

## Informe 4: Radioactividad

Juana Valeria Pinzón\* and Sergio Laverde\*\*

*Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.*

(Dated: 11 de marzo de 2024)

En el presente documento, se expondrán las contribuciones de radiación alfa, beta y gamma en la desintegración del Torio natural. Para ello, se obtuvieron con ayuda de un contador Geiger-Müller las frecuencias de emisión de radiación alfa, beta o gamma como productos de desintegración nuclear del Torio y sus derivados. Para establecer la distinción entre número de partículas alfa, beta o gamma medidas se hizo uso de barreras físicas de papel y plomo entre la fuente radiactiva y el detector. Se obtuvieron como resultados que el  $(39,40 \pm 1,50) \%$  corresponde a radiación alfa, el  $(48,86 \pm 1,57) \%$  a radiación beta y que el  $(11,74 \pm 0,48) \%$  a radiación gamma.

### I. INTRODUCCIÓN

La radioactividad, descubierta a finales del siglo XIX por Henri Becquerel y desarrollada posteriormente por Marie Curie y Pierre Curie, es un fenómeno de los núcleos atómicos inestables, que emiten partículas como resultado de una desintegración nuclear. Los tipos comunes de radiación incluyen alfa, beta y gamma, cada uno con sus propiedades específicas de penetración y alcance. La medición del número de partículas detectadas provenientes del decaimiento de una sustancia radioactiva proporciona información crucial sobre la actividad y tiempo de vida medio. Este proceso se basa en la relación entre la cantidad de material radiactivo presente y la tasa de desintegración observada[3].

La desintegración radiactiva es un proceso aleatorio. Cualquier partícula dada tiene una cierta probabilidad por unidad de tiempo de desintegración espontánea. La probabilidad de desintegración es independiente de la vida anterior de la partícula. Si  $N(t)$  es el número de partículas en una muestra en función del tiempo, entonces la tasa de desintegración  $(-dN/dt)$  es proporcional a  $N$  [1].

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N.$$

La constante de proporcionalidad ( $\lambda$ ) tiene dimensiones de tiempo inverso. Si comenzamos con  $N_0$  partículas, entonces el número de partículas en función del tiempo es:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

La vida media de un isótopo radioactivo se define como el tiempo necesario para que la mitad de los núcleos

en una muestra se desintegren en su totalidad. La vida media ( $\tau$ ) de una partícula es:

$$\tau = \frac{1}{\lambda},$$

Por otro lado, la emisión de partículas alfa se caracteriza por la liberación de núcleos de helio, que son altamente energéticos pero de corto alcance debido a su masa y carga. Este proceso sigue el modelo de penetración de barrera, donde la partícula alfa puede penetrar la barrera de potencial nuclear mediante el efecto túnel. Aunque la partícula alfa es la más masiva y enérgica de las emisiones radiactivas, por su interacción con la materia resulta en un corto alcance. Por otro lado, las partículas beta y los rayos gamma son más penetrantes y pueden atravesar considerables espesores de material. En conjunto, este marco teórico proporciona el contexto necesario para comprender cómo la medición de la desintegración radiactiva puede ser utilizada para estimar el tiempo de vida promedio de una sustancia radioactiva, así como para analizar los diferentes tipos de radiación y sus implicaciones en la estabilidad nuclear[4].

### II. MONTAJE Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta práctica experimental se utilizaron soportes experimentales y un detector Geiger-Müller junto con su equipo electrónico. Además, se dispuso de una fuente radiactiva de Torio. Como se muestra en la figura 1.

El procedimiento experimental se desarrolló en varias etapas. Inicialmente, se verificó que el contador Geiger-Müller funcionara correctamente. Posteriormente, se realizó una medición de 10 minutos estando alejados de las fuentes radioactivas para de este modo medir la radiación ambiente. Seguido de esto, se realizaron

\* Correo institucional: j.pinzonr@uniandes.edu.co

\*\* Correo institucional: s.laverdeg@uniandes.edu.co

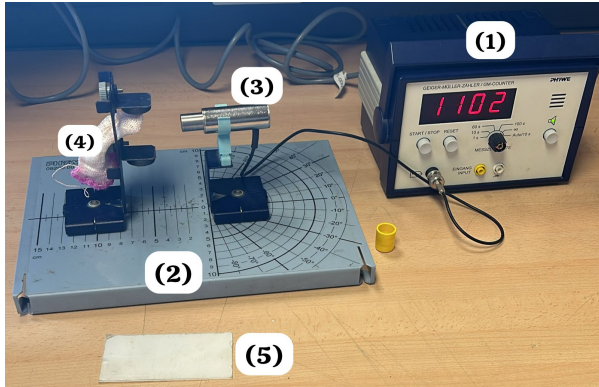


Figura 1. Montaje

Montaje del experimento Radioactividad. En la figura se puede apreciar la electrónica de procesamiento(1), soporte experimental calibrado(2), tubo Geiger-Müller(3), fuente radioactiva de Torio(4) y barreras físicas de diferentes características(5).

mediciones de un periodo de tiempo largo de 10 minutos y a distancias de 2, 4 y 8 cm de la fuente radioactiva. Por último, se realizó la comparación entre tres barreras físicas diferentes: Papel, aluminio y plomo; usando periodos de tiempo de 5 minutos y distancias iguales de 2 cm.

### III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la primera parte del experimento, se realizó un conteo de 10 minutos para reportar la Radiación ambiental, como se observa a continuación:

Tiempo	Conteo
10 minutos	226

$$\text{Radiación ambiental} = 22,6\text{CPM} \pm 0,61$$

Esta radiación ambiental se origina por la presencia de materiales radiactivos en el entorno. Estos materiales son naturales. Por ejemplo, en los suelos en los cuales es común encontrar varios radioisótopos naturales, entre ellos el potasio-40 (40K), que emite principalmente radiación beta; el radio-226 (226Ra), descendiente del uranio-238, que emite radiación alfa, beta y gamma; y el uranio-238 (238U) y torio-232 (232Th). Estos isótopos contribuyen a la radiación ambiental y su presencia varía según la ubicación. No obstante, para el resultado obtenido no se consideró que la cantidad fuera lo suficientemente significativa como para restarla de las tomas siguientes.

Para la segunda parte, se procesaron los conteos de 10 minutos para obtener sus respectivas frecuencias, tomando

$$t_1 = \text{conteo}_1$$

Para los otros 9 intervalos, se calculó como:

$$t_i = t_i - t_{i-1} = \text{conteo}_i - \text{conteo}_{i-1}$$

donde (i) varía desde 2 hasta 10. Luego, para hallar la frecuencia, se dividió sobre 60seg:

$$\text{Frecuencia} = \frac{\text{conteo}}{60}$$

Obteniendo como resultados los que se muestran en la sección V C sin considerar la radiación ambiente.

Considerando la radiación ambiente, se calcularon los promedios, sus desviaciones estándar y las frecuencias de 10 mediciones de 1 minuto y 3 mediciones de 3 minutos:

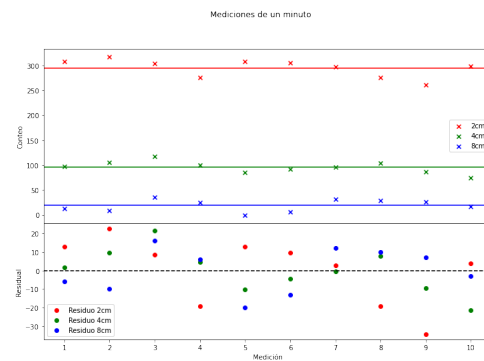


Figura 2. Mediciones de un minuto

Conteos del contador Geiger para cada distancia con su respectivo promedio. También se muestra los residuos con el promedio.

Distancia de medición	Promedio (conteos por minuto)	Desviación Estándar	Frecuencia promedio (Hz)
2 (cm)	$294,7 \pm 5,43$	17.18	$4,91 \pm 0,09$
4 (cm)	$95,7 \pm 3,63$	11.46	$1,59 \pm 0,06$
8 (cm)	$19,3 \pm 3,60$	11.40	$0,32 \pm 0,06$

Cuadro I. Resultados de mediciones de un minuto.

Se reportan el promedio de conteos, desviación estándar y frecuencia promedio de 10 mediciones de un minuto cada una de partículas radioactivas.

Como se muestra en los cuadros I y II. Para ambos casos se puede observar que para una distancia de 2 y 4 cm las fluctuaciones en las mediciones son considerablemente bajas. Sin embargo, para una distancia

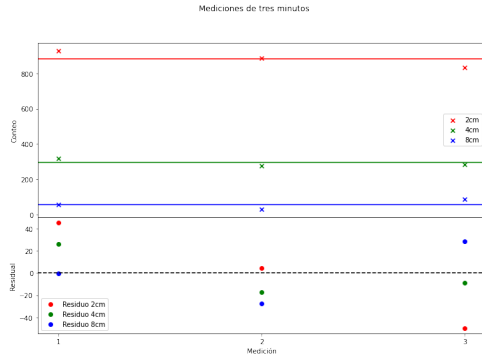


Figura 3. Mediciones de tres minutos

Conteos del contador Geiger para cada distancia con su respectivo promedio. También se muestra los residuos con el promedio.

Distancia de medición	Promedio (conteos por cada 3 minutos)	Desviación Estándar	Frecuencia promedio (Hz)
2 (cm)	$882,87 \pm 22,46$	38.90	$4,90 \pm 0,12$
4 (cm)	$294,20 \pm 10,78$	18.67	$1,63 \pm 0,06$
8 (cm)	$58,87 \pm 13,20$	22.87	$0,33 \pm 0,07$

Cuadro II. Resultados de mediciones de tres minutos.

Se reportan el promedio de conteos, desviación estándar y frecuencia promedio de 3 mediciones de tres minutos cada una de partículas radioactivas.

de 8 cm se presenta una alta fluctuación como se ve representada en su alto error estándar. Por lo tanto, sólo se obtuvo precisión a 2 y 4 cm. Además, se comprueba la teoría de que entre mayor sea la distancia entre el detector y la fuente, menor es la frecuencia de medición de partículas radioactivas.

La fuente radiactiva emite radiación alfa ( $R_\alpha$ ), beta ( $R_\beta$ ) y gamma ( $R_\gamma$ ). Cómo se explica en la sección de introducción, la radiación alfa corresponde a núcleos de Helio-4 (2 protones y 2 neutrones) que por su alta masa y carga de  $+2e$ , interactúa fuertemente con la materia y por lo tanto su alcance es corto. La radiación beta corresponde a un electrón o positrón y un neutrino producto de la transformación de un protón a un neutrón o viceversa, como el neutrino prácticamente no interacciona con la materia entonces no lo consideraremos. La radiación beta debido a su fuerte interacción electromagnética con la materia no es capaz de penetrar materiales muy densos. la radiación gamma corresponde a la radiación de más alta energía del espectro electromagnético, esta radiación tiene una gran capacidad de penetración y sólo puede ser detenida mediante absorción de un material muy denso y ancho.

Teniendo lo anterior en cuenta y sin considerar la radiación ambiente, se procedió a realizar 5 mediciones de un minuto a 2 cm de la fuente radioactiva interponiendo barreras físicas de papel (2 hojas,  $0.5-0.8 \text{ g/cm}^3$ ), aluminio (1mm,  $0.645 \text{ g/cm}^3$ ) o plomo (0.64mm,  $1.89 \text{ g/cm}^3$ ). Los resultados se muestran en el cuadro III y la figura 4.

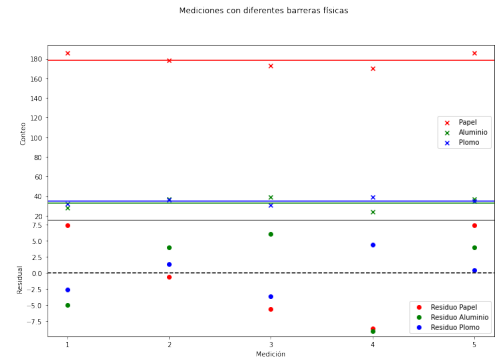


Figura 4. Mediciones para diferentes barreras físicas.

Conteos del contador Geiger para cada barrera interpuesta con su respectivo promedio. También se muestra los residuos con respecto al promedio.

Material de la barrera	Promedio (conteos por minuto)	Desviación Estándar	Frecuencia promedio (Hz)
Sin barrera	$294,7 \pm 5,43$	17.18	$4,91 \pm 0,09$
Papel	$178,6 \pm 2,93$	6.56	$2,98 \pm 0,05$
Aluminio	$33,00 \pm 2,64$	5.90	$0,55 \pm 0,04$
Plomo	$34,6 \pm 1,28$	2.87	$0,58 \pm 0,02$

Cuadro III. Resultados de mediciones para diferentes barreras físicas.

Se reportan el promedio de conteos, desviación estándar y frecuencia promedio de 5 mediciones de un minuto cada una de partículas radioactivas para cada barrera física interpuesta.

Entonces tenemos que la radiación medida sin barrera física ( $R_T$ ) corresponde a la suma de las radiaciones alfa, beta y gamma. La radiación medida interponiendo la barrera de papel ( $R_2$ ) corresponde a la suma de radiaciones beta y gamma. Y por último, la radiación medida interponiendo la barrera de plomo ( $R_3$ ) corresponde únicamente a radiación gamma[2].

$$R_T = R_\alpha + R_\beta + R_\gamma = (4,91 \pm 0,09) \text{ Hz}$$

$$R_2 = R_\beta + R_\gamma = (2,98 \pm 0,05) \text{ Hz} \quad (1)$$

$$R_3 = R_\gamma = (0,58 \pm 0,02) \text{ Hz}$$

Se procedió a calcular la contribución de los diferentes tipos de radiación emitidos a la radiación total de

la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \%R_\gamma &= \left( \frac{R_3}{R_T} \right) \times 100 \% = (11,74 \pm 0,48) \% \\ \%R_\beta &= \left( \frac{R_2}{R_T} \right) \times 100 \% - \%R_\gamma = (48,86 \pm 1,57) \% \\ \%R_\alpha &= \left( 1 - \frac{R_2}{R_T} \right) \times 100 \% = (39,40 \pm 1,50) \% \end{aligned} \quad (2)$$

Debido al error correspondiente para cada contribución obtenida y según el criterio de precisión (V A) se puede afirmar que se obtuvo precisión en las mediciones desarrolladas.

Para la última parte del análisis se creó una tabla con los valores teóricos de la contribución de cada radiación para el Torio. Para esto se buscó en la base *Decay Radiation*, la radiación de desintegración del Torio 232 (isótopo más puro de Th). A partir de la base de datos, la cual proporcionó la serie completa del Torio desde Th232 hasta su producto de desintegración más estable Pb 208, como se puede observar a continuación:

Núclido	Modo	Energía de desintegración(MeV)	Producto
Th 232	$\alpha$	4,081	Ra 228
Ra 228	$\beta^-$	0,046	Ac 228
Ac 228	$\beta^-$	2,124	Th 228
Th 228	$\alpha$	5,520	Ra 224
Ra 224	$\alpha$	5,789	Rn 220
Rn 220	$\alpha$	6,404	Po 216
Po 216	$\alpha$	6,906	Pb 212
Pb 212	$\beta^-$	0,570	Bi 212
Bi 212	$\beta^-$ (64,06 %) $\alpha$ (35,94 %)	2,252	Po 212
		6,208	TI 208
Po 212	$\alpha$	8,955	Pb 208
TI 208	$\beta^-$	4,999	Pb 208
Pb 208	.	.	.

Cuadro IV. Cadena desintegración Torio-232

A partir de la tabla se calculó la contribución en porcentaje de los diferentes tipos de radiación emitidos a la radiación total, para esto, primero, se calculó la radiación total emitida en cada paso de la cadena de desintegración. Luego, se calculó la contribución de cada tipo de radiación (alfa, beta, gamma) a la radiación total en cada paso. Finalmente, se expresaron las contribuciones como porcentajes. Dado que el Th-232 es el inicio de la cadena de desintegración, la radiación total será la suma de todas las radiaciones emitidas en cada paso de

la cadena. Las fórmulas utilizadas fueron (1) y (2). Los resultados obtenidos fueron:

Núclido	Energía	$\%R_\alpha$	$\%R_\beta$	$\%R_\gamma$
Th-232	4.081	100 %	0 %	0 %
Ra-228	0.046	0 %	100 %	0 %
Ac-228	2.124	0 %	100 %	0 %
Th-228	5.520	100 %	0 %	0 %
Ra-224	5.789	100 %	0 %	0 %
Rn-220	6.404	100 %	0 %	0 %
Po-216	6.906	100 %	0 %	0 %
Pb-212	0.570	0 %	100 %	0 %
Bi-212	8.460	26.26 %	73.74 %	0 %
Po-212	8.955	100 %	0 %	0 %
Tl-208	4.999	0 %	100 %	0 %
Pb-208	-	0 %	0 %	0 %

Cuadro V. Contribución de cada tipo de radiación y radiación total en cada paso de la cadena de desintegración del Torio-232.

Al comparar las contribuciones teóricas y experimentales de los diferentes tipos de radiación en la desintegración del Torio-232, se observa una notable inexactitud. Según la tabla teórica, si toda la cadena de desintegración sucede en el periodo de medición, se espera que aproximadamente el 57 % de la radiación medida sean partículas alfa, el restante 43 % corresponde a partículas beta y que no haya contribución de radiación gamma. Sin embargo, en las mediciones experimentales, se observa una distribución diferente de radiación, con contribuciones diferentes tanto de radiación alfa como beta, y una contribución significativa de radiación gamma.

Estas discrepancias pueden atribuirse a varios factores. Primero, que los modelos del proceso de desintegración teóricos estén simplificados, ignorando posibles mezclas de radiación. Además, las mediciones experimentales pueden verse afectadas por la presencia de otras fuentes de radiación, como la radiación ambiental o errores experimentales. O también pudo deberse a que a la barrera de Plomo la atravesaron partículas alfa y beta que se asumieron como radiación gamma. Todo lo anterior lleva a una distribución de radiación diferente a la esperada teóricamente.

Es importante destacar que estas diferencias resaltan la complejidad de entender completamente el proceso de desintegración radiactiva y la importancia de combinar modelos teóricos con mediciones experimentales para obtener una comprensión más completa del fenómeno.

#### IV. CONCLUSIONES

La práctica realizada abarcó diversas etapas, comenzando con la medición de la radiación ambiental durante 10 minutos. Se encontró que la radiación ambiental era de aproximadamente 22.6 CPM, atribuible a la presencia de materiales radiactivos naturales en el entorno, como el potasio-40, el radio-226 y otros isótopos de uranio y torio. Aunque esta radiación ambiental se consideró baja en este caso, es importante reconocer su impacto en las mediciones realizadas.

En la siguiente etapa, se analizaron las fluctuaciones en las mediciones de frecuencia para diferentes intervalos de tiempo, lo que reveló una baja dispersión en los conteos para distancias cortas entre el detector y la fuente radiactiva, pero una mayor dispersión a distancias más largas. Este fenómeno respalda la teoría de que la distancia entre el detector y la fuente afecta la frecuencia de detección de partículas radiactivas.

Seguido de lo anterior, se realizaron mediciones con diferentes barreras físicas (papel, aluminio y plomo)

para observar cómo afectan la radiación medida. Se encontró que la radiación medida disminuyó significativamente con la introducción de barreras físicas más densas, lo que demuestra la capacidad de estos materiales para absorber diferentes tipos de radiación.

Finalmente, se compararon las contribuciones teóricas y experimentales de los diferentes tipos de radiación en la desintegración del Torio-232. Se observaron diferencias significativas entre los valores teóricos esperados y las mediciones experimentales. El principal hecho de resaltar es que teóricamente la desintegración de Torio-232 no produce radiación gamma, de lo que podemos concluir o bien que toda la radiación gamma observada proviene de radiación ambiental, o que partículas beta o alfa lograron penetrar la barrera de Plomo y activar el detector quedando registradas como falsos positivos.

El experimento proporcionó información valiosa sobre la radiación ambiental, las fluctuaciones en las mediciones de frecuencia, la atenuación de la radiación por diferentes materiales y las discrepancias entre las predicciones teóricas y las mediciones experimentales en la desintegración radiactiva.

- 
- [1] Hyperphysics, 2024.
  - [2] D. de Física de la Universidad de los Andes. Guías de laboratorio: Física moderna. 2021.
  - [3] J. W. Rohlfs. Modern physics from alpha to z0. [https://sun.bao.ac.cn/hsos\\_data/Meeting\\_report/Stark\\_resources/ebook%20White,%20Introduction%20to%20Atomic%20Spectra%20\(1934\)\(ASIN%20B000HKNGN6\).pdf](https://sun.bao.ac.cn/hsos_data/Meeting_report/Stark_resources/ebook%20White,%20Introduction%20to%20Atomic%20Spectra%20(1934)(ASIN%20B000HKNGN6).pdf), 1934.
  - [4] R. A. Serway, C. J. Moses, and C. A. Moyer. *Física Moderna*. International Thomson, 3 edition, 2006.

#### V. ANEXOS

##### A. Criterios

- Precisión:  $= \frac{\sigma}{\text{Valor obtenido}} \leq 0,1$
- *Exactitud* :=  $|\text{Valor real} - \text{Valor obtenido}| \leq 2,5 \cdot \sigma$

##### B. Apéndice de cálculo

- Promedio:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

- Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

- Propagación de errores:

$$\sigma f(\vec{x}) = \sqrt{\sum_i^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{x}) \cdot \sigma x_i \right)^2} \quad (5)$$

- Error estándar de una media:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

##### C. Datos

Distancia 2cm			
Tiempo (min)	Datos	Conteo	Frecuencia (Hz)
1	330	330	5.5
2	670	340	5.67
3	996	326	5.43
4	1294	298	4.97
5	1624	330	5.5
6	1951	327	5.45
7	2271	320	5.33
8	2569	298	4.97
9	2852	283	4.72
10	3173	321	5.35

Cuadro VI. Resultados toma 2cm

Distancia 4cm			
Tiempo (min)	Datos	Conteo	Frecuencia (Hz)
1	120	120	2
2	248	128	2.13
3	388	140	2.33
4	511	123	2.05
5	619	108	1.8
6	733	114	1.9
7	851	118	1.97
8	977	126	2.1
9	1086	109	1.82
10	1183	97	1.62

Cuadro VII. Resultados toma 4cm

Distancia 8cm			
Tiempo (min)	Datos	Conteo	Frecuencia (Hz)
1	36	36	0.6
2	68	32	0.53
3	126	58	0.97
4	174	48	0.8
5	196	22	0.37
6	225	29	0.48
7	279	54	0.9
8	331	52	0.87
9	380	49	0.82
10	419	39	0.65

Cuadro VIII. Resultados toma 8cm