



513335 Geofísica de la Tierra Sólida

Presentación 3

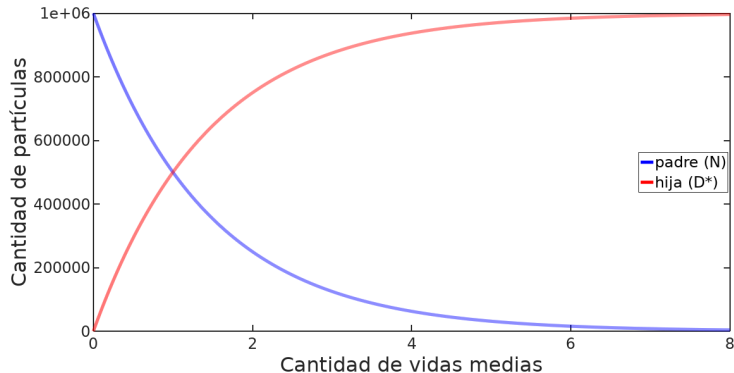
Decaimiento Radiactivo

Versión 1.1



Decaimiento radiactivo

- ▶ Radiactividad permite un mecanismo para el calentamiento largo plazo para la Tierra.
- ▶ La datación radiométrica permite una forma de determinar edades absolutas de rocas.



Tasa de decaimiento y vida media

El principio de decaimiento radiactivo es que en un cierto pequeño periodo de tiempo (dt), la cantidad de partículas que decaen (dN) es proporcional a la cantidad de partículas que existen (N). En una ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Aquí λ se llama la constante de decaimiento . Integrando la ecuación (1):

$$\begin{aligned} \int \frac{dN}{N} &= \int -\lambda dt \\ \ln N &= -\lambda t + \text{cte.} \\ N &= \text{cte.} e^{-\lambda t} \\ N &= N_0 e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (2)$$

Aquí N_0 es la cantidad de partículas N cuando $t = 0$. Para saber de la vida media del sistema, en la ecuación (2) se puede poner $N = \frac{1}{2} N_0$ cuando $t = \tau_{\frac{1}{2}}$ que nos entrega la relación entre vida media ($\tau_{\frac{1}{2}}$) y λ : $\tau_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Decaimiento padre-hija

Las partículas radiactivas padres (N) se decaen a partículas hijas (D^*).

$$D^* = N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

Siempre es útil medir la tasa entre las diferentes partículas radiactivas, en este caso

$$\frac{D^*}{N} = \frac{N_0(1 - e^{-\lambda t})}{N_0 e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t} - 1 \quad (4)$$

La constante de decaimiento, λ , se puede conocer desde experimentos en laboratorio, entonces,

- si la partículas hijas no son radiactivas,
- si $D_0^* = 0$,

⇒ podemos medir la cantidad de N y D^* en la roca para obtener su edad, t .

¿Es razonable suponer que $D_0^* = 0$?

El sistema Rubidio-Estroncio

Este sistema es un ejemplo de datación radiométrico cuando podrían existir partículas hijas al inicio en los minerales. Entonces en este sistema, **no se sabe el valor de D_0^*** . ¿Cómo proceder?

En este caso, **hay que comparar las cantidades de las partículas radiactivas con un isotopo estable para obtener la edad de la roca**. ¿Qué es un isotopo?

El sistema Rb-Sr es útil para calcular la edad de rocas muy antiguas porque la constante de decaimiento λ es muy pequeña: $\lambda_{87} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ año}^{-1}$
 $\Rightarrow \tau_{\frac{1}{2}} = 48.8 \times 10^9 \text{ años}$.



¿Qué tipo de decaimiento es?

¿Qué significan los números asociados con los elementos Rb y Sr?

El sistema Rubidio-Estroncio

Vamos a cambiar la notación aquí, un átomo de rubidio siempre va a tener 37 protones, y un átomo de estroncio siempre va a tener 38 protones, entonces dejamos de escribir estos números, están dados explícitamente por el nombre del elemento.

Entonces, escribimos las ecuaciones para la cantidad de átomos padres (^{87}Rb) e hijas (^{87}Sr), reconociendo que la cantidad inicial de átomos hijas es distinta de cero ($^{87}\text{Sr}_0 \neq 0$). Primero rubidio:

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}_0 e^{-\lambda_{87}t} \Rightarrow ^{87}\text{Rb}_t = ^{87}\text{Rb}_0 e^{-\lambda_{87}t} \quad (6)$$

Luego estroncio, que es la suma de su cantidad inicial y la cantidad de rubidio que haya decaído:

$$\begin{aligned} ^{87}\text{Sr} &= ^{87}\text{Sr}_0 + \left[^{87}\text{Rb}_0 - ^{87}\text{Rb} \right] \\ \Rightarrow ^{87}\text{Sr} &= ^{87}\text{Sr}_0 + ^{87}\text{Rb}_0 (e^{\lambda_{87}t} - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

El sistema Rubidio-Estroncio

En la ecuación (7), los conocidos son λ_{87} y las mediciones de las cantidades de rubidio y estroncio en la roca hoy en día, ^{87}Sr y ^{87}Rb . Pero existen dos desconocidos en esta ecuación, $^{87}\text{Sr}_0$ y t , entonces no podemos calcular la edad de la roca todavía.

La solución es medir en la roca la cantidad de ^{86}Sr , un isotopo estable del estroncio ($\Rightarrow ^{86}\text{Sr} \equiv ^{86}\text{Sr}_0$). Vamos a volver a la ecuación (7), con las mediciones ahora comparadas con la cantidad de este isotopo estable en la roca.

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \frac{^{87}\text{Sr}_0}{^{86}\text{Sr}} + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} \left(e^{\lambda_{87}t} - 1 \right) \quad (8)$$

En esta ecuación, usando $^{86}\text{Sr} \equiv ^{86}\text{Sr}_0$ implica que

$$\frac{^{87}\text{Sr}_0}{^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_0 \quad (9)$$

Este valor es la tasa inicial entre los dos isotopos de estroncio en el fundido que se enfrió para generar la roca.

El sistema Rubidio-Estroncio

El punto clave es que una roca contiene varias minerales, y, mientras que las minerales pueden tener diferentes cantidades de $^{87}\text{Sr}_0$ y $^{86}\text{Sr}_0$ en su estructura cristalina[†], la tasa $\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0$ va a estar lo mismo para las diferentes minerales porque vienen del mismo material fundido.

La ecuación (8) se convierte al:

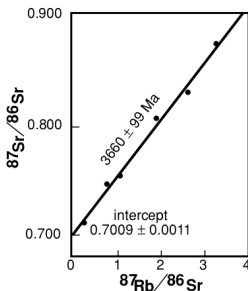
$$\underbrace{\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}}_Y = \underbrace{\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0}_C + \underbrace{\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}}_X \underbrace{\left(e^{\lambda_{87}t} - 1\right)}_M \quad (10)$$

La ecuación (10) tiene la forma de $Y = MX + C$. ¿Qué tipo de ecuación es?

[†] *Algunas minerales naturalmente tienen mayor cantidad de estroncio en su estructura cristalina.*

El sistema Rubidio-Estroncio

Entonces, tomamos varias minerales de una roca (idealmente ígnea), y **medimos los valores de $\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$ y $\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$ en cada mineral**. Las mediciones van a caer en una línea recta, el intercepto representa la tasa inicial $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_0$ que es la tasa entre los isotopos de estroncio en el fundido original, la pendiente de la línea es $e^{\lambda_{87}t} - 1$ [†]. Hemos conseguido el valor de t , la edad de la roca!



Fuente: Fowler, The Solid Earth, 2° Ed., Figura 6.2



mindat.org

Estudios del gneis de Amitsôq de Groenlandia muestran que esta formación es una de las más antiguas en la Tierra.

[†]Para valores de $\lambda_{87}t \ll 1$, simplificamos: $e^{\lambda_{87}t} - 1 \approx 1 + \lambda_{87}t - 1 = \lambda_{87}t$

La edad de la Tierra

Existen otros sistemas radiométricos, por ejemplo lo de Uranio-Plomo, que se pueden usar para determinar la edad de rocas (ver la lectura adicional para este material no examinable).

Usando el sistema de U-Pb aplicado a meteoritos (especialmente los que contienen cóndrulos) las edades de los materiales más antiguas en el sistema solar tienen una cierta límite máxima:

$$4.54 \pm 0.03 \times 10^9 \text{ años}$$

Es razonable suponer que ésta representa la edad del sistema solar. Y, dado que modelos de formación planetaria muestran que la formación de la Tierra ocurrió relativamente rápido, hemos encontrado la edad de la Tierra.

¿Por qué no se pueden usar rocas terrestres para calcular la edad de la Tierra?

La estructura de la Tierra en una dimensión

En este capítulo hemos visto conceptos acerca de la formación del sistema solar, la formación y estado inicial de la Tierra, la composición de la Tierra, y la edad de la Tierra. A continuación se presenta un modelo simplificado (1-dimensional) de la Tierra.

- ▶ Corteza: Rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias (**observación directa**).
- ▶ Manto: Minerales silicatos como ortopiroxeno, olivino, perovskita (**xenolitos, meteoritos**).
- ▶ Núcleo: Hierro y níquel (**meteoritos, M_{Tierra} , I_{Tierra} campo magnético, ondas sísmicas**).
- ▶ El núcleo interno es sólido, el núcleo externo es líquido.

La estructura de la Tierra en una dimensión

Las capas de la Tierra mencionadas anteriormente están separadas por cambios composicionales.

También existen capas en la Tierra que están definidas por sus propiedades mecánicas.

- ▶ Litosfera: Capa rígida en la superficie de la Tierra, consiste en la corteza y parte del manto superior (geodesia, sismología).
- ▶ Astenosfera: Capa viscoelástica en el manto inferior, el flujo es dúctil en escalas de tiempo de años o mas (geodesia, flujo de calor).

¿Cuál es otro nombre para los diferentes segmentos de la litosfera?

Lectura adicional

- ▶ Apuntes del curso, Capítulo 1. Secciones 1.6, 1.7, 1.8, 1.10 y 1.11.
- ▶ Fowler, The Solid Earth, 2^o Ed. Sección 6.3 “Rubidium-Strontium”.
- ▶ Fowler, The Solid Earth, 2^o Ed. Sección 6.10 “The age of the Earth”.
- ▶ Lowrie, Fundamentals of Geophysics, 2^o Ed. Figura 4.12 “Radiometric age ranges”.

Preguntas prácticas

1. Mediciones radiométricas están realizadas en unos minerales de una roca sedimentaria que viene de un lago glacial:

Mineral	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Granate	3.51	0.719
Olivino	1.32	0.717
Labradorita	4.23	0.748
Ortopiroxeno	1.95	0.713
Ortopiroxeno	5.17	0.727
Labradorita	3.88	0.742
Olivino	2.15	0.726

- (a) Explique por qué el método radiométrico no entregaría la edad de la roca sedimentaria. Entonces, ¿qué información va a entregar?
- (b) Grafiquen estos datos, para reconstruir la historia de los minerales en esta roca.