

ESPECTRO DE NEUTRONES SECUNDARIOS OBTENIDOS AL BOMBARDEAR UNA MUESTRA DE Fe NATURAL CON NEUTRONES DE 14.1 Mev.

F. Deák

A. Kiss

Universidad "Eötvös Lorand" Budapest VIII Puskin U, 5-7

V. Fajer

A. Mavilio

Instituto de Investigaciones Nucleares. ACC. Managua.
C. Habana. Apartado Postal 6122

ABSTRACT

The neutron spectra after bombarding a natural iron target with 14 MeV neutrons were obtained for 30, 60 and 90 degrees laboratory angles. A time of flight system which

uses the associated alpha particle technique was employed. The double differential cross sections were determined in the energy range 1.5 to 6 MeV. The experimental results were compared with the predictions of the simple evaporation model.

RESUMEN

Espectros de neutrones secundarios obtenidos al bombardear una muestra de Fe natural con neutrones de 14.1 MeV han sido medidos empleando un espectrómetro de tiempo de vuelo que emplea el método de la partícula α asociada. Las secciones doblemente diferenciales han sido obtenidas en el rango energético de 1.5 a 6 MeV para ángulos de 30, 60 y 90 grados en el sistema de laboratorio. Los resultados experimentales fueron comparados con las predicciones del modelo de evaporación simple.

INTRODUCCIÓN

La total comprensión de los espectros de neutrones emitidos en procesos inducidos por neutrones rápidos continúa siendo uno de los problemas más importantes de la física de neutrones. La solución de este problema es importante no sólo desde el punto de vista del desarrollo de la teoría nuclear, sino también para la determinación de las secciones de interacción con neutrones rápidos por modelos nucleares.

Recientemente se han ido acumulando experiencias [1,2] , de que el espectro de neutrones emitidos en procesos con neutrones rápidos está considerablemente influido por la contribución de radiación gamma. Esto resulta sorprendente porque sobre la base de resultados experimentales con neutrones lentos, debía esperarse que las probabilidades de emisión de radiación gamma sea muy pequeña en comparación con la probabilidad de emisión del neutrón. Por supuesto, es necesario tener en cuenta el hecho de que sólo unos pocos estados nucleares discretos están disponibles en el último paso de un proceso de desintegración nuclear y que los neutrones con un momento orbital alto se emiten con muy baja probabilidad, por lo que las ideas más simples acerca de la emisión de neutrones y rayos gamma pueden ser modificadas. Además, los procesos de pre-equilibrio pueden también modificar considerablemente las probabilidades de emisión.

El presente trabajo ha sido realizado para contribuir al conocimiento experimental de los espectros de neutrones emitidos en procesos inducidos con neutrones rápidos; una muestra de hierro natural fue seleccionada como núcleo blanco. Se determinaron no sólo las distribuciones energéticas de los espectros de neutrones, sino también se obtuvo información acerca de sus distribuciones angulares. Desde este punto de vista, este experimento complementa el trabajo de Stengl y otros, quienes determinaron el espectro de neutro-

nes en un experimento similar pero asumiendo una distribución angular isotrópica.

EXPERIMENTO Y RESULTADOS

Los espectros de neutrones fueron medidos por un sistema de tiempo de vuelo (fig. 1) el cual emplea la técnica de la partícula alfa asociada [1] . Fue usado el generador de neutrones NG-200 E del tipo Cockroft-Walton con un voltaje de aceleración de 200 KV y una intensidad máxima del haz de deuterones de 1 mA; sin embargo, la corriente del haz se mantuvo en el rango de 1 a 50 μ A debido a que la velocidad de conteo límite en el monitor alfa es alcanzada alrededor del valor de 10^5 partículas/s. El círculo del haz de deuterones en el blanco tuvo un radio de 1 mm y el detector alfa estaba constituido por una fina lámina de centelleante plástico NE-102A, de 0.2 mm de espesor y 1 cm de radio. La distancia desde esta lámina al blanco de tritio fue de 7.6 cm y esto determinó una dispersión en el ángulo Θ de 15 grados.

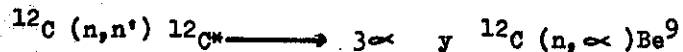
Las dimensiones de la muestra fueron calculadas para evitar correcciones por dispersión múltiple, su geometría consistió en un cono truncado de 1:3 cm de longitud (aproximadamente $\sqrt{4}$). Esta fue colocada a una distancia de 5 cm del blanco, lo cual aseguró que fuera atravesada por todos los neutrones correspondientes al ángulo sólido que subtiende el detector alfa.

Un blindaje de hierro de 60 cm fue empleado para evitar

que los neutrones lleguen al detector directamente desde el blanco de tritio.

La resolución temporal obtenida con un umbral de 0.5 MeV fue de 1.5 ns y fueron empleadas en las mediciones trayectorias de vuelo de 1 y 1.5 m. El espectro de tiempo fue estabilizado con referencia al pico de un generador de pulsos de mercurio colocado en el extremo superior del espectro.

Para calcular la eficiencia del centelleante plástico fue empleado el código de Monte Carlo [3] desarrollado por nuestro Grupo. Este programa considera para la simulación: dispersión elástica en el hidrógeno y el carbono, dispersión inelástica en el carbono y las reacciones



La magnitud del pulso de salida luminoso producido por los protones de retroceso es uno de los aspectos más problemáticos del modelo físico. Para mejorar este aspecto fueron empleados valores de salida luminosa recientemente obtenidos o confirmados. Han sido usados valores tabulados obtenidos de [4] en el rango energético de 20 a 200 KeV y en el rango de 0.2 a 15 MeV fue empleada la siguiente fórmula semi-empírica. [5]

$$L_p = a_1 [1 - \exp (-a_2 E_p^{a_3})] + a_4 E_p, \quad (1)$$

donde: $a_1 = -8$, $a_2 = 0.1$, $a_3 = 0.9$ y $a_4 = 0.95$ en el caso del centelleante plástico NE-102A que usamos en el experimento

con dimensiones de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Para la fijación del umbral energético del detector de neutrones se utilizó el pico del espectro Compton en lugar de la mitad de la altura. La ventaja de este método radica en que la localización del pico del espectro Compton es menos sensible que la posición de la mitad de la altura del borde a la resolución energética del detector de centelleo. Se asoció al canal del pico con una energía de electrón igual a 0.95 de la correspondiente al valor máximo de la energía de electrón de Compton.

Los valores de la eficiencia $\mathcal{E}(E)$ fueron calculados en intervalos de 0.5 MeV en el rango energético de 1 a 15 MeV. Los resultados fueron ajustados por

$$\mathcal{E}(E) = (1-T/E_n) (A_0 + A_1 E_n + A_2 E_n^2 + A_3 E_n^3 + A_4 E_n^4), \quad (2)$$

donde $T = 0.5$ MeV es el umbral en energía de protón y los valores de los parámetros fueron: $A_0 = 73.38$, $A_1 = -20.75$, $A_2 = 3.32$, $A_3 = -0.24$ y $A_4 = 0.0064$. Se llevó a cabo una determinación experimental de la eficiencia a la energía de 14.1 MeV y el resultado está de acuerdo con las predicciones de Monte Carlo dentro de los errores del cálculo los cuales son menores que el 10%.

El programa ELABGRAF fue usado para la conversión del espectro de tiempo en espectro energético. Este código realiza el suavizamiento del espectro de tiempo tomando diferente número de puntos, fueron seleccionados 15 puntos en nuestros cálculos. Las secciones de interacción diferenciales fueron

medidas en ángulos de 30, 60 y 90° en el sistema de laboratorio. Las secciones diferenciales de interacción para diferentes ángulos se muestran en la Tabla I.

DISCUSIÓN

Los espectros fueron analizados en el marco del modelo de evaporación simple asumiendo la temperatura nuclear constante, la idea básica es mostrada en la fig. 2. La línea sólida representa el espectro energético de los neutrones emitidos en el proceso (n, n') , la línea punteada corresponde a la emisión del segundo neutrón y la línea discontinua muestra la suma de las 2 componentes.

Si nosotros conocemos la forma del espectro de consideraciones teóricas, la comparación de las áreas T(I) y T(II) podrían dar información sobre la competencia neutrón-gramma.

Las secciones de interacción doblemente diferenciales fueron ajustadas por la siguiente ecuación.

$$\frac{d^2 \sigma(E)}{d\Omega dE} dE = E (A \exp(-E/T_1) + B \exp(-E/T_2)) dE, \quad (3)$$

la cual está caracterizada por la temperatura nuclear T_1 para el primer núcleo residual y T_2 para el segundo núcleo residual. Los valores promedios obtenidos fueron:

$$T_1 = 1.86 \pm 0.37 \quad \text{y} \quad T_2 = 0.49 \pm 0.03$$

A partir de la descomposición realizada se determinó el valor absoluto de la sección de interacción $(n, 2n)$. En

la tabla II se muestra la comparación de este valor con datos obtenidos por el método de activación y otras mediciones; la concordancia con otros resultados justifica la validez del empleo de la expresión (3) y la simple descomposición del espectro realizada.

En la fig. 3, se puede apreciar la presencia de anisotropía en los espectros de neutrones, comúnmente se asume isotropía para el rango energético considerado; este efecto debe ser tenido en cuenta para la determinación de secciones eficaces integradas angularmente y para la mejor comprensión de los procesos estudiados. Los resultados a 90° fueron comparados con otros valores experimentales, esto se muestra en la figura 4.

La relación entre el número de los primeros y segundos neutrones bajo el umbral de la reacción $(n, 2n)$ puede ser determinado de la descomposición realizada, el valor promedio de esta relación fue $\eta = 1.17 \pm 0.3$.

Para tener una idea más completa de la competencia neutrón-gramma en la desexcitación del Fe^{56} , desde energías de excitación de 0 a 2 MeV por encima de la energía de enlace del neutrón, se construyó un gráfico (fig. 5) donde se muestra la dependencia de la magnitud K.

$$K = \frac{A \exp(-E/T_1) - B \exp(-E/T_2)}{A \exp(-E/T_1)}$$

y la energía de excitación. Esta magnitud K representa la

relación entre el aporte γ y el aporte total. Puede observarse en la figura 5 los valores obtenidos por Stengl y los obtenidos en nuestro trabajo.

Se observa que para energías de excitación por debajo de la energía de enlace del neutrón (11.2 MeV) el aporte γ es total ($K=1$) tal como se esperaba, para energías de excitación mayores que 11.2 MeV se puede apreciar que compiten los dos modos de desintegración, de manera que en nuestros datos se observa que 1 MeV por encima de dicha energía de enlace existe un 52% del aporte y dicho aporte va disminuyendo hasta que deja de ser significativo, Stengl obtuvo un aporte del 40% para la misma energía de excitación por lo que el presente trabajo, reafirma la presencia de la competencia γ para las energías de excitación estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo del Prof. G. Marx, del Ing. G. Pongrácz y del grupo técnico del laboratorio de Física de Neutrones de la Universidad "Eötvös Lorand" en la realización del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Deák, V. Fajér, S. Gueth, A. Kiss, P.N. Ngoc y J. Kecskeméti, Proc. 2nd Int. Symp. on Neutron Induced Reactions, Smolenice, Bratislava, 1979.
2. G. Stongl, M. Uhl y H. Vonach, Nucl. Phys., A 290, 109. 1977.
3. V. Fajér y L. Alvarez, KFKI-1979-60.
4. C. Renner, N. W. Hill, G. L. Morgan, K. Rush y J. A. Harvey, Nucl. Instr. and Meth., 154, 525, 1978.
5. R. Madey, F. M. Waterman, A. R. Baldwin, J. N. Knudson, J. D. Carlson y J. Rapaport, Nucl. Instr. and Meth., 151, 445, 1978.
6. M. Bormann, H. Neuert y W. Soebel, Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections, Technical Report Series No. 156, IAEA, 1974.
7. A. Adams, L. Yoki, Acta Physical of the Academy of Sciences of Hungary, 26, 4, 1969.
8. J. Frehaut, J. Mosinski, CEA-R-4627, 1974.
9. J. Csikai, M. Buczko, Z. Body y A. Demeny, Atomic Energy Review, 7, 4, 1969.
10. Korkal'Chak, K. A. Prokopez, B. Jolmkwost, Yadernaya Fizika, 20, 1096, 1974.
11. R. M. Sheckman y J. D. Anderson, Nuclear Physics 77, 241, 1966.
12. J. L. Kammerdierner, UCRL-51232, 1972.

TABLA I

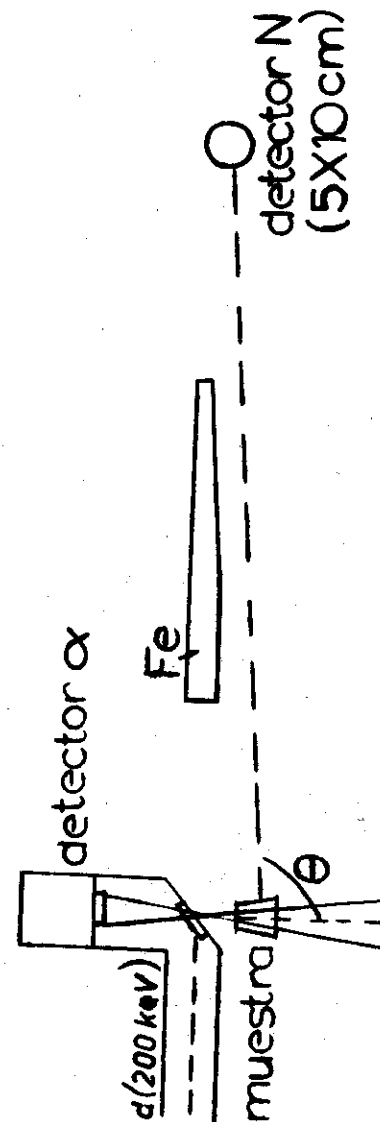
Secciones eficaces doblemente diferenciales (mb/Str. MeV).

Energía (MeV)	90°	60°	30°
1,5	21,4 ± 4,16	17,2 ± 1,23	24 ± 1,39
2	12,8 ± 2,25	17,5 ± 0,66	23,6 ± 1,44
2,5	11,6 ± 0,86	16,7 ± 0,58	21,6 ± 1,32
3	8,40 ± 0,26	14,2 ± 0,55	15,9 ± 0,86
3,5	8,28 ± 0,44	10,7 ± 0,37	15,3 ± 0,83
4	5,71 ± 0,2	9,91 ± 0,36	13,6 ± 0,66
4,5	4,95 ± 0,15	9,39 ± 0,32	13,8 ± 0,66
5	3,64 ± 0,08	7,2 ± 0,30	11,8 ± 0,62
5,5	2,78 ± 0,05	6,6 ± 0,27	9,5 ± 0,59
6	2,15 ± 0,03	5,9 ± 0,25	7,5 ± 0,46

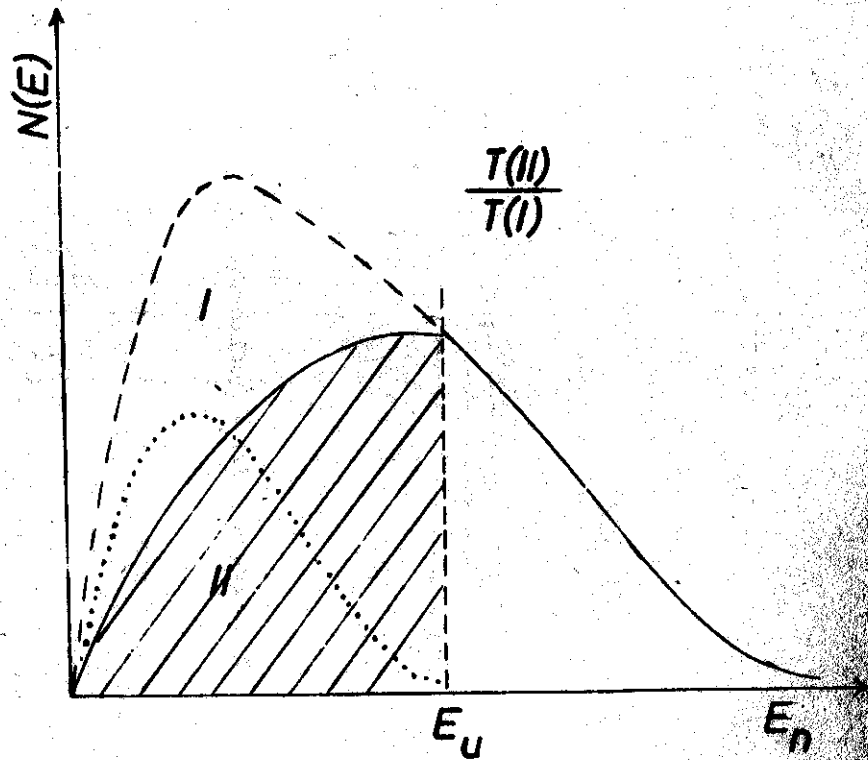
TABLA II

Sección eficaz (n , $2n$) obtenida en este trabajo comparada con los valores de otros autores.

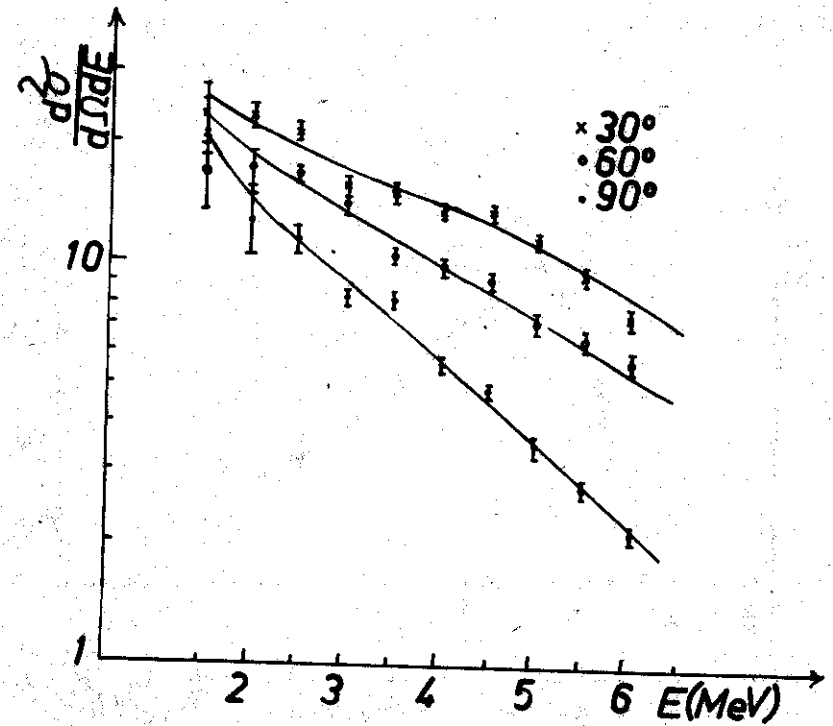
$\bar{V}_{n, 2n}$ (mb)					
Nuestro trabajo	ref. [6]	ref. [7]	ref. [8]	ref. [9]	ref. [10]
418 ± 48	440 ± 90	500 ± 40	420 ± 50	445 ± 40	436



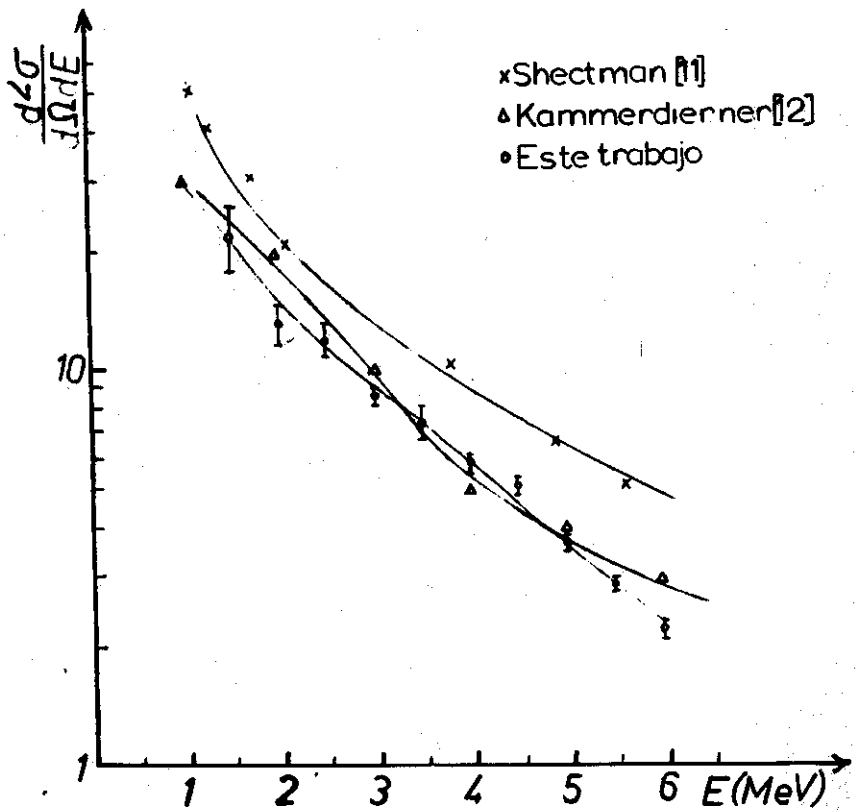
1.- Esquema del experimento.



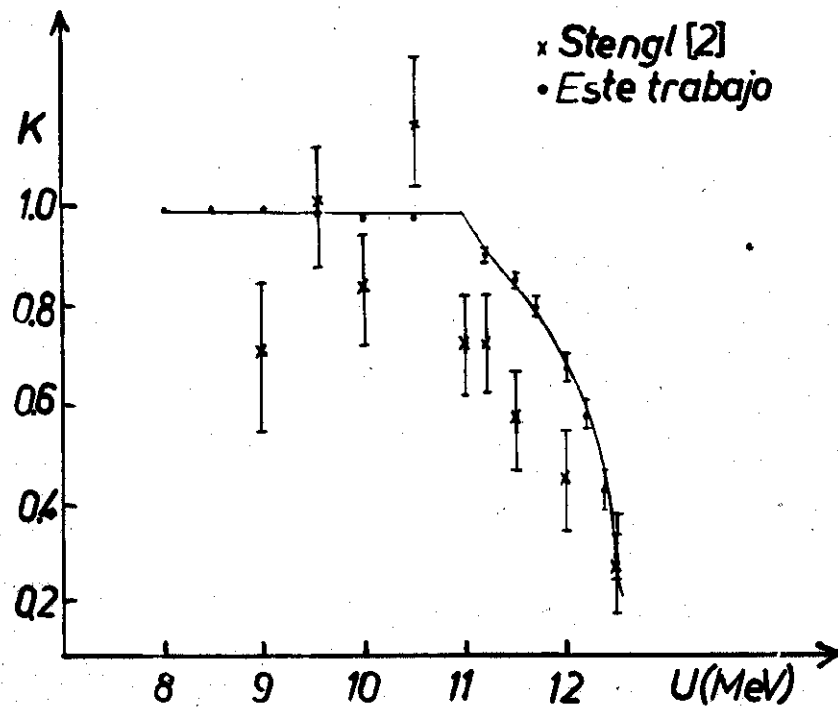
2.- Espectro energético de los primeros y segundos neutrones en la reacción $(n, 2n)$.



3.- Espectros de neutrones para 3 ángulos diferentes.



4.- Secciones eficaces doblemente diferenciales a 90° comparadas con valores reportados por otros autores.



5.- Valores que indican la competencia neutrón-gamma.