

Microondas

Alejandro Hernández A.* and Daniel Sánchez M.**

*Departamento de Física
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.*

(Dated: 15 de octubre de 2015)

Este informe presenta los datos obtenidos al medir la intensidad de las microondas recibidas en distintas configuraciones de una fuente emisora y un receptor. Básicamente, se trataron de verificar diversos conceptos vistos en el curso de **ONDAS Y FLUIDOS** tales como la ley de reflexión, la ley de Snell, ondas estacionarias y patrones de interferencia. Entre los resultados notables cabe mencionar OJO y OJO. Los demás resultados y todos los comentarios de los mismos se muestran en la sección de **RESULTADOS Y ANÁLISIS**.

Conceptos clave: Microondas, reflexión, refracción, leyes de Snell, ondas estacionarias, patrón de interferencia.

I. INTRODUCCIÓN

Las leyes de Maxwell, junto con la ley de Lorentz describen completamente la teoría electromagnética clásica. Precisamente, la existencia de las ondas electromagnéticas, de las cuales las microondas forman parte del espectro de alta frecuencia, fueron predichas por Maxwell en el año de 1864 a partir de las susodichas 4 ecuaciones de Maxwell. Por su parte, la verificación experimental de las mismas se dio en el año de 1888 cuando Heinrich Rudolf Hertz demostró la existencia de las ondas electromagnéticas mediante la construcción de un aparato para generar y detectar ondas de radiofrecuencia, que consistía básicamente de un oscilador (generador de ondas) y de un resonador (receptor).

Allende de lo mencionado anteriormente, a partir de las leyes de Maxwell se pueden deducir dos de las leyes más famosas de la óptica, a saber, la ley de reflexión[?]:

$$\theta_I = \theta_R \quad (1)$$

y la ley de refracción, usualmente aludida como ley de Snell en honor a su descubridor, el matemático holandés Willebrord Snel van Royen[?]:

$$n_1 \sin \theta_I = n_2 \sin \theta_T \quad (2)$$

Donde θ_R, θ_T hacen referencia a los ángulos de reflexión y refracción respectivamente, los cuales, al igual que el ángulo de incidencia, están definidos con respecto a la normal de la superficie de incidencia, por lo que solo pueden tomar valores en $[0, \frac{\pi}{2})$. Por otra parte, el índice de refracción n se define como la razón entre la velocidad de la luz y la velocidad en el medio actual, y está relacionado con la densidad óptica del medio:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (3)$$

Donde ϵ, μ representan, respectivamente, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del medio, mientras que ϵ_0, μ_0 representan las mismas cantidades pero para el vacío. Cabe resaltar que la ley del plano de incidencia, la cual establece que el rayo incidente, el reflejado y el transmitido se encuentran en un mismo plano que es perpendicular a la interfaz, es la que permite caracterizar completamente las direcciones del fenómeno de refracción y reflexión solo con los tres ángulos mencionados previamente.

De la ley de refracción cabe resaltar que si el medio de incidencia es más denso ópticamente que el medio de transmisión, existirá un ángulo de incidencia en el intervalo $[0, \frac{\pi}{2})$, tal que el ángulo de refracción tenga que ser exactamente $\frac{\pi}{2}$ para poder satisfacer la ley de Snell. Esta relación se expone en la ecuación (4). Con un posterior análisis sobre los coeficientes de transmisión y reflexión, que indican qué tanta luz se refleja y qué tanta luz se transmite, se puede concluir que para ángulos menores a este ángulo crítico, toda la luz es reflejada, y nada se transmite al otro medio. En estos casos, el ángulo de transmisión tendría que ser mayor a $\frac{\pi}{2}$ o menor a 0, lo cual no cumple lo asumido por la ley del plano de incidencia. Este es el principio sobre el cual se basa el funcionamiento de la fibra óptica. Aquí, la fibra es tan delgada que el ángulo de incidencia siempre es menor que el ángulo crítico, por lo que siempre se da la reflexión interna total y no se pierde luz por transmisión.

$$\sin \theta_{I_{crit}} = \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\pi}{2} < 1 \quad (4)$$

Ahora bien, para un conductor perfecto el campo en su interior es nulo[?], dado que cualquier campo que se intente aplicar, moverá las cargas en la superficie del conductor de tal manera que lo anule. En este sentido, si se tiene una rejilla de un material conductor, se puede dejar pasar campo eléctrico solo en la dirección de la rejilla, dado que la componente del campo que no sea paralela, encontrará el conductor y se anulará. En

este sentido, con una rejilla metálica se puede polarizar una onda electromagnética.

Si se tiene luz polarizada incidente a un polarizador con un desfase en la dirección de polarización dado por θ_1 respecto a la luz incidente, teniendo en cuenta que solo puede pasar la componente de campo eléctrico paralela al polarizador, la intensidad de la luz recibida estará dada por:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \cos^2 \theta_1 \propto \cos^2 \theta_1 \quad (5)$$

Si se pone otro polarizador en medio de estos dos, con desfase θ_2 con respecto a la luz incidente, la intensidad estará dada al aplicar 5 dos veces, teniendo en cuenta que el desfase entre los dos polarizadores es $\theta_1 - \theta_2$:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \cos^2 \theta_2 \cos^2 (\theta_1 - \theta_2) \propto \cos^2 \theta_1 \cos^2 (\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

Nótese que si la luz incidente es perpendicular al polarizador, si solo tenemos en cuenta un polarizador, $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$ entonces la onda transmitida tendrá intensidad nula. sin embargo, si ponemos otro polarizador en medio, tendremos de forma general $\theta_1 - \theta_2 \neq \frac{\pi}{2}$ por lo que la onda transmitida no necesariamente tendrá intensidad nula.

Aparte de lo mencionado anteriormente, otro experimento que se realizó durante la práctica fue el de doble rendija. Si se hace incidir luz monocromática coherente sobre una placa conductora (no deja pasar luz) con una rendija doble con una separación d , se observará un patrón de difracción. Este patrón ondulatorio se debe al principio de superposición del campo electromagnético, el cual dice que el campo electromagnético en un punto debido a dos fuentes es la suma de los campos producidos por cada fuente por separado en dicho punto⁷. Debido a esto, si consideramos ondas, la suma de ambos campos es dependiente de la fase. Si se hace un análisis de los caminos que toman las ondas que pasan por cada una de las rendijas se llegará a la conclusión de que la interferencia destructiva se da cuando:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (7)$$

Donde θ se refiere al ángulo respecto al centro de la rejilla de difracción donde se toma la medida de intensidad de la luz.

Con el experimento de la doble rendija se puede introducir al campo de la interferometría, donde se busca medir distancias del orden de la longitud de onda con la que se trabaja, al mirar la patrones de interferencia o simplemente la distancia entre los máximos o mínimos que ocasiona la superposición de dos haces de luz que han tomado caminos diferentes. El principio de interferencia

por diferencia de fases de haces de luz es el principio detrás de experimentos importantes actuales como los detectores de ondas gravitacionales, y de experimentos que hicieron historia como el de Michelson-Morley.

Una de las formas de hacer interferometría con ondas esféricas es el espejo de Lloyd. En dicho experimento se tiene un material conductor paralelo a la dirección emisor-receptor, situado a mitad de camino entre estos dos instrumentos, cuya distancia perpendicular se puede variar para provocar interferencia entre la onda que se refleja en el conductor y la onda que toma el camino emisor-receptor. Un análisis sencillo de la diferencia de caminos, asumiendo que la onda se propaga esféricamente, nos dice que hay interferencia constructiva cuando se tiene:

$$D - 2 \left(d^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = n\lambda \quad (8)$$

Donde D es la distancia del receptor al emisor, d es la distancia del espejo al centro de la trayectoria, λ es la longitud de onda de la luz incidente, y n es un entero.

De este experimento de interferometría se puede notar claramente que la condición de interferencia no es lineal, y que además, al alejar el espejo, se disminuye la intensidad de la onda que se refleja (asumiendo que se propaga esféricamente), lo cual altera un poco la condición de interferencia.

Un experimento de interferometría que no es afectado por estos factores de no linealidad y de variación de la intensidad, es el interferómetro de Michelson y el de Fabry-Perot. Estos interferómetros trabajan bajo el mismo principio y lo único que los diferencia es el ordenamiento espacial de los elementos. El experimento de Michelson es mostrado en la figura ?? y consiste en superponer dos haces de luz que han tomado distintos caminos con la ayuda de un material semi-transparente. El de Fabry-Perot es análogo (figura ??, sin embargo, los materiales semi-transparentes no están dispuestos a 45° sino en medio del receptor y el transmisor. En este caso, la relación de interferencia para máximos es simple de deducir y simple en general:

$$d = n \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

Donde d es la distancia a la que se corre el receptor o el emisor, entre dos máximos o mínimos.

De esta manera, muchos otros fenómenos ópticos pueden ser caracterizados con la teoría electromagnética clásica, sin embargo, no es objetivo de este informe describirlos todos.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

En general el montaje consistía de un emisor, un receptor y un goniómetro que se ubicaron en distintas configuraciones para realizar los diversos experimentos sugeridos en la guía proporcionada para la práctica. Los elementos más importantes del mismo semuestran en la figura 1. Es preciso aclarar que no se realizaron todos los experimentos puesto que no se disponía de toda la indumentaria necesaria para la realización de los mismos. Los experimentos que no se realizaron se mencionan a continuación:

- **Experimento 9: Fiber Optics**

No se disponía de las "tubular plastic bags".

- **Experimento 12: Bragg Diffraction**

No se disponía del cubo que generaba la difracción de las ondas.

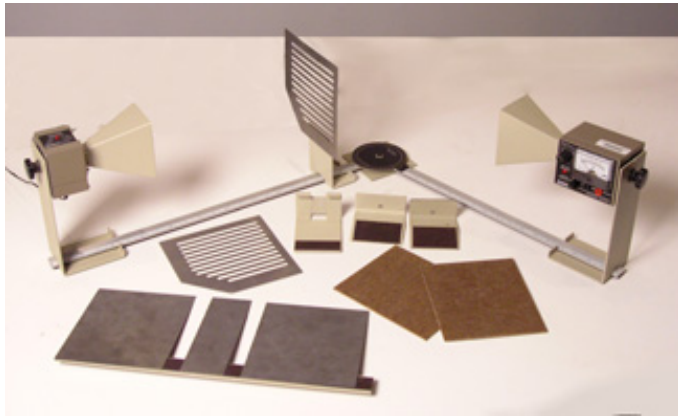


Figura 1: Montaje experimental usado en la práctica.

Usualmente la radiación natural o artificial, ionizante o no, está fuera del espectro visible, excepto cuando se tienen fenómenos como *Cherenkov Radiation*⁵ o *Radioluminiscencia*. Por tal motivo es necesario un instrumento capaz de detectar la radiación emitida por una determinada muestra. Precisamente esa es la función del contador Geiger-Müller, que fue el dispositivo fundamental durante la práctica.

El contador de Geiger está formado por un tubo con un fino hilo metálico a lo largo de su centro. El espacio entre ellos (entre el hilo y el tubo), está aislado y relleno de un gas inerte, tal como se ilustra⁶ en la figura ??.

Un ión o electrón que penetra en el tubo desprende electrones de los átomos del gas. Debido a la diferencia de potencial del hilo central con la superficie que recubre el contador, estos electrones son atraídos hacia el hilo, aumentando su energía. Dichos electrones colisionan con los átomos y liberan más electrones, hasta que el proceso se convierte en una avalancha que produce un pulso de corriente detectable. Relleno de un gas adecuado, el flujo de

electricidad se detiene por sí mismo o incluso el circuito eléctrico puede ayudar a detenerlo. Al instrumento se le llama un contador debido a que cada partícula que pasa por él produce un pulso idéntico, permitiendo contar las partículas pero sin tener información sobre su identidad o su energía.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Radiación de fondo

En este experimento se midió la radiación de fondo del salón de clase. No se colocaron frente al medidor muestras de ningún tipo, y se dejó efectuar el conteo de la radiación natural del ambiente. Los datos se muestran en la tabla I.

Tabla I: Conteos para la radiación natural.

Número de la medición	$\frac{C_0}{\text{conteos}/60 \text{ s}}$
1	19
2	14
3	19
4	22
5	16

El promedio fue de 18 conteos/min. con error⁴ de 9 conteos/min, los cuales van a ser considerados para los cálculos sobre mediciones posteriores de muestras radioactivas.

Teniendo en cuenta que no se tenían muestras radioactivas cerca del contador, se pudo verificar que existe radiación en el ambiente cotidiano, por lo cual se concluye que dicho fenómeno natural es algo con lo que los seres vivos interactuamos constantemente.

Podemos concluir además que:

- No se tienen un conteo constante en las mediciones puesto que existe una desviación estándar de los datos de 3,08, evidenciando una alta dispersión de los mismos.
- La radiación medida puede venir de múltiples fuentes naturales, pero posiblemente se compone en su mayoría de radiación cósmica. Los materiales de construcción, el suelo y el agua contienen también pequeñas concentraciones de materiales radioactivos pero su intensidad es muy baja para ser medida por el contador.

B. Variaciones aleatorias en los conteos

En este experimento se realizaron 50 mediciones de 10 segundos cada una, en las cuales se ponía de forma

vertical el tubo contador, apuntando directamente hacia una manta radioactiva tal y como se muestra en la figura ??.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla II.

Tabla II: Conteos para las variaciones de la radiación natural.

Med. #	Cont. 10 s	Med. #	Cont. 10 s	Med. #	Cont. 10 s
1	101	18	79	35	86
2	72	19	76	36	92
3	80	20	95	37	77
4	96	21	105	38	87
5	70	22	68	39	82
6	84	23	114	40	101
7	91	24	102	41	91
8	89	25	87	42	86
9	76	26	88	43	69
10	86	27	93	44	80
11	79	28	79	45	86
12	96	29	92	46	85
13	105	30	76	47	97
14	88	31	85	48	93
15	79	32	101	49	92
16	80	33	93	50	87
17	79	34	77		

El promedio de estas mediciones fue $\bar{C} = 87,04$ conteos/10 s con un error de 9,32 conteos/10 s. Dado lo anterior, se obtuvo un error porcentual de 10,72 % en estas mediciones, lo cual es aceptable teniendo en cuenta las múltiples fuentes de error, entre ellas la realización de otros experimentos de radiación con fuentes como el radio el mesas aledañas y el hecho de que al principio no sabíamos a qué parte de la manta apuntar con el contador, lo cual rodujo medidas incoherentes al principio del experimento.

Las medidas que más difieren del valor promedio fueron la medición # 2 y la medición # 23, registrando valores de 72 y 114 conteos respectivamente, los cuales están claramente fuera del error de la medida, potencialmente por las fuentes de error explicadas previamente.

La gráfica de frecuencias solicitada se muestra en la figura ??.

Dicha gráfica evidencia claramente la concentración de los datos alrededor del promedio calculado previamente y ademas permite concluir que los datos extremos de las mediciones # 2 y # 23 son casos aislados con frecuencia baja. Además de lo anterior, calculamos que el 70 % de los datos están dentro del error calculado para la medida $87,04 \pm 9,32$. Este valor indica que se realiza una buena toma de datos dado que el valor teórico esperado de los datos dentro de ese rango es del 68,3 %.

C. Rocas radioactivas

Al igual que en el experimento anterior, el montaje experimental se muestra en la figura 1. En este caso, el objetivo es determinar a partir de los conteos hechos con el contador Geiger-Müller si una sustancia es radioactiva o no, es decir, si produce la suficiente radiación ionizante. Se tomaron 3 muestras de columbita (mineral proporcionado dentro de los elementos de laboratorio) y medimos los conteos detectados. En la tabla III se pueden observar los resultados de estas mediciones.

Tabla III: Conteos para diversas muestras de columbita.

Sust.	$C_1 /$ 60 s	$C_2 /$ 60 s	$C_3 /$ 60 s	$C_4 /$ 60 s	$\bar{C} /$ 60 s
Aire	19	21	19	13	18
Colum. 1	33	40	34	40	36.75
Colum. 4	47	49	35	39	42.5
Colum. 7	103	79	117	89	97

A partir de los datos mostrados en la tabla anterior se evidencia claramente un mayor conteo para la columbita 7 que para las demás. A partir de lo consultado en REFERENCIA se espera que para una sustancia radiactiva se obtengan al rededor de 200 conteos/min., razón por la cual podemos concluir que ninguna de las muestras analizadas podrían ser consideradas radioactivas, y a pesar de que la columbita 7 es que más actividad registró de todas, con un conteo promedio de $\bar{C} = 79$ al tener en cuenta al aire, este conteo no es lo suficiente alto para considerar dicho mineral como una amenaza para la salud.

Además de lo anterior, podemos concluir que el contador de Geiger es un instrumento extremadamente útil para la detección de materiales radioactivos.

D. Sales radioactivas

Nuevamente se usó el mismo montaje de los experimentos anteriores. En este experimento se analizaron los conteos obtenidos cuando ponemos diferentes tipos de sales bajo el tubo contador. Los resultados obtenidos y las sales usadas se muestran en la tabla IV.

Es importante resaltar que la radiación del aire aumentó ligeramente para estas emmisiones y la razón para esto es que en la mesas contiguas estaban trabajando con muestras de radio al momento de realizar las mediciones. A pesar de lo mencionado anteriormente, ninguna de estas sales puede ser considerada como radioactiva de acuerdo al conteo de corte previamente aludido. La sal que menos radiación emitió fue el sulfato de cobre y la que más emitió fue la sal de cocina, algo realmente o

Tabla IV: Conteos para diversas muestras de sales.

Sust.	$C_1/$ 100 s	$C_2/$ 100 s	$C_3/$ 100 s	$\bar{C}/$ 100 s
Aire	35	30	36	33.66
KCL	40	50	43	44.33
$CaCl_2$	33	32	24	29.66
$CuSO_4$	28	31	20	26.33

esperado dado que se esperaba que la sal de cocina fuera la de menor emisión puesto que es una sustancia para el consumo humano. Dado esto, se puede concluir que las sales examinadas no representan ningún peligro para la salud humana.

Ahora bien, note que al tener en cuenta al aire para calcular los promedios de conteos se obtienen valores negativos tanto para el cloruro de calcio como para el sulfato de cobre. Este valor negativo puede explicarse teniendo en cuenta el trabajo de grupos aledaños con muestras altamente radioactivas como el radio, además de que dado que el tubo contador se ubica lo suficientemente cerca de la muestra, es muy probable que dicho instrumento solo haya detectado la radiación de la muestra y no la radiación del aire. Por tanto, en todas los experimentos de este tipo, en los que el contador se encuentre de forma vertical sobre la muestra y a una distancia tan corta, y sobre todo cuando trabajamos con bajos conteos como en este caso, es posible que se deba ignorar la radiación del aire y tratar de no realizar mediciones mientras otros grupos trabajen con muestras altamente radioactivas como el radio.

E. Distinción entre los tipos de radiación

El objetivo de los experimentos aplicados a continuación era determinar el tipo y la intensidad de la radiación producida por rocas radioactivas (columbita) y por una manta incandescente.

En el primer experimento se utilizó la columbita 7 y se evaluó como variaban sus conteos dependiendo del material que se imponía entre el contador y la columbita. Dado a una observación sobre el hecho de que había un lado de la columbita que emitía más radiación, primero se determinó el lado que más emitía con el fin de poder evaluar correctamente la parte del bloqueo. Los resultados de este experimento se muestran en la tabla V.

Dado que se encontró que el lado que más emitía era el lado 2, se usó este lado para las restantes dos mediciones. De los datos mostrados previamente se puede observar que la radiación alfa era un constituyente minoritario de la radiación emitida por la columbita y que, por su parte, la radiación beta era el mayor constituyente de la misma. Esto se tiene debido a que los datos del papel, que bloquea la radiación alfa, no muestra un

Tabla V: Conteos para la columbita 7 teniendo en cuenta materiales de bloqueo.

Sust.	$C_1/$ 100 s	$C_2/$ 100 s	$C_3/$ 100 s	$\bar{C}/$ 100 s
Lado 1	160	167	159	162
Lado 2	199	247	262	236
Lado 2 - Papel	219	209	201	209.66
Lado 2 - Placa de plomo	51	55	51	52.33

cambio muy significativo con respecto a los datos sin bloqueo alguno, mientras que los datos del plomo, que bloquea la radiación alfa y beta, sí muestran un cambio significativo con respecto a cuando no hay cambio alguno.

Cuantitativamente tenemos que, en promedio, el papel bloquea el 11,16 % de la radiación (alfa) mientras que el plomo bloquea el 77,83 % de la radiación (beta). El restante 11,01 % es radiación gama. Lo anterior claramente evidencia que las barreras de protección contra la radiación son de suma importancia ya que reducen considerablemente (en el caso del plomo), la cantidad de radiación a la que somos expuestos. Este también es el caso de los bloqueadores solares puesto que su función es impedir tanto como sea posible la penetración de los rayos UV (radiación electromagnética) en nuestro organismo.

En lo que respecta al segundo experimento, se utilizó el mismo montaje anterior cambiando la columbita por la manta radioactiva. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla VI.

Tabla VI: Conteos para la manta incandescente teniendo en cuenta materiales de bloqueo.

Medición #	Sin bloqueo	Papel	Placa de plomo
$C_1 / 60$ s	357	327	33
$C_2 / 60$ s	383	329	24
$C_3 / 60$ s	364	332	27
$C_4 / 60$ s	378	329	30
$C_5 / 60$ s	369	325	34
$\bar{C} / 60$ s	370.2	328.4	29.6

Los resultados obtenidos son completamente análogos a los comentados previamente para la columbita. Cuantitativamente tenemos que, en promedio, el 11,29 % de la radiación emitida por la manta era radiación alfa, el 82,0 % era radiación beta y el restante 6,71 % era radiación gamma.

Cabe resaltar que la constitución porcentual de la radiación emitida tanto por la columbita como por la mancha radioactiva es similar dado los resultados cercanos expuestos previamente.

F. Distancia de fuentes radioactivas

El objetivo de este experimento era determinar cómo variaba el conteo para una muestra altamente radioactiva como el radio. El montaje experimental usado se muestra en la figura ??.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla VII.

Tabla VII: Conteos para el radio a diversas distancias.

Sep. (cm)	$C_1 / 10 \text{ s}$	$C_2 / 10 \text{ s}$	$C_3 / 10 \text{ s}$	$C_4 / 10 \text{ s}$	$C_5 / 10 \text{ s}$	$\bar{C} / 10 \text{ s}$
13	2323	2324	2331	2405	2314	2339.4
12	2805	2728	2736	2812	2776	2771.4
11	3199	3154	3122	3170	3267	3182.4
10	3697	3643	3665	3611	3598	3642.8
9	4354	4222	4410	4222	4398	4321.2
8	5134	5290	5177	5133	5133	5173.4
7	6330	6249	6113	6212	6246	6230
6	7452	7243	7295	7241	7260	7298.2
5	9375	9251	9360	9075	9284	9269

Cabe aclarar que se usó un tiempo de conteo de 10 s puesto que la muestra de radio proporcionada era de 10 mg y se observó que si se dejaba durante 60 s se saturaba el dispositivo.

Los anteriores datos prometen ver, como se esperaba, el radio es una sustancia extremadamente radioactiva y por tanto se tomaron todas las precauciones indicadas para la manipulación de la misma.

Además de lo anterior, la figura ?? muestra la dependencia funcional de los datos de la tabla VII. En dicha gráfica se evidenciando un aparente comportamiento exponencial y decreciente de los datos. Allende de esto, es importante resaltar que aún con el tiempo corto de medición, el conteo aumentaba considerablemente al acercarse la muestra al contador, indicando la gran magnitud de la radiación emitida por esta muestra.

G. Rango de la radiación alfa

El objetivo de este experimento es evidenciar y determinar cuantitativamente el bloqueo de la radiación alfa por una hoja de papel. El montaje experimental usado fue el mismo del experimento anterior, tan solo que entre el radio y el contador se antepuso una hoja de papel. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla VIII

En promedio se obtuvo que el 32,61 % de la radiación proveniente de la muestra de radio era radiación alfa. Da-

Tabla VIII: Conteos para el radio a diversas distancias con y sin papel.

Sep. (cm)	$C_{aire} / 10 \text{ s}$	$C_{pap} / 10 \text{ s}$	% alfa
5	9441	6414	32.06
6.5	6692	4576	31.61
8	4963	3413	31.23
9.5	4125	2629	36.26
11	3234	2217	31.44
12.5	2620	1753	33.09

do a que no se trabajó la muestra de radio sugerida en la guía¹ podemos observar un comportamiento prácticamente constante de la radiación bloqueada por la hoja de papel. Era imposible acercarse más dado a una inminente saturación del contador de Geiger. Dado esto, lo único que podemos concluir aquí es nuevamente la gran intensidad del radio frente a las demás fuentes radiactivas, puesto que inclusive su composición de radiación alfa es tres veces más grande que las de las muestras previamente examinadas.

H. Materiales que bloquean la radiación beta

Para diferentes materiales y diferentes grosores, se midió el comportamiento de la radiación que atraviesa los mismos. El objetivo es verificar que la radiación que atraviesa el material disminuye a medida que aumenta el grosor de dicho material. También se desea observar qué materiales bloquean mejor la radiación, particularmente la radiación beta.

De acuerdo a lo mencionado en la guía¹ y los experimentos previos, sabemos que el plomo es el material que mejor dispersa este tipo de radiación pero desafortunadamente, en el laboratorio no había suficientes capas de distintos grosores de estos materiales para desarrollar tomas de datos más completas. Teniendo en cuenta lo anterior, los datos obtenidos se muestran en la tabla IX.

A partir de los datos anteriores es evidente que lo mencionado previamente acerca de la efectividad del plomo para bloquear la radiación alfa. Esto puesto que es el que presenta la variación más significativa de los datos con y sin bloqueo. Además, dichos datos permiten también concluir nuevamente que la mayor parte de la radiación emitida por la muestra, en este caso el radio, es radiación beta y que, como se esperaba, entre mayor sea el grosor de la pantalla de bloqueo, menor es la radiación que deja pasar la misma.

Ahora bien, las gráficas de los datos se muestran en la figuras ??, ?? y ??.

Nuevamente, en las figuras anteriores se evidencia un decaimiento exponencial de la cantidad de radiación que penetra la placa a medida que aumenta el grosor de la

Tabla IX: Conteos para el radio y diversos materiales de bloque.

Mater./ Ancho (in)	$C_1 / 10 \text{ s}$	$C_2 / 10 \text{ s}$	$C_3 / 10 \text{ s}$	$\bar{C} / 10 \text{ s}$
Aluminio				
0	5802	5817	5738	5785.66
0.02	790	777	764	777
0.032	500	480	466	482
0.04	387	341	374	367.33
0.05	245	274	280	266.33
0.063	233	223	226	227.33
Plomo				
0	5752	5710	5614	5692
0.064	82	80	76	238
0.125	72	73	68	71
0.25	68	64	56	62.66
Plástico				
0	5725	5783	5724	5744
0.03	1613	1697	1596	1635.33
0.04	1233	1305	1255	1264.33

misma. Este comportamiento se ajusta, con buena aproximación, a la ley exponencial dada por la ecuación (10).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (10)$$

Donde μ es el coeficiente de reducción del material usado y x es el grosor del material. Dado que no tenemos un conocimiento suficiente acerca de la ecuación presentada anteriormente, es intrascendente hacer una análisis matemático profundo de la misma, pero podemos concluir que dicha ecuación se ajusta apropiadamente a los datos obtenidos, y las gráficas anteriores evidencian, además del decrecimiento exponencial mencionado anteriormente, la importancia del grosor de las barreras que bloquean la radiación, particularmente la radiación beta.

I. Radiación beta y campos magnéticos

En este experimento se pretendía observar el comportamiento del conteo de radiación al interponer verticalmente un campo magnético entre la fuente radioactiva y el contador. Además, se variaron los ángulos entre la muestra y el contador para observar la dirección de desvío de la radiación. La idea es que el contador Geiger barra todos los ángulos tal y como se muestra en la figura ??, haciendo un mapeo de las trayectorias⁷ de las partículas. Luego de hacer lo mencionado previamente, se cambió la disposición de los imanes con el fin de invertir el campo magnético, y se realizó nuevamente la toma de datos.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla X y la gráfica de los mismos se muestra en la figura ??.

Tabla X: Conteos al interponer un campo magnético entre el radio y el contador.

Ángulo (sexagesimal)	Imanes / 10 s	Imanes invertidos / 10 s
0	877	1383
10	843	1183
20	870	1000
30	774	707
40	565	515
50	437	381
60	485	361
70	540	497
80	516	459
90	457	413
-10	1034	1825
-20	1266	1749
-30	1846	1608
-40	1884	1162
-50	1618	767
-60	1275	711
-70	1144	723
-80	1002	635
-90	875	648

En la susodicha figura ?? se puede observar que la radiación presenta máximos relativamente alejados de la posición 0° , los cual es un clara consecuencia de la presencia del campo magnético, puesto que su acción consiste precisamente en derviar un cierto ángulo las partículas radiadas. No obstante, es inusual que los máximos en ambos casos se presenten hacia el mismo "lado", esto porque al cambiar la disposición de los imanes se está invirtiendo el campo magnético y por ende se está modificando la dirección en la cual las partículas son desviadas en otra dirección. Dicho comportamiento anómalo puede ser explicado nuevamente por el hecho de que otros grupos también estuvieran trabajando con radio en el momento de tomar las medidas.

Allende de lo anterior, es preciso mencionar que cuando se interpone un campo magnético entre el contador y la muestra, el máximo del conteo de radiación en función del ángulo se mueve de la posición 0° (su posición natural) debido a que el campo magnético desvía las partículas radiadas. Sin embargo algunas partículas altamente energéticas no se ven afectadas por el campo y generan nuevamente un pico en la posición natural. Si se aumenta la intensidad del campo magnético, el pico a cero grados desaparece puesto que son pocas las partículas que logran atravesar el campo interpuesto.

J. Radiación gamma en un campo magnético

El objetivo de este experimento es determinar si la radiación gama se ve afectada o no por campos

magnéticos. El montaje propuesto consiste en interponer entre el radio y el contador una placa de plomo lo suficientemente gruesa de tal forma que solo pase la radiación gamma y tomar datos de conteos con y sin imanes entre la muestra y el contador.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla XI.

Tabla XI: Conteos de radiación gamma.

Medición #	Imán-Plomo / 10 s	Plomo / 10 s
1	77	85
2	98	78
3	76	99
4	81	101
5	79	83
Promedio	81.8	89.2

El error de los datos de la columna "Plomo" fue de $s = 9,36$ conteos / 10 s, y al comparar con el promedio de la columna "Imán-Plomo" vemos que el valor 81,9 está dentro del error s calculado. Dado lo anterior podemos concluir que las partículas que componen la radiación gamma no poseen carga eléctrica puesto que no se ven afectadas por campos magnéticos perpendiculares a su trayectoria, además de verificar nuevamente que el plomo bloquea completamente la radiación beta.

K. Variación de la intensidad de radiación con el tiempo

La idea de este experimento es confinar algunas partículas emitidas por una fuente radioactiva en un recipiente para examinar su decaimiento en el tiempo.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla XII.

Tabla XII: Conteos de radiación gamma.

Segundos	Conteo
60	44
120	39
180	38
240	29

Se puede observar de forma clara que la intensidad de la radiación disminuye con el tiempo. No obstante, es importante resaltar que las medidas no son totalmente confiables puesto que no difieren mucho del conteo usual del aire. Esto puede ser explicado por múltiples fuentes de error en este experimento, entre ellas el hecho de que el contador no se ajustara perfectamente al recipiente proporcionado y el hecho de que posiblemente el inyector que se tomó tuviera deteriorada la manta radioactiva en su interior.

L. Back-scattering de la radiación beta

La radiación reflejada por un cierto material, puede ser utilizada para identificar diversos tipos de materiales. Precisamente el objetivo de este experimento es caracterizar dicha reflexión con los materiales disponibles en el laboratorio.

El montaje experimental consiste en ubicar el radio y el contador en un ángulo de 60° entre sí, y tomar datos sobre los conteos registrados. Los datos obtenidos se muestran en la tabla XIII.

Tabla XIII: Conteos de back-scattering de la radiación beta.

Material	C_1 / 10 s	C_2 / 10 s	C_3 / 10 s	\bar{C} / 10 s
Aire	382	411	407	400
Plomo	783	729	805	772.33
Aluminio	480	479	531	496.66
Metal no id.	526	522	543	530.33

Nuevamente, la mayor intensidad fue registrada para el plomo dado que este material es muy efectivo para bloquear la radiación beta. Es importante mencionar que las mediciones eran muy sensibles ante pequeñas variaciones en las distancias tanto de la muestra como del contador, por tanto se tuvieron que repetir algunas mediciones que eran inconsistentes con respecto a los demás datos. Además, dada la cercanía entre los últimos dos datos se puede concluir que potencialmente el metal no identificado era aluminio ligeramente más grueso que la muestra anterior.

M. Usos alternos de la radiación beta

Una característica notable sobre la radiación β es que cambia su intensidad de acuerdo a la cantidad de material que hay en un recipiente que bloquea la radiación. De esta manera se puede determinar qué tan lleno está un recipiente que no se puede observar. Usando el montaje mostrado en la figura ??, se trató de determinar qué tan lleno estaba un tubo proporcionado en el laboratorio.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla XIV.

Dado que todas las medidas son muy cercanas entre sí podemos concluir que el tubo proporcionado estaba vacío, y esto se comprobó puesto que al teminar las mediciones de destapó dicho recipiente y se verificó que no contenía nada en su interior. Por falta de tiempo no se tomaron medidas con otros recipientes.

Tabla XIV: Conteos usando un recipiente como bloqueo.

Altura (cm)	$C / 10 \text{ s}$
1	1860
2	1776
3	1880
4	1934
5	1849
6	1872
7	1881

N. Radiación beta y hojas de papel

El montaje experimental utilizado en este último experimento es análogo al mostrado a la figura ?? tan solo que esta vez se hacía incidir la radiación sobre múltiples capas de papel.

La última aplicación posible del uso de radiación para la caracterización de materiales es que se puede detectar su grosor. Se realizó una calibración con la radiación detectada para distintos grosores de papel logrados al sobreponer múltiples hojas de papel una sobre la otra. Los datos obtenidos se muestran en la tabla XV.

Tabla XV: Conteos de la radiación beta incidiendo sobre multiples hojas de papel.

# de hojas	$C_1 / 60 \text{ s}$	$C_2 / 60 \text{ s}$	$C_3 / 60 \text{ s}$	$\bar{C} / 60 \text{ s}$
1	2569	2599	2541	2569.66
2	2666	2607	2637	2636.66
3	2680	2710	2735	2708.33
5	2712	2788	2681	2727
8	2693	2777	2658	2709.33

Dado a que no hay variaciones significativas a medida que se aumenta el número de hojas, podemos decir que el grosor de las mismas no es lo suficiente para que las mediciones sean confiables. Además, el papel utilizado no era completamente blanco, por lo cual el constituyente de la tinta con la que fue impreso dicho papel pudo haber afectado fuertemente las mediciones realizadas.

IV. CONCLUSIONES

- La radiación es un fenómeno natural que los seres vivos toleramos constantemente en la vida cotidiana.
- Múltiples materiales pueden bloquear diversos tipos de radiación, entre ellos el papel, el aluminio y el plomo. No obstante, el papel solo bloquea la radiación alfa, el plomo bloquea la radiación alfa y beta, y ninguno de los materiales proporcionados en el laboratorio pudo bloquear la radiación gamma.
- El radio es una fuente radioactiva de alta intensidad y se deben tomar todas las precauciones necesarias a la hora de manipularlo, tales como no tocarlo directamente con las manos y sacarlo de un contenedor único y exclusivamente el tiempo necesario para tomar datos.
- Minerales radioactivos como la columbita pueden producir diversos tipos de radiación de baja intensidad. Y no solo la columbita sino también la manta incandescente y el radio, emiten los tres tipos de radiación más conocidos, a saber, radiación alfa, beta y gamma.
- El back scattering de radiación por un material determinado puede ser utilizado para la caracterización de un material determinado.
- El campo magnético afecta la trayectoria de las ciertas partículas emitidas por fuentes radioactivas. En particular, en el experimento *Radiación gamma en un campo magnético* pudimos verificar que las partículas que constituyen la radiación gamma no poseen carga eléctrica. Esto permite verificar, a su vez, la caracterización de este tipo de radiación hecha en la sección **INTRODUCCIÓN**
- Si bien, el scattering de partículas radioactivas permite determinar el grosor de materiales, las mediciones realizadas en el experimento no arrojaron resultados significativos con respecto al número de hojas de papel utilizadas.

* Electronic address: a.hernandez105@uniandes.edu.co

** Electronic address: d.sanchez462@uniandes.edu.co

¹ Guía *Radioactividad* proporcionada para el desarrollo del laboratorio.

² Información consultada en <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radact.html>.

³ Información consultada en https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_decay.

⁴ Taylor, J.R., *An Introduction to Error Analysis*. University Science Books, Sausalito, California. 2nd edition, 1982.

⁵ La radiación Cherenkov es producida cuando una partícula cargada como un electrón pasa a través de un dieléctrico

con una velocidad más grande que la velocidad de propagación de la luz en dicho medio.

⁶ Imagen obtenida de <http://kaffee.50webs.com/Science/labs/Chem/Lab-Geiger.Counter.html>

⁷ Como estamos considerando partículas cuánticas no podemos hablar de trayectorias definidas, sin embargo analizaremos en que zonas es más probable encontrar partículas β dispersadas por la acción del campo.