

Tema 4. Desintegración nuclear

César Fernández Ramírez
Departamento de Física Interdisciplinar
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)



Contextualización dentro de la asignatura

- Bloque I. Estructura nuclear
 - Tema 1. Principales características del núcleo atómico
 - Tema 2. La interacción nuclear. El deuterón y la interacción nucleón-nucleón
 - Tema 3. Modelos nucleares
- **Bloque II. Radioactividad y desintegraciones nucleares**
 - **Tema 4. Desintegración nuclear**
 - Tema 5. Desintegraciones α , β y γ
- Bloque III. Reacciones nucleares e interacción radiación-materia
 - Tema 6. Reacciones nucleares
 - Tema 7. Interacción radiación-materia
- Bloque IV. Física subnuclear
 - Tema 8. El Modelo Estándar de partículas elementales
 - Tema 9. Quarks y hadrones

Cronograma

	L	M	X	J	V	S	D
Octubre		1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12	13
	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27
	28	29	30	31			
Noviembre					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	
Diciembre							1
	2	3	4	5	6	7	8
	9	10	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20	21	22
	23	24	25	26	27	28	29
	30	31					
Enero			1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19
	20	21	22	23	24	25	26
	27	28	29	30	31		

Bloque I
Tema 1
Tema 2
Tema 3
Bloque II
Tema 4
Tema 5
Bloque III
Tema 6
Tema 7
Bloque IV
Tema 8
Tema 9

Apertura foros
Apertura TE
PEC
Periodo vacacional
Cierre foros
Exámenes
Cierre TE

Material disponible

- Material disponible en el repositorio Github de la asignatura
 - <https://github.com/cefera/FNyP>
- Esta presentación:
 - [./Presentaciones/Tema4.pdf](#)
- Código en Python asociado:
 - [./Notebooks/Tema4.ipynb](#)

Esquema

- Introducción
- Ley de desintegración radiactiva
- Tipos de desintegraciones
- Radiactividad natural. Series naturales de elementos radiactivos
- Cadenas radiactivas
- Radiactividad artificial
- Datación

Objetivos específicos

- Definir radiactividad, nucleido radiactivo, proceso radiactivo.
- Explicar las hipótesis fundamentales de las desintegraciones radiactivas, definir las diferentes magnitudes que caracterizan la evolución temporal de las sustancias radiactivas y las unidades más comunes en las que se expresan. desintegración radiactiva.
- Deducir las leyes de evolución temporal de una sustancia radiactiva en los posibles casos: una sola sustancia, ramificaciones y cadenas. Interpretación y reconocimiento en cada caso de las características más importantes que se pueden obtener de estas leyes.
- Identificar los tipos de desintegraciones radiactivas
- Entender el origen de la radiactividad natural
- Aplicación de la radiactividad a la datación

Introducción

Definición

- La radiactividad es un fenómeno natural por el que un núcleo emite uno o más tipos de partículas, transformándose o desexcitándose a un estado de menor energía

Introducción histórica

- Descubierta por Henri Becquerel en 1896 al trabajar con sales de Uranio
- En 1898 Pierre Curie y Marie Sklodowska-Curie aislaron los elementos radiactivos Polonio y Radio a partir de pechblenda
- En 1919 Ernest Rutherford realizó la primera transmutación
$$\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + p$$
- En 1932 Chadwick descubrió el neutrón
- En 1934 Irene y Frederic Joliot-Curie descubrieron la radiactividad artificial, creando núcleos inestables

Ley de desintegración radiactiva

Actividad

- La actividad de una sustancia radiactiva es el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo: $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$, y es proporcional al número de núcleos existentes N .
- λ es la constante de desintegración. Proporciona la probabilidad de desintegración de un núcleo por unidad de tiempo.
- La ley de desintegración es: $N = N_0 e^{-\lambda t}$
- La actividad cumple la misma ley: $\mathcal{A} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$
- Es una ley probabilística.

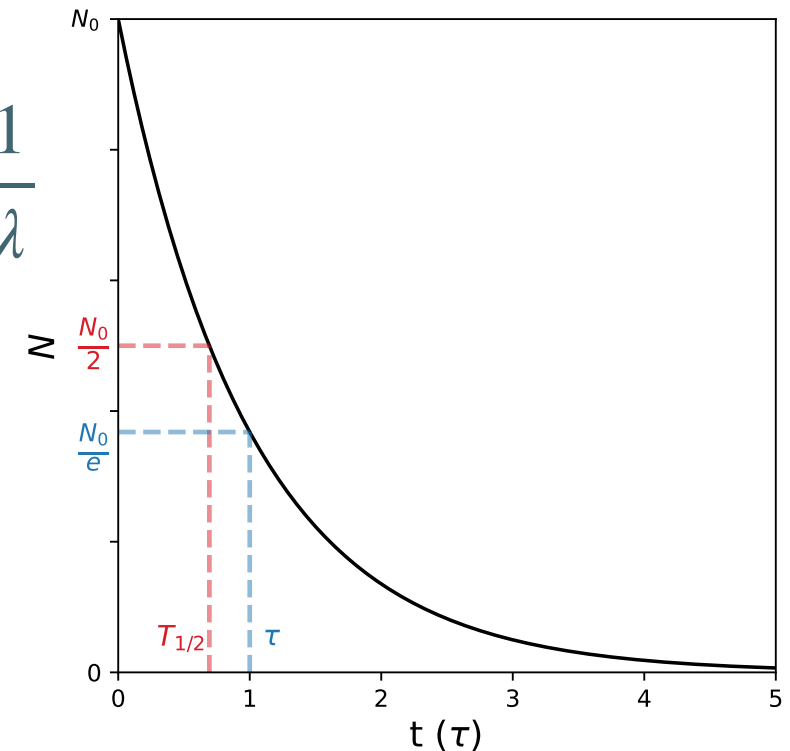
Vida media y semi-vida

- La vida media de un núcleo se puede calcular:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t dN}{\int_0^\infty dN} = \frac{\int_0^\infty t \lambda N dt}{\int_0^\infty \lambda N dt} = \frac{\int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^\infty e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda}$$

- La semi-vida $T_{1/2}$ se define como el tiempo necesario para que el número de núcleos se reduzca a la mitad $N = N_0/2$:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$



Unidad de actividad

- Bequerelio: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ d/s}$
- Curio: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ d/s}$ que es la actividad de 1 g de Radio
- A mayor cantidad de sustancia radiactiva, mayor actividad: $\mathcal{A} = \lambda N$

Desintegraciones parciales (I)

- Que exista una única desintegración no es lo habitual
- Casos sencillos:
 - Caso más sencillo: $N_1 \rightarrow N_2 + \gamma$ donde N_2 es estable y N_1 no se crea,
 $N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$
 $N_1 + N_2 = N_0$. Entonces:
 $N_2(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})$

Desintegraciones parciales (II)

- Existen dos o más modos de desintegración:
$$N_1 \rightarrow N_{2a} + x$$
$$\rightarrow N_{2b} + y$$

La ley de desintegración viene definida por $\lambda_t = \lambda_a + \lambda_b$: $N(t) = N_0 e^{-\lambda_t t}$

λ_a y λ_b son las constantes de desintegración parciales y permiten calcular las proporciones de cada modo parcial: λ_a/λ_t y λ_b/λ_t denominados cocientes de desintegración (*branching ratios*):

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_t t}$$

$$N_{2a}(t) = N_0 (\lambda_a/\lambda_t) (1 - e^{-\lambda_t t})$$

$$N_{2b}(t) = N_0 (\lambda_b/\lambda_t) (1 - e^{-\lambda_t t})$$

En general se tiene: $\lambda = \sum_i \lambda_i$

Tipos de desintegraciones

Tipos de desintegraciones (I)

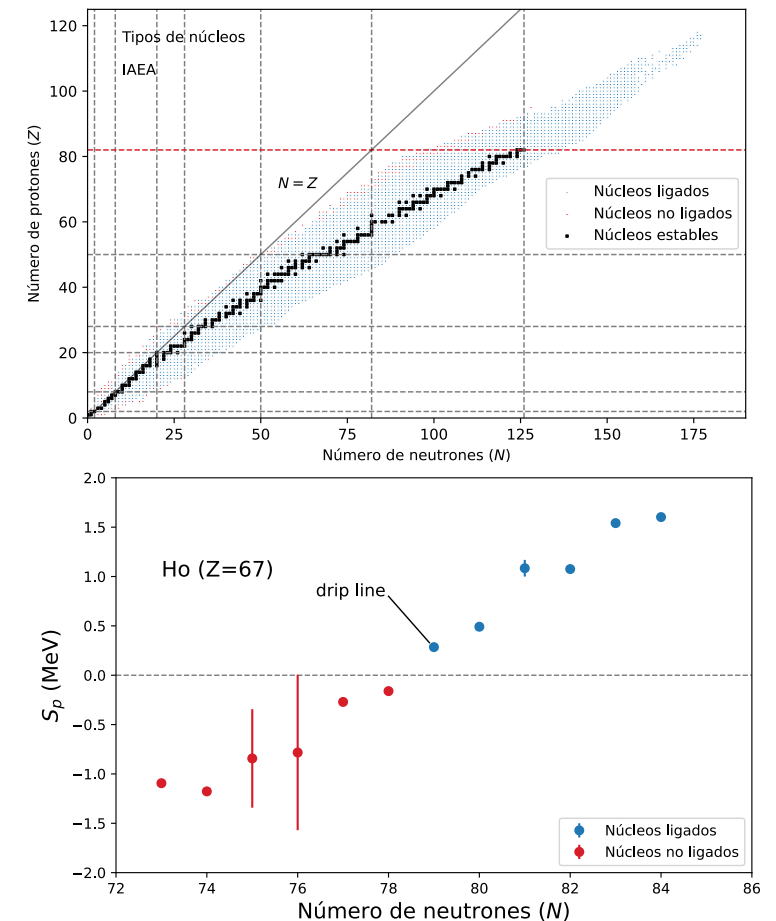
- Se profundizará en el Tema 5. Procesos α , β y γ
- Desintegración α : ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$
 - ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha, T_{1/2} = 4,47 \times 10^9 \text{ años}$
 - ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha, T_{1/2} = 1600 \text{ años}$
 - Debida a la interacción fuerte (efecto túnel)
- Desintegración β :
 - $\beta^+ : n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, {}^{131}_{53}\text{I} \rightarrow {}^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}_e, T_{1/2} = 8 \text{ días}$
 - $\beta^- : p \rightarrow n + e^+ + \nu_e, {}^{25}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{25}_{12}\text{Mg} + e^+ + \nu_e, T_{1/2} = 7,2 \text{ s}$
 - CE: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e, {}^{54}_{25}\text{Mn} + e^- \rightarrow {}^{54}_{24}\text{Cr} + \nu_e, T_{1/2} = 312 \text{ días}$
 - Después de la captura electrónica, se ha de producir la emisión de un rayo X al haberse producido la captura de un electrón de las capas más internas
 - Esta desintegración es consecuencia de la interacción débil que se tratará en el Tema 8. El Modelo Estándar de partículas elementales del Bloque IV. Física subnuclear

Tipos de desintegraciones (II)

- Desintegración γ
 - Es el proceso de desexcitación nuclear por excelencia
 - Debido a la interacción electromagnética
 - El proceso es rápido $T_{1/2} \approx 10^{-9}$ s
- Fisión espontánea
 - Se suele producir en núcleos transuránicos
 - Debido a las fuerzas de repulsión eléctricas creadas por la deformación del núcleo
 - Este fenómeno junto con la desintegración α explica por qué no existen núcleos estables con A elevado
 - A partir de $A \approx 300$ los núcleos fisiónan espontáneamente

Tipos de desintegraciones (III)

- Emisión de nucleones
 - Son desintegraciones de núcleos alejados del valle de estabilidad
 - Para que se produzca la energía de separación [Tema 1: Energía necesaria para arrancar un protón/neutrón de un núcleo] debe ser $S_p, S_n < 0$
 - Recordad la drip line que se estudió en el Tema 1



Radiactividad natural. Series naturales de elementos radiactivos

Radiactividad natural

- La radiactividad natural es debida a dos tipos de radionúcleos naturales
 - Primordiales: En la tierra desde que se formó y su periodo de semidesintegración es mayor que la edad de la tierra y parte de ellos pertenecen a cadenas de elementos pesados
 - Cosmogénicos: Producidos en colisiones de rayos cósmicos con los núcleos del aire de la atmósfera

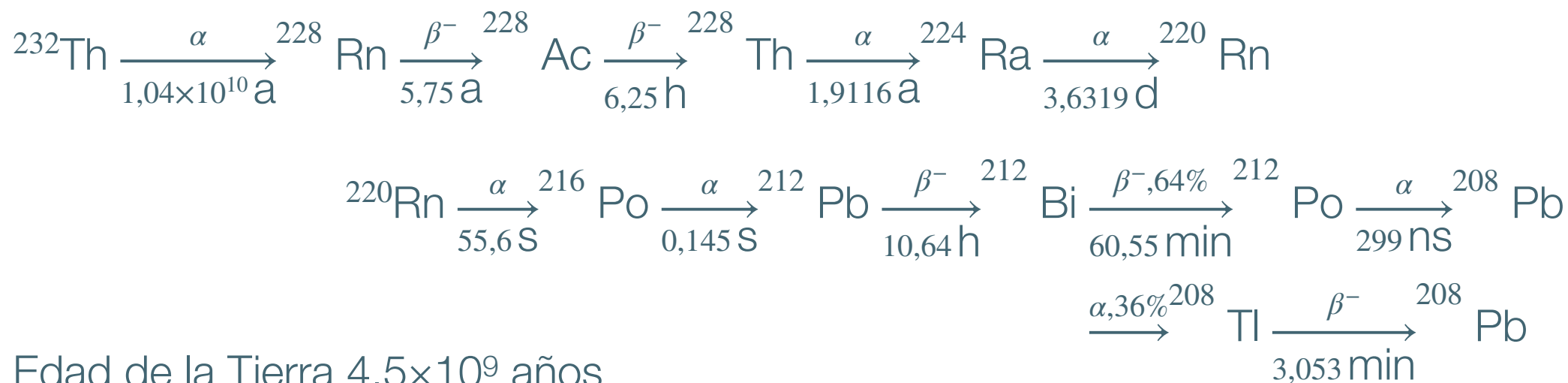
Rayos cósmicos

- Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio exterior y bombardean constantemente la Tierra desde todas direcciones. La mayoría de estas partículas son protones o núcleos de átomos más pesados (como helio, carbono o hierro)
- La mayoría de los rayos cósmicos de menor energía que llegan a la Tierra provienen de algún sitio dentro de nuestra galaxia, la Vía Láctea.
- El origen de los rayos cósmicos de alta energía (10^{20} eV) no es claro, aunque en su mayoría proceden de fuera de la Vía Láctea



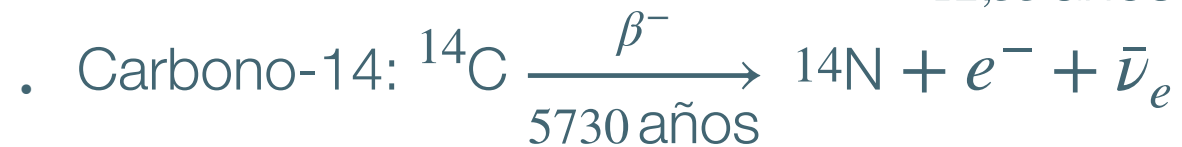
Primordiales

Serie	Elemento	T _{1/2} (años)	Estable
Torio	²³² Th	14,1×10 ⁹	²⁰⁸ Pb
Neptunio	²³⁷ Np	2,01×10 ¹⁹	²⁰⁵ Tl
Uranio	²³⁸ U	4,47×10 ⁹	²⁰⁶ Pb
Actinio	²³⁵ U	0,704×10 ⁹	²⁰⁷ Pb



Cosmogénicos

- Ejemplos:



- Estos ejemplos tienen aplicaciones a datación (se verá más adelante)

Cadenas radiactivas

Cadena radiactiva para tres elementos (I)

- $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$
- Este es un caso sencillo, generalizable a un número arbitrario de decaimientos
- Originalmente sólo existe la especie nuclear 1
- El núcleo 3 es estable
- Las ecuaciones son:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \Rightarrow N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

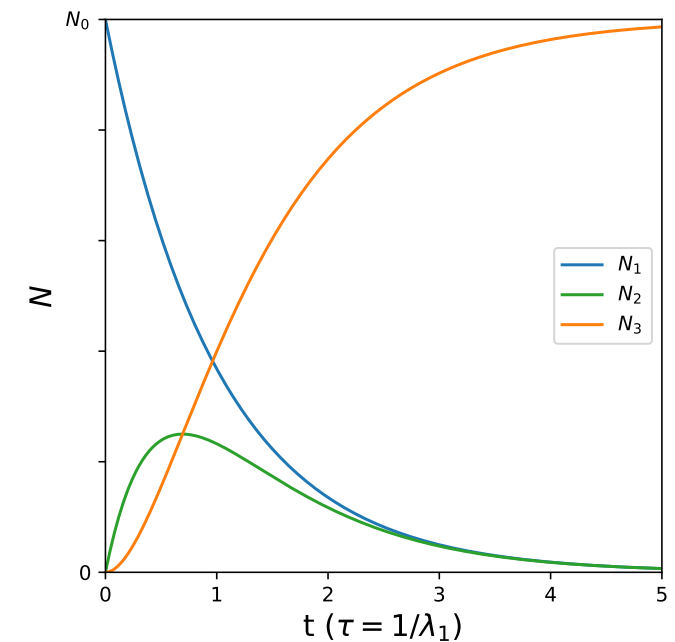
$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \Rightarrow N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \Rightarrow N_3(t) = N_0 \left[1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}) \right]$$

Cadena radiactiva para tres elementos (II)

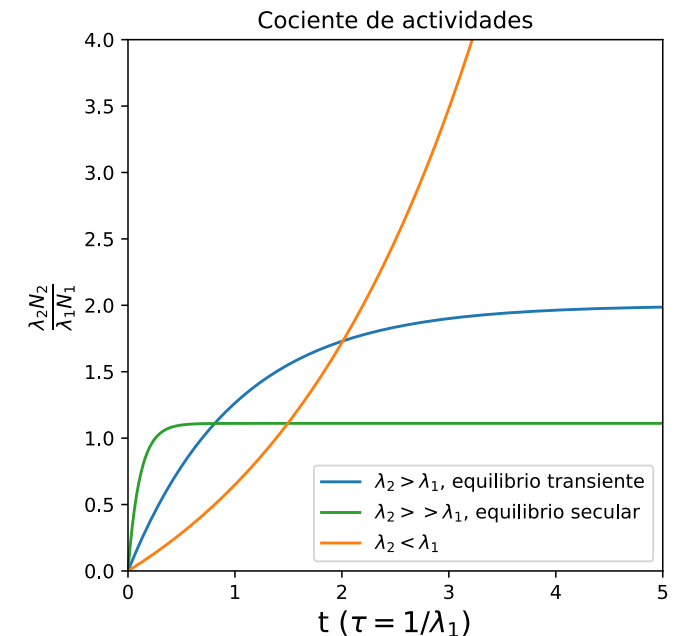
- La actividad del núcleo hijo 2 es $\lambda_2 N_2(t)$
- Hay un máximo para 2 en $t_{\max} = \frac{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}$
para el que la actividad del hijo está en equilibrio
 $\lambda_2 N_2(t_{\max}) = \lambda_1 N_1(t_{\max})$
- El cociente de la actividad entre padre e hijo es:
$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right]$$

distinguiéndose tres casos



Cadena radiactiva para tres elementos (III)

- El cociente de la actividad entre padre e hijo es:
$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right]$$
 distinguiéndose tres casos
- $\lambda_2 \gg \lambda_1$ Equilibrio secular, el hijo se desintegra mucho más rápido que el padre
- $\lambda_2 > \lambda_1$ Equilibrio transiente o transitorio, el cociente de actividades va creciendo hasta aproximarse a una constante $\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)$
- $\lambda_2 < \lambda_1$ Los núcleos 1 se desintegran más rápidamente que los de tipo 2



Ecuaciones de Bateman

- Caso de k generaciones $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \dots \rightarrow k$ $\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1}N_{i-1}(t) - \lambda_i N_i(t)$
- Si se supone que $N_i(0) = 0$ para todos los elementos de la cadena $i > 1$, la actividad de cada miembro n de la cadena será dada por las ecuaciones de Bateman

$$\mathcal{A}_n = N_0 \sum_{i=1}^n c_i e^{-\lambda_i t}$$
 siendo $c_m = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{m \neq i=1}^n (\lambda_i - \lambda_m)}$ teniendo en cuenta $n \leq m$
- Se tiene equilibrio secular si $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n$
- Número de átomos del elemento n : $N_n(t) = \lambda_1 \dots \lambda_{n-1} N_1(0) \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\prod_{m \neq i=1}^n (\lambda_i - \lambda_m)}$

Ejemplo de aplicación

- Supongamos dos elementos radiactivos en equilibrio, ^{226}Ra y ^{238}U , de los que se conoce la relación de masa $\frac{M_{\text{Ra}}}{M_{\text{C}}} = 3,4 \times 10^{-7}$
- Si se conoce una de las semi-vidas: $T_{1/2}(\text{Ra}) = 1602$ años
- Se puede calcular $T_{1/2}(\text{U})$ teniendo en cuenta la condición de equilibrio

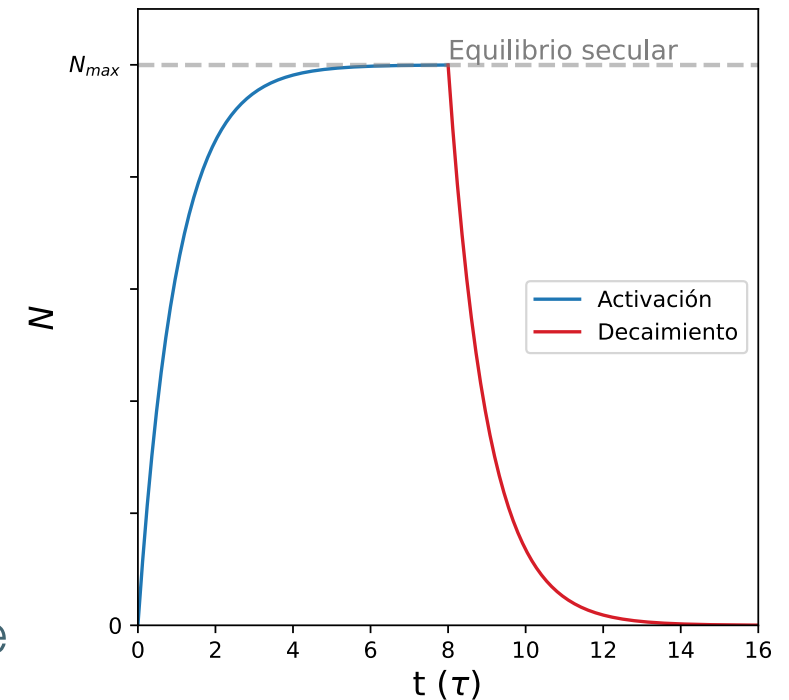
$N_{\text{Ra}}\lambda_{\text{Ra}} = N_{\text{U}}\lambda_{\text{U}}$ y como $N = M \frac{\mathcal{N}_A}{A'}$ al despejar queda:

$$T_{1/2}(\text{U}) = 1602 \frac{226}{238} \frac{1}{3,4 \times 10^{-7}} = 4,5 \times 10^9 \text{ años}$$

Radiactividad artificial

Activación y decaimiento

- Los radioisótopos se pueden obtener por "bombardeo" de un material mediante aceleradores de partículas o con reactores
- Ejemplo: $p + N_0 \rightarrow N_1 + q$
- El ritmo de de generación es: $R = \phi \sigma N_0$
 ϕ es el flujo ($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$); σ sección eficaz ($\sim 1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$); N_0 número de núcleos disponibles;
- $R/N_0 \sim 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Se puede suponer N_0 constante
- Si N_1 es inestable: $N_1 \rightarrow N_2 + x$
- $\mathcal{A}_1(t) = R (1 - e^{-\lambda_1 t})$; $N_1(t) = \mathcal{A}_1(t) / \lambda_1$;



Datación radiactiva

Datación por Carbono-14

- El Carbono-14 es un isótopo radiactivo con $T_{1/2} = 5730$ años de origen cosmogénico
- Se supone que la proporción $^{14}\text{C}/\text{C} = 1/10^{12}$
- El carbono natural tiene la proporción isotópica 90,89% de ^{12}C y 1,11% de ^{13}C , que forma CO_2 y es absorbido por los organismos
- Al morir, el organismo deja de absorber carbono por este medio y cesa de adquirir ^{14}C
- Esto proporciona una forma de datar los restos del organismo.

Ejemplo de datación por Carbono-14

- Supongamos que el carbón de un fogón situado en un campamento tiene una actividad de $\mathcal{A}_{\text{hoy}} = 0,0048 \mu\text{Ci/kg}$. Calcular el año en el que el campamento fue usado por última vez sabiendo que la actividad del carbono en seres vivos es $\mathcal{A}_{\text{vivo}} = 0,007 \mu\text{Ci/kg}$

$$\frac{N_{\text{hoy}}}{N_{\text{vivo}}} = e^{-\lambda t} = e^{-t \log 2 / T_{1/2}} \text{ y}$$

$$\frac{\mathcal{A}_{\text{hoy}}}{\mathcal{A}_{\text{vivo}}} = \frac{\lambda N_{\text{hoy}}}{\lambda N_{\text{vivo}}} = \frac{N_{\text{hoy}}}{N_{\text{vivo}}} \Rightarrow t = -\frac{T_{1/2}}{\log 2} \log \frac{\mathcal{A}_{\text{hoy}}}{\mathcal{A}_{\text{vivo}}} \Rightarrow t = 2923 \text{ años}$$

Datación geológica

- Para tiempos geológicos se debe obtener N_0 .
- Buenos elementos para medir tiempos geológicos son:

Isótopo	$T_{1/2}$ (años)	Isótopo	$T_{1/2}$ (años)
^{40}K	$1,28 \times 10^9$	^{138}La	$1,3 \times 10^{11}$
^{87}Rb	$4,8 \times 10^{10}$	^{176}Lu	$3,6 \times 10^{10}$
^{113}Cd	$9,0 \times 10^{15}$	^{187}Re	$5,0 \times 10^{10}$
^{115}In	$4,4 \times 10^{14}$	^{238}U	$4,5 \times 10^9$

Ejemplo

- Supongamos que tenemos una muestra de Rubidio
- Este es una mezcla isotópica de ^{85}Rb (72,15%) y ^{87}Rb (27,85%)
- El ^{85}Rb es estable
- El ^{87}Rb es inestable: $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + e^- + \bar{\nu}_e$ con $T_{1/2} = 4,8 \times 10^{10}$ años
- Si se tiene una muestra actual de $N_p(t_{\text{hoy}})$ núcleos de Rb y $N_h(t_{\text{hoy}})$ de Sr y que en t_0 se tenían $N_p(t_0)$ y 0 respectivamente
- Se cumple $N_p(t_{\text{hoy}}) = N_p(t_0)e^{-\lambda(t_{\text{hoy}}-t_0)}$, luego
$$t_{\text{hoy}} - t_0 = \Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_p(t_0)}{N_p(t_{\text{hoy}})} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_h(t_{\text{hoy}})}{N_p(t_{\text{hoy}})} \right)$$
- donde se hace uso de que $N_p(t_0) = N_p(t_{\text{hoy}}) + N_h(t_{\text{hoy}})$

Resumen

- Ley de desintegración radiactiva
- Vida media, semi-vida, actividad
- Tipos de radiactividad
- Cadenas radiactivas
- Origen de la radiactividad:
 - Natural
 - Primordial
 - Cosmogénica
 - Artificial
- Aplicaciones: Datación