Actividad VI.61– Vida media del ^{40}K - Nucleosíntesis

Objetivo

Determinación de vidas medias largas. Medición de tiempos del orden de la vida media del universo y estimación de la época en que ocurrió la nucleosíntesis de los elementos que forman la Tierra. Radiactividad natural. Detectores de radiación gama y sistemas de detección.

Introducción

Nucleosíntesis

Los orígenes del universo y la vida han sido cuestiones que siempre han cautivado a la humanidad. En ese sentido tal vez no sea casual que el primer libro de la Biblia sea justamente el Génesis. A lo largo del tiempo se desarrollaron diversas teorías cosmológicas y cosmogenéticas que intentaron explicar el origen y estado actual del universo. Una de las teorías cosmológicas más antiguas es la del universo estático e infinito[1-4]. Esta es una de las teorías más simple y en consonancia con la teoría newtoniana de la gravitación. Si el universo fuese estático (no se expande ni colapsa) también debería ser infinito, de este modo la fuerza gravitatoria sobre cada región del universo sería en promedio nula y esto prevendría el colapso gravitatorio. También se pensaba que el universo era eterno, o sea que siempre habría existido como ahora, incluyendo los elementos que lo forman. Actualmente sabemos que estas teorías tienen varías objeciones serias. Tal vez la objeción más elemental sea la existencia de la noche (Paradoja de Olbers)[1,2]. Si el universo fuese eterno (siempre existió) e infinito, todos las visuales trazadas desde la Tierra eventualmente encontrarán una estrella, de modo que el cielo de noche debería ser tan brillante como la superficie del sol. ¡Sin embargo sabemos que la noche existe!. Otro modo de entender esta paradoja consiste en calcular la intensidad de radiación que llega a la superficie de la tierra proveniente de las estrellas; recordemos que la intensidad de radiación es la energía radiante que llega a la unidad de área por unidad de tiempo. Para ello supondremos que el universo es infinito y con una densidad *n* de estrellas por unidad de volumen. Cada una de ellas tiene una potencia de emisión promedio de $<P>$. La intensidad *dI* que llega desde todas las estrellas que están en la capa esférica

de radio r y espesor dr, teniendo a la Tierra en el centro de dicha esfera, será:

$$dI = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot n \cdot \frac{< P >}{r^2} \cdot dr \qquad (61.1)$$

Si integramos esta intensidad para todas las capas esféricas desde el mínimo radio r_{min} (asociado a la distancia de las estrellas más cercanas) hasta el radio máximo r_{max}, obtenemos:

$$I = 4 \cdot \pi \cdot n \cdot < P > \cdot \left(r_{max} - r_{min} \right) \qquad (61.2)$$

Si suponemos que el universo es infinito y siempre existió, debemos tomas $r_{max} = \infty$, con lo cual $I \rightarrow \infty$, que es justamente la paradoja de Olbers. Nótese que esta divergencia subsiste para cualquier valor de n y $<P>$. El origen de esta divergencia está asociada a $r_{max} \rightarrow \infty$. ¿Cómo podría solucionarse este problema?. Vemos que si el universo fuese finito en tiempo, es decir si existiera un "horizonte" en tiempo T_{horiz}, tal que las estrellas que "vemos" son sólo aquellas que están dentro la esfera de radio $R_{horiz}=c$. T_{horiz} (c es la velocidad de la luz). Entonces en la expresión (61.2) debemos asociar $r_{max} = R_{horiz}$ y la divergencia quedaría salvada. Es interesante notar que la posible absorción que podrían producir partículas entre la Tierra y las estrellas, que forman el medio interestelar, no resuelve el problema de la divergencia en la intensidad. En un universo eterno, este material interestelar estaría en equilibrio térmico con la radiación que recibe y emitiría tanto como absorbe. De este modo, por las leyes de Kirchhoff, este material interestelar sería tan brillante como las estrellas, lo cual hace que la absorción sea irrelevante y el problema de la divergencia aun subsistiría.

Otra objeción importante de un universo eterno es la existencia de radioactividad natural. Como veremos en este experimento, su existencia puede ser fácilmente comprobada. Además, la radioactividad natural es la causa del calentamiento de la tierra y la fuente de energía de la actividad volcánica y movimientos geológicos terrestres. Su existencia se manifiesta, también, en la presencia de Helio en el interior de la tierra. Este gas se escapa de la atmósfera ya que su velocidad, debida a la agitación térmica, es mayor que la velocidad de escape de la Tierra. El origen del

Helio en el interior de la Tierra es consecuencia del decaimiento alfa (núcleos de He) de los núcleos pertenecientes a las cadenas radiactivas naturales. Si el universo, y por lo tanto los elementos que lo forman, siempre hubiesen existido, los elementos radiactivos ya habrían decaído totalmente y no existiría la radiactividad natural, ni volcanes, ni tierra caliente, etc. La única posibilidad de observar fenómenos radiactivos sería a través de fuentes artificiales. Por lo tanto, la mera observación de la radiación natural, que nos proponemos realizar en este experimento (radiactividad no generada por el hombre) es una evidencia de que los elementos no siempre existieron.

Proyecto 1.- Vida media del ^{40}K.

Equipamiento recomendado: Un detector de radiación gama asociado a un sistema de adquisición de datos. 250 g de KCl. Si no dispone de estos equipos puede utilizar los espectros que se describen en la Nota al final.

Uno de los elementos más conspicuos en cuanto a su radiactividad natural es el ^{40}K, que emite una línea (rayo gama) característica de E_γ = 1461 keV. El objeto del presente experimento es justamente medir la vida media de este isótopo (~10^9 años). Su abundancia relativa (a los otros isótopos del K) es de $p(^{40}\text{K})\%$ = 0.012%. El experimento se basa en determinar la actividad *A(t)*, es decir el número de decaimientos por unidad de tiempo, de diversas muestras de KCl de masas conocidas[1,3]. Dado que:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot N(t), \qquad (61.3)$$

donde *N(t)* es el número total de núcleos que decaen, o sea núcleos de ^{40}K y $T_{1/2}$ es la vida media ($\lambda = \ln 2/T_{1/2}$). El número de átomos de ^{40}K se puede determinar a partir de la masa de *KCl*.

$$N(t) = N(^{40}K) = \frac{m_{KCl}}{M_{KCl}} \cdot N_A \cdot p(^{40}K), \qquad (61.4)$$

donde, m_{KCl} es la masa de *KCl*, M_{KCl} es su masa molecular, $p(^{40}\text{K})$ es la proporción de

^{40}K en el potasio natural y N_A es el número de Avogadro.

Vemos que si podemos medir la actividad *A(t)* del ^{40}K en función de la masa de la muestra de KCl (m_{KCl}), se puede en principio determinar el valor de $T_{1/2}$. ¿Por qué no se hace la medición con una sola muestra de masa conocida? La razón de esto es que en las paredes del laboratorio, en la tierra, en nosotros mismos, etc., existe potasio, por lo tanto, si medimos una sola muestra, el resultado de la actividad será la debida a la muestra más la del "fondo", cuya masa ni ubicación podemos precisar. En este experimento podremos verificar esta aseveración sobre la presencia del potasio observando la presencia del rayo gama característico del ^{40}K (E_γ = 1461 KeV.), aún en ausencia de muestras de KCl.

Dispositivo experimental - Espectroscopia de rayos gama

En la Fig. 61.1 se esquematiza un diseño experimental típico para la detección de radiación gama. El mismo constituye un sistema básico de espectroscopia gama. El objetivo de la técnica espectroscópica es la determinación de la energía e intensidad de los fotones incidentes. El detector puede ser un centellador del tipo Yoduro de Sodio (NaI) o bien uno de germanio hiperpuro Ge (HP)[7]. El primero consiste de un cristal centellador inorgánico de NaI dopado con Talio (NaI(Tl)). Al incidir los fotones sobre el mismo, éstos interactúan por varios mecanismos con los átomos del centellador, ver Actividad VI.60. En estas interacciones la energía de los fotones incidentes se invierte en producir una cierta cantidad de fotones ópticos, cuyo número es proporcional a la energía del fotón incidente.

> **Nota:** No aplique tensión al detector ni conecte nada al multicanal de la computadora hasta que un instructor revise su circuito. Tenga precaución con el manejo de las fuentes radioactivas y después de su uso colóquelas en los contenedores de plomo correspondientes. Lea las notas sobre seguridad en el Apéndice J.

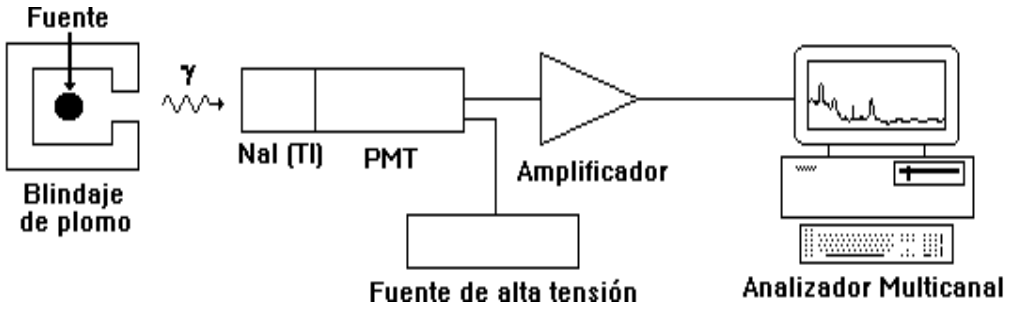

Figura 61.1 Esquema del dispositivo experimental para la obtención de espectros gama de una fuente.

Estos fotones visibles, inciden sobre el fotocátodo de un tubo fotomultiplicador (PMT)[5]. En el fotocátodo, cada fotón visible que incide produce la emisión de electrones por efecto fotoeléctrico. De esta forma la salida del fotomultiplicador entrega un pulso de tensión cuya amplitud es proporcional a la energía del rayo gama original. El amplificador entre el PMT y al analizador multicanal (MCA) amplifica y condiciona los pulsos (le da una forma especial preestablecida adecuada para el buen funcionamiento del MCA).

El multicanal realiza un análisis de la altura del pulso, convirtiendo una señal analógica (tensión) en un número digital equivalente (número de canal). Finalmente un programa de computadora asociado al multicanal realiza un histograma de alturas de los pulsos, que representan la energía de los rayos gamas. Una descripción más detallada de los diversos componentes del dispositivo experimental puede hallarse en la bibliografía.[7]

Desarrollo del experimento y análisis de los espectros

Utilizando el dispositivo experimental esquematizado en la Fig. 61.1 obtendremos los espectros de rayos gama para un conjunto de fuentes conocidas que cubran un rango de energías de fotones que comprendan los rayos gama de interés (E_γ = 1461 KeV). Fuentes tales como: ^{22}Na, ^{60}Co, ^{133}Ba, ^{137}Cs y ^{207}Bi pueden ser adecuadas. Determinando la ubicación de los picos y conociendo las energías de los fotones emitidos por las mismas[7], realizaremos una calibración en energía del sistema de

adquisición utilizado. Esto consiste en realizar un gráfico de la posición de los centroides de los picos (expresado en canales) en función de las energías de los rayos gama emitidos por cada fuente.

Una vez realizada la calibración en energía, definimos la geometría más apropiada para ubicar las muestras. Desde luego, la calibración en eficiencia[3] del detector debe realizarse posicionando las fuentes patrones en los mismos lugares donde se colocarán las muestras. Es importante asegurar que tales posiciones sean lo más reproducibles posible. Realizamos una calibración en eficiencia del detector[5] para la posición geométrica elegida. Para ello debe conocer la actividad absoluta de algunas de las fuentes usadas. Si sabemos la actividad absoluta de la fuente cuando fue calibrada y su vida media, es posible calcular la actividad actual $A_f(t)$. Si el rayo gama de interés es E_γ y la fracción de emisiones de este rayo por cada decaimiento de la fuente es p_γ (p_γ es la intensidad absoluta del rayo gama, en las tablas de la Ref.[6] pueden consultarse estos valores). El número de fotones de este tipo emitidos por la fuente por unidad de tiempo será:

$$N_{emit}(E_\gamma) = p_\gamma \cdot A(t_{actual}) \qquad (61.5)$$

Si el número de estos rayos gama acumulados por el detector en el fotopico del espectro medido por unidad de tiempo es $N_{espectr}(E_\gamma)$, definimos la eficiencia absoluta a la energía E_γ como:

$$\varepsilon_{abs}(E_\gamma) = \frac{N_{espectr}(E_\gamma)}{N_{emit}(E_\gamma)} \qquad (61.6)$$

De no ser posible realizar la determinación de la eficiencia absoluta en forma experimental, podemos consultar en tablas o en la documentación del detector los valores de las eficiencias de fotopico provistas por el fabricante del detector a las energías de interés (E_γ = 1461 keV).

La siguiente es una lista de actividades a desarrollar en este experimento:

- Construya un gráfico de la calibración en energía de espectrómetro gama usado

(energía de los fotones en función del número de canal).

- De ser posible obtenga la calibración en eficiencia del detector (eficiencia en función de la energía de los fotones).
- Una vez calibrado el espectrómetro gama, obtenga espectros sin muestra, de modo de observar la radiación de fondo. Adquiera un espectro de fondo con suficiente estadística como para ver claramente el pico de $E\gamma = 1461$ keV. ¿Qué otro pico de radiación observa en el espectro? (ver Nota al final).
- Estudiar la variación de la actividad en función de la masa de KCl. Se sugiere empezar a medir las muestras de mayor masa y dejar las de menor masa y el fondo para corridas de días completos. Consulte con su instructor para acordar horarios de acceso al laboratorio.
- El objetivo principal de este experimento es determinar la *actividad* y la *actividad específica* (actividad por unidad de masa) como función de la masa de KCl. Construya los siguientes gráficos:

  - ✓ actividad del ^{40}K en función de la masa de la muestra de KCl
  - ✓ actividad específica del ^{40}K en función de la masa de la muestra de KCl

- A partir de estos gráficos determine la vida media del ^{40}K.
- Discuta la posibilidad de obtener una corrección para la absorción de rayos gama en su muestra (autoabsorción).
- Demuestre que la actividad experimentalmente medida, A_{exp}, definida como el número de rayos gamas de energía $E_\gamma = 1461$ keV en el espectro por unidad de tiempo, viene dado por:

$$A_{exp} = \frac{N_\gamma(espectro)}{t(medición)} = \varepsilon_{abs}(E_\gamma)\cdot p_\gamma \cdot \frac{ln\,2}{T_{1/2}} \cdot q(^{40}K)\cdot \frac{N_A}{M_{KCl}} \cdot m_{KCl} \qquad (61.7)$$

donde $\varepsilon_{abs}(E\gamma)$ el la eficiencia del fotopico absoluta del detector dada por la Ec.(61.6), a la energía en cuestión ($E_\gamma = 1461$ keV); p_γ es la fracción de rayos gamas de 1461 keV emitidos por cada decaimiento del ^{40}K ($P_\gamma = 0.01$); $q(^{40}\text{K}) = 0.00012$ es la fracción de ^{40}K en el potasio natural; m_{KCl} es la masa de la muestra de KCl. Consulte la Ref.[3] para verificar los valores de los parámetros incluidos

en la Ec.(61.7).

- Analice la tabla de isótopos y extraiga todos los isótopos radioactivos naturales y sus vidas medias. A partir de esta información trate de acotar lo mejor posible el momento de la formación de los elementos naturales y la vida del universo. Para ello tenga en cuenta que los elementos deben de haberse formado en una época del orden de la vida media del isótopo de más corta vida media. ¿Puede justificar esta aseveración? Del análisis de los espectros de fondo identifique el origen de la mayor parte de los picos observados. ¿A qué elementos corresponden los mismos? ¿Cómo explica su origen?
- Sabemos que la Tierra no puede retener el Helio, ya que, por su masa, la velocidad térmica de estos átomos es mayor que la velocidad de escape gravitatoria (justifique esta aseveración). Por lo tanto, ¿cuál es el origen del Helio que se obtiene comercialmente y del que se dispone en los laboratorios? Tal vez Ud. sepa que el interior de la Tierra está caliente: ¿Cuál es el origen de este calentamiento? Averigüe lo que más pueda sobre este fenómeno, temperaturas de la Tierra, composición del núcleo y la corteza, etc. ¿Qué conclusiones puede sacar de estos experimentos respecto de la época en que ocurrió la nucleosíntesis de los elementos de la Tierra?[1,2,6]

Bibliografía

1. H. Fraunfelder and E.M. Henley, *Subatomic Physics*,2nd ed. (Prentince Hall, New Jersey, 1991).

2. J. Audouze and S. Vauclair, *An introduction to nuclear astrophysics* (D. Reidel Pub. Co., Holland, 1980).

3. S. Weinberg, *The three first minute* (Basics Books, New York, 1977).

4. J.J. Sanguineti, *El origen del Universo* (Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, 1994).

5. K. Gopal *et al.*, "A laboratory experiment for determining the partial kalf-life of

^{40}K for beta emision," *Am. J. Phys.* 40 , 721 (1972).

6. C.M. Lederer *et al.*, *Table of Isotopes*, 7th ed. (John Wiley & Sons, New York, 1978); Lederer, Hollander y Perlman, *Table of Radioisotopes*, 6th ed. (John Wiley & Sons Inc., New York, 1967). En Internet: la tabla de isótopos se puede consultar en: http://ie.lbl.gov/toi.htm del Lawrence Berkeley Laboratory, CA, USA, y en http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/ y http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/index.asp

7. Glenn F. Knoll, *Radiation detection and measurements*, 2nd ed. (John Wiley & Sons Inc., New York, 1989).

Nota

En los archivos disponibles en la sección de datos experimentales de www.fisicarecreativa.com se pueden encontrar espectros de fondo tomados en la ciudad de Buenos Aires (Argentina) y en Seattle (USA) con un detector de alta resolución. De estos espectros puede tratar de identificar el pico del ^{40}K y picos de otros elementos.