

Decaimientos radiactivos de múltiples elementos

Fundamentos Teóricos

El decaimiento radioactivo es un proceso nuclear intrínseco que implica la transformación espontánea de núcleos atómicos inestables en núcleos más estables a través de la emisión de partículas subatómicas o radiación electromagnética. Este fenómeno es un componente esencial en la física nuclear y la teoría cuántica, y su comprensión es crucial en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. La radiactividad es el proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía mediante la emisión de radiación, como una partícula alfa, partícula beta con neutrino, entre otras posibles partículas. Un material que contiene estos núcleos inestables se considera radiactivo [1].

En el presente documento se explorarán los fundamentos del decaimiento radioactivo, incluyendo los tipos de decaimiento, las leyes que lo gobiernan y los factores que influyen en las tasas de decaimiento. De esta forma se tendrá una visión general sólida de un concepto fundamental en la física moderna y su amplio alcance en la investigación.

La desintegración radioactiva es un proceso estocástico a nivel de átomos individuales. Según la teoría cuántica, es imposible predecir cuándo se desintegrará un átomo en particular, independientemente de cuánto tiempo haya existido el átomo. Sin embargo, para una colección de átomos, la tasa de decaimiento esperado de la colección se caracteriza en términos de su constante de decaimientos o vidas medias medidas. Así, entre los principales tipos de desintegración radioactiva se tienen:

- **Desintegración alfa:** Ocurre cuando el núcleo expulsa una partícula alfa (núcleo de helio). Este es el proceso más común de emisión de nucleones, pero los núcleos altamente excitados pueden expulsar nucleones individuales, o en el caso de desintegración del racimo, núcleos ligeros específicos de otros elementos. ocurre de dos maneras: i) decaimiento beta-negativo, cuando el núcleo emite un electrón y un antineutrino en un proceso que convierte un neutrón en un protón, o (ii) decaimiento beta-positivo, cuando el núcleo emite un positrón y un neutrino en un proceso que convierte un protón en un neutrón. Los núcleos ricos en neutrones altamente excitados, formados como producto de otros tipos de descomposición, ocasionalmente pierden energía por medio de la emisión de neutrones, resultando en un cambio de un isótopo a otro del mismo elemento. El núcleo puede capturar un electrón en órbita, haciendo que un protón se convierta en un neutrón en un proceso llamado captura de electrones. Todos estos procesos resultan en una transmutación nuclear bien definida.
- **Desintegración gamma:** No da lugar a una transmutación nuclear. La energía de un núcleo excitado puede ser emitida como un rayo gamma en un proceso llamado, o esa energía puede perderse cuando el núcleo interactúa con un electrón orbital causando su expulsión del átomo, en un proceso llamado conversión interna.

- **Desintegración beta:** proceso mediante el cual un nucleido inestable emite una partícula beta (un electrón o positrón) para compensar la relación de neutrones y protones del núcleo atómico. Esta desintegración viola la paridad. Cuando esta relación es inestable, algunos neutrones se convierten en protones, o viceversa. Como resultado de este decaimiento, cada neutrón emite una partícula beta y un antineutrino o un neutrino electrónicos. En este tipo de desintegración, la suma del número de neutrones y de protones, o número másico, permanece estable, ya que la cantidad de neutrones disminuye (o aumenta si se trata de una emisión β^+) en una unidad, mientras que la cantidad de protones aumenta (o disminuye) también en una unidad. El resultado del decaimiento beta es un núcleo en que el exceso de neutrones o de protones se ha corregido en dos unidades y por tanto resulta más estable.
- **Fisión nuclear espontánea:** Da como resultado productos que varían, apareciendo como dos o más "fragmentos" del núcleo original con un rango de posibles masas. Ocurre cuando un gran núcleo inestable se divide espontáneamente en dos (u ocasionalmente tres) núcleos hijos más pequeños, y generalmente conduce a la emisión de rayos gamma, neutrones u otras partículas de esos productos.

Tras una leve explicación de los distintos tipos de decaimientos [2], se tiene que la matemática que rige este tipo de procesos está fundamentada, en su estado más simple de decaimiento único, por el decaimiento exponencial, estipulado por la ecuación diferencial de primer orden: [3]

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \implies \Phi(t) \propto \frac{dN}{dt} ;$$

donde Φ representa un flujo de radiación ionizante por unidad de ángulo sólido y N el número de átomos en el tiempo. El signo negativo de la ecuación indica que N decrece conforme el tiempo incrementa. Siendo el resultado de la ecuación diferencial el siguiente:

$$N(t) = \Phi(t) = N_0 e^{-\lambda t} ;$$

donde N_0 es el valor de átomos existentes en el tiempo $t = 0$. Asimismo, se tiene que el número de decaimientos observados en un intervalo de tiempo específico corresponde a una distribución de Poisson, por lo que la probabilidad de N decaimientos está dada por:

$$P(N) = \frac{\bar{N}^N e^{-\bar{N}}}{N!}$$

Ahora, en el caso de cuando existen dos cadenas de decaimiento al mismo tiempo, siendo un nucleóide A decayendo en otro nucleóide B, y luego B decayendo en otro C mediante un segundo proceso; la ecuación previamente analizada no puede aplicarse de forma directa, pero esta puede ser generalizada al caso deseado. De esta forma, se tiene que la ley para el decaimiento de una cadena de dos nucleóides es la siguiente: [4]

$$\frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_A \implies \frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_{A0} e^{-\lambda_A t}$$

Ello utilizando el resultado previo, y teniendo que N_{A0} se refiere al número inicial de átomos de la muestra A. Al resolver la ecuación diferencial ordinaria de primer orden, se obtiene que:

$$N_B = \frac{N_{A0} \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

Sucesivamente, esta ecuación puede ser totalmente generalizada para el caso de múltiples decaimientos radioactivos, obteniendo las ecuaciones de Bateman; pero al no ser un problema relevante para el presente, esto es omitido. Otros de los conceptos relevantes para el estudio de este tipo de fenómenos físicos es el **tiempo de vida media**. Este se define como:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

O en el caso de dos decaimientos:

$$\frac{1}{\tau} = \lambda = \lambda_A + \lambda_B = \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_B}$$

Esta constante de tiempo se refiere al tiempo de vida medio para el decaimiento de los átomos; siendo que cada átomo vive por una cantidad finita de tiempo antes de decaer, por lo que el tiempo de vida medio es la media aritmética de todos los tiempos de vida media del átomo en específico.

Referencias

- [1] Peter Hall y Ben Selinger. “Better estimates of exponential decay parameters”. En: *The Journal of Physical Chemistry* 85.20 (1981), págs. 2941-2946.
- [2] Jörg Enderlein y Rainer Erdmann. “Fast fitting of multi-exponential decay curves”. En: *Optics Communications* 134.1-6 (1997), págs. 371-378.
- [3] Philip Hartman. *Ordinary differential equations*. SIAM, 2002.
- [4] Martin Braun y Martin Golubitsky. *Differential equations and their applications*. Vol. 2. Springer, 1983.