

Naturaleza estadística del decaimiento radiactivo

Pablo Martin Olivar. Carlos Alberto Prado.

Laboratorio 5. Departamento de Física.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- 2º cuatrimestre de 2015 -

Resumen

Se realizaron estudios de los decaimientos radiactivos de distintas muestras. Utilizando un detector de radiación gamma por centelleo y un analizador multicanal se recogieron los datos y se analizaron con un programa hecho en Matlab. Se hizo un histograma de los datos y se observó que la cantidad de cuentas sigue una distribución de Poisson. Para cada muestra se determinaron las posiciones de los máximos de energía y se compararon con los valores tabulados.

(I) Introducción

La radiactividad es un fenómeno por el cual los núcleos de algunos elementos químicos, emiten radiación. Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas, en forma de rayos X o rayos gamma, o bien corpusculares, como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras. En resumen, es un fenómeno que ocurre en los núcleos de ciertos elementos, inestables, que son capaces de transformarse, o decaer, espontáneamente, en núcleos atómicos de otros elementos más estables. En las desintegraciones radiactivas se tienen varios tipos de radiación: alfa, beta, gamma y neutrones libres.

La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables", es decir, que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que, para alcanzar su estado fundamental, deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo rayos X) o de sus nucleones (rayo gamma) o variando el isótopo (al emitir desde el núcleo electrones, positrones, neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el uranio que, con el transcurrir de los siglos, acaba convirtiéndose en plomo.

Nosotros estudiaremos decaimientos en los núcleos, que se manifiestan en forma de radiación gamma o fotones gamma. El proceso de emisión de los fotones es estocástico; se produce en forma aleatoria, siendo imposible de predecir el tiempo y la dirección de la emisión a un nivel microscópico. Sin embargo, para una muestra macroscópica (10^{12} átomos) se puede determinar el número promedio de decaimientos en una dada dirección.

Si se conoce la función de distribución de un sistema, se puede conocer todos los momentos de la misma, y viceversa.

La distribución de Poisson

Es una distribución de probabilidad discreta. Los valores posibles son números naturales. La probabilidad de que la variable aleatoria tome el valor n está dada por la función de distribución:

$$P_{\lambda}(n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}, n \in \mathbb{N}$$

La media y varianza de esta distribución son λ . La probabilidad es máxima para $n = \lambda$.

A modo de ejemplo, a continuación se muestra un ejemplo de dicha distribución para un valor del parámetro λ de 4.

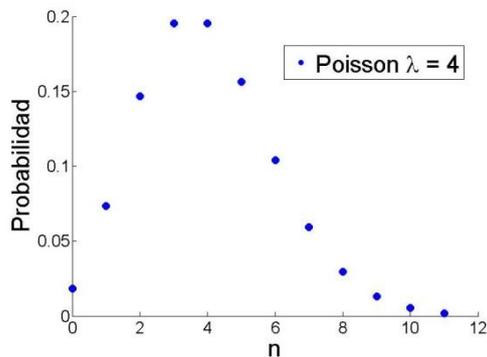


Figura 1: Distribución de Poisson con $\lambda=4$.

Efecto Compton

Cuando un fotón interactúa con un electrón libre (o cuasi-libre, donde el electrón tiene una energía de ligadura al átomo), el estado luego de la interacción es tal que la energía y el momento se conservan.

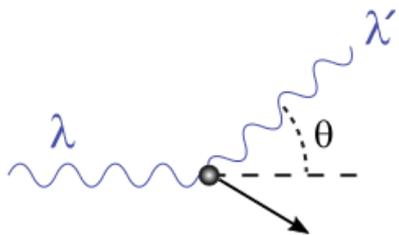


Figura 2: Diagrama de la dispersión de Compton.

Sea P_e y T el momento y la energía cinética del electrón luego de la interacción, E_γ y $E_\gamma'(\theta)$ las energías del fotón antes y después de la interacción. El fotón sale en una dirección que forma un ángulo θ respecto de la dirección de incidencia. Para el caso en que $\theta=180^\circ$, se cumple que

$$cP_e = 2E_\gamma - T$$

Usando la relación entre energía y momento clásicos, se obtiene

$$m_{nr} c^2 = \frac{(2E_\gamma - T)^2}{2T}$$

donde m_{nr} es la masa no relativista del electrón. Esta última ecuación relaciona la masa no relativista del electrón y la energía cinética máxima de los electrones después de la

interacción. [1] La expresión relativista entre el momento y la energía cinética es

$$m_e c^2 = \frac{2E_\gamma(E_\gamma - T)}{T}$$

(II) Experimental

Para el desarrollo del experimento usó como detector de radiación gamma un centellador de yoduro de sodio y un fotomultiplicador, conectados a una fuente de alta tensión. Las distintas muestras se colocaron una a una al lado del detector, y todo el conjunto se lo cubrió con lingotes de plomo para proteger el exterior de la radiación. La salida del detector se la conectó a un "MultiChannelScaling" (MCS), el cual puede realizar un número grande de mediciones consecutivas. Con el MCS se pudieron controlar variables como la amplificación de la señal.

Se utilizó una placa de adquisición de datos "National Instruments USB-6210" para adquirir los datos.

Para cada muestra se tomaron mediciones durante un tiempo que varió según la muestra. Las muestras analizadas fueron: ^{133}Ba , ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{22}Na . Con la ayuda de un programa hecho en Matlab se recolectaron los datos de las mediciones para cada muestra, obteniendo gráficos como el que se muestra en la Figura 3.

(III) Resultados

A partir de la medición del ^{137}Cs , se realizó un histograma y se pudo ver que la distribución de las cuentas coincide con la distribución de Poisson. En la Figura 3 se muestra un gráfico de dicho histograma.

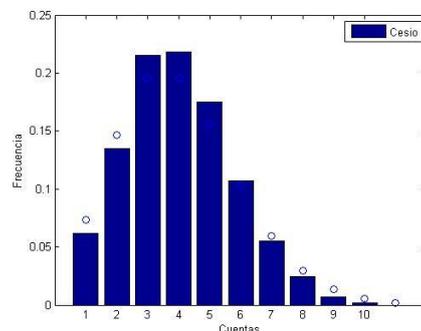


Figura 3: Histograma normalizado del número de cuentas para el cesio. Los círculos corresponden a la distribución de Poisson con $\lambda=4$.

Se puede ver que la distribución obtenida concuerda con la distribución de Poisson. Es

decir que el proceso radiactivo es un proceso de Poisson. Para poder hacer este tipo de histogramas, a partir de la cantidad de cuentas en cada medición en función del tiempo, se dividió el intervalo temporal y se contó la cantidad de picos en cada uno de ellos. Con ayuda de un programa hecho en Matlab se pudo obtener el histograma normalizado.

Se analizaron los datos de 5 fuentes radiactivas, y se obtuvieron histogramas correspondientes al voltaje medido por el RACK para cada fuente. En la Figura 4 se muestra el gráfico correspondiente al ^{137}Cs .

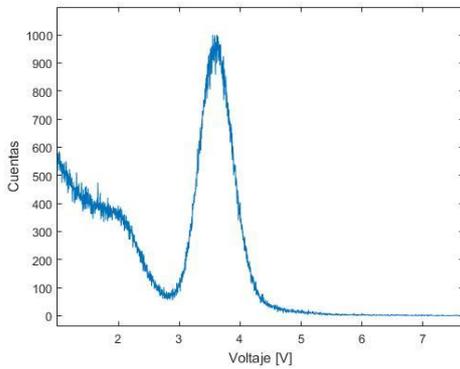


Figura 4: Espectro del ^{137}Cs que muestra cantidad de cuentas para cada voltaje.

Para cada pico de voltaje (asociados a los fotopicos de radiación de las fuentes), se ajustó a una función gaussiana para hallar el valor numérico de dicho pico, como se muestra en la figura 5.

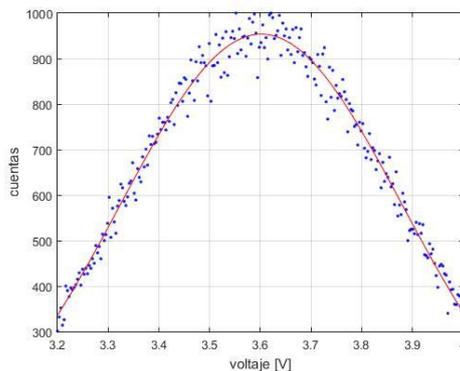


Figura 5: Datos cercanos al pico de voltaje para el ^{137}Cs , con el ajuste gaussiano.

Se compararon los voltajes correspondientes a 5 picos provenientes de 4 fuentes distintas (^{22}Na , ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{133}Ba) con los fotopicos tabulados[3],[4] y se ajustaron los datos a una función lineal (Figura 6).

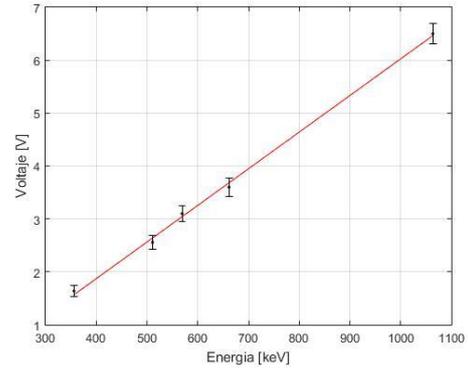


Figura 6: Valores de energía de los fotopicos vs valores de los picos de voltaje, con ajuste lineal.

Como errores se utilizaron las dispersiones de las gaussianas de cada pico, y el error del valor medio propio del ajuste, ya que este proceso de medición es estocástico y requiere un error del tipo estadístico.

Con los datos de la pendiente y la ordenada al origen obtenidos del ajuste, se calibraron las energías a partir de los voltajes en los histogramas. Se aplicó esta calibración también a los datos del cobalto 60, los cuales no usamos para realizar el ajuste, y obtuvimos el espectro de energías que se muestra en la figura 7.

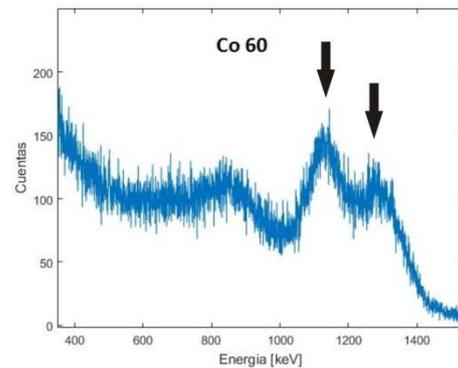


Figura 7: Espectro de energías para el Co 60 con un tiempo de medición de 1 hora. Se observan dos fotopicos entre 1000 y 1400 keV.

Se ajustaron los datos cercanos a los dos fotopicos por funciones gaussianas, y se obtuvieron valores energéticos de (1130 ± 60) keV y (1280 ± 70) keV para los fotopicos.

A continuación en las figuras 8, 9, 10 y 11 se muestran los espectros de energías para las otras 4 fuentes radiactivas utilizadas:

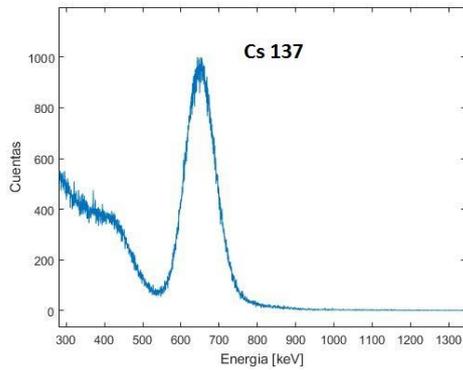


Figura 8: Espectro de energías para el ^{137}Cs con un tiempo de medición de 3 minutos.

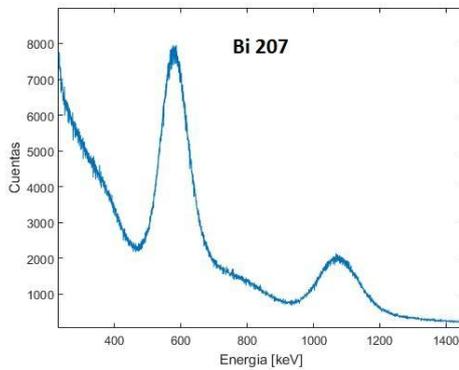


Figura 9: Espectro de energías para el ^{207}Bi con un tiempo de medición de 10 minutos.

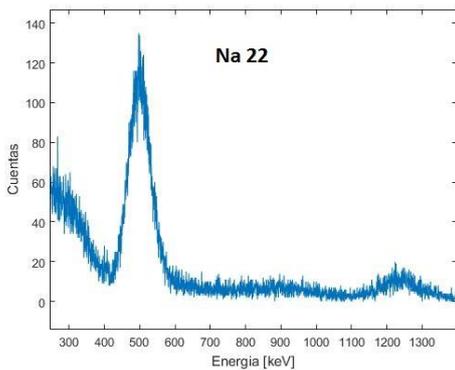


Figura 10: Espectro de energías para el ^{22}Na con un tiempo de medición de 20 minutos

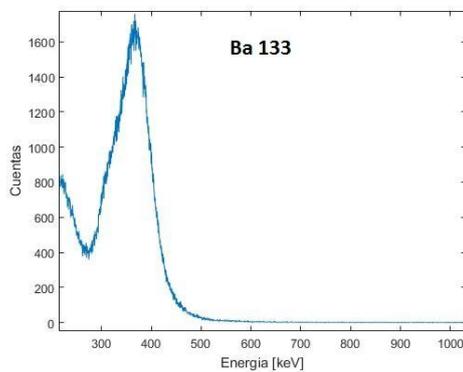


Figura 11: Espectro de energías para el ^{133}Ba con un tiempo de medición de 3 minutos.

(IV) Conclusiones

Se pudo ver que la radiación gamma de las muestras sigue una ley de probabilidades dada por la distribución de Poisson, como era de esperarse. Se observó que el cobalto es la muestra con menos actividad, mientras que el cesio es la que tiene mayor actividad (dentro de las muestras disponibles en el laboratorio).

Se lograron obtener las energías de los fotopicos para el cobalto, que fueron de (1130 ± 60) keV y (1280 ± 70) keV. Comparándolas con los valores tabulados de 1173 keV y 1332 keV [3] respectivamente, se observa que estos se solapan con los valores medidos.

(V) Referencias

[1] “Compton Scattering, the electron mass, and relativity: A laboratory experiment”, P.L. Jolivette and N Rouze, Am. J. Phys. 62, 266 (1994)

[2]

[3]http://www.ib.edu.ar/FisicaExperimental/images/8/89/IPFN2011_Lab01_G2.pdf

[4]http://www.ib.edu.ar/FisicaExperimental/images/a/a1/IPFN2012_Lab01_G3.pdf