

CNEA 393

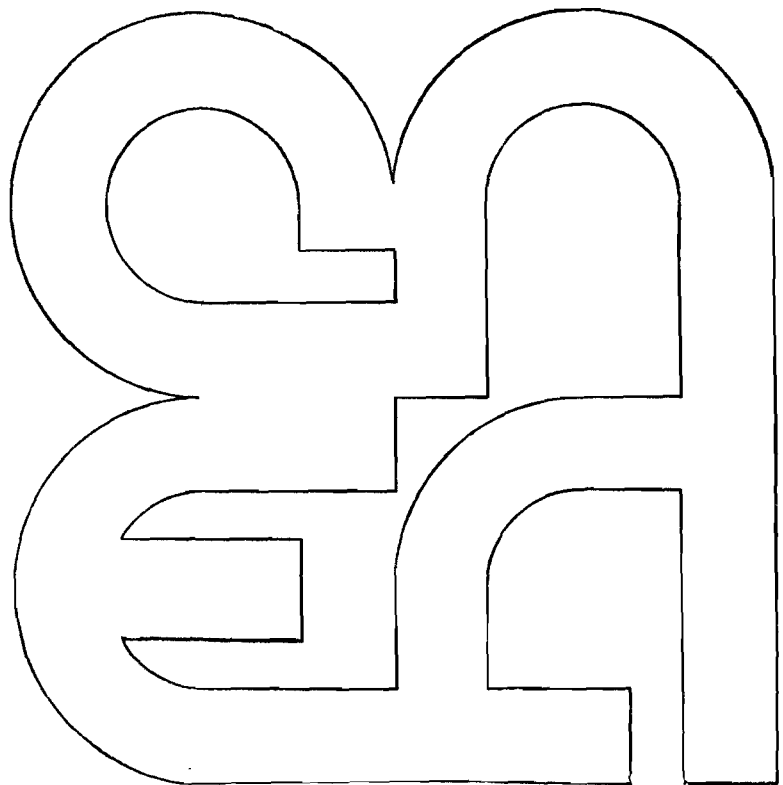
# Termalización de Neutrones en Agua Liviana; Medición y Cálculo de Espectros

M. J. Abbate  
J. V. Lolich

Comisión  
Nacional  
de Energía  
Atómica

República Argentina

Buenos Aires, 1975



INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

A21

THERMALIZATION  
THERMAL NEUTRONS  
WATER  
TIME-OF-FLIGHT METHOD  
NEUTRON SPECTRA  
MEASURING METHODS  
LINEAR ACCELERATORS  
DATA PROCESSING

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

**TERMALIZACION DE NEUTRONES EN AGUA LIVIANA;  
MEDICION Y CALCULO DE ESPECTROS**

M.J. Abbate\* y J.V. Lolich

Centro Atómico Bariloche  
Instituto de Física "Dr. José A. Balseiro"  
Universidad Nacional de Cuyo

RESUMEN

Se ha concretado una serie de investigaciones destinadas a estudiar el espectro de neutrones moderados en agua liviana pura. Esta consistió en mediciones del mismo por el método de tiempo de vuelo y su cálculo con distintas teorías, en condiciones de medio casi infinito.

La utilización de refinadas técnicas experimentales y de elementos de cálculo no probados en este problema permitió reducir la discrepancia conocida entre valores medidos y calculados, en el intervalo de energías correspondiente a la zona de termalización, de un 40 % a un 16 %. Concluyéndose que la razón de este remanente podría ser la bondad del modelo de hidrógeno ligado utilizado (ENDF-GASKET, basado en el espectro de frecuencias Haywood II modificado), el cual ha dado muy buenos resultados en el caso de soluciones envenenadas con absorbentes.

Además, esto ha permitido completar anteriores trabajos, refinar técnicas de medición tanto integrales como diferenciales y temporales y aumentar la capacidad de cálculo mediante la puesta en operación de una segunda parte de un sistema para cálculos neutrónicos y de reactores.

---

\* Ejército Argentino.

## ABSTRACT

*Neutron thermalization in light water. Spectrum measurements and calculations.*

Investigations related to neutron thermalization in light water have been made. Neutron spectra under quasi-infinite-medium conditions have been measured by the time-of-flight technique and calculations were performed with different codes.

Through the use of improved experimental techniques and the best known calculational techniques available, the known discrepancies between experimentals and theoretical values were belowed from 40 % to 16 %. The present disagreement is believed to be due to the scattering model used (ENDF-GASKET, based on the modified Haywood II frequency spectra), that shows to be very satisfactory for poisoned light water cases.

Moreover, previous experiments were completed and differential, integral and pulse-source experimental techniques were improved. Also a second step of a neutron and reactor calculation system was completed.

## INTRODUCCION

Si bien ha sido satisfactoria la reproducción por cálculo de espectros de neutrones moderados para el caso de agua liviana envenenada con absorbentes (1), no ha ocurrido lo mismo para el de agua pura (3) (24).

Estudios sistemáticos efectuados por J.R. Beyster (4) en los cuales se compararon espectros medidos con aquellos calculados a partir del modelo de Nelkin, mostraron que los primeros superaban a los segundos hasta en un 50 % (eran más termalizados, es decir, tenían una mayor relación "térmico a epitérmico") según se observa en las curvas presentadas. Este mismo grupo (5) presentó otras comparaciones con cálculos realizados utilizando los modelos de "gas libre" (Wigner-Wilkins) y de "hidrógeno ligado" (Nelkin). Los mejores resultados se obtuvieron con este último siendo las diferencias del orden del 40 %.

J.C. Young (6) luego de un considerable desarrollo de modelos y elementos de cálculo, utilizó el modelo ligado de Haywood y un método desarrollado por Parks (7) obteniendo un desajuste de hasta el 40 % en el intervalo de 0,08 a 0,25 eV, siendo ahora el espectro calculado el más termalizado.

De los trabajos citados podían obtenerse las siguientes conclusiones:

- a) El modelo de hidrógeno ligado sería válido inclusive a temperaturas propias de un reactor (300°C).

- b) El modelo de Haywood mejora al de Nelkin y es tan bueno o mejor que el llamado anisotrópico (9).
- c) Es posible que una razón de las discrepancias sea la resolución en energías entre 0,1 y 0,3 eV en donde tanto el flujo como sus derivadas temporales cambian rápidamente.
- d) No se consideraba que el modelo fuera responsable de las diferencias observadas sino más bien lo inadecuado de la geometría utilizada y los elementos de cálculo con los que se contaba.

Por sugerencia de J.M. Neill (3) el problema fue abordado en este estado. Los primeros resultados (2) se obtuvieron usando los métodos experimentales descritos en (10), cambiando las condiciones de medición y los elementos de cálculos respecto de los trabajos ya mencionados. En particular utilizando el programa CAGE (11), se observó que la diferencia se había reducido a un 28 % como máximo. Pero dichos resultados no eran definitivos pues mostraban un desajuste adicional en la zona de moderación (1/E) del orden del 30 %, ver figura 1.

Esto fue subsanado, posteriormente, con cuidadosas mediciones del "buckling" local (12) reduciéndose el desajuste al 26 %, como puede verse en figura 2, es decir que era un efecto de incorrecto tratamiento de la fuga de neutrones del medio.

Para proseguir fue necesario implementar una segunda parte del sistema de cálculo neutrónico incluyendo procedimientos más refinados como la teoría de transporte; con ello pudo calcularse el espectro por tres métodos distintos; además, se realizó una nueva medición del mismo.

## PARTE EXPERIMENTAL

Se midió el espectro de neutrones moderados en agua liviana pura a 23°C utilizando las técnicas y en las condiciones descritas en (10) cuidadosamente revisadas.

Respecto del dispositivo experimental, sólo se efectuaron algunas modificaciones en el tubo de vuelo que implicaron aumentar su transmisión en un 5% lo cual disminuyó el peso de las correspondientes correcciones.

Se cuidó de lograr una buena estadística prolongando convenientemente el tiempo de medición.

También se midió la constante de decaimiento del sistema que resultó ser de 170,9 $\mu$ s (siendo de 171  $\mu$ s el valor calculado). Este valor fue utilizado como tiempo medio de emisión a bajas energías. Hacia mayores energías se lo evaluó mediante el primer momento temporal de la distribución neutrónica calcu-

lado con el programa CAGE y en la zona de moderación se usó el tiempo de moderación.

Finalmente se midió la distribución espacial mediante la activación de hojuelas de indio desnudas y bajo cadmio con la técnica y condiciones descritas en (12) tanto en sentido transversal como longitudinal a la dirección del haz de electrones. Con la primera se obtuvo la forma espacial de la fuente a utilizar en los cálculos y se verificó la validez de la hipótesis de separabilidad de variables en el punto de medición lo que se requiere para uno de los programas empleados (CAGE). Con la segunda se determinó la constante de relajación necesaria para calcular el "buckling" local, resultando:

$$\begin{aligned}\gamma &= 0,2084 \text{ cm}^{-1} \\ B^2_{\text{total}} &= -0,0242 \text{ cm}^{-2} \\ B^2_{\text{transvers.}} &= -0,0338 \text{ cm}^{-2}\end{aligned}$$

con lo que la fuga térmica es:

$$D \times B^2 = -0,0034 \text{ cm}^{-1}$$

#### REDUCCION Y PREPARACION DE DATOS

Obtenidos los datos de los experimentos es necesario reducirlos a fin de expresarlos en las formas y unidades que posibiliten su interpretación y comparación con los resultados teóricos.

Por ser una de las incógnitas del problema se puso especial esfuerzo en la estimación de la resolución en energías del experimento, a fin de proporcionar cotas reales al programa de reducción de datos NYRTOF (13).

Mediante un cálculo auxiliar (14) se determinó dicha resolución notándose que queda definida por el ancho de canal del codificador de tiempos y la desviación standard del tiempo medio de emisión. Es la designada como "óptima" en la figura 3.

Pero existe otra incerteza temporal adicional para los resultados finales, que proviene del hecho que el programa de reducción de datos agrupa las cuentas de canales contiguos hasta alcanzar un valor dado de dispersión estadística, es decir que para ciertos valores de energía el ancho de canal real será igual a un cierto número de anchos de canal del codificador. Esto implica empeorar la resolución. Los valores finales se dan en figura 3 con el nombre de resolución en energías "del espectro medido".

En dicha curva se observa que la resolución es mejor que el 10% para todo el intervalo de energías considerado.

Otra incerteza que debe tenerse en cuenta es la dispersión del flujo debida al uso de una fuente pulsada. Aceptando el tratamiento que de ella realiza K.H. Beckurts (15) y comparando los valores por él presentados con los resultados de este experimento, se asumió que es del 5%.

La corrección por tiempo muerto del codificador de tiempos se minimizó con adecuados parámetros del circuito de medición.

El espectro medido se agrega en figura 5.

## CALCULOS Y RESULTADOS

### *Sistema de cálculo:*

Para la realización de este trabajo fue necesario completar la segunda parte del sistema de cálculo neutrónico NYR001 (16) lo que implicó:

- incluir posibilidades de realizar cálculos utilizando teoría de transporte.
- desarrollar nuevos programas y corregir otros.
- implementar todo el conjunto en forma de sistema.

El resultado puede verse en figura 4, donde se han incluido también aquellos elementos necesarios para efectuar la acumulación, preparación y reducción de los datos.

### *Cálculo de la fuente:*

La necesaria fuente de neutrones de moderación, para los cálculos, fue determinada mediante un programa redactado especialmente (17), asumiendo modelo de gas libre para el núcleo de transferencia, flujo de moderación en aproximación de Honeck y, utilizando como distribución espacial, la de neutrones epitérmicos que se midió en sentido transversal.

### *Cálculos multigrupo:*

Este tipo de cálculos requiere determinar, en primer lugar, las constantes de grupo. Su obtención se realizó con el método descrito en (18), usando el modelo ENDF-GASKET (19) para el hidrógeno ligado en agua y asumiendo traslación libre para el oxígeno. Los resultados se pesaron convenientemente y redujeron a 30 grupos de energía de valores comprendidos entre 0,0025 y 1,66 eV.

a) *Cálculo unidimensional por teoría de transporte* - Se llevó a cabo con el programa NYR230 (20), versión modificada y adaptada del conocido programa DTF-4.

Se definieron 15 intervalos espaciales (de 2 cm cada uno) y se consideró "scattering" isotrópico ( $P_0$ ) y aproximación  $S_8$ .

El espectro así calculado se compara con el medido representado en la figura 5, habiéndose normalizado en la zona de moderación (1/E).

Se observa un buen ajuste en general, la desviación máxima alcanza al 16,4%, no atribuible a dispersión estadística y superior al efecto proveniente de la resolución en energías.

Salvo el intervalo en donde prevalece aún el desajuste, el resto de los valores están comprendidos entre 5 y -2% de diferencia relativa porcentual.

b) *Cálculo indefinido por el método de frecuencia de colisión* - Dadas las condiciones de medio casi infinito, se calculó con el programa CAGE que ya había sido empleado con anterioridad (2) y (12). Los resultados se encuentran en la figura 6. El espectro calculado se presenta menos termalizado que el medido lo que puede verse por la discrepancia del 12% que aparece a bajas energías. Esto origina un cruzamiento de los espectros que desfigura la diferencia real en el intervalo de interés, allí se indica una desviación del 11% pero por lo dicho se considera mayor (del orden del 19%).

El cálculo fue repetido utilizando "buckling" dependiente de la energía, y no constante como en el primer caso, pero los resultados marcaron mayores desviaciones que las citadas.

Finalmente se determinó que la diferencia entre las relaciones térmico a epitérmico de los dos espectros, medido y calculado en primer lugar, equivalía a una disminución del 10% en la constante de relajación lo que era superior al error de la misma.

#### *Cálculo unidimensional con modelo secundario:*

Para este cálculo se utilizó el programa NYRESE (21) el que cuenta con su propia biblioteca de datos que no responde al modelo de hidrógeno ligado ya citado. Fue empleado por ser su prueba parte de este trabajo. Ya había sido utilizado anteriormente para casos de soluciones envenenadas lográndose un razonable acuerdo (22), pero, los resultados obtenidos aquí no aportaron nada al problema de termalización de neutrones en agua liviana aunque sí al conocimiento y aplicación del mismo.

En la figura 7 puede verse que el espectro calculado es mucho menos termalizado que el medido; hay una diferencia del 35%, o sea que existe un efecto similar al observado en el método anterior, pero más acentuado.



Luego de varios cálculos se dedujo que no era debido a una simple sobreestimación de la corrección por fuga, sino que pesaría otras causas que originarían las diferencias obtenidas. Pudieron ser detectados algunas como las siguientes:

- Este método es menos sensible a la corrección por fuga que los otros.
- El problema de menor termalización permanece aún para el medio considerado indefinido, luego no es atribuible a la fuga de neutrones.
- Es notable la sensibilidad del método con la red de energías: entre un cálculo con 195 puntos y otro con 102 puntos hay una diferencia del 7% a bajas energías, figura 8.
- Algo similar ocurre si se disminuye la cantidad de intervalos espaciales.

## CONCLUSIONES

Sobre la base que podrían mejorarse los resultados hasta ahora obtenidos en la medición y cálculo de espectros de neutrones de bajas energías en agua liviana pura, se llevaron a cabo una serie de trabajos en los que se puso especial énfasis en la cuidadosa obtención, corrección y discusión de los resultados experimentales, y la utilización de elementos de cálculo y datos no probados para este problema.

Mediante verificaciones de reproducibilidad de valores medidos y otras pruebas se aseguró la confiabilidad de los resultados experimentales.

En definitiva puede afirmarse que se pudieron disminuir las discrepancias que existían en este problema en un 50%, las que eran efectivamente atribuibles en parte tanto a las condiciones de medición como a los métodos de cálculo y constantes nucleares que se habían utilizado con anterioridad.

El desajuste remanente, del orden del 16%, podría atribuirse a las bondades del modelo utilizado; al respecto cabe destacar que han sido formulados recientemente nuevos modelos para el agua liviana que podrían dar respuesta a esta suposición (23).

Paralelamente se obtuvieron otros resultados, tales como la implementación de la segunda parte de un sistema de cálculos neutrónicos y de reactivos e información para el estudio y perfeccionamiento de un programa de cálculo basado en el modelo secundario.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean expresar su agradecimiento a todo el personal de la sección acelerador lineal por su constante colaboración para el desarrollo de las mediciones. También a los señores R.E. Bravo y L.J. Capararo, técnicos de la división, por su asistencia permanente en las necesidades experimentales y su apoyo en la realización de las mediciones; además al señor A. Parker por su colaboración en los cálculos efectuados con el programa NYRESE y al señor C. Espinel por su intervención en la implementación del sistema de cálculo.

El presente trabajo se realizó con el apoyo del Ejército Argentino a través del proyecto "Física de Neutrones y Reactores".

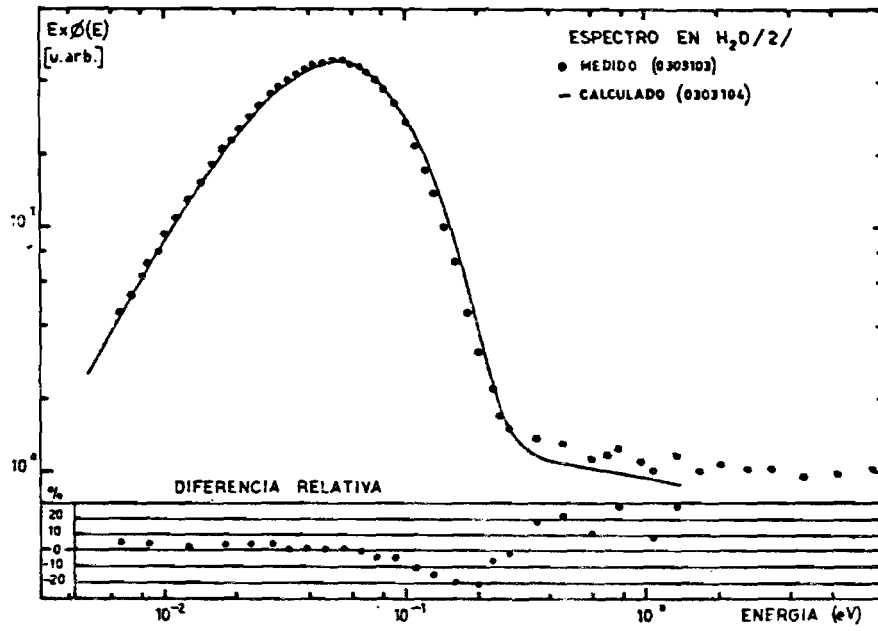


FIGURA 1

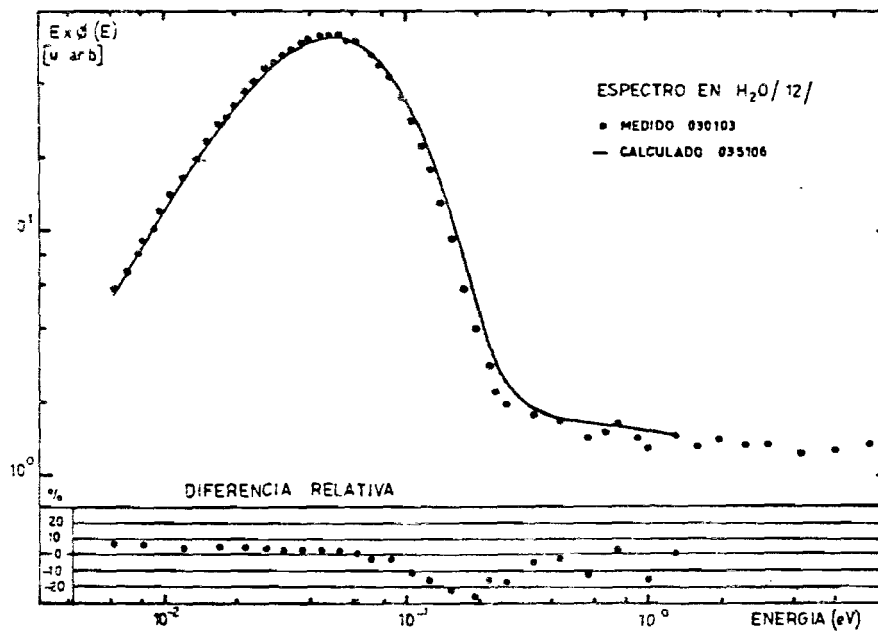


FIGURA 2

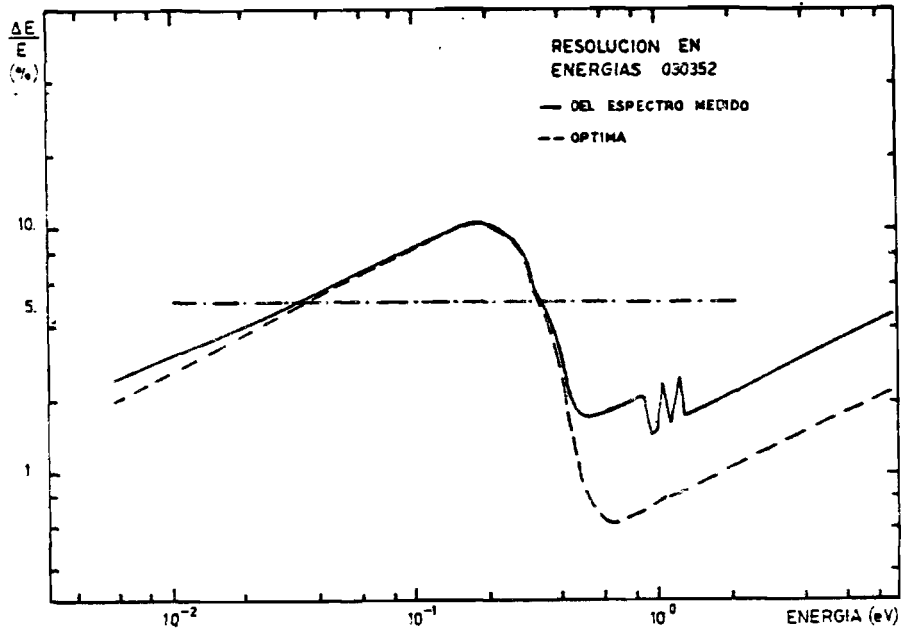


FIGURA 3

SISTEMA DE CALCULO PARA ESTUDIO DE ESPECTROS /16/

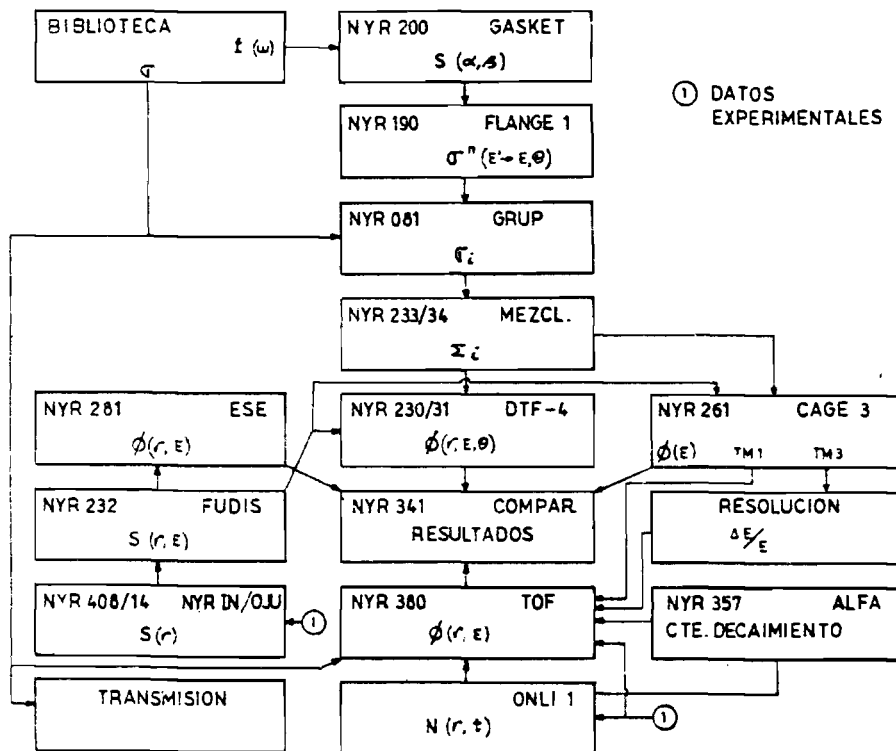


FIGURA 4

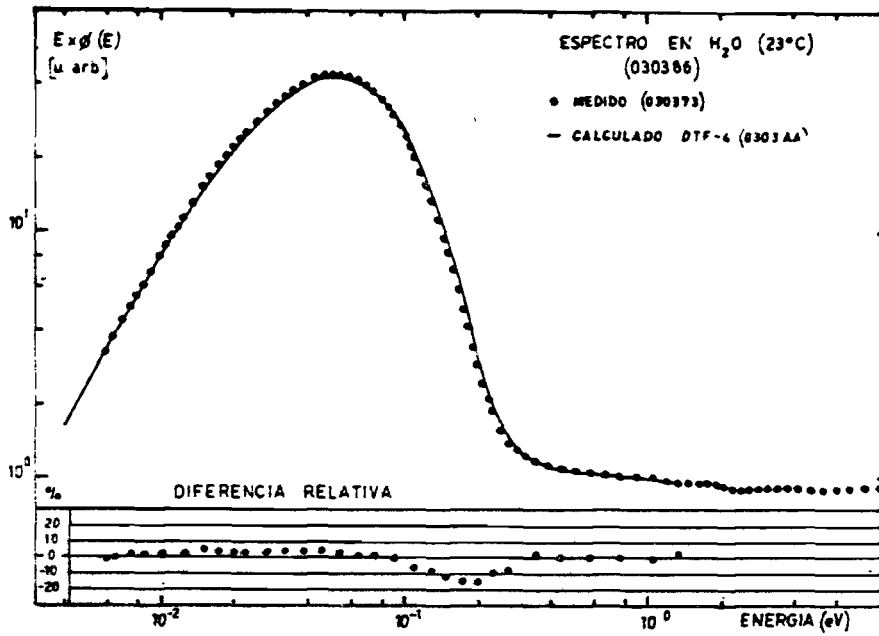


FIGURA 5

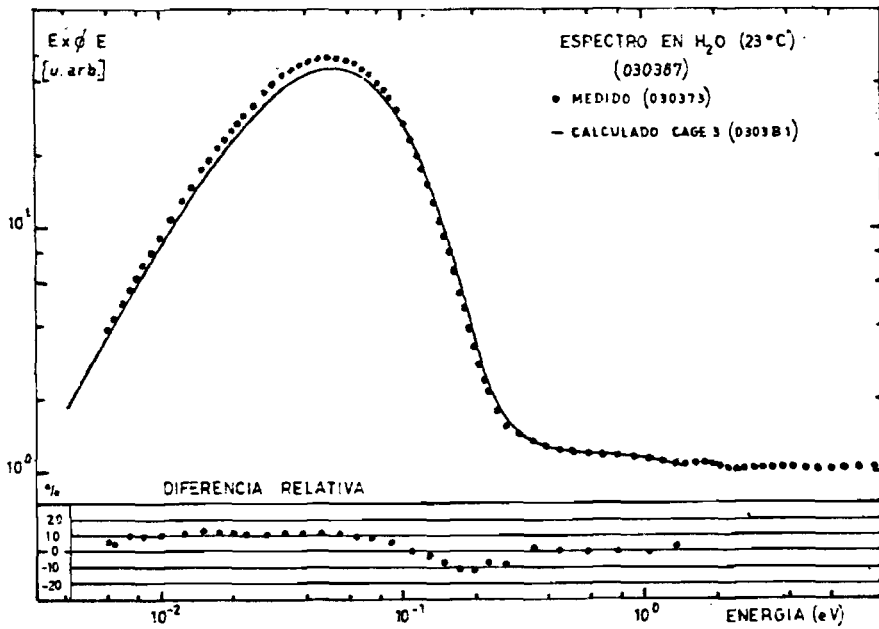


FIGURA 6

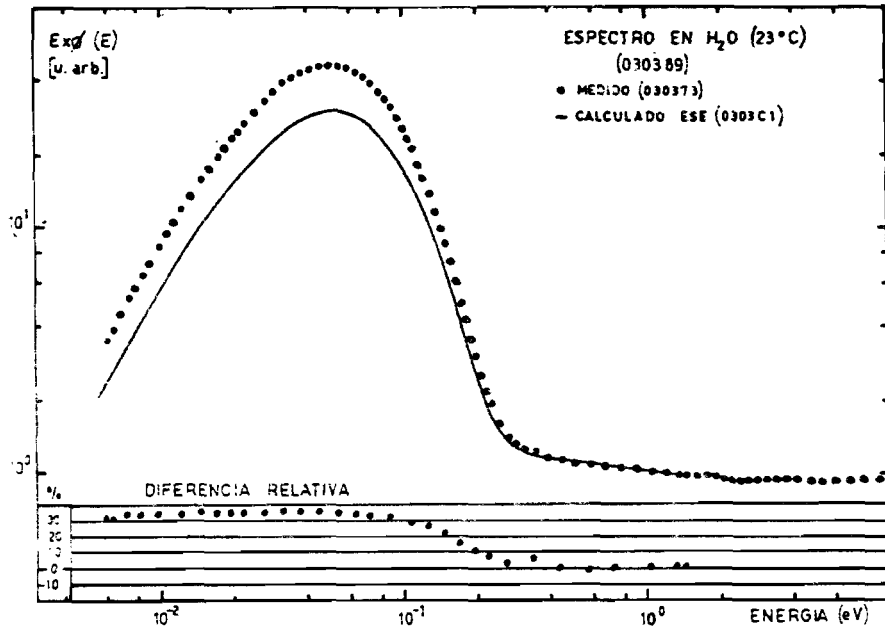


FIGURA 7

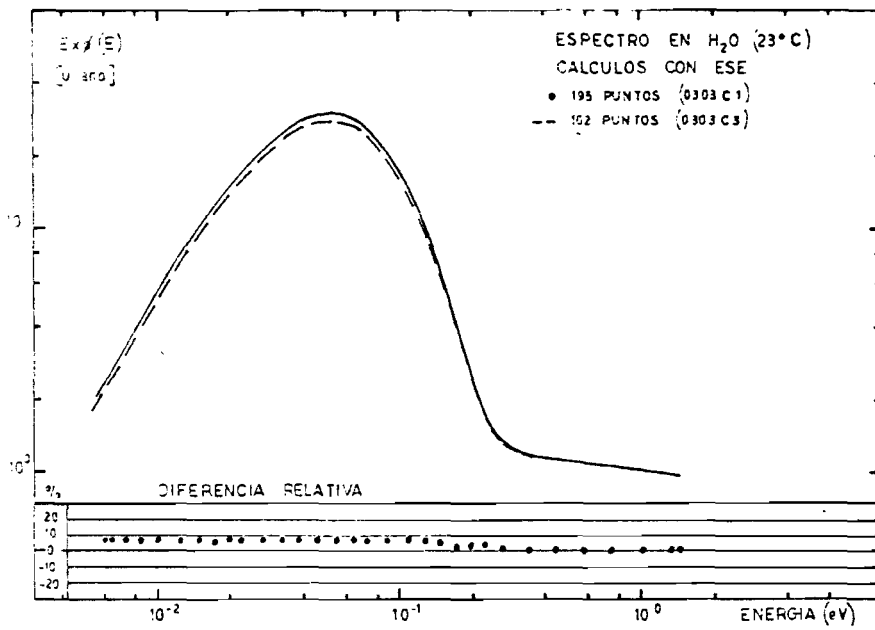


FIGURA 8

## BIBLIOGRAFIA

- 1) J.C. YOUNG et al., "Theoretical and experimental neutron spectra", GA-5319 (1967).
- 2) M.J. ABBATE et al., "Medición y cálculo de espectros de neutrones en agua liviana", CAB/1972/10, Septiembre 1972.
- 3) J.M. NEILL, comunicación privada, 1970.
- 4) J.R. BEYSTER et al., "Integral neutron thermalization", GA-2544, (1961).
- 5) J.R. BEYSTER et al., Nucl. Sci. Eng. 9, 168 (1961).
- 6) J.C. YOUNG et al., Nucl. Sci. Eng. 28, 259 (1967).
- 7) D.E. PARKS et al., Nucl. Sci. Eng., 13, 306 (1962).
- 8) J.U. KOPPEL et al., "GASKET - A unified code for thermal neutron scattering", GA-7417 (1967), (NYR200, ACNYR, CAB);  
H.C. HONECK and Y.D. NALIBOFF, "FLANGE-1", Abstract 247, Argonne Code Center, ANL, Ill. (1966), (NYR190, ACNYR, CAB).
- 9) J.U. KOPPEL and J.S. YOUNG, Nucl. Sci. Eng., 19, 412 (1964).
- 10) M.J. ABBATE et al., "Facilidad para la medición de espectro de neutrones por el método de tiempo de vuelo", CNEA 369, 1974.
- 11) P. D'OUTREMONT et al., "CAGE-BIRD-SPEC, A package Fortran V system for reduction and analysis of neutron time-of-flight spectra", Gulf- RT-10195, (1970).
- 12) J.V. LOLICH y M.J. ABBATE, "Determinación de la densidad neutrónica espacial por activación de hojuelas de indio", com. L.I., 60ª reunión de la AFA, Tucumán, mayo 1974.
- 13) H.M. ANTUNEZ et al., "NYRTOF-programa para acumulación y reducción de datos en mediciones de espectros de neutrones por el método de tiempo de vuelo-Opción Off-Line", NYR380, ACNYR, CAB, Noviembre 1971.
- 14) M.J. ABBATE, "Programa RESOLUCION" no publicado.
- 15) K.H. BECKURTS and K. WIRTZ, "Neutron Physics", Springer-Verlag, N. York, (1964).

- 16) M.J. ABBATE, "NYR001-Sistema de cálculos neutrónicos y de reactores" no publicado.
- 17) M.J. ABBATE, "NYR232-FUDIS cálculo de fuentes distribuidas", ACNYR, CAB, 1973.
- 18) J.E. VOLKIS et al., "Método de cálculo para la obtención de parámetros de difusión", CAB/1972/6, Junio 1972.
- 19) J.U. KOPPEL and D.H. HOUSTON, "Reference manual for ENDF thermal neutron scattering data", GA-8774, (1968).
- 20) M.J. ABBATE, "NYR230-Versión del programa DTF-4", NYR230, ACNYR CAB, 1973.
- 21) J.E. VOLKIS, "NYRESE-Programa para el cálculo de espectros con el modelo secundario", NYR281, ACNYR, CAB (1973);  
R. SOLANILLA, "Use of secondary model for calculating the thermal neutron spectrum in multiannular cylindrical geometry and applications", SIEMENS, 1970.
- 22) J.E. VOLKIS, Comunicación privada, 1973.
- 23) R.G. JARVIS, Trans. Am. Nucl. Soc., 12, 673 (1969).  
L.J. ESCH, Nucl. Sci. Eng., 46, 223 (1971).
- 24) F. AKINO et al., J. Nucl. Sci. Tech. 9 (10), 574 (1972)