



REPUBLICA ARGENTINA

PUBLICACIONES
DE LA
COMISION NACIONAL DE LA ENERGIA ATOMICA
SERIE FISICA
VOL. I — Nº 10

CALIBRACION DE UNA FUENTE DE RA-BE

POR

A. H. W. ATEN (JR.) Y V. J. KOWALEWSKI



BUENOS AIRES
1956

REPUBLICA ARGENTINA

PUBLICACIONES
DE LA
COMISION NACIONAL DE LA ENERGIA ATOMICA
SERIE FISICA
VOL. I — N° 10

CALIBRACION DE UNA FUENTE DE RA-BE

POR

A. H. W. ATEN (JR.) Y V. J. KOWALEWSKI



BUENOS AIRES

1956

Imprenta y Casa Editora CONT, Perú 684, Buenos Aires

237

CALIBRACION DE UNA FUENTE DE RA-BE

POR A. H. W. ATEN (JR.) Y V. J. KOWALEWSKI

Trabajo recibido para su publicación el 9 de agosto de 1954

SUMMARY

The number of neutrons emitted by second and in all directions by a source of 50 mg. of radium with beryllium was determined by the manganese bath method. The problem of the absolute measurement of the low activity of manganese was solved by means of an intermediate activity. The correction due to the finite volume was calculated on the basis of already published neutron distribution curves in water. The result obtained was:

$$Q = (5,0 \pm 0,5) \cdot 10^5 \text{ n/sec.}$$

INTRODUCCIÓN

La calibración de una fuente de neutrones del tipo Radio-Berilio consiste en determinar el número de éstos emitidos por la fuente por segundo, en todas direcciones. Como en la mayoría de las mediciones de la radioactividad y de la física nuclear, la determinación absoluta de una magnitud resulta siempre más laboriosa que la determinación relativa, o sea, la comparación de una fuente con otra.

El método a utilizar para efectuar la calibración absoluta de una fuente depende de su naturaleza y de su intensidad. Para cada caso particular se han desarrollado diferentes técnicas (1), (2), (3) y (4).

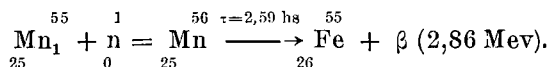
Las fuentes que presentan un espectro complejo se calibran generalmente por el método de la «integración en el espacio» (5), y se reducen, en última instancia, al problema de la calibración absoluta de una fuente radioactiva (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12).

En el caso presente las dificultades son considerables, en parte por la naturaleza de la radiación a medir, y en parte por la relativamente baja intensidad de la fuente. Trátase de 50 mg. de radium,

bajo la forma de sal (Br Ra), mezclados con berilio (metal) en polvo, en una proporción aproximada de 1 : 8. El conjunto está comprimido en forma de una pastilla y encerrado en una doble envoltura de platino de 0,5 mm de espesor c/u. Por razones de seguridad y comodidad de manejo este cilindro de platino, de aproximadamente 1 cm cúbico, fué cerrado herméticamente en una cápsula de bronce, cilíndrica, de aproximadamente 2×3 cm.

PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN

Una fuente de neutrones como la descripta emite fundamentalmente neutrones rápidos. El espectro de energía no es bien conocido. Tiene una energía media de alrededor de los 5 Mev y una energía máxima de unos 12 Mev. La presencia de neutrones se detecta por la radioactividad que inducen en algunos elementos al incorporarse a los núcleos de los mismos. Esta incorporación es, en general, tanto más fácil cuanto más lentos son los neutrones. Para algunos elementos como por ejemplo el manganeso, que es el utilizado en estas experiencias, esta incorporación y la consiguiente activación es máxima cuando los neutrones no tienen casi nada de su energía inicial y se mueven casi solamente por la agitación térmica de las moléculas y átomos (neutrones térmicos $E = 0,025$ eV). En el caso del manganeso la absorción de neutrones no térmicos es casi despreciable. La reacción que se observa es la siguiente :



La energía de la reacción β emitida la hace fácilmente detectable.

En el presente caso no hay entre el manganeso y los neutrones reacciones de otro tipo que la indicada. El manganeso no posee isótopos, que podrían interferir con reacciones colaterales.

Si sobre una cierta cantidad de material indicador (manganeso en este caso), hacemos incidir un flujo de neutrones, éstos son absorbidos por el manganeso a razón de R_0 por segundo. Se forman de este modo R_0 átomos radiactivos por segundo. Si exponemos el material durante un tiempo t_0 , lo sacamos luego del flujo de neutrones y medimos su actividad durante un intervalo de tiempo comprendido entre t_1 y t_2 , obtenemos un cierto número de descargas en el conta-

dor, $C(t_1, t_2, t_e)$ del cual podemos deducir la razón de formación de los átomos radiactivos R_0 , o sea *el número de neutrones que absorbe la muestra por segundo*, mediante la expresión :

$$R_0 = \frac{1}{f} \frac{C(t_1, t_2, t_e)}{(1 - e^{-t_e/\tau})(e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau})}$$

en esta fórmula es :

R_0 = N° de neutrones absorbidos por segundo por la muestra igual a la actividad absoluta de la muestra al cabo de un tiempo infinito de irradiación, llamada también *actividad de saturación* o saturada.

f = factor «geométrico» del contador (< 1) que permite pasar del número de descargas observadas a actividades absolutas, y que incluye factores tales como la geometría, la absorción de la ventana del detector y otros. Es el factor más difícil de determinar y de mantener invariable de una medición a otra.

C = número de impulsos del contador registrados entre el tiempo t_1 y el t_2 . ($t_2 - t_1$ = tiempo de contaje).

t_e = tiempo que permanece expuesta la muestra al flujo de neutrones.

t_1 = al instante de tiempo en el que se comienza a contar, contando a partir del momento de la extracción.

t_2 = íd. íd al terminar de contar.

τ = vida media del material radiactivo que se forma y que emite la radiación que se detecta con el tubo contador.

Para detectar *todos* los neutrones emitidos por la fuente se usa el método llamado del *baño de agua*. Se coloca la fuente de neutrones en el centro de un recipiente lleno de agua (o de alguna solución adecuada) de dimensiones que por ahora consideraremos infinitas. Los neutrones rápidos emitidos sufren repetidos choques y van perdiendo rápidamente energía (especialmente en los choques con los átomos de hidrógeno). Recorren un cierto trayecto, son frenados hasta las velocidades térmicas y absorbidos luego, sea por el hidrógeno (para formar deuterio con emisión de radiación gamma), sea por otros átomos en solución. (El efecto del oxígeno es completamente despreciable). Se tiene así un estado de régimen (al que se llega casi instantáneamente) en el que un cierto número Q_0 de neu-

trones es emitido por segundo por la fuente y ese mismo número es absorbido por segundo por el líquido. El método más sencillo para determinar el número de neutrones que por segundo absorbe el baño moderador consiste en disolver homogéneamente en el mismo una cantidad conocida de un material que se activará al absorber parte de los neutrones y medir dicha actividad. En el presente caso se ha utilizado sulfato de manganeso cristalino ($\text{SO}_4\text{Mn} + 4\text{H}_2\text{O}$) Merck pro análisis. La presencia del azufre es también despreciable desde el punto de vista de la absorción de neutrones, de modo que tendremos:

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ de n. absorb. por el H}}{\text{N}^\circ \text{ de n. absorb. por el Mn}} = \frac{N_H \cdot \sigma_H}{N_{Mn} \cdot \sigma_{Mn}}$$

En esta expresión es:

N_H = N° de átomos de hidrógeno del baño.

N_{Mn} = N° de átomos de manganeso en el baño.

σ_H = sección eficaz de absorción del H para neutrones térmicos.

σ_{Mn} = íd. íd. del manganeso, de donde:

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ total de n. absorb. por la sol.}}{\text{N}^\circ \text{ de absorb. por el Mn}} = \frac{N_H \cdot \sigma_H + N_{Mn} \cdot \sigma_{Mn}}{N_{Mn} \cdot \sigma_{Mn}} = 1 + \frac{N_H \cdot \sigma_H}{N_{Mn} \cdot \sigma_{Mn}}$$

Evidentemente el número de neutrones que desaparecen por segundo en el baño (igual al número de neutrones emitidos por segundo por la fuente) es igual a la *actividad saturada absoluta* del manganeso contenido en la solución, multiplicada por la expresión anterior. El problema se reduce así a la medición de la actividad absoluta del manganeso de la solución.

Para medir la actividad del manganeso, se extrae una muestra de la solución. Como la actividad específica del Mn será mayor en las proximidades de la fuente que en la periferia del recipiente, al término de la irradiación se debe revolver intensamente la solución para asegurarse de que la actividad de la parte alícuota de la solución es proporcional a la actividad total de la misma (método de integración de Fermi) (8).

Para extraer rápidamente el Mn de la solución, se precipita el Mn de la misma bajo la forma Mn_3O_4 .

La medición de la actividad absoluta del Mn_3O_4 se ha hecho en el presente trabajo por comparación con la actividad de una cierta

cantidad de U_3O_8 (Método del UX_2) (13). En el caso presente no es posible aplicar dicho método en forma directa ya que la actividad *específica* de la muestra de Mn_3O_4 extraído de la solución es demasiado pequeña para su medición directa, debido a la relativamente baja intensidad de la fuente de neutrones. (En este tipo de experiencias se utiliza habitualmente 500 mg. o más de Ra, en vez de los 50 utilizados por nosotros). Debe tenerse en cuenta que se debe comparar la actividad de un depósito muy delgado de Mn_3O_4 con la de uno, también muy delgado, de U_3O_8 , para evitar los efectos de la auto-absorción. Asimismo las mediciones deben hacerse colocando el material radiactivo a una cierta distancia de la ventana del contador, definiendo el ángulo sólido subtendido mediante diafragmas adecuados, para evitar errores debidos a la diferente dispersión de las partículas beta de ambos elementos radiactivos (diferente en ambos casos debido al diferente espectro beta).

Para evitar estos inconvenientes se ha usado un método de comparación *indirecta*. Se utilizó un *intermediario* bajo la forma de Mn_3O_4 de actividad específica relativamente elevada, obtenido por irradiación, mediante la misma fuente de neutrones, de una cierta cantidad de permanganato de potasio y posterior precipitación. Se obtuvo una actividad específica fuerte colocando un tubo de ensayo con el permanganato en la vecindad inmediata de la fuente, todo dentro de un bloque de parafina de grandes dimensiones.

Se han efectuado de este modo, un total de cuatro mediciones de actividad en la siguiente forma:

A) Se midió el n° de descargas que daba en un contador 0,5 grs de Mn_3O_4 extraído del baño de medición, colocado en una cápsula situada bien próxima a la ventana de mica del tubo, para obtener así, con esa capa gruesa y la pequeña distancia, un buen número de impulsos y por consiguiente, bajo error estadístico.

B) Se midió el número de descargas que daba *en la misma posición* 0,5 grs del Mn_3O_4 especialmente activado.

C) Se determinó el n° de descargas que daba *el mismo manganeso* especialmente activado colocado en una capa delgada (20 a 40 mg por muestra) a una buena distancia del contador y bajo ángulo sólido bien definido.

D) Se determinó el número de impulsos que daban *en la misma posición anterior* una cierta cantidad de U_3O_8 .

La comparación de A) con B) es lícita, a pesar de la fuerte auto-absorción y dispersión, por tratarse de muestras del *mismo material*

y de la misma energía máxima y espectro beta (y gamma). La comparación de B) con C) da cuenta de dichos efectos de autoabsorción y dispersión (ya que se trata de la misma muestra). La comparación de C) con D) da finalmente el valor absoluto de la actividad de la muestra auxiliar y, por ende, de la muestra del baño de medición.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las experiencias se realizaron, como es natural, en un volumen finito: Un recipiente cilíndrico de 44,8 cm de diámetro fué llenado con solución de SO_4Mn hasta una altura de 41,6 cm lo que equivale a un volumen de 65,5 lts. Este volumen de agua contiene

$$2.65 \cdot 5.10^3 / 18 = 7,26 \cdot 10^3 \text{ at. gr.}$$

de hidrógeno :

$$\underline{N_H = 7,26 \cdot 10^3 \text{ at. gr.}}$$

Se disolvieron en el baño 238,5 grs de $\text{SO}_4\text{Mn} + 4\text{H}_2\text{O}$. Esto equivale a 58,6 grs de manganeso, o sea :

$$\underline{N_{Mn} = 1,065 \text{ at. gr.}}$$

El cociente de las secciones eficaces de absorción se deduce de los siguientes datos: (para neutrones térmicos) (5).

$$\sigma_{Mn} = 12,6 \text{ bn}$$

$$\sigma_H = 0,313 \pm 0,013 \text{ bn}$$

Por lo tanto es :

$$1 + \frac{N_H \cdot \sigma_H}{M_{Mn} \cdot \sigma_{Mn}} = 1 + \frac{7,26 \cdot 10^3 \cdot 0,313}{1,065 \cdot 12,6} = \underline{171}$$

La solución fué irradiada durante 21 horas (8 períodos), prácticamente a saturación. Después de 193 minutos de decaimiento, tiempo empleado en la extracción de una parte de la solución y transformación del SO_4Mn en Mn_3O_4 se midió la actividad de 0,5 grs de óxido, en una capa gruesa y próxima al tubo, observándose 66 descargas por minuto. Teniendo en cuenta el decaimiento podemos calcular (o determinar gráficamente, como se hizo en el presente caso), la actividad *específica* (por gramo) al tiempo cero, o sea al final de la radiación. Esto dió por resultado 300 descargas por minuto y por gramo.

Como el tiempo de irradiación es mucho mayor que el período de desintegración, esta actividad es precisamente la actividad de saturación.

Para comparar la actividad del óxido de manganeso con la del uranio, se determinó la actividad de una capa delgada de U_3O_8 (caso *d*), obteniéndose una actividad *por miligramo* de 60 descargas. Extrapolando dicho valor a espesor cero de aluminio (usado como absorbente de las radiaciones del U_I), se obtuvo una actividad de 76 descargas por minuto y miligramo.

En consecuencia la actividad de un gramo de Mn_3O_4 es, a menos de la geometría y demás efectos, equivalente en actividad a: $300/76 = 4,0$ mgs de U_3O_8 . (En una segunda determinación se obtuvo el valor de 4,6 mgs, de modo que podemos tomar el promedio :

$$1 \text{ gr } Mn_3O_4 = 4,3 (\pm 0,3 \text{ mg de } U_3O_8) \quad (\text{error } \pm 7 \%)$$

El factor geométrico y de autoabsorción y dispersión se determinó, mediante la muestra de óxido de manganeso especialmente activado, obteniéndose como resultado que: 0,5 grs de óxido, en capa gruesa y cercana al tubo, equivalen a 0,733 grs en capa delgada y lejos del mismo. Esto da un factor geométrico de: $0,5/0,733 = 0,682$.

Multiplicando el valor anterior por este factor geométrico tenemos que: 1 gramo de Mn_3O_4 tiene *la misma actividad absoluta* que $4,3 \times 0,682 = 2,93$ mgs de U_3O_8 .

Como un miligramo de óxido de uranio se desintegra a razón de 682 des/min, tenemos como actividad absoluta del óxido de manganeso: $2,93 \times 628 = 1.840$ des/min. gr. — ($\pm 7\%$).

La actividad específica *del manganeso* será, teniendo en cuenta los respectivos pesos moleculares: $1.840 \times 229/165 = 2.510$ des/min. gr.

La actividad *de todo* el manganeso del baño es por lo tanto: $2.510 \times 58,6 = 1,47 \times 10^5$ des/min., y por segundo es:

$$1,47 \times 10^5/60 = 2,45 \times 10^3 = 2.450 \text{ des/seg.}$$

Este es el número de neutrones que absorbe por segundo *el manganeso* de la solución. *La solución*, por lo tanto, absorbe a razón de: $2.450 \times 171 = 420.000$ neutrones por segundo.

CORRECCIÓN DEBIDA AL VOLUMEN FINITO

Como se ha dicho al comienzo de la sección referente a los resultados experimentales, se ha utilizado un baño de volumen finito. Podía habérselo considerado prácticamente infinito tomando, por ej., un tanque de 1.000 lts. de capacidad, pero eso implicaría la medición de una muestra de Mn_3O_4 de actividad específica demasiado baja para ser medida, debido a la dilución consiguiente. De modo que en rigor, existe un cierto volumen óptimo: (cuyo valor exacto no vale la pena determinar, sino guiándose por la experiencia), tal que: no es dema-

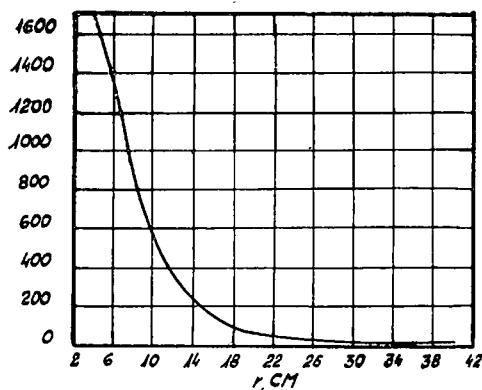


Fig. 1. — Distribución de neutrones térmicos en agua, en función de la distancia de la fuente (Miscellaneous Physical and Chemical Techniques of the Los Alamos Project V-3 por A. C. Graves y D. K. Froman, pág. 119).

siado grande como para producir demasiada dilución ni demasiado chico como para hacer graves los errores por pérdida de neutrones.

Para comprender mejor lo antedicho veamos cuál es la distribución de los neutrones térmicos dentro del volumen del baño. Esta se estudia habitualmente, sea con un pequeño contador de trifluoruro de boro, sea por la activación de hojuelas de indio o manganeso que se colocan a diferentes distancias de la fuente. En la figura 1 se ha representado la distribución de neutrones térmicos provenientes de una fuente como la utilizada en esta experiencia, en un baño de agua pura en función de la distancia a la fuente. En la figura 2 están representados los mismos valores (siempre relativos), de la densidad

A de neutrones térmicos, pero multiplicados por el cuadrado de la respectiva distancia. Debido a la simetría esférica de nuestro problema, la integral :

$$I = 4\pi \int_0^{\infty} A \cdot r^2 \cdot dr$$

da, a menos de la constante del detector utilizado, el número total de neutrones que absorbe la solución (o el agua en este caso) por segundo, igual al número de neutrones emitidos por segundo por la fuente.

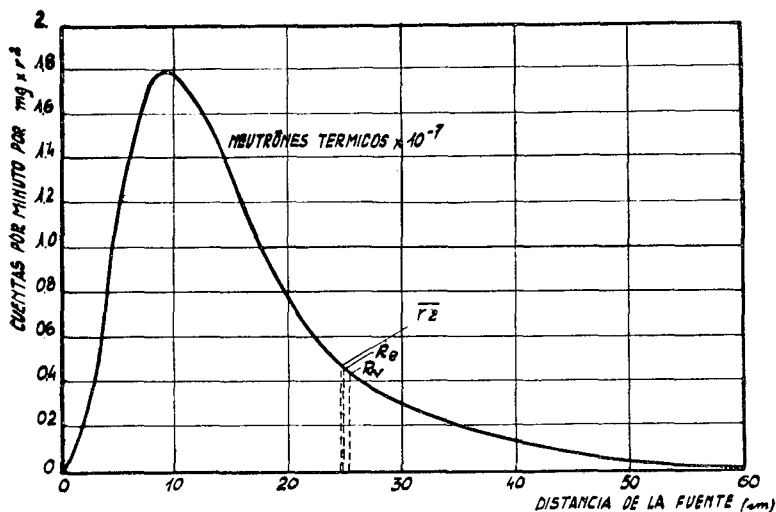


Fig. 2. — Distribución de neutrones de una fuente de Ra-Be en agua. Las coordenadas dan, a menos de una constante, la densidad de neutrones, multiplicada por el cuadrado de la distancia a la fuente (Experimental Nuclear Physics, vol. II, E. Segrè y col., pág. 397).

Si utilizamos un volumen finito *esférico*, el cociente :

$$F = \frac{4\pi \int_0^R A \cdot r^2 \cdot dr}{4\pi \int_0^{\infty} A \cdot r^2 \cdot dr}$$

da la fracción de neutrones absorbidos por la esfera de radio R, y $(1 - F)$ da el error cometido al utilizar la esfera finita de radio R. En el presente caso el volumen utilizado tiene la forma de un cilindro y el problema que se plantea es: ¿Cuál es el radio de la esfera equivalente a ese cilindro?

Como ya se ha dicho, la integración se realiza agitando bien la

solución del baño después del período de irradiación, y como se observa en las figuras 1 y 2, la contribución de las partes periféricas del baño a la actividad total es evidentemente muy pequeña debido a la distribución del flujo de neutrones, de ahí que no convenga utilizar un volumen muy grande.

Para calcular la corrección debida al volumen finito del baño se han hecho las siguientes suposiciones :

1ª El número de neutrones no térmicos que escapan del recipiente es despreciable.

2ª Es también despreciable la influencia de la discontinuidad del medio agua-aire sobre la forma de la curva de distribución de los

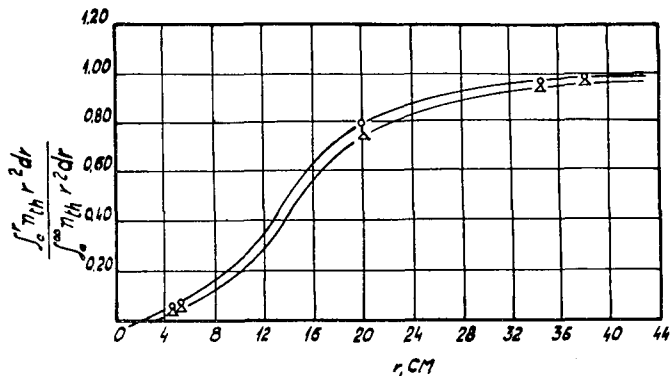


Fig. 3. — Relación entre la integral espacial para un radio finito a la integral al infinito, en función de dicho radio, para una fuente de Ra-Be, en agua O, y en solución de ácido bórico Δ, (id. id., pág. 119),

neutrones en las vecindades de la superficie del cilindro. Esto se justifica dado el pequeño valor del camino libre medio de transporte en agua, $\lambda = 4,26$ mm por lo que el «radio extrapolado» del recipiente no difiere apreciablemente del radio real (14).

3ª La forma de la curva de distribución de neutrones está dada, en nuestro caso, por la figura 2. Esto es aceptable si se tiene en cuenta la poca influencia que sobre dicha curva tienen los materiales en solución (véase la figura 3) y la poca cantidad de manganeso utilizado en nuestro caso (que absorbe menos del 1 % del total de neutrones). Se suponen, además, idénticos los espectros de energía de la fuente presente y la correspondiente a la figura 2.

En lugar de calcular la fracción F se ha calculado el valor

$$1 - F = \frac{\int_{\text{Cil}}^{\infty} A \cdot r^2 \cdot dv}{4\pi \int_0^{\infty} A \cdot r^2 \cdot dr}$$

Para calcular el valor numérico de $(1 - F)$ se ha utilizado la curva de la figura 2, admitiendo, en base a las hipótesis anteriores, que ella representa con suficiente precisión la distribución de neutrones en nuestra experiencia. Como el cociente F (ó $1 - F$) es un número abstracto, independiente de la intensidad de la fuente, trabajamos sobre

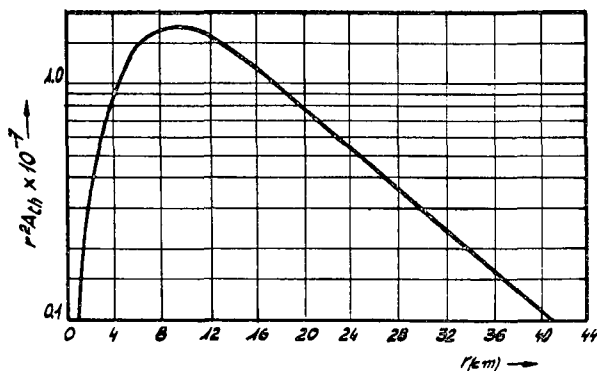


Fig. 4. — La misma curva de la figura 2, para neutrones térmicos pero en coordenadas semilogarítmicas, que demuestra que la función es exponencial por encima de un cierto valor de r (id. id., pág. 490).

dicha curva suponiendo que las ordenadas dan directamente el número de neutrones por cm^3 y por seg. multiplicado por el cuadrado de la distancia, o sea, tienen la dimensión: $\text{seg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$;

La integral del denominador se determinó con planímetro polar extrapolando analíticamente hasta el infinito, dando por resultado, para la figura 2 el valor: $I_0^\infty = 384 \cdot \text{cm}^{-1} \text{seg}^{-1}$.

Se puede determinar analíticamente la integral del numerador ya que la curva de la figura 2, ó 4 para valores de r mayores de 21 cm está dada por la ecuación $A \cdot r^2 = a \cdot \exp(-b \cdot r)$, $a = 5,6 \text{seg}^{-1} \text{cm}^{-1}$; $b = 0,10 \text{cm}^{-1}$ y por consiguiente la función A está dada por: $A = a/r^2 \exp(-b \cdot r)$. La integral, que no es trivial debido a la forma del límite inferior de integración, fué resuelta por el Departamento de Matemáticas de la C. N. E. A. siendo su valor: para un cilindro de 41,6

cm de alto y 44,8 cm de diámetro: $I_{\text{cyl}}^{\infty} = 59,4$; $\text{cm}^{-1} \text{seg}^{-1}$; es decir, el 15,5 % del total.

El número total de neutrones emitidos por la fuente es, pues:

$$N = 4,2 \cdot 10^5 \frac{100}{100 - 15,5} = 5,0 \cdot 10^5 \text{ n/seg}$$

Es difícil determinar la precisión de esta determinación. La sección eficaz σ_{H} está afectada de un error del 4 %; no se conoce el error de σ_{Mn} pero es probablemente del mismo orden; la actividad absoluta del Mn_3O_4 está determinada con un error de aproximadamente 7 %. El factor $(1 - F)$ es probablemente el que está mejor determinado. Todo esto da un error probable para el número de neutrones emitidos por segundo por la fuente que estimamos en un ± 10 %.

El punto más débil está evidentemente en la medición absoluta de las actividades y toda mejora en este sentido aparecería directamente en el resultado final.

Como para la presente geometría el cálculo del error por volumen finito resulta poco práctico, es interesante ver algunos métodos aproximados. Para ello calculemos *el radio de la esfera equivalente al cilindro* utilizado, o sea, el radio tal que:

$$5,6 \int_R^{\infty} \frac{\exp(-0,1 \cdot r)}{r^2} dv = 59,4 \text{ seg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

Pasando a coordenadas polares se obtiene inmediatamente como resultado $R_e = 24,7$ cm.

Si calculamos ahora *el radio de la esfera de igual volumen* que el cilindro, obtenemos: $R_v = 25,2$ cm.

Otro valor interesante se obtiene si se calcula *el radio cuadrático medio*, o sea el valor medio del cuadrado de las distancias entre los puntos de la superficie del cilindro y su centro:

$$\overline{r^2} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} r^2 \cdot d\varphi = (D \cdot h/\pi)^{1/2} = 24,5 \text{ cm}$$

Como se ve, excepto para las mediciones de gran precisión, es suficiente con tomar esta última aproximación y calcular la corrección por integración gráfica de la figura 2, o mejor aún directamente de la figura 3.

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. F. TASCHEK, A. HEMMENDINGER y G. A. JARVIS, *Phys. Rev.*, **75**, 1464 (A) (1949).
- (2) F. A. PANETH y E. GLUCKAUF, *Nature*, **139**, 712 (1937).
- (3) — *Proc. Roy. Soc. (London)* **A 165**, 229 (1938).
- (4) L. T. CURTISS y A. CARSON, *Phys. Rev.*, **76**, 1412 (1949).
- (5) *Experimental Nuclear Phys.*, vol. II, E. SEGRE, P. MORRISON y B. T. FELD, pág. 455.
- (6) O. R. FRISCH, H. VON HALBAN (JR.) y J. KOCH, *Kgl. Danske, Viedenskab. Selskab, Math. fys., Medd.*, **XV**, 10 (1938).
- (7) R. D. O'NEAL y G. SCHIAFF-GOLDHABER, *Phys. Rev.*, **69**, 368 (1946).
- (8) H. L. ANDERSON, E. FERMI y L. SEILAND, *Phys. Rev.*, **56**, 284 (1939).
- (9) E. SEGRÈ, *Ricerc. Sci.*, **7** (1), 389 (1936).
- (10) W. J. WHITEHOUSE y G. A. R. GRAHAM, *Can. J. Res.*, **A 25**, 261 (1947).
- (11) E. AMALDI y E. FERMI, *Phys. Rev.*, **50**, 899 (1936).
- (12) F. G. P. SEIDL y S. P. HARRIS, *R. S. I.*, **18**, 897 (1947).
- (13) *Experimental Nucleonics*, E. BLEULER y G. J. GOLDSMITH.
- (14) *The elements of Nuclear Reactor Theory*, S. GLASSSTONE y M. C. EDLUND.