

Radiactividad*

Jesus Prada[†] and Sergio Iván Rey[‡]

Departamento de Física, Universidad de los Andes

(Dated: 22/10/2015)

En este experimento verificamos la naturaleza del comportamiento de la radiación ionizante por medio de diversos experimentos que caracterizaban cada cualidad particular de este fenómeno nuclear. Pudimos verificar la composición de radiación en términos de rayos α , β y γ de diversas fuentes radiactivas teniendo en cuenta su poder de penetración sobre diferentes filtros. Especialmente verificamos que la radiación β es cargada y de masa minúscula, mientras que la radiación γ no tiene carga. Demostramos que el proceso estocástico de decaimiento radiativo es bien modelado por la distribución de Poisson. De esta manera pudimos deducir la varianza y el error de las mediciones sin tener muestras estadísticas significativas. Demostramos además con error de alrededor de 2% que la intensidad de radiación decae con el cuadrado de la distancia a la fuente y como una ley exponencial con la distancia a la que penetra un material absorbente. Con el criterio del intervalo de confianza proporcionado por la varianza, pudimos demostrar la radiactividad o inactividad de diferentes elementos como rocas con trazas radiactivas y diversas sales. Además verificamos cuantitativamente la ley de decaimiento exponencial con el tiempo al medir el tiempo de actividad característico de una muestra de aire radiactivo.

I. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de los elementos radiactivos por Pierre y Marie Curie a principios del siglo XX dio paso al desarrollo de la física nuclear, una oleada de nuevas tecnologías, el desarrollo de nuevas maneras de producción de energía y una especie de nueva revolución industrial. Por ello, el estudio de las fuentes radiactivas ha sido de mayor interés durante el último siglo para la ingeniería y las ciencias naturales en general, y por ello se ha desarrollado este experimento. El entendimiento de la radiactividad será de utilidad para el estudiante para desarrollar competencias en física nuclear y de partículas, como también proveerá de un entendimiento global de los fenómenos que acontecieron en el siglo XX.

La radiactividad es un fenómeno físico en el cual isótopos inestables de algunos átomos, con el fin de alcanzar un estado más estable, pierden energía por medio de la emisión de ondas electromagnéticas o bien por la pérdida, de parte de sus núcleos, de partículas más pequeñas.

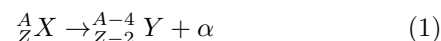
La radiactividad puede ser clasificada en dos categorías según la manera de emisión. Así pues, la radiactividad natural se produce cuando espontáneamente los átomos emiten energía en las formas anteriormente mencionadas para alcanzar un estado más estable.

En caso contrario, la radiactividad artificial o inducida ocurre cuando se libera energía al bombardear partículas pequeñas contra átomos inestables causando su ruptura,

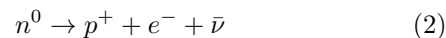
proceso cono cocido como fisión nuclear. EL proceso opuesto, conocido como fusión nuclear, es el de colisionar átomos pequeños para formar unos más grandes con el fin de liberar energía.

Por otra parte, dada su naturaleza de emisión, se puede catalogar la radiación en tres categorías diferentes:

-Radiación alfa (α): Es el flujo de partículas alfa, que consisten de dos neutrones con dos protones. En otras palabras, es la emisión de iones de He^{2+} . Este tipo de radiación es altamente ionizante pero muy poco penetrante y sólo se presenta cuando átomos pesados decaen para formar átomos más pequeños. La producción de una partícula alfa está dada por la ecuación:



-Radiación beta (β): Consiste en el flujo de electrones (β^-), o de positrones (β^+). Esta radiación, en el primer caso el átomo debe tener un exceso de neutrones, así uno de éstos decaerá para formar un positrón, un electrón y un antineutrino, el cual es una partícula agregada a la ecuación por Fermi para soportar el balance energético y la conservación del número leptónico y bariónico; su existencia fue probada experimentalmente años después. Su reacción está dada por:

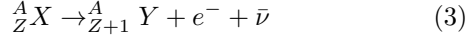


*

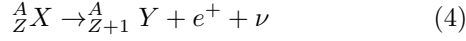
[†] jd.prada1760@uniandes.edu.co; Also at Departamento de Física, Universidad de los Andes

[‡] si.rey1826@uniandes.edu.co

El átomo al cual pertenece el neutrón cambia de la siguiente forma:



También puede ocurrir que el neutrón decaiga para producir un positrón y un neutrino, en cuyo caso el átomo cambia de la siguiente manera, esta radiación es conocida como beta positiva:



-Radiación Gamma (γ): La radiación Gamma es la emisión de ondas electromagnéticas con longitud de onda muy corta. Se considera la radiación más peligrosa y penetrante, ya que usualmente se requiere de muros de hormigón de varios centímetros para detenerla. Esta radiación se produce cuando un átomo decae de un estado excitado a otro más estable, pero no pierde ninguna partícula. Así:



Los diferentes tipos de radiación requieren así, diferentes tipos de barreras para ser detenidas y esto por lo general depende de la masa y la carga de la partícula emitida. Así, dado el gran tamaño de la partícula alfa, se requiere sólo una hoja de papel. Los electrones son significativamente más pequeños, y por lo tanto requerirán una lámina delgada de algún metal o unos centímetros de agua.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

Contador Geiger-Muller

El dispositivo usado durante la práctica es un contador de Geiger-Muller. Éste es un dispositivo que sirve para medir la intensidad de la fuente radiactiva. El dispositivo consiste en un filamento conductor muy delgado dentro de un tubo metálico. Ambos están aislados por un gas inerte. De esta manera, cuando una partícula desprendida de un átomo que está en proceso de decaimiento, entra al detector e interactúa con el filamento, produce un impulso eléctrico cuya amplificación es audible. Esto se conoce como una cuenta. Así pues, a mayor cantidad de cuentas, mayor se considera que es la intensidad de la fuente radiactiva.

Durante este experimento utilizamos este contador en diferentes configuraciones según la guía [3], para medir la radiación emitida por diversas fuentes radiactivas y por el ambiente. En general posicionábamos el detector el dispositivo Geiger en frente de una fuente como se

muestra en la figura 1. Con ayuda de los soportes que se muestran en dicha figura podíamos variar la distancia entre el detector y la fuente además de su ángulo. Además de esto, las escalas estaban impresas en la mesa de trabajo, por lo cual, la toma de medidas era sencilla.

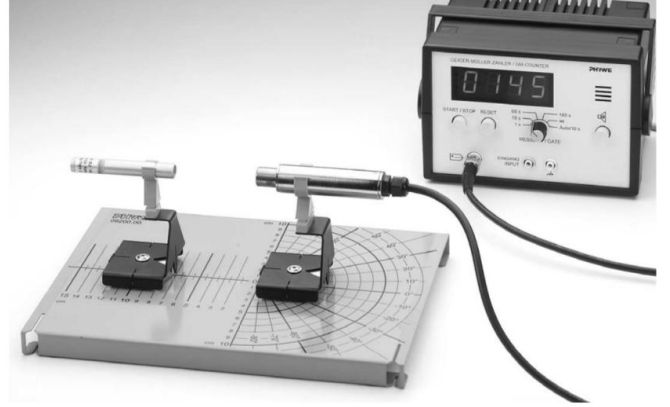


FIG. 1. Montaje experimental general

En el caso en que era preciso tomar conteos con filtros, se ponían filtros con ayuda de los soportes entre el detector y la fuente, como se muestra en la figura 2.

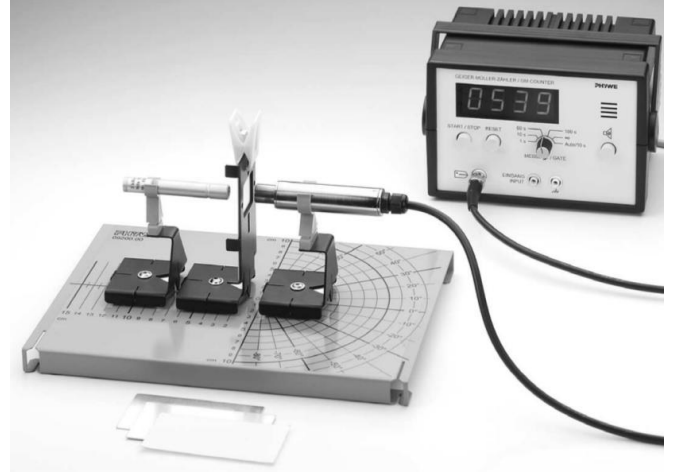


FIG. 2. Montaje experimental con filtros

De la misma manera, en el caso en que verificamos el efecto del campo magnético sobre la radiación, lo que hicimos fue posicionar dos magnetos con polarización paralela en medio de la trayectoria de la radiación de la fuente al detector. Dichos magnetos eran posicionados con ayuda del soporte multifuncional proporcionado en el laboratorio. Un ejemplo de este montaje se puede apreciar en la figura 3.

En el caso especial en que medimos la radiactividad en una muestra de aire proveniente de una manta radiactiva, encerramos dicho aire con ayuda de una jeringa

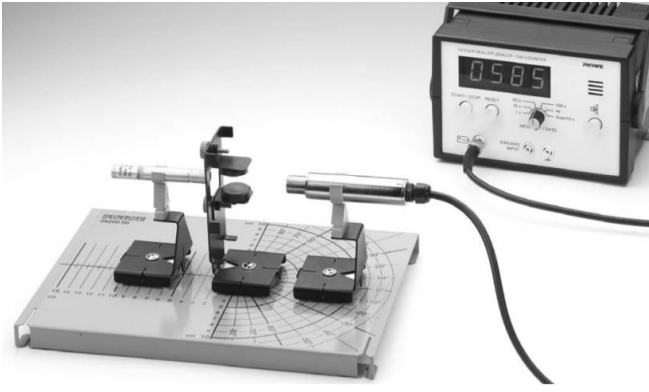


FIG. 3. Montaje experimental con magnetos

en un recipiente con apertura del mismo tamaño y forma del contador. Acto seguido tapamos el recipiente con el contador y empezamos a tomar medidas. Dicho montaje puede ser apreciado en la figura 4 .

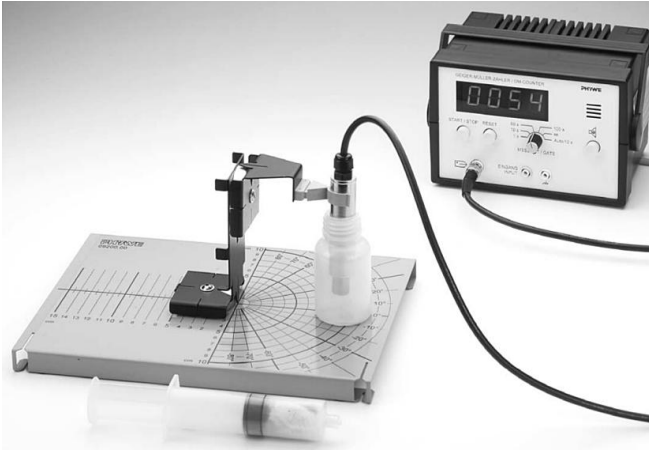


FIG. 4. Montaje experimental para una muestra de aire radiactivo

En general, debido a que el detector Geiger era separado del su contador, unidos únicamente por un cable, ese experimento permitía mucha libertad de movimiento para poder configurar los montajes y realizar las mediciones.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Radiación de fondo

En este experimento medimos la radiación de fondo promedio. Tomamos 5 datos de 60 segundos cada uno, los cuales se encuentran registrados en la tabla I.

El objetivo de este experimento era verificar si se

$C_{\text{conteo}}(\pm 1)$
27
20
16
19
24

TABLE I. Radiación ambiental

podía detectar radiación en ausencia de una muestra. Esta radiación detectada la llamamos radiación de ambiente y se debe a decaimientos espontáneos de isótopos radiactivos en la materia que nos rodea; a la radiación cósmica de fondo y a las muestras de radiación que se encontraban en mesas cercanas. Las muestras que se encontraban en dichas mesas variaban constantemente su ubicación y su nivel de radiactividad dependía de los experimentos que otros estuvieran haciendo, por lo cual era conveniente medir la radiación de fondo al realizar cada montaje.

Esta radiación de fondo tiene como promedio un valor de 21.2 conteos por cada 10 segundos. En estas mediciones, debido al carácter probabilístico de su naturaleza, una buena medida del error es la desviación estándar. A lo largo de este informe escogemos la definición de error absoluto asociado a su medida como su desviación estándar. Esta medida, $\delta x = \sigma_x$ tiene un 68.27% de confianza, es decir, cada medida tiene 68.27% de probabilidad de estar en el rango dado por dicho error.

En este caso, la media, incluyendo su error absoluto está dada por $C = 21.2 \pm 3.86 \frac{cts}{10s}$. Esta medida de error, es cada vez más confiable entre más medidas tengamos, dado que la desviación estandar real asociada a la distribución de probabilidad del fenómeno se obtiene, por definición, sobre un número infinito de realizaciones de dicha distribución. Podemos ver la veracidad de este factor dado que en este caso obtuvimos un error relativo bastante grande para solo 5 medidas: 18.2%.

B. Variaciones

En este experimento verificamos la naturaleza estadística de la radiación al tomar 50 medidas de 10 segundos sobre una manta incandescente.

La distribución de probabilidad que mejor caracteriza el proceso estocástico de decaimientos radiactivos es la distribución de Poisson. Esta distribución tiene como característica que su varianza es igual a su promedio, y en términos de la desviación estándar: $\sigma_x^2 = \bar{x}$. Debido a que esta distribución es discreta, hacer cálculos de intervalos de confianza resulta difícil, sin embargo, podemos aproximar su forma de campana como una

Gaussiana. En este sentido, se tiene que el 68.27% de los datos estarán concentrados alrededor del promedio con radio igual a una desviación estándar. Si se escoje un radio de 2σ , 95.45% de los datos estarán concentrados en el intervalo, y si se tienen 3σ (el error absoluto definido para este informe), se tendrá una confianza del 99.73%.

Teniendo los anteriores datos en cuenta, se puede notar que el porcentaje de error debido a la definición $\delta x = \sigma_x$ está dado por $\epsilon = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{x}}}$. Esto evidencia la importancia del tiempo en las medidas que tomamos, ya que si se toman conteos por un intervalo de tiempo mayor, el promedio será claramente mayor, y por tanto, el error relativo disminuirá. Además de esto, con esta propiedad es posible estimar el error asociado a una medida sin tener una muestra estadística significativamente grande.

Sin más preámbulos, los datos obtenidos se encuentran consignados en la tabla II y un histograma donde se pueden apreciar claramente las características de una distribución de Poisson con baja resolución, se encuentra graficado en la figura 5.

<i>N° Medicion</i>	<i>Resultado(±1)</i>	<i>N° Medicion</i>	<i>Resultado(±1)</i>
1	65	26	66
2	63	27	73
3	57	28	60
4	67	29	59
5	67	30	82
6	78	31	74
7	67	32	72
8	56	33	62
9	78	34	66
10	55	35	57
11	80	36	75
12	69	37	56
13	61	38	79
14	70	39	65
15	68	40	68
16	65	41	75
17	69	42	67
18	58	43	71
19	71	44	73
20	75	45	65
21	61	46	69
22	73	47	70
23	54	48	64
24	79	49	56
25	64	50	64

TABLE II. Variación estadística

En este experimento se obtuvo un promedio de 67.16 conteos cada 10 segundos, y una desviación estándar de 7.19 en las mismas unidades. Nótese que la raíz cuadrada del promedio debería ser igual a la desviación estándar si la distribución estudiada es de Poisson. En este caso dicha raíz es de 8.19, que comparada con el

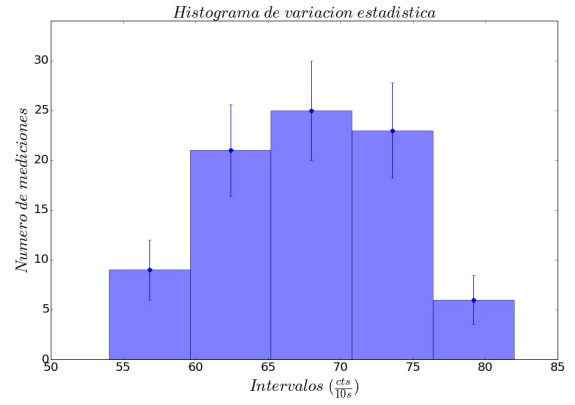


FIG. 5. Histograma de los conteos medidos

valor real, presenta un error de solo 12%, lo cual es bastante razonable para un análisis estadístico.

Ahora, al verificar el intervalo de confianza que provoca una desviación estándar, descubrimos que el $64 \pm 2\%$ de los datos se encontraban en dicho intervalo, lo cual muestra un error de 6.25% con el valor esperado de 68%.

Los errores obtenidos en este montaje son naturales de la calidad estocástica de los procesos involucrados. En principio, para los análisis estadísticos siempre necesitaremos una cantidad infinita de mediciones para obtener conclusiones exactas. A pesar de dichos errores, pudimos identificar la distribución de probabilidad de las medidas como una distribución de Poisson.

C. Radiactividad en sales

En esta sección verificamos si las muestras de sales $CaCl_2$, Cu_2SO_4 , $NaCl$, KCl emitían radiación ionizante. Para ello medimos cuatro veces los conteos que provocaban en el contador Geiger durante 60 segundos, y los comparamos con la radiación del ambiente.

Los datos obtenidos se encuentran consignados en la tabla III.

<i>Muestra</i>	<i>Resultado (±1)</i>				\bar{x}	σ_x
CaCl ₂	28	22	21	22	23.25	2.77
Cu ₂ SO ₄	21	15	32	16	21.0	6.75
KCl	43	41	44	34	40.5	3.91
NaCl	25	23	23	16	21.75	3.42
Ambiente	23	23	23	15	21.0	3.46

TABLE III. Radiación por diferentes muestras de sales

De esta tabla, teniendo en cuenta las desviaciones estándares, se puede concluir el cloruro de potasio es claramente radiactivo ya que, teniendo en cuenta el error estadístico, su intervalo no cae en la radiación ambiente; el cloruro de calcio es posiblemente radiactivo ya que, aunque su promedio es mayor, hay una pequeña intersección entre su intervalo de confianza y el de la radiación de ambiente; y el resto de sales, cloruro de sodio y sulfato de cobre, no presentan una diferencia significativa con la radiación de ambiente para tener una conclusión convincente.

D. Radiactividad en rocas

Al igual que en la sección anterior, verificamos radiactividad esta vez en rocas en lugar de sales. Para esto, hicimos las mismas 4 mediciones de 60 segundos sobre cada una de las muestras y sobre el ambiente. Las rocas utilizadas en este experimento contenían cada una, y por separado, restos de Ba-133, de Cd-109 y Cs-137.

Los datos tomados se encuentran en la tabla IV.

<i>Muestra</i>	<i>Resultado (± 1)</i>				\bar{x}	σ_x
Ba-133	611	639	607	642	624.75	15.85
Cd-109	81	67	66	70	71.0	5.96
Cs-137	3279	3198	3146	3186	3202.25	48.31
Ambiente	24	20	24	22	22.6	1.66

TABLE IV. Radiación por diferentes muestras de rocas

En este caso encontramos que todas las rocas medidas eran radiactivas. Claramente la más activa era la de Cesio, seguida de la de Bario y de la de Cadmio. Todas las muestras tuvieron promedios superiores a la radiación ambiente, con varianzas que permitían admitir con certeza que eran radiactivas. Las varianzas pequeñas registradas en comparación con las medidas evidencia una vez más que la distribución de Poisson rige estos decaimientos radiactivos.

E. Diferentes tipos de radiación en Columbita

En este experimento medimos diferentes tipos de radiación al poner diferentes filtros a una roca de columbita. Para esto, medimos 3 conteos en intervalos de 100 segundos para la roca de frente y de revés. Luego tomamos las mismas medidas para el lado más radiactivo de la roca superponiendo filtros de papel y aluminio. Claramente no faltó la medición de la radiación ambiente.

Los datos de radiación ambiente se encuentran consignados en la tabla V. Mientras los datos de ra-

diación con diferentes filtros de columbita se encuentran en la tabla VI.

<i>Medicion</i>	<i>Conteo(± 1)</i>
1	42
2	32
3	34
4	36
5	41
Prom	37.0
Std	3.90

TABLE V. Radiación ambiental

<i>Muestra</i>	<i>Resultado (± 1)</i>			\bar{x}	σ_x
No Filtro 1	326	349	318	331.0	13.14
Papel 1	329	355	344	342.67	10.67
Metal 1	146	187	160	164.33	17.02
No Filtro 2	286	321	286	297.67	16.50

TABLE VI. Distintos filtros para la Columbita

De esta tabla es importante notar que la radiación de ambiente es prácticamente insignificante respecto a las radiaciones obtenidas incluso con los filtros, y para los objetivos de esta sección no es importante tenerla en cuenta, ya que no realizaremos ningún cálculo, solo compararemos los promedios y varianzas.

Así, es sencillo notar que la diferencia entre los conteos realizados cuando se tenía el lado más radiactivo de la columbita respecto a la misma situación con un filtro de papel, son prácticamente insignificantes dadas las varianzas. Esto nos permite afirmar con bastante certeza que la radiación emitida por la columbita no está compuesta de radiación α o su fracción es muy pequeña para ser medida por este experimento.

Por otro lado, los conteos del filtro metálico son claramente menores que los conteos normales sin filtro. A su vez, estos son significativamente mayores que la radiación ambiente por varias desviaciones estándares. Esto nos permite afirmar que mucha de la radiación emitida por la columbita es radiación β , casi la mitad, mientras la otra mitad, al poder atravesar el filtro de metal, se compone de radiación γ . Si sustraemos la radiación ambiente de los conteos con los filtros y sin ellos podremos dar un estimado de la proporción de radiación de tipo β y γ que emite la columbita.

Así, la columbita produce en promedio un valor total de 294 ± 13.14 conteos cada 100 segundos, mientras que con el filtro de metal produce 127.33 ± 17.02 . Omitiendo las varianzas y asumiendo que el filtro de metal para completamente la radiación β , la proporción de radiación β y γ es de respectivamente de $56.67 \pm 0.06\%$ y de $43.33 \pm 0.06\%$. Aquí los errores absolutos se

calcularon con las respectivas propagaciones de error.

La composición de radiación β de la roca se puede verificar cualitativamente porque al voltearla el número de conteos disminuyó. En este caso, la misma roca actuaba como un filtro no perfecto y no tan poderoso como el de metal que usamos, pero que de todas maneras reducía la radiación β recibida por el contador.

F. Diferentes tipos de radiación en manta incandescente

En este experimento el objetivo era el mismo que en la sección anterior, esta vez, para una manta incandescente. Para lograr dicho objetivo tomamos 5 conteos en 60 segundos cada uno teniendo como objetivo la manta, la manta con un filtro de papel y luego de plomo, y el ambiente. Los datos obtenidos se encuentran en la tabla VII.

Medicion	Manta	Papel	Metal	Ambiente
1	672	586	126	22
2	696	573	148	28
3	746	627	144	42
4	691	608	149	21
5	754	655	160	20
Prom	711.80	609.80	145.40	26.60
Var	32.30	29.19	11.06	8.19

TABLE VII. Distintos filtros para la manta incandescente

De esta tabla es importante notar que no hay pre-ocupaciones por las mediciones respecto al ambiente. En cada caso las medidas fueron claramente diferentes entre ellas y con el ambiente por varias desviaciones estándares. Dada esta diferencia clara entre los conteos con diferentes filtros y respecto al ambiente, podemos afirmar con gran certeza que la manta incandescente emite radiación compuesta por rayos α , β y γ .

Sabiendo que los rayos α solo son parados por papel y metal, que los rayos β solo son parados por metal, y que los rayos γ son imparables por papel y metal, podemos obtener un valor para las fracciones de composición de la radiación de la manta. Sin embargo, para que estas fracciones no se vean alteradas por el ambiente, es necesario restar su contribución a cada medida.

De esta manera tenemos que la manta provoca en 60 segundos un promedio de 685.2 ± 32.3 conteos, mientras que la misma medida con filtros de papel y metal son, en promedio, respectivamente 583.2 ± 29.19 y 118.8 ± 11.06 . Con estos datos, y la información en el párrafo anterior podemos concluir que la radiación ionizante emitida por la manta incandescente se compone en un $14.89 \pm 0.05\%$

de rayos α , en un $67.78 \pm 0.05\%$ de rayos β y en un $17.34 \pm 0.018\%$ de rayos γ .

Aquí vemos que la manta incandescente emite todos los tipos de radiación, α , β y γ . Ahora, dado que la radiación β y α no puede ser emitida en un mismo proceso atómico, los resultados de este experimento demuestran que la manta incandescente contiene materiales reactivos que emiten radiación por al menos 2 procesos atómicos.

G. Dependencia de la intensidad de radiación con la distancia

En este experimento pretendíamos medir la dependencia de la intensidad de radiación con la distancia de la fuente. Para ello, tomamos conteos de 10 segundos de una muestra de Ra-226 a distancias desde 2cm hasta 10cm equiespaciadas a 1cm. Además, se duplicó el experimento con medidas de 10 segundos sobre una muestra del mismo elemento, esta vez, mucho más radiactiva. Los datos obtenidos se encuentran en la tabla VIII y IX.

$D(\pm 0.1cm)$	$c_1(\pm 1)$	$c_2(\pm 1)$	$c_3(\pm 1)$	$c_4(\pm 1)$	$c_5(\pm 1)$	\bar{c}	σ_c
2	539	530	536	553	554	542.4	9.5
3	278	283	294	281	269	281.0	8.0
4	173	183	184	166	190	179.2	8.5
5	123	139	134	112	129	127.4	9.4
6	99	104	100	77	105	96.8	10.1
7	93	76	78	82	65	78.8	9.1
8	68	70	72	66	77	70.6	3.8
9	67	55	48	67	65	60.4	7.6
10	45	40	52	48	64	49.8	8.1

TABLE VIII. Dependencia de la radiación con la distancia (Ra-226 débil)

$D(\pm 0.1cm)$	$c(\pm 1)$	σ_c
4.00	8558	92.51
5.00	5281	72.67
6.00	3899	62.44
7.00	3089	55.58
8.00	2376	48.74
9.00	1993	44.64
10.00	1563	39.53
11.00	1303	36.10
12.00	1074	32.77

TABLE IX. Dependencia de la radiación con la distancia (Ra-226 fuerte)

Debido al poder de la segunda fuente utilizada, no necesitamos un fuerte respaldo estadístico, ya que según la distribución de Poisson, el error relativo disminuye con el inverso de la raíz del promedio (en este caso la

medida). Así, solo tomamos una medida de 10 segundos y tomamos la raíz cuadrada de dicho valor como error. Cabe resaltar que para $d = 2\text{cm}$ y $d = 3\text{cm}$ en la muestra fuertemente radiactiva, el contador se saturaba, por lo que no tomamos estos conteos.

Para poder analizar la dependencia de la intensidad con la distancia de una mejor manera, se obtuvieron gráficas para cada muestra. Ahora, como normalmente sucede, la intensidad de una fuente depende inversamente del cuadrado de la distancia a la que está el detector. Por esto, teniendo en cuenta que la intensidad es proporcional al número de conteos, se hizo un ajuste de la forma:

$$C(d) = A + \frac{B}{d^2} \quad (6)$$

Donde A corresponde a la intensidad percibida e invariante del ambiente, y B corresponde a una constante de calibre para la dependencia de la fuente de Radio con la distancia. En el caso del Ra-226 fuerte el efecto del ambiente es sumamente insignificante, por lo cual se tomó $A = 0$.

Los resultados de los ajustes, así como sus respectivas gráficas se encuentran en las figuras 6 y 7.

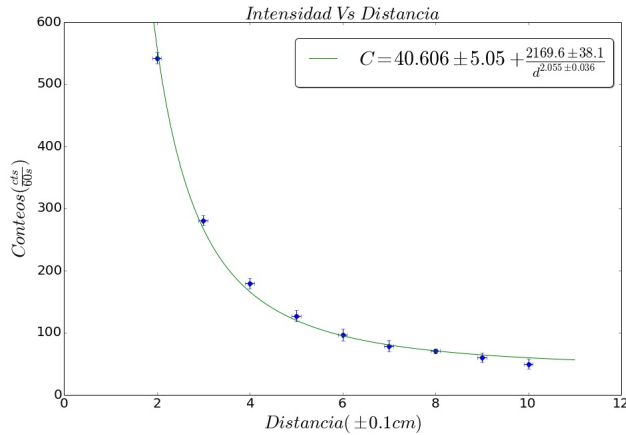


FIG. 6. Relación de intensidad con la distancia a la fuente (Ra-226 débil)

Dicho ajuste verifica la relación cuadrática de la intensidad con la distancia a la fuente. El valor del exponente es de 2.055 ± 0.036 para la fuente débil y de 1.969 ± 0.011 lo cual solo está alejado de la realidad un 2.75% y un 1.5%. La diferencias de errores se debe a la propagación de los errores relativos, los cuales son menores para conteos muy grandes.

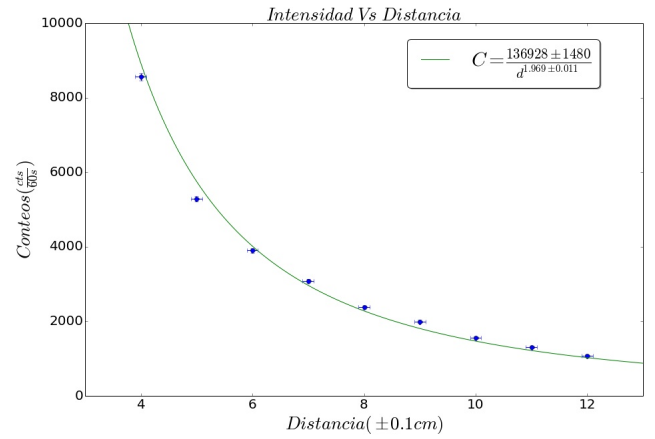


FIG. 7. Relación de intensidad con la distancia a la fuente (Ra-226 fuerte)

Con esto concluimos que la intensidad de radiación decae inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente, independientemente de la fuente utilizada.

H. Rango de la radiación alpha

En esta sección evaluamos el alcance de la radiación α emitida por una muestra de Ra-226. Para ello tomamos conteos durante 10 segundos variando la distancia sobre la muestra sin filtro, y la muestra con un filtro de papel. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la tabla X.

Cabe resaltar que la fuente distanciatomada era sumamente radiactiva y para distancias muy cortas el contador se saturaba, por lo que se omitieron dichas medidas. Además, dado que no se tomaron muchas medidas se tomó como error absoluto la raíz cuadrada de las medidas, lo cual es una buena aproximación teniendo en cuenta la distribución de Poisson que caracteriza los decaimientos.

Ahora, para verificar el alcance de la radiación α , tenemos que obtener en qué fracción se reduce la radiación total al imponer el filtro a diferentes distancias. Dicha fracción corresponde a la fracción de rayos α en la radiación total. Cuando la fracción reducida sea significativamente pequeña, podemos decir que la radiación α llegó a su límite de distancia recorrida. En la tabla XI se pueden apreciar las diferencias de radiación para cada distancia, así como la fracción que esta diferencia representa respecto a la radiación sin filtro. Los errores expuestos fueron calculados con la respectiva propagación de error tomando los errores de Poisson ya mencionados.

En esta tabla se puede apreciar que la fracción de

$Distancia(\pm 0.1cm)$	$C_{filtro}(\pm 1)$	δ_{filtro}	$C_0(\pm 1)$	δ_0
3.00	5299	72.79	13640	116.79
3.50	4225	65.00	11030	105.02
4.00	3406	58.36	9570	97.83
4.50	2722	52.17	7124	84.40
5.00	2394	48.93	5740	75.76
5.50	2106	45.89	4985	70.60
6.00	1765	42.01	4230	65.04
6.50	1558	39.47	3706	60.88
7.00	1361	36.89	3163	56.24
7.50	1159	34.04	2755	52.49
8.00	1046	32.34	2500	50.00
8.50	940	30.66	2258	47.52
9.00	825	28.72	1989	44.60
9.50	795	28.20	1841	42.91
10.00	710	26.65	1652	40.64
11.00	595	24.39	1369	37.00
12.00	553	23.52	1098	33.14
13.00	461	21.47	967	31.10
14.00	334	18.28	818	28.60
15.00	299	17.29	680	26.08
16.00	288	16.97	582	24.12
17.00	217	14.73	494	22.23
18.00	205	14.32	417	20.42
20.00	144	12.00	320	17.89
25.00	97	9.85	189	13.75

TABLE X. Mediciones de Ra-226 con y sin filtro de papel

$Distancia(\pm 0.1cm)$	ΔC	$Fraccion Reducida$	δ_{frac}
3.00	8341	0.612	0.006
3.50	6805	0.617	0.007
4.00	6164	0.644	0.007
4.50	4402	0.618	0.009
5.00	3346	0.583	0.010
5.50	2879	0.578	0.011
6.00	2465	0.583	0.012
6.50	2148	0.580	0.013
7.00	1802	0.570	0.014
7.50	1596	0.579	0.015
8.00	1454	0.582	0.015
8.50	1318	0.584	0.016
9.00	1164	0.585	0.017
9.50	1046	0.568	0.018
10.00	942	0.570	0.019
11.00	774	0.565	0.021
12.00	545	0.496	0.026
13.00	506	0.523	0.027
14.00	484	0.592	0.027
15.00	381	0.560	0.031
16.00	294	0.505	0.036
17.00	277	0.561	0.036
18.00	212	0.508	0.042
20.00	176	0.550	0.045
25.00	92	0.487	0.064

TABLE XI. Fracciones de reducción de radiación por el filtro

radiación α parada por el filtro de papel no varió significativamente en las distancias medidas. A pesar de esto si se pudo notar una disminución general-

izada de esta radiación alrededor de los 5cm. Después de dicha distancia la fracción no varió generalizadamente.

Ahora, debido a la interacción del aire con la radiación α , esta no tiene mucho alcance dependiendo de su energía. Para el aire a presión constante y a $15^\circ C$, este alcance está dado por $D = 0.4769E^{1.5} \frac{cm}{MeV}$. Si tenemos en cuenta la caída en la fracción de radiación α , podemos encontrar que la muestra emitía dichos rayos con energías alrededor de $4.80 MeV$. Con un poco de investigación [1] podemos intuir que dicha energía corresponde a la transición $Ra - 226 \rightarrow Ra - 222$, la cual es de $4.871 MeV$. Si esta es, en efecto, la transición correcta, este método de cálculo de energía provoca únicamente un 2% de error, congruente con los errores obtenidos anteriormente con estos montajes.

I. Influencia del grosor de los materiales en la radiación β

En este experimento medimos la influencia del grosor de materiales como el cartón, perspex y aluminio sobre la radiación β de una fuente de Ra-226. Para ello tomamos diferentes medidas de conteo durante 10 segundos con la muestra a 3 cm del detector. Los datos obtenidos se encuentran en las tablas XIV, XIII y XII.

$Grosor(\pm 0.1cm)$	$c_1(\pm 1)$	$c_2(\pm 1)$	$c_3(\pm 1)$	\bar{c}	σ_c
0.0	9936	9824	9849	9869.67	48.00
0.5	1467	1428	1482	1459.00	22.76
1.0	697	664	739	700.00	30.69
1.5	363	364	324	350.33	18.62
2.0	211	199	219	209.67	8.22
2.5	162	165	143	156.67	9.74

TABLE XII. Filtros de aluminio de diferente grosor

$Grosor(\pm 0.1cm)$	$c_1(\pm 1)$	$c_2(\pm 1)$	$c_3(\pm 1)$	\bar{c}	σ_c
0.0	9193	9194	9081	9156.00	53.03
1.4	1468	1462	1541	1490.33	35.91
2.8	608	652	583	614.33	28.52
4.2	358	350	398	368.67	21.00
5.6	271	222	230	241.00	21.46

TABLE XIII. Filtros de perspex de diferente grosor

En estos casos, como error absoluto de las medidas con filtros de aluminio y perspex, se utilizó la desviación estándar; sin embargo, para el cartón debido a sus grandes conteos por su bajo poder de filtro, se tomó solo una medida y su error fue obtenido como la raíz cuadrada del valor medido.

$Grosor(\pm 0.1cm)$	$c(\pm 1)$	δ_c
0.0	9207	95.95
1.5	4359	66.02
3.0	2554	50.54
4.5	1765	42.01
6.0	1284	35.83
7.5	791	28.12
9.0	699	26.44
10.5	557	23.60

TABLE XIV. Filtros de carton de diferente grosor

Ahora, la intensidad de radiación disminuye exponencialmente a través de un medio absorbente de la forma $I(d) = I_o e^{-\lambda d}$. Teniendo esto en cuenta, es necesario realizar un ajuste exponencial de esta forma, teniendo en cuenta la radiación ambiental como una constante aditiva. Dichos ajustes se encuentran representados en las figuras 8, 9 y 10.

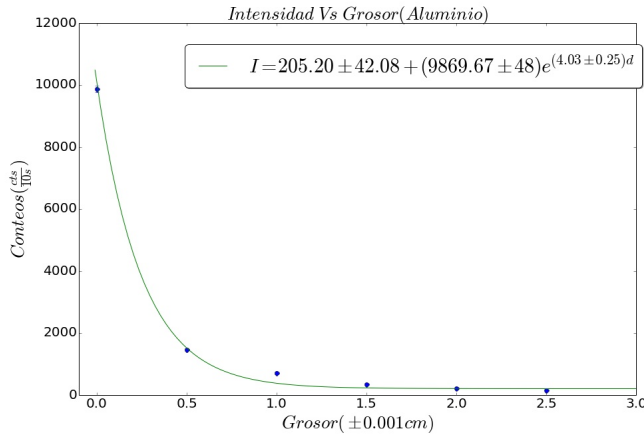


FIG. 8. Ajuste para la relación grosor-intensidad en el aluminio

En estas gráficas se puede apreciar que los coeficientes de absorción son respectivamente $\lambda_{al} = 4.04 \pm 0.25 cm^{-1}$, $\lambda_{perspex} = 1.41 \pm 0.11 cm^{-1}$ y $\lambda_{carton} = 0.50 \pm 0.04 cm^{-1}$. El inverso de estos coeficientes nos darían una longitud de penetración para cada material, la cual es más intuitiva y más fácil de analizar. Dichas longitudes de penetración, con sus respectivos errores están dadas por: $d_{al} = 0.248 \pm 0.015 cm$, $d_{perspex} = 0.709 \pm 0.055 cm$ y $d_{carton} = 2.0 \pm 0.16 cm$. Así, según este indicador, el mejor filtro (entre los tres probados) para la radiación β es el aluminio, seguido del perspex y luego del cartón.

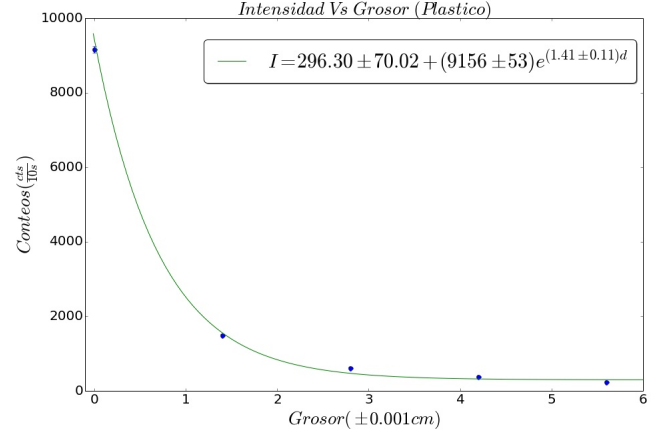


FIG. 9. Ajuste para la relación grosor-intensidad en el perspex

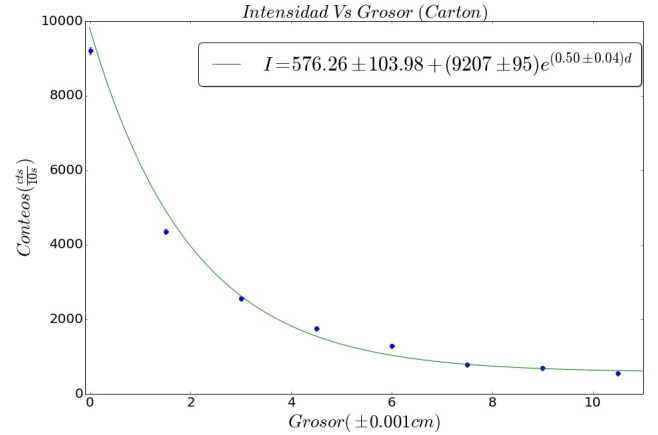


FIG. 10. Ajuste para la relación grosor-intensidad en el carton

J. Interacción de la radiación β con campos magnéticos

En este experimento no se pretendía tomar medidas, sino verificar cualitativamente la influencia de un campo magnético sobre la radiación β . Específicamente se quería ver cómo se deflectaba la radiación al imponer el mencionado campo magnético. Para esto, se tomaron medidas de conteo durante 10 segundos para ángulos de 0 a 180° equiespaciados a 10° a una distancia de 8 cm con los magnetos, sin los magnetos y con los magnetos invertidos. Los datos tomados se encuentran en la tabla XV.

Es preciso aclarar que hablamos únicamente de radiación β dado que el único otro tipo de radiación que es cargada es la α , la cual tiene el doble de carga que la radiación β pero aproximadamente 8000 veces su masa, lo cual reduce el efecto de los campos magnéticos en un factor de aproximadamente 4000. En este sentido, el

efecto del campo magnético solo será sobre la radiación β .

Angulo	Magnetos	NoMagnetos	MagnetosInv
0	221	300	200
10	201	366	247
20	166	430	306
30	180	730	466
40	303	1228	481
50	492	1582	689
60	707	1754	937
70	845	1544	1293
80	1051	1303	1533
90	1177	1153	1547
100	1299	976	1453
110	1444	753	1235
120	1652	652	932
130	1720	569	674
140	1505	473	527
150	941	299	447
160	602	193	362
170	479	180	288
180	383	209	215

TABLE XV. Efecto del campo magnético en la radiación β

En esta tabla se puede notar que la intensidad de radiación tiende a concentrarse en 90° cuando no hay magnetos involucrados. Esta dirección es la dirección de salida de los rayos producidos por el Ra-226 a través de su envoltura de plomo. Si se mira el efecto de los magnetos, en un caso la intensidad tiende a estar entre 0° y 90° , y en el otro, su máximo tiende a concentrarse entre 90° y 180° . Para entender este efecto de una mejor manera, se realizó una gráfica donde se mostraban los datos de la tabla anterior en un diagrama polar. En dicha figura 11, en la escala angular se muestran los ángulos, y en la escala radial se grafica la intensidad.

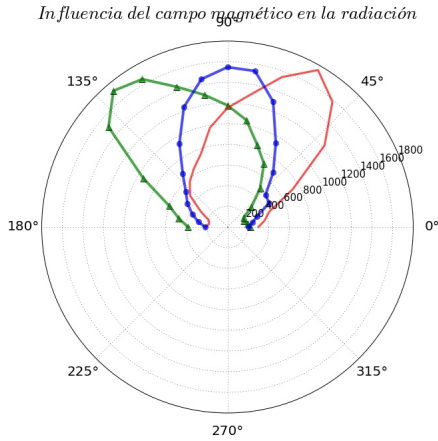


FIG. 11. Influencia de los campos magnéticos sobre la radiación β

En esta gráfica se puede apreciar que para el caso sin magnetos la función de intensidad es simétrica alrededor de su ángulo mayor, lo cual era de esperarse. Sin embargo, para los casos con magnetos, esta función de intensidad con respecto al ángulo tiende a rotar sin conservar la simetría alrededor de su máximo, favoreciendo el lado más cercano a la fuente de radiación (90°). Esto puede ser explicado debido a los otros tipos de radiación que emite la muestra usada, α y γ , las cuales no se ven afectadas considerablemente por el campo magnético y por tanto se quedan en cerca a 90° .

K. Interacción de la radiación γ con campos magnéticos

Además de mostrar la influencia de los campos magnéticos sobre la radiación β , quisimos demostrar formalmente que estos campos no afectan la radiación γ . Para ello tomamos 4 medidas de 10 segundos con magnetos y sin ellos a la misma fuente radiactiva de Ra-226 cubierta siempre por una placa de aluminio. Los datos tomados con sus respectivos promedios y varianzas se encuentran en la tabla XVI.

Medida	Magnetos	No-Magnetos
1	192	190
2	216	192
3	220	194
4	231	208
5	212	217
\bar{c}	214.2	200.2
σ_c	14.6	14.1

TABLE XVI. Efecto del campo magnético sobre la radiación γ

En dicha tabla se puede observar que cada valor cae dentro del rango de incertidumbre del otro, lo cual nos dice que dadas dichas incertidumbres, los conteos son prácticamente iguales. De esta manera, la radiación γ no se ve afectada por un campo magnético. La diferencia entre los promedios, sin tener en cuenta las varianzas, la podemos atribuir a que el aluminio no bloquea totalmente la radiación β y un remanente de la radiación β que si es deflectada, afecta la medida.

L. Tiempo de decaimiento

En este montaje pretendíamos medir el tiempo de decaimiento del gas radiactivo que rodeaba a una manta incandescente. Para ello encerramos el gas en un recipiente y medimos 4 conteos consecutivos de 60 segundos. En este caso se trabajó con el aire que rodeaba a la

manta debido a su poca densidad, lo cual permite un tiempo de decaimiento más corto, observable con estos montajes. En este sentido, dicho aire es poco radiactivo y el efecto del ambiente juega un papel importante, por lo cual también fue medido. Las tablas con los datos obtenidos son XVII y XVIII.

Medida	Ambiente
1	12
2	17
3	19
4	26
\bar{c}	18.5
σ_c	4.3

TABLE XVII. Radiación ambiente (Tiempo de decaimiento)

Tiempo	c	σ_c
60	60	7.75
120	43	6.56
180	32	5.66
240	27	5.20

TABLE XVIII. Decaimiento de radiación del aire radiactivo

En estos casos se puede apreciar que claramente los conteos del aire radiactivo disminuían con el tiempo que pasaba. Ahora, la ley de decaimiento, dada por la ecuación 7 nos permite obtener un ajuste exponencial teniendo en cuenta que se tiene que restar la radiación del ambiente. Dicho ajuste se encuentra en la figura 12.

$$I(t) = I_0 e^{\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

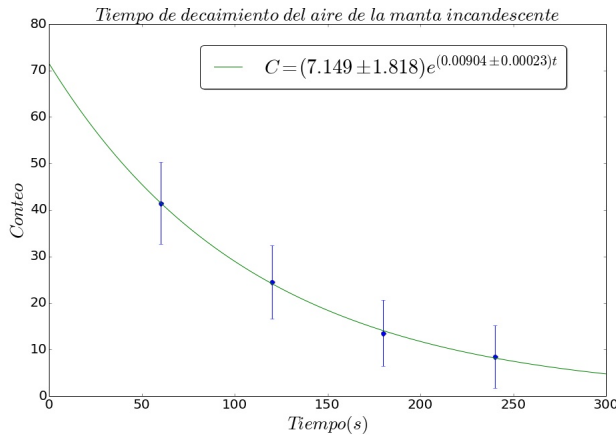


FIG. 12. Tiempo de decaimiento del aire que rodea una manta incandescente

De esta gráfica se puede notar que el ajuste es muy preciso y arroja un tiempo de decaimiento de $0.00904 \pm 0.00023s^{-1}$, lo cual, en otras palabras nos dice que el aire que rodea la manta tiene un tiempo de decaimiento de 110 segundos, justamente observable en este experimento. A pesar de la propagación de error por la medida del ambiente y la propia medida del aire radiactivo, el error relativo de este ajuste fue de aproximadamente 2.5%, el error relativo usual asociado a este montaje.

IV. CONCLUSIONES

Una de las conclusiones más importantes de este experimento, la cual estuvimos utilizando durante todo el análisis numérico, fue la definición de la distribución de probabilidad que rige los decaimientos radiactivos. Dicha distribución es de Poisson y esto nos da el poder para deducir valores de varianza sin tener muestras estadísticas significativamente grandes.

Además de esto, verificamos que la radiación ionizante se compone de los 3 tipos α , β y γ , los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su poder de penetración. De estos tipos de radiación descubrimos que los rayos β son cargados con masa pequeña y que los rayos γ no tienen carga. Sobre los rayos α no hicimos experimentos explícitos con campos magnéticos, pero pudimos verificar que estos, a comparación de los rayos β , no se ven afectados por campos magnéticos pequeños debido a su gran masa.

Descubrimos que algunas sales que son en principio no radiantes, tienen trazas de isótopos radiactivos que hacen que emitan radiación ionizante detectable con los montajes propuestos.

Pudimos verificar además, con alrededor de 2% de precisión, que la intensidad de radiación disminuía como el inverso de la distancia de la fuente al cuadrado y como una ley exponencial al penetrar cierta distancia en un material absorbente.

Los errores obtenidos fueron muy similares porque debido a la propagación de error de las medidas tomadas. Dicho error dependía del tamaño del conteo realizado y debido a que en muchos experimentos se usó el Ra-226, dichos conteos eran muy similares.

En general, a pesar de la estocasticidad natural de cada experimento, se pudieron obtener resultados concretos con muy buena exactitud.

-
- [1] *Physical Measurement Laboratory* <http://www.nist.gov/pml/index.cfm>.
- [2] Serway, A; Moses, C; Moyer, C *Modern Physics* 3rd edition Brooks Cole Pub Co 2004
- [3] Fiebach, Rudolf. *Student Experiments Physics. Radioactivity*.