac{\mu(E_\gamma) d}{\sin \theta} \right] d\theta \right\} \quad (2)$$

donde:

$$\theta_1 = \arctg \frac{a}{(b+x)}, \quad \theta_2 = \arctg \frac{a}{x}$$

La evaluación de la fórmula (2) para el cálculo de la eficiencia intrínseca la realizamos utilizando el método de integración numérica de Simpson por tener desde el punto de vista práctico una buena solución al compromiso entre la exactitud de los resultados y su relativa simplicidad de aplicación. Como el grado de exactitud alcanzable por este método depende del parámetro  $n$  que determina la partición del intervalo de integración y para una buena precisión dicho parámetro debe ser relativamente grande, se puede apreciar que el proceso de cálculo es bastante laborioso, por lo cual se confecciona el programa EFICUO-I para realizar los cálculos con gran rapidez y confiabilidad en la computadora digital IRIS-10.

A continuación se muestra el programa en lenguaje FORTRAN 10-H confeccionado para el algoritmo del cálculo de la eficiencia intrínseca (EFF) desarrollado, siendo posible la introducción de diez valores de distancia fuen-

te-cristal (X) y hasta treinta valores del coeficiente de absorción lineal de los cuantos en el material del cristal (CA), lo que equivale a tomar la misma cantidad de valores de energías  $E_\gamma$  de los cuantos. Se pueden introducir también diferentes dimensiones de los cristales: radios (A) y espesores (B).

```

1  C  EFICUO-I
2  C  CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE REGISTRO DE
3  C  RADIACIÓN GAMMA PARA UN CRISTAL DE CEN-
4  C  TELLEO CILÍNDRICO DE NaI(Tl) CON FUENTE
5  C  PUNTUAL EN EL EJE DEL CRISTAL
6  MAIK
7  DIMENSIÓN CA(30),X(10),EFF(30,10)
8  READ (05,10)L1,L2
9  READ (05,6)A,B
10 READ (05,9)(CA(I), I=1,L1)
11 READ (05,9)(X(J),J=1,L2)
12 DO 5 I=1, L1
13 DO 7 J=1, L2
14 T1 = A/(B/X(J))
15 T2 = A/X(J)
16 TETA1 = ATAN(T1)
17 TETA2 = ATAN(T2)

```

```

18      Z = TETA1
19  12  IF(Z-100.00)8,11,11
20      8  Z = Z * 10.00
21      GO TO 12
22  11  N = Z
23      N = N/2
24      N = 2 * N
25      FO = 0.00
26      H = TETA1/FLOAT(N)
27      Y = H
28      T = 0.00
29      F = 0.00
30      K = 1
31  1  FY = EXP(-CA(I) * B/COS(Y)) * SIN(Y)
32      F = F/FY
33      Y = Y/H
34      FY = EXP(-CA(I) * B/COS(Y)) * SIN(Y)
35      T = T/FY
36      Y = Y/H
37      K = K/1
38      IF(K-N/2)1,2,2
39  2  R1 = H/3.00 * (FO/4.00 * F/2.00 * T-FY)
40      WRITE (06,18)R1
41      Z = (TETA2-TETA1)

```

```

42  15  IF(Z-100.0)13,14,14
43  13  Z = Z * 10.00
44      GO TO 15
45  14  N = Z
46      N = N/2
47      N = 2 * N
48      Y = TETA1
49      FO = EXP(CA(I)*X(J)/COS(Y)-CA(I)*A/SIN(Y)*
SIN(Y)
50      H = (TETA2-TETA1)/FLOAT(N)
51      Y = Y/H
52      T = 0.00
53      F = 0.00
54      K = 1
55  3  FY = EXP(CA(I)*X(J)/COS(Y)-CA(I)*A/SIN(Y)*
SIN(Y)
56      F = F/FY
57      Y = Y/H
58      FY = EXP(CA(I)*X(J)/COS(Y)-CA(I)*A/SIN(Y)*
SIN(Y)
59      T = T/FY
60      Y = Y/H
61      K = K/1
62      IF(K-N/2)3,4,4

```

```

63 4 R2 = H/3.00*(FO/4.00*F/2.00*T-FY)
64 WRITE(06,18)R2
65 P = 1.0-1.0/(1.0-COS(TETA2))*(RI/R2)
66 WRITE(06,18)P
67 EFF(I, J) = P
68 7 CONTINUE
69 5 CONTINUE
70 WRITE(06,20)((EFE(I,J), J = 1, L2, I = 1, L1)
71 10. FORMAT(216)
72 6 FORMAT(2F6,0)
73 9 FORMAT(7F6,0)
74 18 FORMAT(F10,3)
75 20 FORMAT(7F10,3)
76 STOP
77 END
78 FINISH

```

Para un cristal de 1,91 cm de radio y 2,54 cm de espesor reportado en /4/, tomando los coeficientes de absorción total de la misma referencia, usando el programa anterior se calculó la eficiencia intrínseca para diferentes distancias fuente-cristal entre 2 y 50 cm. En la figura(1) se muestra la dependencia de la eficiencia calculada con la energía, para las distancias 3, 7 y 20cm. En la tabla (1) se dan los valores obtenidos para las dis-

tancias de 2, 5, 10 y 50 cm, comparándose con los valores dados en /4/ (valores entre paréntesis). El error standard de estimación (ESE), como se observa, no es mayor del 2%.

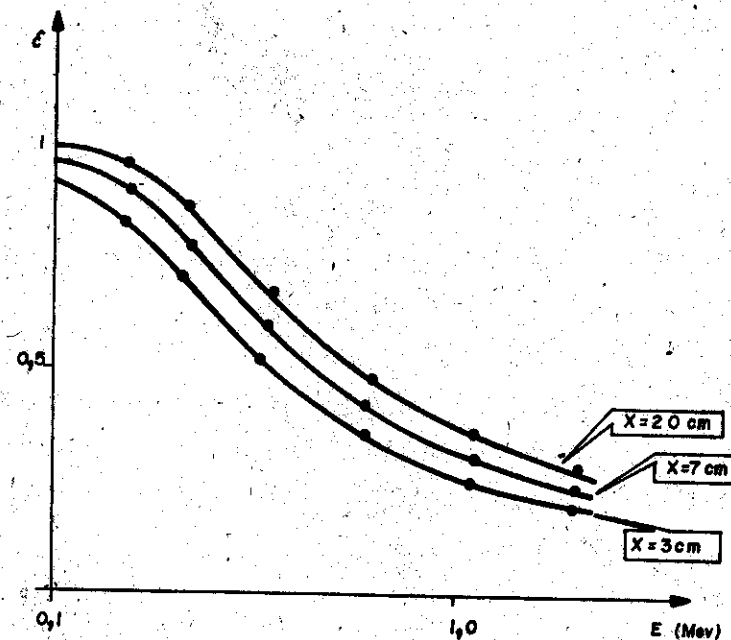


Fig 1  
Eficiencia intrínseca calculada con EFICUO-1 para un cristal de 1,9 cm de radio y 2,5 cm de espesor para diferentes distancias fuente-cristal.

TABLA (1)

Eficiencia intrínseca calculada con EFICUO-I para un cristal de 1,8 cm de radio y 2,5 de espesor, valores entre paréntesis los reportados en /4/ para el mismo cristal.

| Energía<br>(Mev) | Eficiencia intrínseca en %        |             |             |             |
|------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | distancias fuentes-cristales (cm) |             |             |             |
|                  | 2                                 | 5           | 10          | 50          |
| 0,105            | 92,1 (91,5)                       | 94,9 (94,0) | 96,6 (96,5) | 99,3 (99,3) |
| 0,153            | 81,3 (81,0)                       | 86,9 (86,0) | 91,4 (91,3) | 97,6 (97,5) |
| 0,214            | 66,4 (66,3)                       | 74,0 (73,5) | 80,4 (80,2) | 89,1 (89,0) |
| 0,335            | 48,0 (47,5)                       | 55,2 (54,8) | 61,2 (60,8) | 69,5 (69,3) |
| 0,580            | 34,4 (33,5)                       | 40,4 (38,8) | 45,2 (44,0) | 51,6 (51,0) |
| 1,100            | 25,3 (24,5)                       | 30,2 (28,5) | 33,9 (32,5) | 38,8 (38,0) |
| 2,000            | 20,1 (19,3)                       | 24,2 (22,5) | 27,3 (25,8) | 31,0 (30,2) |
| ESE %            | 0,7                               | 1,6         | 1,1         | 0,6         |

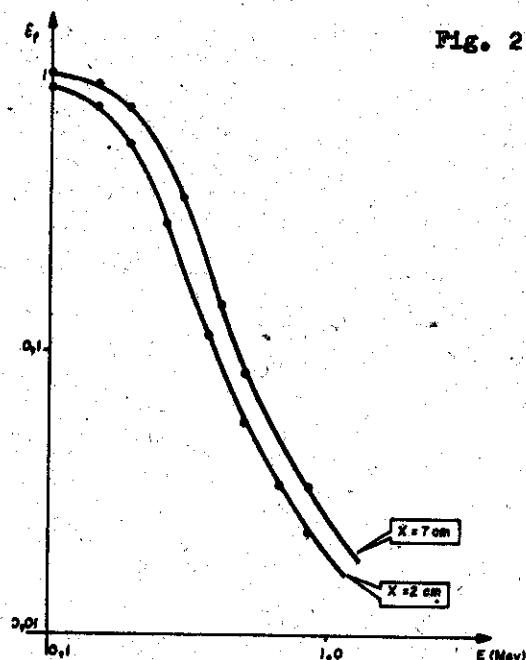
Empleando EFICUO-I para un cristal de 1,25 cm. de radio y 2,50 cm. de espesor se calculó la eficiencia intrínseca, usando los coeficientes de absorción dados en /5/, Los resultados obtenidos se dan en la tabla (2).

TABLA (2)

Eficiencia intrínseca calculada con EFICUO-I para un cristal de 1,25 cm. de radio y 2,5 cm de espesor

| Energía<br>(Mev) | Eficiencia intrínseca en %     |      |      |      |      |
|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|
|                  | distancia fuentes-cristal (cm) |      |      |      |      |
|                  | 2                              | 3    | 5    | 10   | 50   |
| 0,10             | 90,0                           | 92,1 | 94,6 | 96,9 | 99,4 |
| 0,15             | 74,8                           | 79,0 | 83,9 | 90,9 | 97,2 |
| 0,20             | 56,7                           | 61,8 | 67,8 | 76,0 | 85,3 |
| 0,30             | 32,6                           | 36,5 | 41,0 | 46,9 | 51,7 |
| 0,50             | 14,8                           | 17,0 | 19,0 | 21,6 | 26,0 |
| 1,00             | 12,8                           | 14,7 | 16,4 | 18,5 | 22,4 |

En la fig (2) se muestra la dependencia de la fotoeficiencia intrínseca con la energía para este último cristal, la que se obtiene usando los resultados de la eficiencia calculada y la correspondiente relación entre los coeficientes de absorción por efecto fotoeléctrico y total tomada de /5/. De esta figura se observa la dependencia aproximada del tipo función potencial de la fotoeficiencia intrínseca con la energía de los cuantos gamma, para valores de ésta mayores a 200 Kev.



Fotoeficiencia intrínseca calculada para un cristal de radio 1,25 cm y espesor 2,5 cm.

#### MEDICIÓN DE LA FOTOEFICIENCIA INTRÍNSECA

Para la determinación experimental de la fotoeficiencia intrínseca se empleó el cristal de radio 1,25 cm y espesor 2,5 cm acoplado a una sonda del tipo VA-S-50 y ésta a su vez a un espectrómetro VAM-141. Con un error estadístico menor al 5% se midieron los fotopicos para las líneas de 660 Kev del  $\text{Cs}^{137}$ , 840 Kev del  $\text{Mn}^{54}$ , 511 y 1280 Kev del  $\text{Na}^{22}$ .

La determinación de esta fotoeficiencia, acorde con su definición exige conocer la cantidad de cuantos incidentes sobre el cristal y la cantidad de pulsos registrados en el fotopico. Los primeros se calculan a partir de las actividades y relaciones de emisión de las fuentes y del factor geométrico correspondiente. Los pulsos registrados se obtienen por la superficie bajo el fotopico por la suma de los conteos de cada canal con un descuento que depende del espectro Compton en la zona del fotopico siguiendo los criterios dados en /1/. A esta cantidad de pulsos registrados se les afectó con un factor de corrección igual a 0,86 que tiene en cuenta los sobreconteos producidos por el grado de solapamiento de canales adyacentes del espectrómetro usado.

Las fotoeficiencias intrínsecas medidas para distan-



cias fuente-cristal de 2 y 3 cm se muestran en la fig (3), observándose la dependencia del tipo función potencial con la energía al igual que en el cálculo teórico.

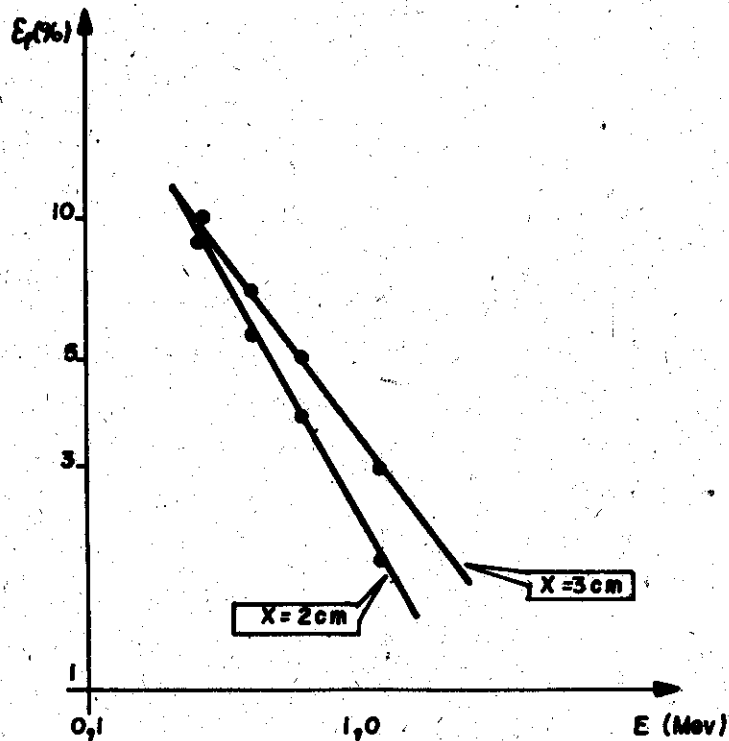


Fig (3)

Fotoeficiencia intrínseca experimental para un cristal de 1,25 cm de radio y 2,5 cm de espesor.

La fig (4) muestra una comparación de las fotoeficiencias intrínsecas calculadas y medidas para el cristal de 1,25 cm de radio y 2,5 cm de espesor para la distancia fuente-cristal de 2 cm, como se observa los resultados experimentales son superiores a los calculados hasta en un 3,5%. Pudiéndose deber esta diferencia a la influencia de efectos de interacción múltiples y secundarios pues en el cálculo empleamos la relación entre los coeficientes de absorción y no la fotofracción, diferencias entre las dimensiones reales y las tomadas para el cálculo de los cristales, así como también de las actividades de las fuentes.

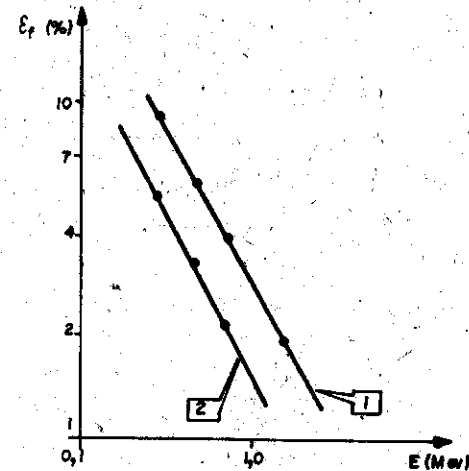


Fig (4)

Comparación entre la fotoeficiencia intrínseca calculada (1) y medida (2) para el cristal de 1,25 cm de radio y 2,5 cm de espesor

## CONCLUSIONES

El programa EFICUO-I confeccionado en FORTRAN-10 H con el algoritmo utilizado permite el cálculo de la eficiencia intrínseca de cristales cilíndricos de  $\text{Ina(Tl)}$  para fuentes puntuales situadas sobre su eje a diferentes distancias y diferentes dimensiones de los rismos. Para un cristal de radio 1,91 cm y espesor de 2,5 cm el error standard de estimación es menor al 2% comparados con resultados obtenidos por otros programas.

La fotoeficiencia calculada a partir de la eficiencia que da el programa EFICUO-I comparada con los resultados experimentales para un cristal de diámetro 2,5 cm e igual espesor, aunque menores hasta en un 3,6% pueden ser considerados adecuados para su aplicación en la calibración en fotoeficiencia intrínseca de un espectrómetro de cuantos gamma como el empleado.

## BIBLIOGRAFÍA

- /1/ Bowen H.J.M., Gibbons D.  
"Análisis de Radioactivación"  
Atomizdat, Moscú, 1968
- /2/ Green R. M. and Finn R.L.  
Nucl. Instr. and Meth. 34 (1965)72.

- /3/ Polyakov V.I., Chechetkin Yu.V.,  
Instr. and Exp. Tech. Vol. 14 No. 4 (1972) 1013
- /4/ Sigbahn K.  
"Alfa, beta and gamma ray spectroscopy" North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968.
- /5/ Evans R.D.  
"The Atomic Nucleus" Mc Graw-Hill Book Company,  
New York, 1972

Recibido 12/81.