

# Caracterización de fuentes radioactivas

Patricio Montaron  
patriciomontaron@gmail.com

Facundo Sanchez  
flsanchez94@gmail.com

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

30 de Octubre de 2015

## Resumen

*Se experimentó con fuentes radioactivas gamma de  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{207}\text{Bi}$  y un detector de NaI(Tl) con el objetivo de realizar una caracterización de las mismas, comprobar como cambia la detección en función de la distancia entre la fuente y el detector, y en función de blindajes de distintos materiales. En un primer experimento se realizó un histograma de detección de fotones en distintas ventanas de tiempo, para así obtener su valor medio de cuentas y compararlo con la distribución correspondiente. Para un segundo experimento se propuso ver como varía esta cantidad de cuentas con la distancia y ajustar por un modelo teórico dado, en el cual no se obtuvo una concordancia. Por último, se propusieron blindajes de plomo, cobre y acrílico de distintos espesores y se observó la variación de cantidad de cuentas en función del espesor. Se obtuvieron los valores de los coeficientes de atenuación de los distintos materiales y se los comparó con valores tabulados, sin resultados satisfactorios. Se corroboró la ley de Beer-Lambert.*

## 1. Introducción

En este trabajo se estudió el decaimiento radioactivo de distintas fuentes midiendo energías de fotones  $\gamma$  incidentes. Luego, se caracterizó como cambia la cantidad de fotones que detecta un fotomultiplicador en función de la distancia, y por último, para una distancia fija, cuantos fotones atraviesan distintos blindajes.

### 1.1. Caracterización de la actividad radioactiva

El decaimiento individual de un núcleo o átomo es un proceso estocástico. En particular, la emisión de fotones producida debido a la transición de niveles de energía se observa en tiempos y direcciones no predecibles, por lo que determinaciones sucesivas del número de fotones detectados, o cuentas, en un dado intervalo de tiempo no darán exactamente el mismo resultado. Sin embargo, se puede conocer el valor medio del número de cuentas en un dado intervalo de tiempo ( $\langle n \rangle$ ), ya que los valores obtenidos estarán distribuidos alrededor del mismo, obedeciendo la distribución de probabilidad de Poisson:

$$P_\lambda(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}. \quad (1)$$

En particular, el valor medio de la distribución es  $\lambda$ , y este se corresponde con  $\langle n \rangle$ .<sup>[1]</sup>

### 1.2. Número de fotones en función de la distancia al detector

Otra relación interesante para estudiar es ver como varía  $\langle n \rangle$  con la distancia entre la fuente y el detector. Supongamos que se tiene una fuente de luz que emite fotones con una determinada tasa de  $n_0$  fotones por unidad de tiempo. Si asumimos que no hay direcciones privilegiadas para la emisión se sigue que, dado un casquete esférico de radio  $r_s$  que rodea la fuente, la intensidad  $I_0$  que lo atraviesa va a ser <sup>[2]</sup>

$$I_0 = \frac{n_0}{4\pi r_s^2}. \quad (2)$$

Para un radioisótopo cuya vida media es mucho más larga que los intervalos de tiempo en

los que se esta midiendo, medir la cantidad de cuentas en un intervalo de tiempo es sinónimo de medir la actividad de la fuente. De esta manera, se observa la relación

$$\frac{N}{T} = A_0 \frac{a_d}{4\pi r_s^2} \epsilon, \quad (3)$$

donde  $N$  es el número de cuentas en un intervalo de tiempo  $T$ ,  $A_0$  es la actividad de la fuente,  $a_d$  el área efectiva del detector,  $\epsilon$  la eficiencia del detector para fotones  $\gamma$ , y  $r_s$  la distancia de la fuente al detector.<sup>[2]</sup>

### 1.3. Número de fotones que llegan al detector a través de distintos blindajes

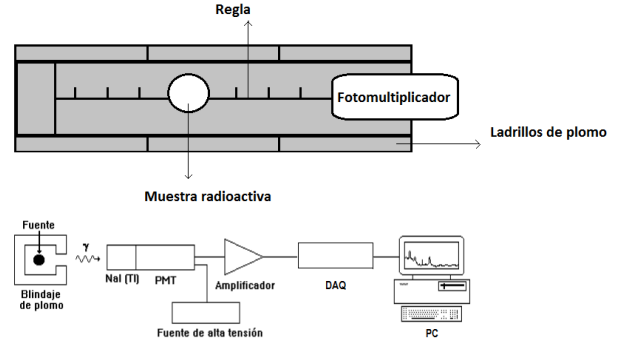
Por último, se propuso observar la variación de la cantidad de fotones de la fuente que llegan al detector al colocar una muestra de distintos materiales entre ambos. Los rayos gamma, a diferencia de los alfa y beta, pueden penetrar mejor a través de los materiales debido a su alta energía y su neutralidad eléctrica. Los fotones gamma, pueden sin embargo, ser atenuados al atravesar un material debido a distintos fenómenos. Estos fenómenos son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares. La atenuación de fotones  $\gamma$  al atravesar un material, se rige por la ley de Beer-Lambert:

$$N(t) = N_0(t)e^{-\mu x}, \quad (4)$$

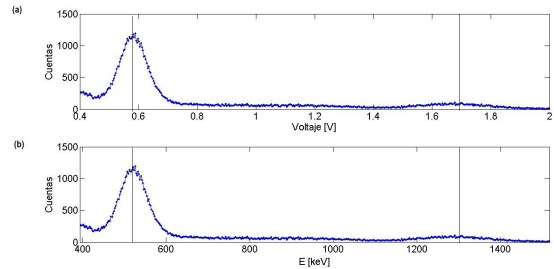
donde  $N$  es el número de fotones por unidad de tiempo que no son atenuados, de una cantidad inicial  $N_0$  también por unidad de tiempo que no fue atenuada, al atravesar una distancia  $x$  de un material con coeficiente de atenuación  $\mu$ . Este coeficiente depende de la energía.<sup>[3]</sup>

## 2. Procedimiento experimental

Para la realización de los 3 experimentos, el arreglo experimental utilizado fue el dado por la figura 1. Se utilizó un centellador NaI(Tl) alimentado a una fuente de alta tensión HV



**Figura 1:** Arreglo experimental utilizado en las dos primeras experiencias. En la tercera se agregó un blindaje entre la muestra y el detector.



**Figura 2:** En las dos figuras se muestran los datos para una muestra de  $^{22}\text{Na}$ . En (a) se tiene cuentas en función de las tensiones, mientras que en la (b) se muestra en función de la energía.

Power Supply 3002D cuyo voltaje se fijó en  $V_{\text{centellador}} = 1.43\text{kV}$ . Debido a que la señal del centellador tiene que ser amplificada para poder realizar un análisis, se utilizó un amplificador Canberra 2022, con parámetros ajustables para el acondicionamiento apropiado de la señal a medir. En particular se utilizó un Shaping Time de  $8\ \mu\text{seg.}$ , un Coarse Gain de  $1K$  y un Fine Gain de  $590$ . Con estos parámetros se podían identificar de manera correcta los picos provenientes del centellador. La adquisición de estos datos se realizó a través de una placa National Instruments DAQ 6210, controlada por un algoritmo realizado en *MATLAB* mediante el cual se almacenan tanto el voltaje como la ubicación temporal de los picos detectados en un intervalo de tiempo programable. En cuantos a fuentes radioactivas, se utilizaron fuentes de  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,

$^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{207}\text{Bi}$ .

Como uno de los objetivos de estos trabajos es obtener los espectros de energía de cada una de las muestras, y el fotomultiplicador convierte la llegada de un fotón a una señal eléctrica, es necesario encontrar la relación de voltaje a energía. Para ello se realizó una calibración midiendo la cantidad de cuentas en función del voltaje, en un intervalo de tiempo dado, para cada una de las muestras y se identificaron las tensiones correspondientes a cada fotopico. En la figura 2 se puede observar lo obtenido para una muestra de  $^{22}\text{Na}$ . Luego se asoció, a ese valor de voltaje del fotopico, el valor de energía correspondiente que se puede encontrar en la tabla [4]. Con estos valores, se procedió a realizar un ajuste de voltaje en función de energía obteniendo la relación:

$$E(x) = 702.7 \frac{keV}{V} * x + 112.2keV, \quad (5)$$

donde  $E$  es la energía en  $keV$   $x$  es el voltaje medido en  $Volts$ .

### 2.1. Caracterización de la actividad radioactiva

Una vez realizada la calibración, se fueron colocando las distintas muestras radioactivas y midiendo los voltajes proporcionados por los fotones y sus localizaciones para un intervalo de tiempo. Teniendo en mente que se quiere conocer el valor medio de las cuentas, se subdividió el intervalo en ventanas de tiempo más pequeñas y se realizó un histograma de cantidad de cuentas totales por ventana de tiempo. Con el fin de distinguir señal de ruido, se fijó, para la realización de los histogramas una tensión de umbral para cada fuente. Luego, se calculó el valor medio del histograma para cada muestra, obteniendo así  $\langle n \rangle$ . Proponiendo este valor como el  $\lambda$  dado en la distribución de Poisson (ec. 1) se compararon los resultados obtenidos con la distribución teórica. Comparando los  $\langle n \rangle$  de cada muestra entre ellos, se observó que la fuente de Bismuto ( $^{207}\text{Bi}$ ) es la fuente más activa. Teniendo en cuenta que para las dos experiencias que siguen sólo nos interesa ver como varía el número de fotones que llegan al detector en distintas con-

diciones, no resultará necesario realizar las experiencias para cada muestra, sino que se eligió la de  $^{207}\text{Bi}$  por ser la que más fotones emite.

### 2.2. Número de fotones en función de la distancia al detector

En esta sección se realizaron mediciones para la muestra de  $^{207}\text{Bi}$  en función de la distancia al foto multiplicador. El método con el cual se midió fue el mismo, se tomó un intervalo de tiempo para la medición y se registraron los valores de voltaje y localización de todos los fotones. Nuevamente, se dividió el intervalo en ventanas de tiempo y se realizó un histograma. Una vez hecho esto, se halló  $\langle n \rangle$  para cada distancia y se propuso ajustar por el modelo dado por la ecuación (3).

### 2.3. Número de fotones que llegan al detector a través de distintos blindajes.

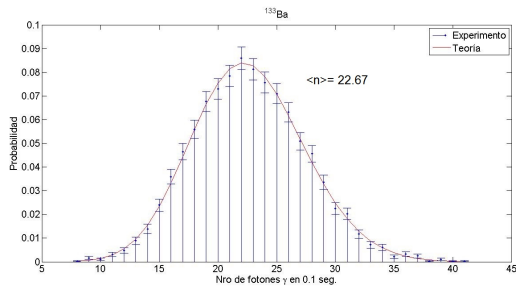
Por último se realizó la medición de cantidad de fotones que llegan al detector luego de haber atravesado algún material. Para esta experiencia se utilizaron como blindaje placas de distintos espesores de acrílico, plomo y cobre. En cuanto a las mediciones, se realizó un histograma donde, para cada ventana de tiempo, se contaron sólo aquellos fotones correspondientes a un fotopico específico, ya que el coeficiente de absorción de un material es una función de la energía. Una vez obtenidas las cuentas por ventana de tiempo para cada blindaje, se propuso un ajuste según el modelo dado por la ec. 4 para obtener el  $\mu$  del material. Finalmente, se compararon los valores obtenidos con valores tabulados para los distintos materiales.

## 3. Resultados y Análisis

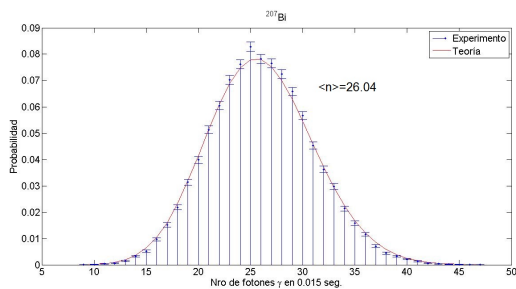
### 3.1. Caracterización de la actividad radioactiva

De los datos obtenidos para cada muestra, se realizó un histograma de cantidad de cuentas en función de la ventana de tiempo elegida y se lo comparó con la distribución de Poisson

correspondiente (ec. 1). Los mismos se muestran a continuación en las figuras 3 - 7.

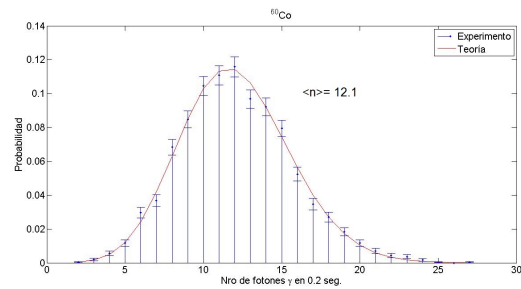


**Figura 3:** Histograma para una muestra de  $^{133}\text{Ba}$ .  $\chi_{33}^2 = 23.87$ . Se observa la teoría en línea continua mientras que los puntos representan las mediciones.

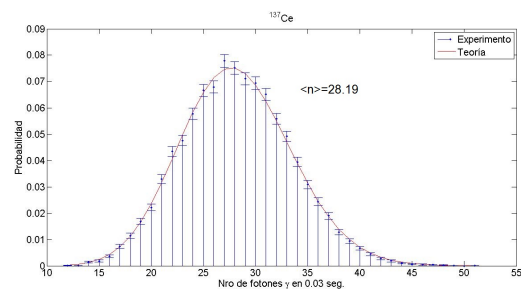


**Figura 4:** Histograma para una muestra de  $^{207}\text{Bi}$ .  $\chi_{38}^2 = 84.30$ . Se observa la teoría en línea continua mientras que los puntos representan las mediciones.

Si sólo se observara el valor  $\chi^2$  obtenido para cada muestra se podría concluir que los datos no se correlacionan con la teoría excepto en el caso del cobalto. Sin embargo, mirando los gráficos se puede ver que la teoría y los datos son similares. Si se observan los valores medios obtenidos, y teniendo en cuenta las ventanas de tiempo utilizadas para la realización de cada histograma, se puede ver que la fuente más activa es la de bismuto, con un valor de  $\langle n \rangle = 26.04$  para una ventana de tiempo de  $15\text{ms}$ . Debido a este valor se eligió la fuente de bismuto para realizar las siguientes experiencias.



**Figura 5:** Histograma para una muestra de  $^{60}\text{Co}$ .  $\chi_{25}^2 = 21.93$ . Se observa la teoría en línea continua mientras que los puntos representan las mediciones.



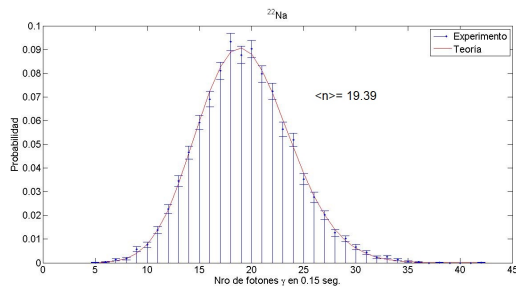
**Figura 6:** Histograma para una muestra de  $^{137}\text{Cs}$ .  $\chi_{39}^2 = 72.63$ . Se observa la teoría en línea continua mientras que los puntos representan las mediciones.

### 3.2. Número de fotones en función de la distancia al detector

Para cada distancia se realizó un histograma con una tensión de umbral de  $0.5\text{V}$  y ventanas de tiempo de  $30\text{ms}$ . Si se extrae de cada histograma el valor medio de cuentas y se lo grafica en función de la distancia al fotomultiplicador, se obtiene la figura 8. Se quiso corroborar la ecuación 3, por lo que se propuso un ajuste por el modelo

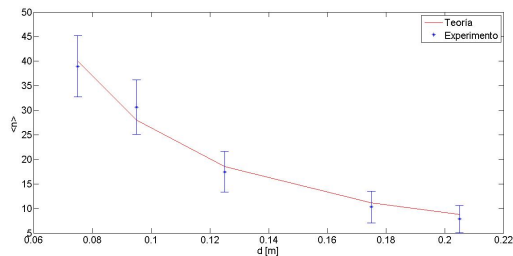
$$y = ax^b, \quad (6)$$

y se obtuvo un valor de  $a = (0.81 \pm 0.95)$  y un valor de  $b = (-1.504 \pm 0.477)$ . Si se compara con la ecuación 3 se observa que no se obtuvo la relación esperada con la distancia. Sin embargo, el intervalo de error de  $b$ , obtenido por el ajuste, se encuentra cerca de contener al exponente



**Figura 7:** Histograma para una muestra de  $^{22}\text{Na}$ .  $\chi^2_{37} = 21.49$ . Se observa la teoría en línea continua mientras que los puntos representan las mediciones.

esperado.

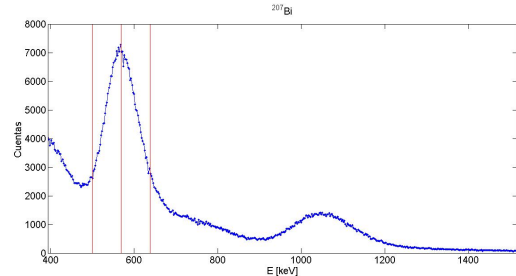


**Figura 8:** Gráfico de número de cuentas promedio por ventana de tiempo en función de la distancia al fotomultiplicador. En línea continua se muestra el ajuste teórico mientras que con puntos se observan los datos obtenidos.

### 3.3. Número de fotones que llegan al detector a través de distintos blindajes.

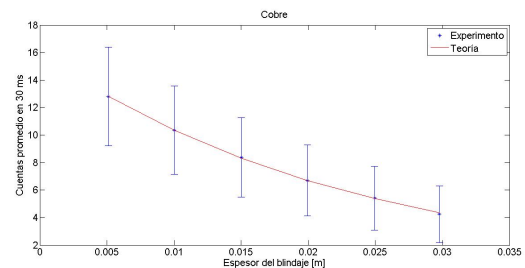
Finalmente, se propone ver el efecto de distintos blindajes para una fuente de bismuto a una distancia de  $7\text{ cm}$  del detector. Se utilizaron placas de distintos espesores de plomo, cobre y acrílico. Si tenemos en cuenta que el coeficiente  $\mu$  de la ecuación 4 depende de la energía, se propone entonces realizar el histograma con las cuentas provenientes de fotones de una única energía por ventana de tiempo. La elección de que energía medir se basa en que si observamos el espectro del bismuto (figura 9), el fotopico correspondiente a  $(569 \pm 69)\text{ keV}$  es el que pre-

senta más cantidad de cuentas por ventana de tiempo. Una vez fijado este umbral, se realizaron los histogramas de cuentas de fotones correspondientes a ese rango de energías en ventanas de tiempo de  $30\text{ ms}$ , para cada material.



**Figura 9:** Espectro de energías obtenido para el bismuto. En la región marcada se muestra el umbral que delimita el fotopico centrado en  $569\text{ keV}$ . Para delimitar este umbral se ajustó por una gaussiana el pico y se considero su valor esperado como valor central y desvió estándar para valores extremos del intervalo

En las figuras 10 - 12 se pueden observar el numero medio de cuentas en función del espesor del blindaje, para cada material.

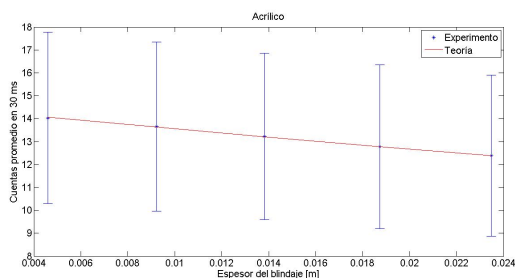


**Figura 10:** Datos experimentales de número medio de cuentas en función de espesor del blindaje y su correspondiente ajuste para placas de cobre

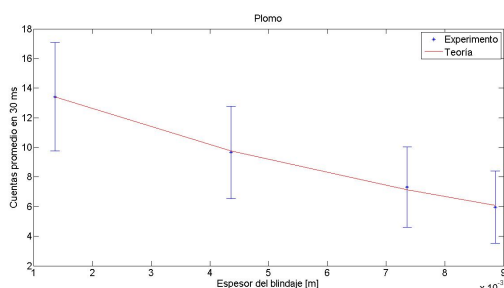
Siguiendo el modelo teórico propuesto por la ec. 4, se propuso como ajuste un modelo:

$$y = ae^{-xb}, \quad (7)$$

donde el parámetro  $b$  del ajuste corresponde a coeficiente de atenuación  $\mu$ . Entonces, de los



**Figura 11:** Datos experimentales de número medio de cuentas en función de espesor del blindaje y su correspondiente ajuste para placas de acrílico



**Figura 12:** Datos experimentales de número medio de cuentas en función de espesor del blindaje y su correspondiente ajuste para placas de plomo

ajustes de las figuras 10 - 12, se puede extraer el  $\mu$  de cada material. Para el cobre, se obtuvo  $\mu_{cobre}^{exp} = (43.79 \pm 1.13) m^{-1}$ , mientras que en el valor tabulado<sup>[5]</sup> se encuentra en el intervalo  $\mu_{cobre} = (60 - 70.29) m^{-1}$ . Para el rango de energías que se propuso, no se obtuvo una concordancia. Por otro lado, el ajuste del plomo resultó  $\mu_{plomo}^{exp} = (105.2 \pm 14.46) m^{-1}$ , mientras que su valor tabulado<sup>[6]</sup> se encuentra en el intervalo  $\mu_{plomo} = (145 - 188.5) m^{-1}$ . Para el intervalo de energías que se está considerando, se observa que no se obtuvo una corroboración. En cuanto al blindaje de acrílico, se halló que  $\mu_{acrílico}^{exp} = (6.72 \pm 0.38) m^{-1}$ . Debido a que no se encontraron valores tabulados para este material, no se realizó ninguna comparación.

## 4. Conclusiones

Para el primer experimento, se logró caracterizar las distintas fuentes radioactivas en función de la cantidad de cuentas por ventana de tiempo, con el fin de poder clasificarlas según su actividad. Se encontró que la fuente más activa corresponde al bismuto mientras que la fuente menos activa es la fuente de cobalto. Cada uno de los histogramas obtenidos para cada fuente se comparó con su correspondiente distribución de Poisson y se utilizó el criterio  $\chi^2$  para corroborar la comparación. Si bien el criterio no fue satisfactorio (salvo en el caso de la fuente de cobalto), se puede observar a partir de los gráficos dados por las figuras 3 - 7 una gran similitud entre los datos y el modelo de Poisson. Creemos que utilizando algún otro criterio estadístico para realizar la comparación se pueden obtener mejores resultados. En lo referente al segundo experimento, se observó efectivamente como la cantidad de cuentas por ventana de tiempo disminuye con la distancia, pero sin embargo, no se pudo recuperar el exponente dado por la ecuación 3. No sabemos porque el exponente obtenido es distinto al dado por la teoría, pero se recalca la cercanía alcanzada al tener en cuenta la incertidumbre. Por último, en el tercer experimento se pudo corroborar la ley de Beer-Lambert (ec. 4) ya que se obtuvo un comportamiento exponencial decreciente entre el número de cuentas de un valor de energía y el espesor del blindaje. Los coeficientes de atenuación  $\mu$  obtenidos no se corresponden con los tabulados. Creemos que esta disgresión puede ser debida a que las tablas que se encontraron son de los coeficientes de elementos puros, y nuestros blindajes no necesariamente lo son. Para corroborar esta hipótesis es necesario realizar un análisis químico de los blindajes utilizados.

## 5. Referencias

- [1] [http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5\\_1er2011/Decaimiento.pdf](http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/Decaimiento.pdf)
- [2] <http://www.ortec-online.com/download/Geiger-Counting.pdf>

[3] Blindajes y Beer-Lambert: <http://www.physics.ryerson.ca/sites/default/files/u11/exp/exppcs352/LAB%203%20-%20Linear%20Absorption%20Coefficient%20of%20Pb.pdf>

Tabla de energías de radioisótopos:

[4] <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>

Tabla con valores de  $\mu$  para el cobre:

[5] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z29.html>

Tabla con valores de  $\mu$  para el plomo:

[6] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z82.html>