

## Elementos radiactivos

### I. El núcleo atómico

#### 1. Componentes del núcleo, nucleones, protón y neutrón.

	Carga	masa (u.m.a.)	Símbolo
Protón	1+	1,007825	${}_1^1\text{P}$ ( ${}_1^1\text{H}^+$ )
Neutrón	0	1,008665	${}_0^1\text{n}$

Masa del electrón  $5,4858 \times 10^{-4}$  u.m.a.

1 u.m.a. =  $1,66054 \times 10^{-24}$  g

masa  ${}_1^1\text{H}^+$ /masa  $e^-$  = 1836

masa  ${}_1^1\text{H}^+$ /masa  ${}_0^1\text{n}$   $\cong$  1

#### 2. Notación

Z = número atómico = número de protones = carga nuclear

N = número de neutrones

A = Z + N = número de masa

${}_Z^A\text{X}$  = *elemento X*

${}_{-1}^0e = {}_{-1}^0\beta$  = electrón o partícula  $\beta^-$

${}_{+1}^0e = {}_{+1}^0\beta$  = positrón o partícula  $\beta^+$

$\text{He}^{2+} = {}_2^4\alpha$  = partícula  $\alpha$

${}_{11}^{23}\text{Na}$ ;  ${}_{11}^{24}\text{Na}$ : Isótopos (igual Z)

${}_{34}^{83}\text{Se}$ ;  ${}_{35}^{83}\text{Br}$ ;  ${}_{36}^{83}\text{Kr}$ : Isóbaros (igual A)

#### 3. Ecuaciones nucleares

${}_{7}^{14}\text{N} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_8^{17}\text{O}$ :  $\Sigma Z = 9$   $\Sigma A = 18$ .

Conservación del número de masa y del número atómico.

#### 4. Tamaño nucleares

A partir de diagramas de dispersión de neutrones se ha obtenido la relación; radio nuclear:  $R = 1,3 \times 10^{-13} A^{1/3}$  (cm), donde A es el números de masa.

Ejemplos

${}_1^1\text{H}$ :  $R = 1,3 \times 10^{-13}$  cm =  $1,3 \times 10^{-5}$  Å

${}_2^4\text{He}$ :  $R = 2,2 \times 10^{-13}$  cm =  $2,2 \times 10^{-5}$  Å

${}_{17}^{35}\text{Cl}$ :  $R = 4,3 \times 10^{-13}$  cm =  $4,3 \times 10^{-5}$  Å

${}_{92}^{238}\text{U}$ :  $R = 8,1 \times 10^{-13}$  cm =  $8,1 \times 10^{-5}$  Å

\*átomo de H;  $R = 0,529$  Å  $\Rightarrow$   $(R_{\text{át}} / R_{\text{Nucleo}})_{\text{H}} = 0,529 / 1,3 \times 10^{-5} = 40.000$

### 5. Estabilidad nuclear

**A. Energía de enlace nuclear ( $\Delta E_b$ ):** Es la energía necesaria para disociar completamente un núcleo en protones y neutrones.

Ejem:  ${}_{8}^{17}\text{O} \rightarrow 8 {}_1^1\text{H} + 9 {}_0^1\text{n}$   $\Delta E_b$

La relación entre la masa y la energía es:

$$\Delta E_b = \Delta m \cdot c^2$$

$\Delta m = 8 \times 1,007825 + 9 \times 1,008665 - 16,999136$

$= 0,141449$  u.m.a. =  $2,35 \times 10^{-25}$  g.

$\Delta E_b = (2,35 \times 10^{-25} \text{ g}) \cdot (2,9978 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})^2$

$= 2,11 \times 10^{-4}$  erg/ átomo

$= 2,11 \times 10^{-11}$  J/átomo =  $5 \times 10^{-15}$  Kcal/átomo = 131,7 MeV

$$\Delta E_b = (1,69 \times 10^{-15} \text{ Kcal/átomo}) \cdot (6,022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})$$

$$\Delta E_b = 3,0 \times 10^{+9} \text{ Kcal/mol} = 1,27 \times 10^{+9} \text{ KJ/mol} \quad \text{;;;1000 millones de Kcal/mol;;;}$$

En cambio, la energía de enlace químico, para disociar por ejemplo una molécula de  $O_2$



Una medida de la estabilidad nuclear es la *energía de enlace por nucleón*:

$$\Delta E_b / A \quad (A = Z + N).$$

Ejm  $^{17}_8O$ :  $\Delta E_b / A = 2,11 \times 10^{-11} \text{ J/átomo} / 17 \text{ nucleones}$   
 $\Delta E_b / A = 1,24 \times 10^{-12} \text{ J/nucleón} = 7,75 \text{ MeV / nucleón}$

$$(1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J} = 3,8 \times 10^{-14} \text{ cal})$$

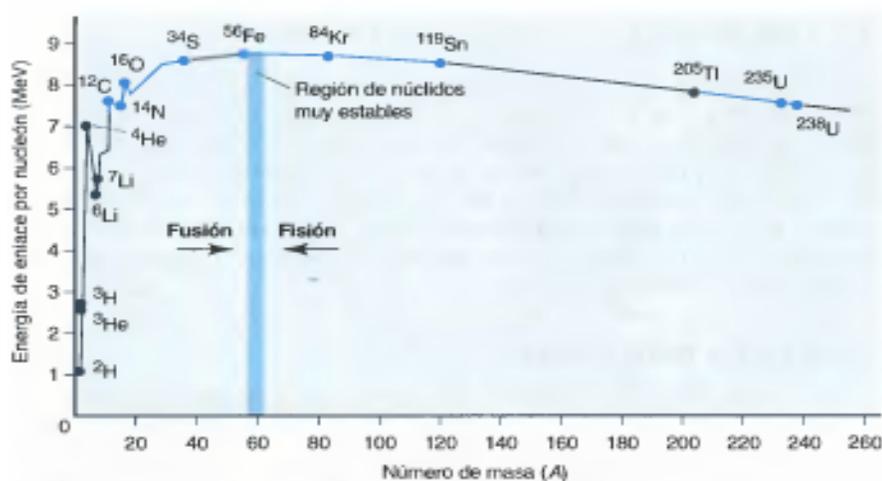


Fig. Energía de enlace por nucleón en función del número de masa para algunos núcleos estables

Los núcleos más estables:  $40 \leq A \leq 100$

## B. Estabilidad nuclear en función de de A, Z y N.

### a) Relación neutrón / protón

La razón  $N/Z$  es el factor más importante que determina la estabilidad nuclear. Para los elementos de bajo valores de  $Z$  la relación  $N/Z$  es cercana a 1. Pero a medida que  $Z$  aumenta  $N/Z$  tiende a tomar valores mayores que 1. Esta desviación puede atribuirse a que es necesario un mayor número de neutrones ( $N$ ) para compensar el gran aumento de las fuerzas de repulsión protón-protón a medida que aumenta  $Z$ . Así, los núcleos más estables se ubican en el gráfico de  $N$  versus  $Z$  en una zona denominada *banda de estabilidad*.

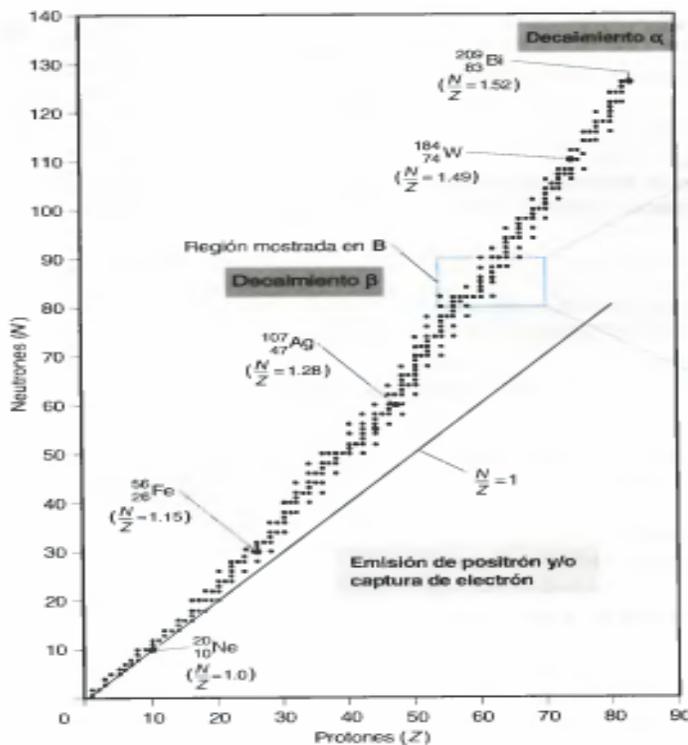


Fig. Número de neutrones en función de número de protones. La banda oscura “banda de estabilidad” muestra los valores de Z y N para núcleos estables

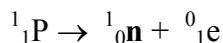
.....

Ubicación de los elementos radiactivos en gráfico número de neutrones v/s número de protones:

1. Los elementos radiactivos se localizan por lo general fuera de dicha banda. Los que se encuentran a la **derecha** de ésta (N/Z alta) tienden a decaer por emisión:  $\beta^-$  ( ${}^0_{-1}e$ )



2. Los elementos radiactivos que se encuentran a la **izquierda** de la banda de estabilidad tienden a decaer por emisión de *positrones*:  $\beta^+$  ( ${}^0_1e$ )



O por captura *electrónica*:  ${}^1_1P + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n$

(nota:  ${}^0_{-1}e = {}^0_{-1}\beta$  y  ${}^0_1e = {}^0_1\beta$ )

Ejemplos:  ${}^{65}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{65}_{29}\text{Cu} + {}^0_{-1}\beta$  (N/Z = 37/28 = 1,32  $\rightarrow$  1,24)

${}^{54}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{54}_{26}\text{Fe} + {}^0_1\beta$  (N/Z: 1 $\rightarrow$ 1,08)

${}^{48}_{24}\text{Cr} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{48}_{23}\text{V}$  (N/Z: 1 $\rightarrow$ 1,09)

**b) Carácter par o impar de los valores de Z y N:**

Tabla. Frecuencia con que existen isótopos estables (no radiactivos)

Z	N	Número de isótopos estables
Par	Par	166
Par	Impar	57
Impar	Par	53
Impar	Impar	8



**e) Emisión de rayos  $\gamma$** 

Son radiaciones electromagnéticas (*fotones*) que acompañan a la mayor parte de los procesos radiactivos. Sus longitudes de onda varían entre  $10^{-8}$  y  $10^{-11}$  cm (1 a  $10^{-3}$  Å), es decir, son más energéticas que los rayos X ( $\sim 1$  Å).

$$E = hc / \lambda$$

$$h = 6,62242 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}; \quad c = 2,99776 \times 10^{10} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}.$$

$$E = 1,98577 \times 10^{-16} / \lambda \text{ (cm):}$$

$$1,986 \times 10^{-8} < E < 1,986 \times 10^{-5} \text{ (erg)}.$$

Las emisiones  $\gamma$  no son simultáneas a los procesos de decaimiento  $\alpha$ ,  $\beta^-$ , EC o  $\beta^+$  sino posteriores a éstos.

Los rayos  $\gamma$  provienen de núclidos hijos en estado excitado que decaen a estados de energía más bajos.

.....

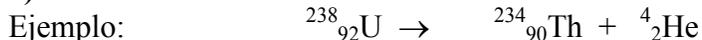
**2) Cálculo de energías totales de desintegración.**

$$\Delta E = \Delta mc^2; \quad \Delta m = \text{defecto (diferencia) de masa}$$

$$\text{Para 1 uma} = 1,6605 \times 10^{-24} \text{ g} \quad \Delta E = 1,4923 \times 10^{-3} \text{ erg/uma} = 1,4923 \times 10^{-10} \text{ J/uma}$$

$$\text{O bien:} \quad \mathbf{931,5 \text{ MeV/ uma.}}$$

$$\mathbf{(1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J} = 3,8 \times 10^{-14} \text{ cal})}$$

**a) Emisión  $\alpha$** 

$$\Delta m = 234,04294 + 4,002626 - 238,0501$$

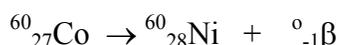
$$\Delta E = -4,5255 \times 10^{-3} \text{ uma} \times 1,4923 \times 10^{-10} \text{ J/uma}$$

$$\Delta E = -6,8 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{liberadas} \quad (*4 \times 10^8 \text{ kJ/mol} = 1 \times 10^8 \text{ kcal/mol})$$

¡100 millones de kcal/mol como calor!

$$\Delta E = -4,5255 \times 10^{-3} \times 931,5 = -4,234 \text{ MeV.}$$

**b) Emisión  $\beta^-$** 

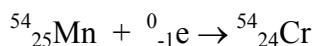
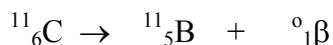
$$\Delta m = 59,93064 - 59,93366$$

$$\Delta m = -3,02 \times 10^{-3} \text{ uma}$$

$$\Delta E = -3,02 \times 10^{-3} \times 931,5 = -2,813 \text{ MeV.}$$

$$\Delta E = \mathbf{-2,813 \text{ MeV.}}$$

## c) Captura electrónica

d) Emisión  $\beta^+$ 

$$\Delta m = 11,00933 - 11,01146$$

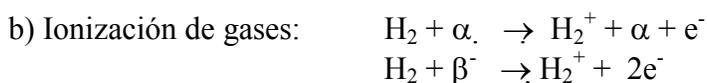
$$\Delta m = -0,00158 \text{ uma}$$

$$\Delta E = -0,00158 \times 931,5 = -1,474 \text{ MeV.}$$

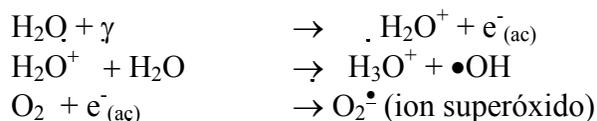
## 3) Interacción de la radiación con la materia

Las partículas  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ ,  $\alpha$  y los rayos  $\gamma$  provenientes de la desintegración nuclear son de *alta energía*, pudiendo causar drásticos cambios químicos en las sustancias que interactúa:

a) Impresión de placas fotográficas



c) Generación de radicales libres:



d) Excitación electrónica de átomos y moléculas.

e) Deterioro y muerte de células y tejidos.

## 4) Velocidad de desintegración radiactiva.

a) Todos los tipos de decaimiento radiactivos mencionados anteriormente corresponden a procesos cinéticos de *primer orden*. Designando como N el número de núcleos que hay en una muestra de un elemento radiactivo, en un tiempo determinado, entonces:

$$-dN/dt = \lambda N$$

Donde  $\lambda$  es la *constante de decaimiento o de desintegración*. Integrado la expresión anterior entre tiempo 0 y un tiempo t:

$$-\int dN/N = \lambda \int dt$$

Resulta:  $\ln(N/N_0) = -\lambda \cdot t$

o bien:  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Además, para el caso  $N = N_0/2$ :  $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$  . "*vida media*"

La velocidad de desintegración,  $-dN/dt$ , se denomina también *actividad* (A):

$$\begin{array}{ll} A = \lambda N: & A_0 = \lambda N_0 \quad \text{a tiempo } 0. \\ & A = \lambda N \quad \text{a tiempo } t. \end{array}$$

Ordenado:  $N_0 = A_0 / \lambda$  y  $N = A / \lambda$

Y reemplazando en la expresión integrada:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Donde  $A$  y  $A_0$  son las velocidades de desintegración a tiempo  $t$  y a tiempo  $0$ , respectivamente. Las unidades más utilizadas para  $-dN/dt$  (o **actividad  $A$** ) son el **becquerel (Bq)** y el **curie**:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ des/s} \quad \text{y} \quad 1 \text{ curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ des/s} \quad (\text{que corresponde a la velocidad de desintegración de 1 gramo de radio}).$$

$$1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci} \quad \text{y} \quad 1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

Ejercicios:

1. El Cobalto-60 es un emisor de radiación  $\beta^-$  y  $\gamma$  ( $t_{1/2} = 5,2$  años). La radiación  $\gamma$  de este radioisótopo se emplea en agricultura para controlar plagas (esterilización de insectos machos). Calcular la actividad de una muestra de 100 mg de cobalto-60 (m.a. 59,9337 u.m.a.)

Resp:

$$A = -dN/dt = \lambda N$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \Rightarrow \lambda = \ln 2 / t_{1/2} = \ln 2 / 5,2$$

$$\lambda = 0,1333 \text{ años}^{-1} \times (1 \text{ año} / 31536000 \text{ s}) = 4,23 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

$$N = 0,100 \text{ g} / 59,9337 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 6,022 \times 10^{23} \text{ átomos} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$N = 1,0 \times 10^{21} \text{ átomos}$$

$$A = (4,23 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}) (1,0 \times 10^{21} \text{ átomos}) =$$

$$A = 4,23 \times 10^{12} \text{ átomos} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{o des} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \text{o (Bq)}$$

$$A = 4,23 \times 10^{12} \text{ Bq} \times 1 \text{ curie (Ci)} / 3,7 \times 10^{10} \text{ des/s}$$

$$A = 114,3 \text{ curie}$$

2. El tritio ( $^3_1\text{H}$ ) es un emisor  $\beta^-$ . Su vida media es de 12,5 años. En el agua ordinaria la proporción entre  $^1\text{H}$  y  $^3\text{H}$  es  $10^{17}$ . Calcular la actividad de 1 Kg de agua.

R:

$$A = \lambda N$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \Rightarrow \lambda = \ln 2 / t_{1/2} = \ln 2 / 12,5$$

$$\lambda = 0,05545 \text{ años}^{-1} \times (1 \text{ año} / 31536000 \text{ s}) = 1,758 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{H}_2\text{O}: 1000 \text{ g} / 18,016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 55,5 \text{ moles}$$

$$55,5 \text{ moles} \times 6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$3,342 \times 10^{25} \text{ moléculas.}$$

$$\text{Átomos de H: } 2 \times 3,342 \times 10^{25} = 6,68 \times 10^{25}$$

$$\text{Átomos de } ^3\text{H: } 6,68 \times 10^{25} / 10^{17} = 6,68 \times 10^8$$

$$N = 6,68 \times 10^8 \text{ átomos}$$

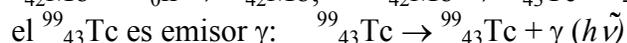
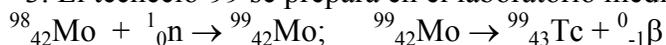
$$A = (1,758 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}) (6,68 \times 10^8 \text{ átomos}) =$$

$$A = 1,174 \text{ átomos} \cdot \text{s}^{-1} = 1,174 \text{ Bq}$$

$$A = 1,174 \text{ Bq} \times 1 \text{ curie (Ci)} / 3,7 \times 10^{10} \text{ des/s}$$

$$A = 3,17 \times 10^{-11} \text{ curie}$$

3. El tecnecio-99 se prepara en el laboratorio mediante las siguientes reacciones nucleares:



su vida media es  $t_{1/2} = 6,04$  h.

Con fines de diagnóstico clínico, se inyecta a una persona una solución que contiene  $^{99}_{43}\text{Tc}$ . ¿Qué porcentaje de  $^{99}_{43}\text{Tc}$  permanecerá en su organismo al cabo de 24 horas?

R:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N / N_0 = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = \ln 2 / 6,04 = 0,1148 \text{ h}^{-1}$$

$$N / N_0 = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-(0,1148 \times 24)} = 0,0636$$

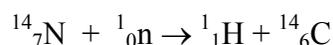
$$0,0636 \times 100 \% = 6,36 \%$$

¿Tarea: En este problema a que tiempo llega el contenido tecnecio-99 al 0,1 %?

## b) Datación de radiométrica con carbono-14.

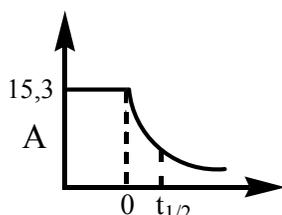
El carbono-14 ( $^{14}_6\text{C}$ ) se produce continuamente en la atmósfera como resultado del bombardeo de rayos cósmicos, provenientes del espacio exterior:

*Rayos cósmicos*  $\rightarrow$  atmósfera  $\rightarrow$  neutrones.



El carbono-14 es un emisor  $\beta^-$  y decae con una vida media  $t_{1/2} = 5730$  años. Su concentración en la naturaleza es constante (estado estacionario) para seres vivos, presentando una actividad de 15,3 desintegraciones por minuto por gramo de carbono total. Luego de la muerte el  $^{14}\text{C}$  comienza a *decaer*:

15,3 des / min por gramo de carbono total (mezcla isotópica) =  $A_0$ .



**Problema:** Algunos objetos encontrados en las cuevas de Lascaux, Francia, presentan una actividad de 2,25 desintegraciones por minuto por gramo de carbono (mezcla isotópica). ¿Cuál es la edad de esos objetos?

$$\text{R: } A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \ln(A/A_0) = -\lambda \cdot t$$

$$t = -1/\lambda \ln(A/A_0)$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = \ln 2 / 5730 = 1,21 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

$$A_0 = 15,3 \text{ des} \cdot \text{min}^{-1} \text{ y } A = 2,25 \text{ des} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Reemplazando:

$$t = -1/ 1,21 \times 10^{-4} \times \ln(2,25/15,3) = 15842 \text{ años.}$$

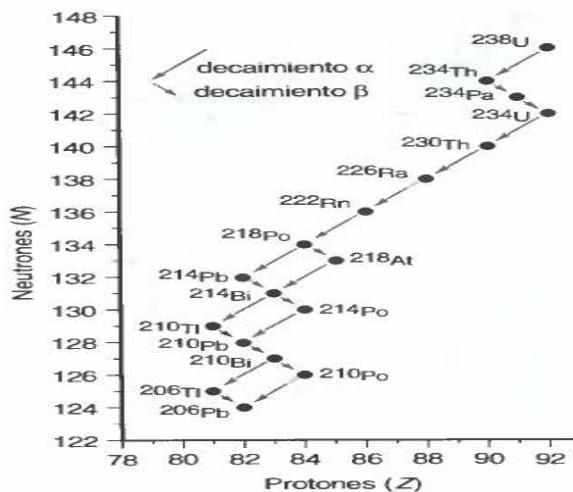
**Tarea:** El polonio-210 es un emisor  $\alpha$  y su vida media es de 138 días.

- Escriba la ecuación nuclear para el proceso de decaimiento de este isótopo radiactivo.
- Si se tiene inicialmente 100 gramos de  $^{210}_{84}\text{Po}$ . ¿Cuál es la velocidad de desintegración inicial? (R:  $1,66 \times 10^{16}$  Bq).
- ¿Cuál es la actividad de la muestra al cabo de 300 días? (R:  $3,7 \times 10^{15}$  Bq)
- ¿Que cantidad de muestra queda al cabo de un año?. (R: 16 g)  
(Dato:  $^{210}_{84}\text{Po} = 209,9823$  u.m.a.).

## 5. Radioactividad natural

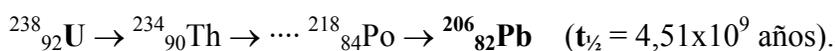
Los isótopos radiactivos más pesados se presentan en la naturaleza integrando series de decaimiento radioactivo. El decaimiento ocurre desde el radioisótopo (padre) en paso sucesivo por emisión de radiaciones  $\alpha$  y  $\beta^-$  hasta llegar a un isótopo terminal estable (hijo). Se conocen al menos cuatro series radiactivas todas terminar con isótopos estables de **plomo**:

Serie natural	Padre	Isótopo terminal estable
del torio	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
del neptuno	$^{237}_{93}\text{Np}$	$^{209}_{82}\text{Pb}$
del uranio-238	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
del uranio-235	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$



**Figura 24.3 La serie de decaimiento del  $^{238}\text{U}$ .** El uranio-238 (arriba a la derecha) decae a través de una serie de emisiones  $\alpha$  y  $\beta$  hacia plomo-206 (abajo a la izquierda) en 14 pasos.

## 6) Datación a partir de las series naturales



Los elementos intermedios se encuentran en cantidades despreciables. Designando como “p” el elemento padre y como “h” el elemento hijo (en este caso, el terminal):

$$N_0 = N(p)_0 = N(p) + N(h).$$

Sustituyendo en la ecuación de desintegración integrada:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$N(p) = [N(p) + N(h)] \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

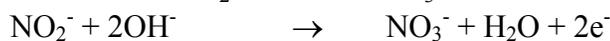
Reordenado:  $t = 1/\lambda \ln[N(h) / N(p) + 1]$

Luego, midiendo el contenido de  $^{238}\text{U}$  (padre) y de  $^{206}\text{Pb}$  (hijo), es posible determinar la edad del mineral.

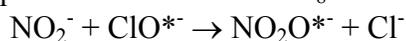
## 7) Uso de trazadores (indicadores) radiactivos:

Se usa de radioisótopos en medicina, en ciencia de materiales, estudio de mecanismos de reacción química y en muchos otros procesos. Esto es posible porque los isótopos radiactivos se pueden detectar en pequeñas cantidades (trazas) y por otra parte todos los isótopos de un elemento presentan propiedades químicas y físicas muy similares. Aplicaciones en el estudio de algunos mecanismos:

**a) Estudio de la reacción:**  $\text{NO}_2^- + \text{ClO}^- \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$

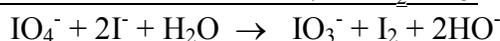
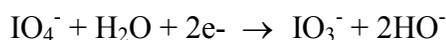


Empleando hipoclorito marcado con  $^{18}\text{O}$ :

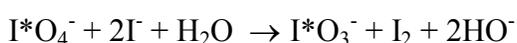


Luego, hay transferencia de un átomo de oxígeno del ion hipoclorito al ion nitrato.

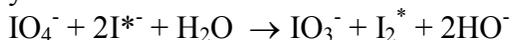
## b) Reacción entre ion peryodato y ion yoduro



Usando  $^{131}_{53}\text{I}$  (emisor  $\beta$  y  $\gamma$ ) se ha encontrado que:



y:



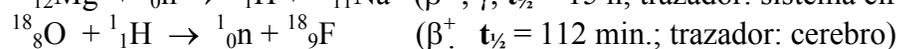
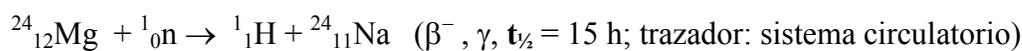
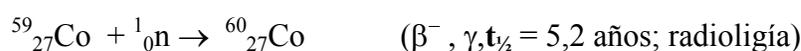
En este caso las semi-reacciones redox reflejan el verdadero mecanismo.

## 6. Algunos tipos de reacciones nucleares

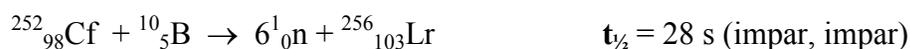
Estas reacciones son producidas por el hombre en los reactores nucleares de investigación o ocurren en las estrellas.

### 1. Transmutaciones nucleares (en reactores nucleares de investigación)

#### a) Síntesis de algunos radioisótopos que se emplean en medicina



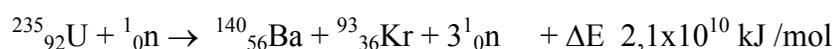
#### b) Síntesis de transuránidos



.....

### 2. Fisión nuclear (reactores de potencia)

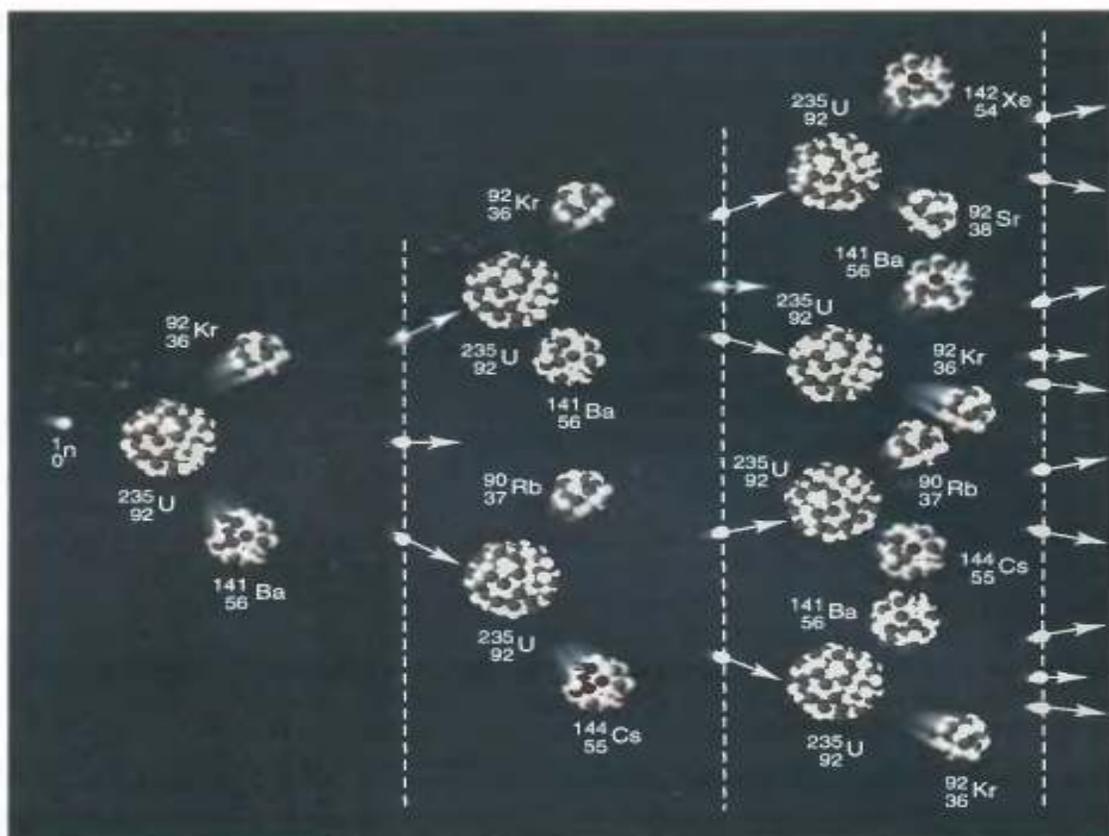
Al bombardear el núcleo uranio-235 con neutrones este se divide “*fisión*” en núcleos más pequeños y se libera una gran cantidad de energía:



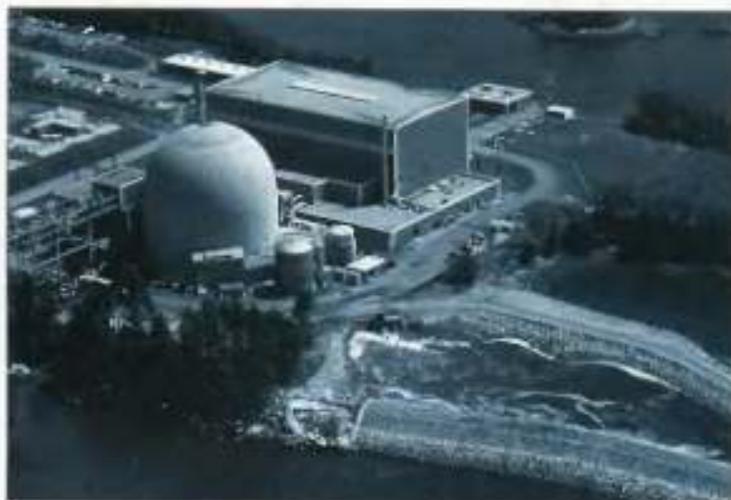
¡Resulta mil millones de veces más energía que la liberada de la combustión de carbono!

Los neutrones producidos en esta reacción a su vez provocan nuevas reacciones. Estas reacciones en cadena son de alta energía y actualmente son controladas y su energía es aprovechada en los **reactores nucleares de potencia**. El no control de las mismas puede provocar una explosión nuclear: “**bomba atómica**”.

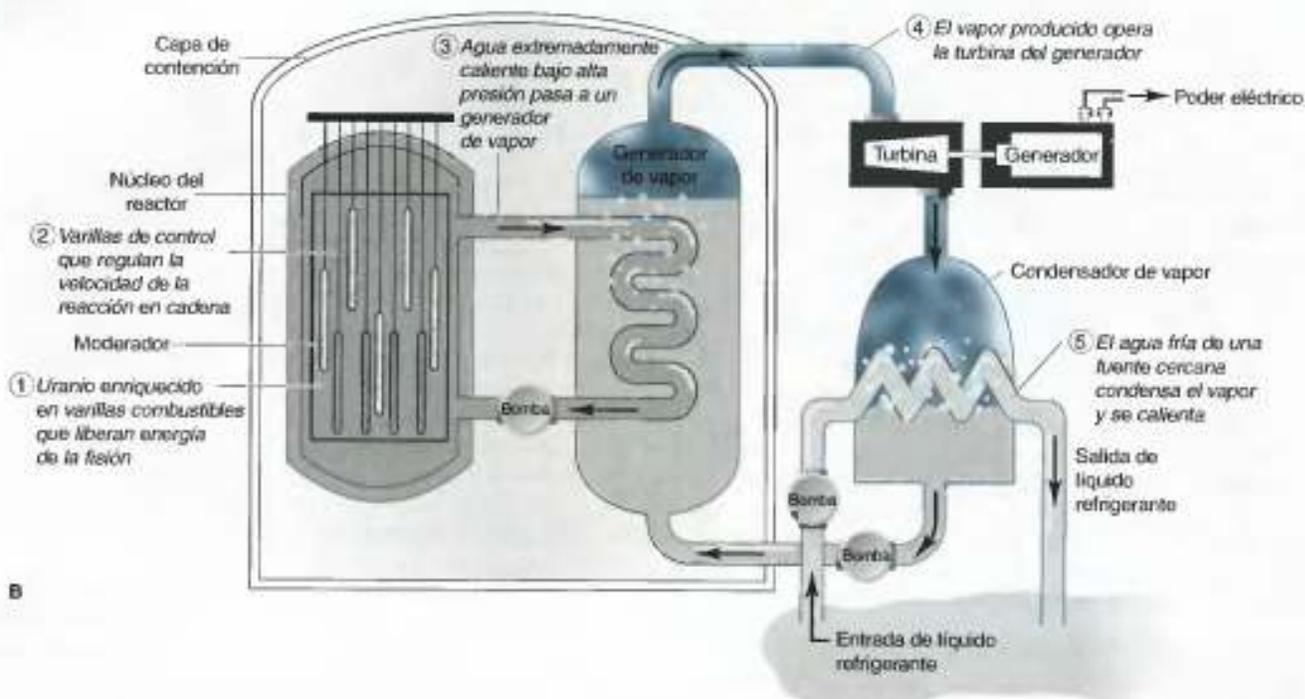
Los reactores de fisión potencia, actualmente utiliza la energía nuclear para general energía eléctrica. El combustible de dichos reactores es principalmente de U-235.



**Figura 24.14 Una reacción en cadena de  ${}^{235}\text{U}$ .** Si una muestra excede la masa crítica, los neutrones producidos por el primer evento de fisión chocan con otros núcleos, provocando su fisión y la producción de más neutrones para continuar el proceso. Note que se forman varios núcleos producto. Las líneas verticales punteadas separan las “generaciones” subsecuentes de neutrones.



A

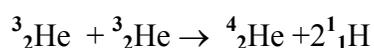
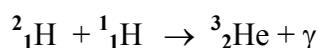
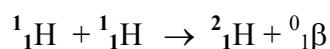


B

Figura 24.15 **Un reactor nuclear de agua ligera.** A, Foto de una instalación que muestra la capa de contención de concreto y una fuente cercana de agua. B, Esquema de un reactor de agua ligera.

### 3) Fusión nuclear (energía de las estrellas):

En las estrellas se producen constantemente las siguientes reacciones:



Estas reacciones se producen en las estrellas incluido el sol, a una temperatura de 15 millones de °C. En estas condiciones, los iones positivos y electrones están separados formando una mezcla gaseosa, que se conoce como “**Plasma**”: el cuarto estado de la materia:

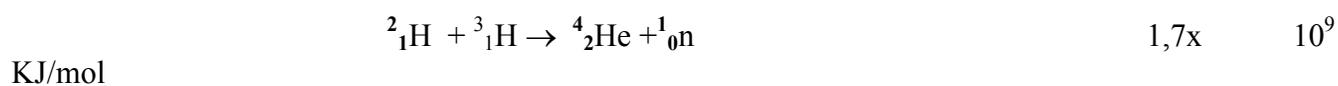
Combinando las tres reacciones anteriores de tal manera de eliminar los intermediarios, se obtiene:



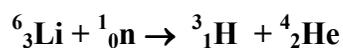
Esta reacción es “*limpia*” ya que no produce desechos radiactivos como en las reacciones de fisión.

### Futuros reactores de fusión

Con el objetivo de obtener energía “**limpia**”, que no produzca residuos radiactivos como los obtenidos en los reactores de fisión, se planean *reactores de fusión*, donde una de las reacciones más promisorias es la siguiente:



La obtención de  ${}^2_1\text{H}$  será desde electrólisis de agua de mar y  ${}^3_1\text{H}$  se obtendrá en el mismo reactor de fusión a partir de la siguiente reacción:



El problema en la fabricación de los reactores de fusión es encontrar un “material” que pueda contener el plasma. Actualmente, hay algunos prototipos teóricos constituidos de campos magnéticos para confinar dicho plasma a la alta temperatura requerida:

