



# Física Nuclear

El Núcleo de los Átomos

Estabilidad de los Núcleos. Energía de Enlace y Energía de Enlace por Nucleón

Radiactividad

La Emisión  $\gamma$

La Emisión  $\beta^-$  y La Emisión  $\beta^+$

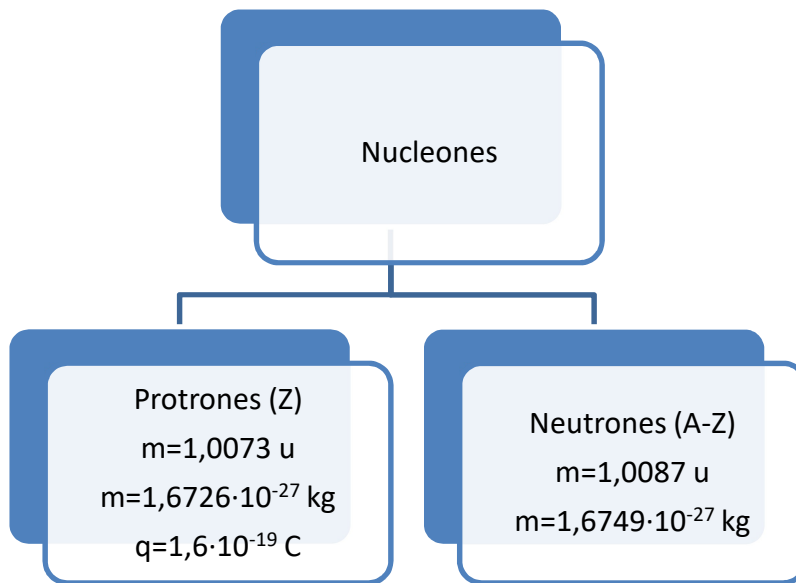
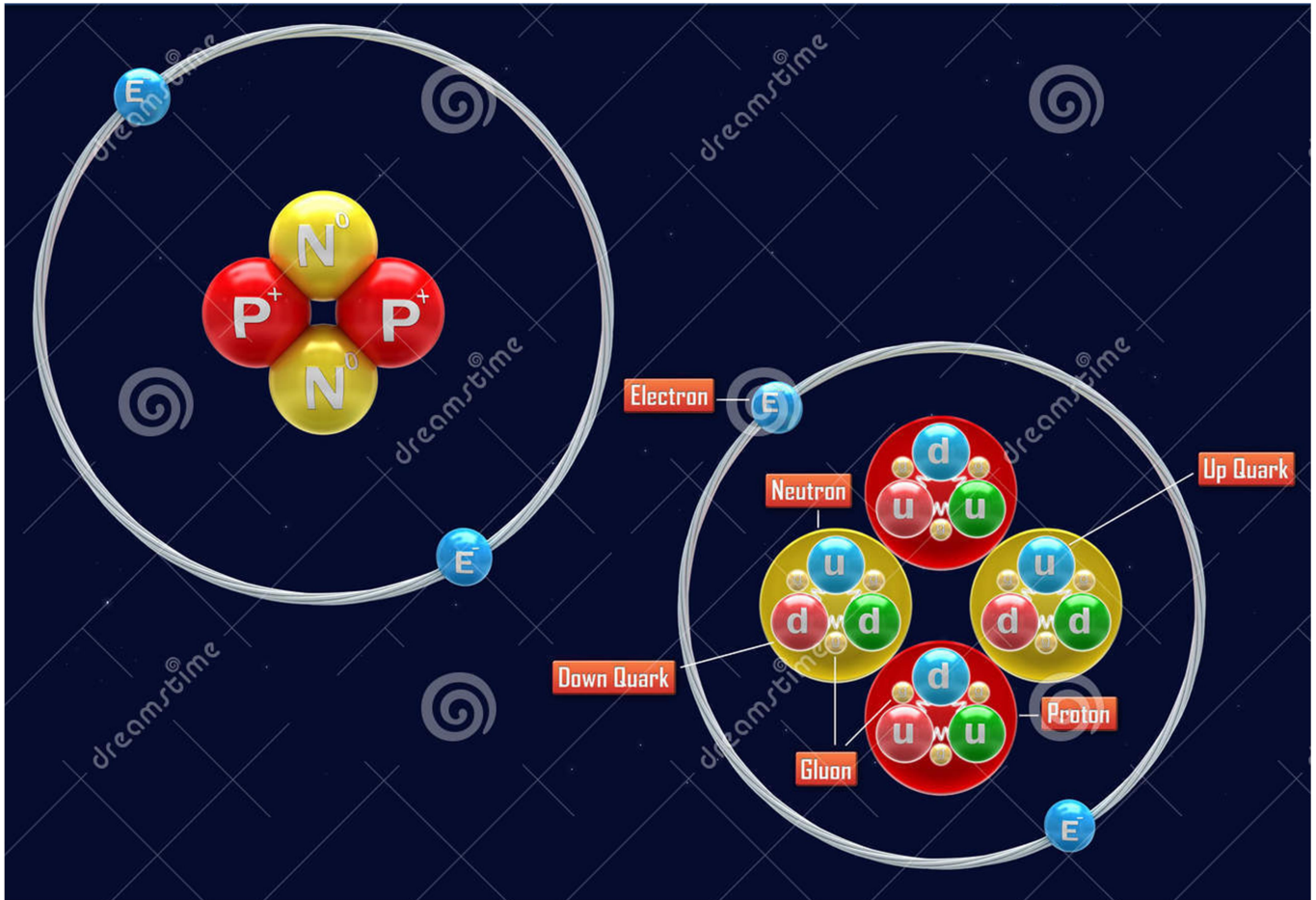
La Emisión  $\alpha$

Magnitudes Características de la Desintegración Radiactiva

Las Reacciones Nucleares. Fisión Nuclear y Fusión Nuclear

Aplicaciones de los Procesos Nucleares

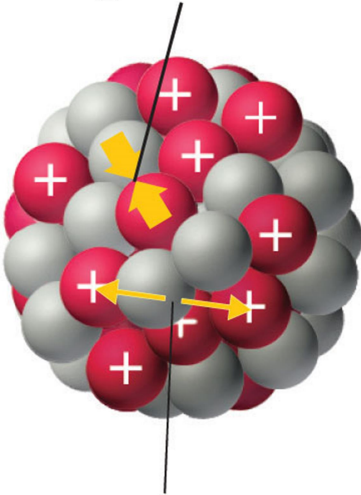
# El Núcleo de los Átomos



$$1u = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

# Estabilidad de los Núcleos | Energía de Enlace

Strong nuclear force



Electrostatic repulsion

El núcleo está formado por nucleones: protones y neutrones. La interacción nuclear fuerte es la fuerza que mantiene unidos a los nucleones en el interior del núcleo.

En el interior del núcleo, la distancia promedio entre nucleones es de 1 fermi:

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

La interacción nuclear fuerte es una fuerza atractiva de muy corto alcance.

Defecto de Masa | Es la diferencia entre la masa teórica y la masa real de un núcleo.

La masa teórica de un núcleo es la suma de las masas de sus nucleones. La masa real de un núcleo es la masa determinada experimentalmente y medida con un espectrógrafo de masas.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M$$

Número  
Atómico

Masa  
del  
Protón

Número  
De  
Neutrones

Masa  
del  
Neutrón

Masa  
Real

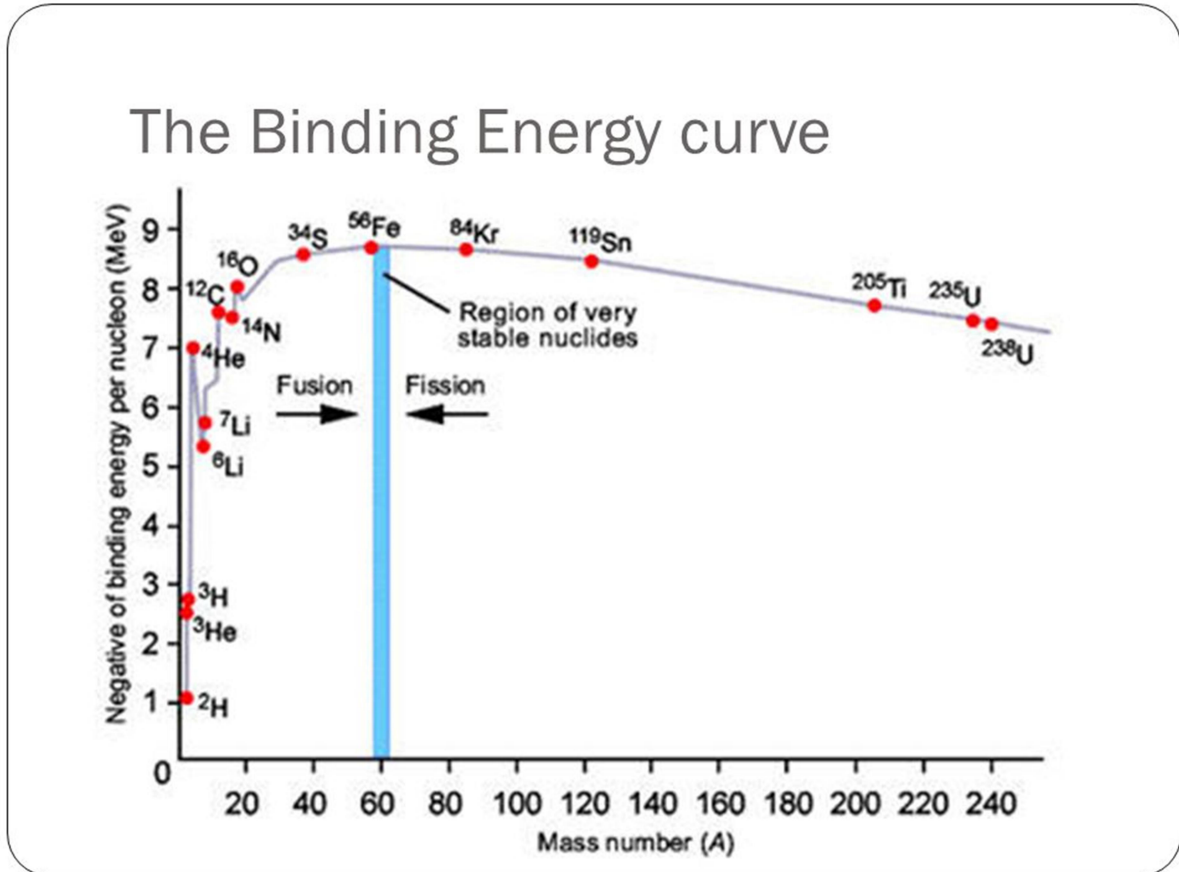
$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Energía de enlace o energía de ligadura

# Energía de Enlace por Nucleón

El concepto de energía de enlace por nucleón se define como la relación entre la energía de enlace de un núcleo y el número de nucleones de dicho núcleo.

Cuanto mayor es la energía de enlace por nucleón, más estable será el núcleo correspondiente.



Ejercicio a| El tritio es un isótopo del hidrógeno, de masa 3,0160 u ( $1u = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg). Su núcleo está formado por un protón y dos neutrones. Determinar:

- a) El defecto de masa.
- b) La energía de enlace por nucleón, expresada en Julios y en MeV.

Solución|  $\Delta m = 1,45 \cdot 10^{-29}$  kg     $E_{\text{nucleón}} = 4,37 \cdot 10^{-13}$  J = 2,73 MeV

Ejercicio b| La masa del  $^{40}_{20}\text{Ca}$  es de 39,97545 u. Determinar:

- a) El defecto de masa.
- b) La energía de enlace.
- c) La energía de enlace por nucleón.

Solución|

# Radiactividad

La radiactividad hace referencia al proceso de ruptura de un núcleo inestable.

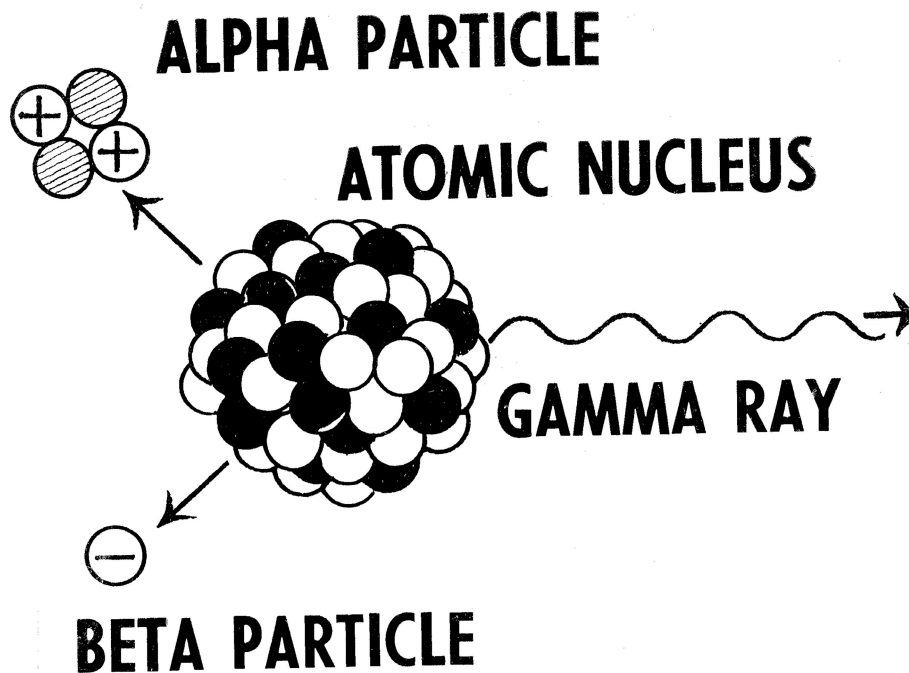
Esta ruptura supone la emisión de una o varias de las siguientes radiaciones:

- **Radiación  $\alpha$ .** Son núcleos de helio ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ )
- **Radiación  $\beta$ .** Son electrones ( $e^-$ )
- **Radiación  $\gamma$ .** Son ondas electromagnéticas (fotones) de alta frecuencia.

Las radiaciones  $\alpha$  y  $\beta$  se corresponden con verdaderos cambios nucleares, ya que el núcleo modifica su naturaleza; sin embargo, la radiación  $\gamma$  está relacionada con la vuelta al estado estable de un núcleo previamente excitado.

Los procesos de desintegración radiactiva cumplen las siguientes leyes de conservación:

- Conservación de la energía.
- Conservación de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la carga.
- Conservación del número de nucleones.



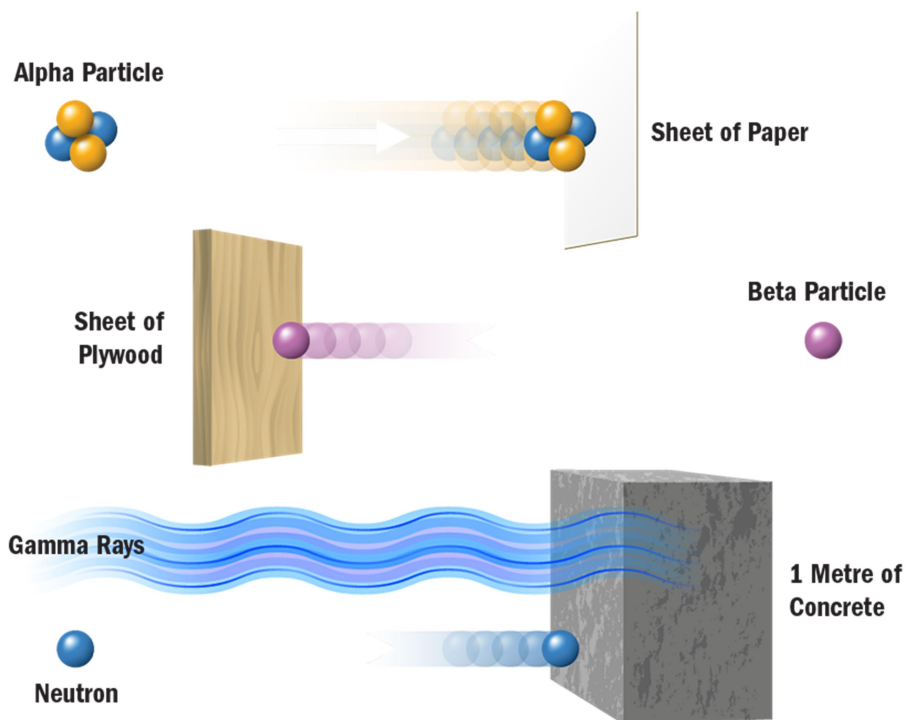
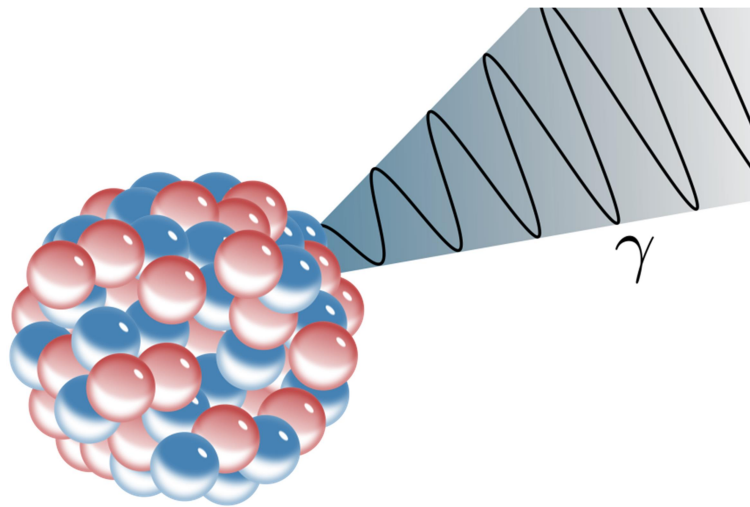
# La Emisión $\gamma$

La radiación  $\gamma$  se corresponde con fotones de muy alta energía.

Esta emisión supone la vuelta al estado fundamental de un núcleo previamente excitado. Es una emisión radiactiva que, generalmente, acompaña a las emisiones  $\alpha$  y  $\beta$ .

En el núcleo existen niveles de energía, de modo análogo a como sucede en la corteza electrónica, de modo que los nucleones pueden disponerse en distintas configuraciones, unas más estables que otras desde el punto de vista energético. A la configuración más estable (menos contenido de energía) se la denomina estado fundamental. Cualquier otra disposición es denominada estado excitado.

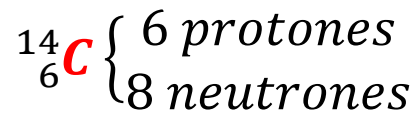
La energía de los fotones emitidos depende de la transición energética que tiene lugar en el núcleo, desde un determinado estado excitado al estado fundamental. Por tanto, los núcleos emitirán únicamente rayos  $\gamma$  de determinadas frecuencias.



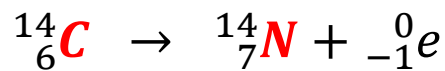
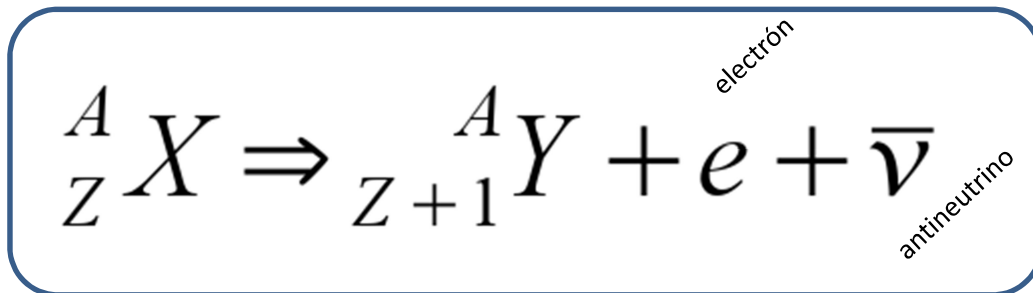


# La Emisión $\beta^-$

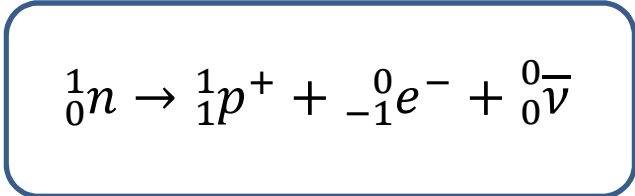
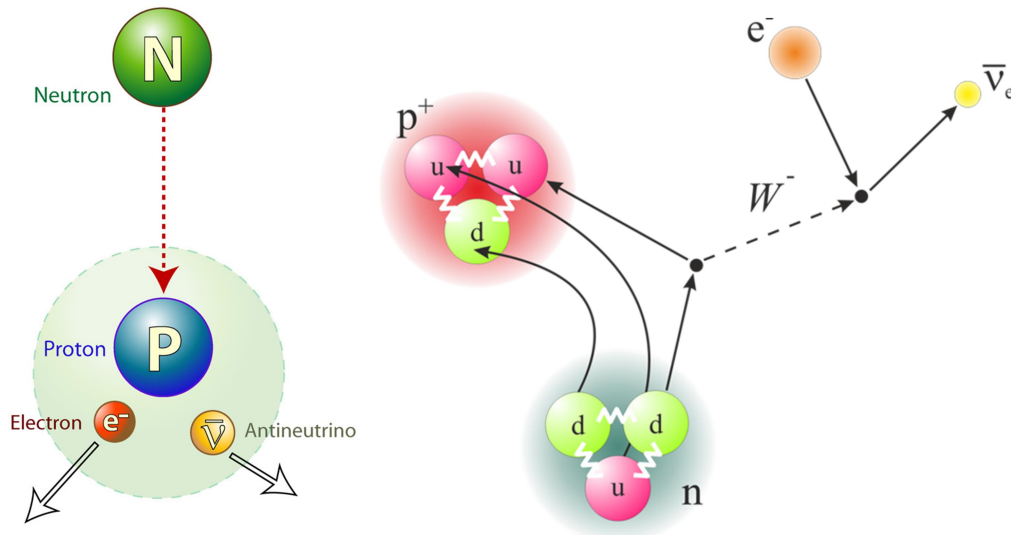
La desintegración radiactiva con emisión de partículas  $\beta^-$  (electrones) es característica de núcleos con exceso de neutrones.



El proceso que tiene lugar es el siguiente:



Si en el núcleo no hay electrones, ¿De dónde procede el electrón emitido?

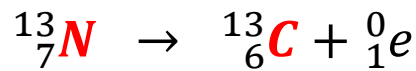
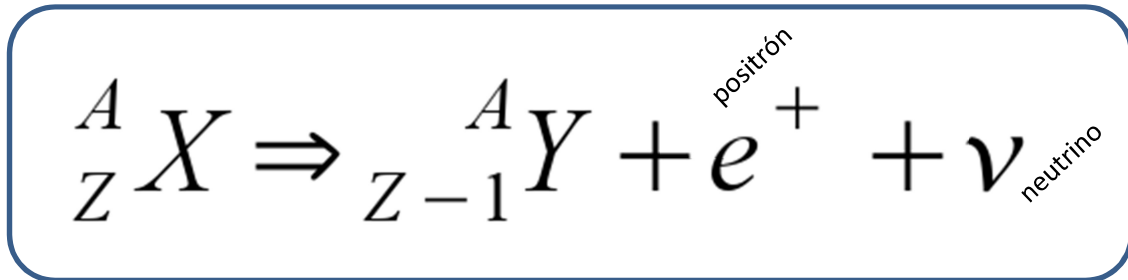


## La Emisión $\beta^+$

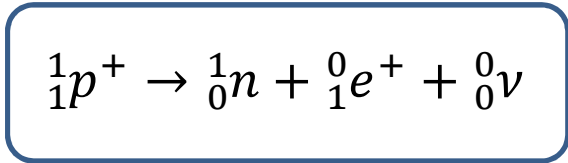
La desintegración radiactiva con emisión de partículas  $\beta^+$  (positrones) es característica de núcleos con exceso de protones.

$${}_{7}^{13}\text{N} \begin{cases} 7 \text{ protones} \\ 6 \text{ neutrones} \end{cases}$$

El proceso que tiene lugar es el siguiente:



El origen del positrón hay que buscarlo en el siguiente proceso:

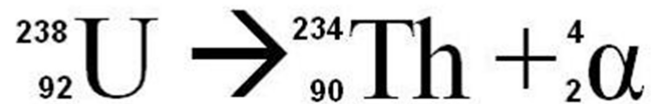
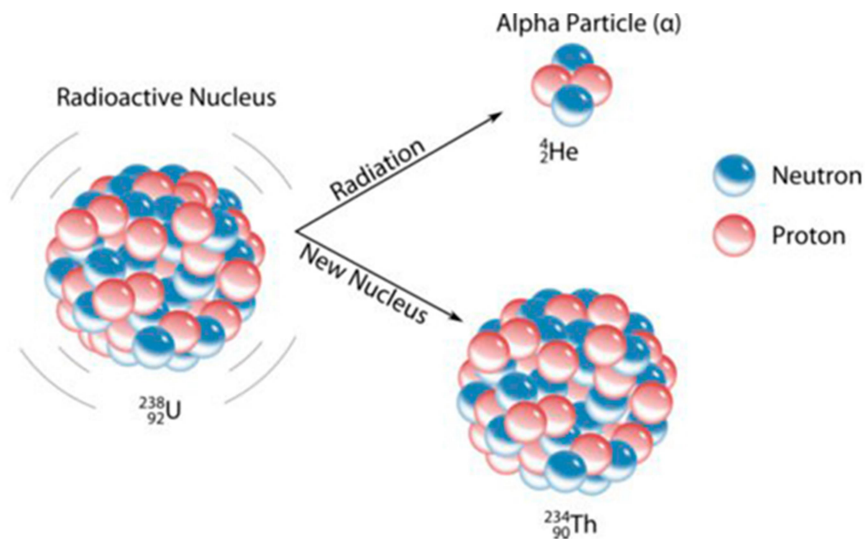
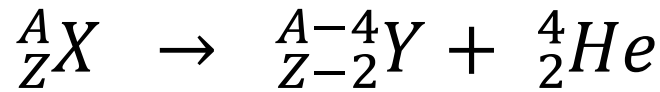




# La Emisión $\alpha$

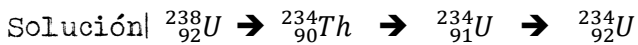
La desintegración radiactiva con emisión de partículas  $\alpha$  (núcleos de helio) es característica de los núcleos pesados, es decir, de número atómico elevado.

El proceso que tiene lugar es el siguiente:

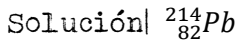


Type	Nuclear equation	Representation	Change in mass/atomic numbers
Alpha decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: decrease by 4 Z: decrease by 2
Beta decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y$		A: unchanged Z: increase by 1
Gamma decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$		A: unchanged Z: unchanged
Positron emission	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^{A}_{Z-1}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1

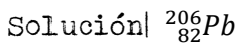
Ejercicio 01| El  $^{238}_{92}\text{U}$  emite una partícula  $\alpha$  y dos partículas  $\beta^-$ , de forma sucesiva. Indica cada uno de los productos intermedios y el elemento final de la serie.



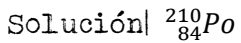
Ejercicio 02| Si el  $^{234}_{92}\text{U}$  emite cinco partículas  $\alpha$ , de forma sucesiva, ¿En qué elemento se transforma?



Ejercicio 03| El  $^{214}_{82}\text{Pb}$  emite, de forma sucesiva, las siguientes partículas:  $\beta^-$ ,  $\beta^-$ ,  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\alpha$ . Indica el producto final de la serie.



Ejercicio 04| Partiendo de  $^{214}_{82}\text{Pb}$ , se emiten, sucesivamente, las siguientes partículas:  $\beta$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta$ . Indica el producto final de la serie.



Ejercicio 05| Una serie radiactiva comienza en el  $^{235}_{92}\text{U}$ . Se emiten, sucesivamente, las siguientes partículas:  $\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha, \alpha, \alpha, \beta, \beta, \alpha$ . Indica el producto final.

82 207.2 <b>Pb</b> PLOMO	83 208.98 <b>Bi</b> BISMUTO	84 (209) <b>Po</b> POLONIO	85 (210) <b>At</b> ASTATO	86 (222) <b>Rn</b> RADÓN	
87 (223) <b>Fr</b> FRANCIO	88 (226) <b>Ra</b> RADIO	89 (227) <b>Ac</b> ACTINIO	90 232.04 <b>Th</b> TORIO	91 231.04 <b>Pa</b> PROTACTINIO	92 238.03 <b>U</b> URANIO

## Magnitudes Características de la Desintegración Radiactiva

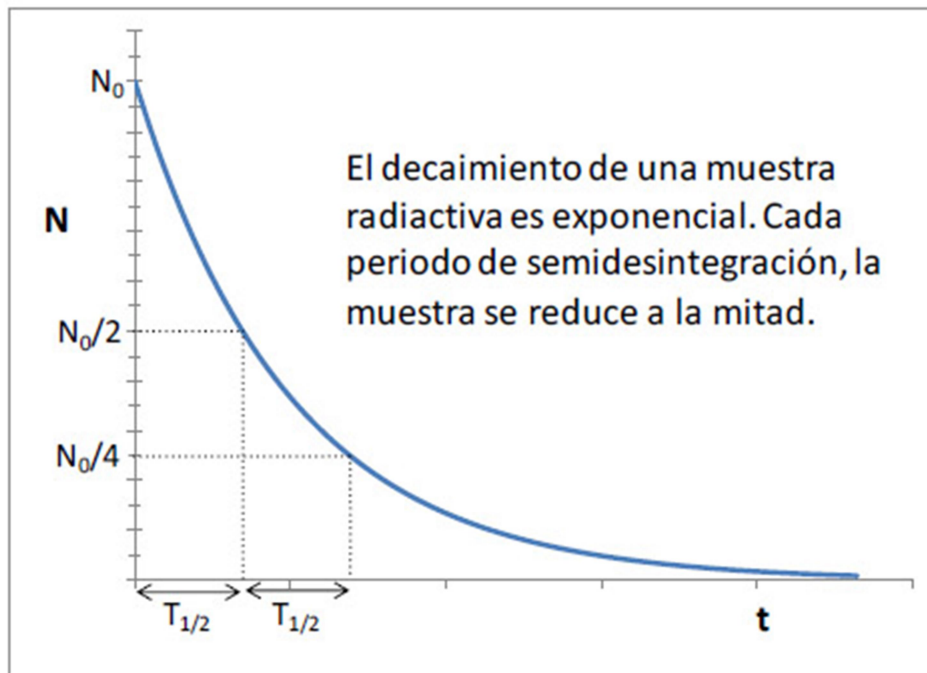
### □ Ecuación Fundamental de la Radiactividad

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

$N$  = número de núcleos radiactivos que quedan sin desintegrar en un instante dado

$N_0$  = número inicial de núcleos radiactivos

$\lambda$  = constante de desintegración ( $s^{-1}$ )



$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Ecuación fundamental en función de la masa inicial de núcleos radiactivos y de la masa existente después de un tiempo.

☐ Actividad o Velocidad de Desintegración

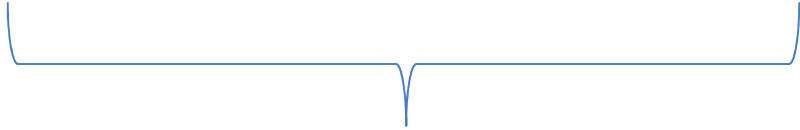
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N$$

La unidad de actividad es el Becquerel (Bq). 1 Bq = 1 desintegración/s

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

A = actividad después de transcurrido un tiempo t

A<sub>0</sub> = actividad inicial de la muestra



Ecuación fundamental en función de la actividad

Período de Semidesintegración

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

TIEMPO QUE DEBE TRANSCURRIR PARA QUE EL NÚMERO DE NÚCLEOS PRESENTES EN UNA MUESTRA DE MATERIAL RADIATIVO SE REDUZCA A LA MITAD.

Vida Media

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

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

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

ES EL PROMEDIO DE VIDA, ES DECIR, EL TIEMPO QUE POR TÉRMINO MEDIO TARDARÁ UN NÚCLEO RADIATIVO EN DESINTEGRARSE.

Ejercicio 06| Una **sustancia radiactiva se desintegra según la ecuación  $N=N_0 \cdot e^{-0,005 \cdot t}$**

Si una muestra contiene, en un momento dado  $10^{26}$  núcleos, ¿Cuál será la actividad al cabo de tres horas?. ¿Cuál será el período de semidesintegración?

Solución| Al cabo de tres horas quedarán 365 núcleos y su actividad será  $A=1,83$  Bq. El período de semidesintegración es de 139 segundos.

Ejercicio 07| Si un isótopo radiactivo tiene un período de semidesintegración de un día, ¿qué parte de una muestra quedará al final del segundo día?

Solución|  $N=N_0 / 4$

Ejercicio 08| Un isótopo radiactivo tiene un período de semidesintegración de 10 años. Si se tiene una muestra de 80 mg de este isótopo, determina:

- Su constante de desintegración radiactiva.
- La masa que quedará al cabo de 30 años.
- La masa que se tenía hace 30 años.

Solución|  $\lambda=0,0693$  años       $m=10$  mg       $m_0=640$  mg

Ejercicio 09| Una muestra de madera, procedente de una tumba egipcia, tiene una actividad de 13.356 desintegraciones/día por cada gramo de carbono-14. Sabiendo que la actividad actual de un gramo de carbono-14 es de 920 desintegraciones/hora y que el período de semidesintegración de este isótopo es de 5.730 años, termina la edad de la muestra de madera.

Solución| La muestra de madera tiene una antigüedad de 4.045 años.

Ejercicio 10| Se tiene una muestra de 80 mg del isótopo radio-226, cuya vida media es de 1.600 años. Determina:

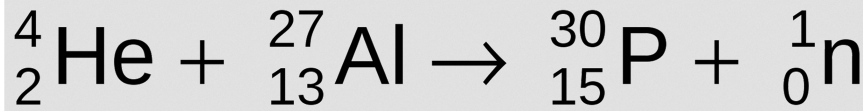
- La masa que quedará dentro de 500 años.
- El tiempo que debe transcurrir para que su actividad se reduzca a la mitad.

Solución|  $m=59$  mg       $t=2,22 \cdot 10^3$  años

# Reacciones Nucleares

Las reacciones nucleares son aquellas en las que intervienen núcleos atómicos. Generalmente se producen cuando un núcleo es bombardeado con un núcleo de menor tamaño (núcleos de He: partículas alfa) o con partículas subatómicas (neutrones o protones).

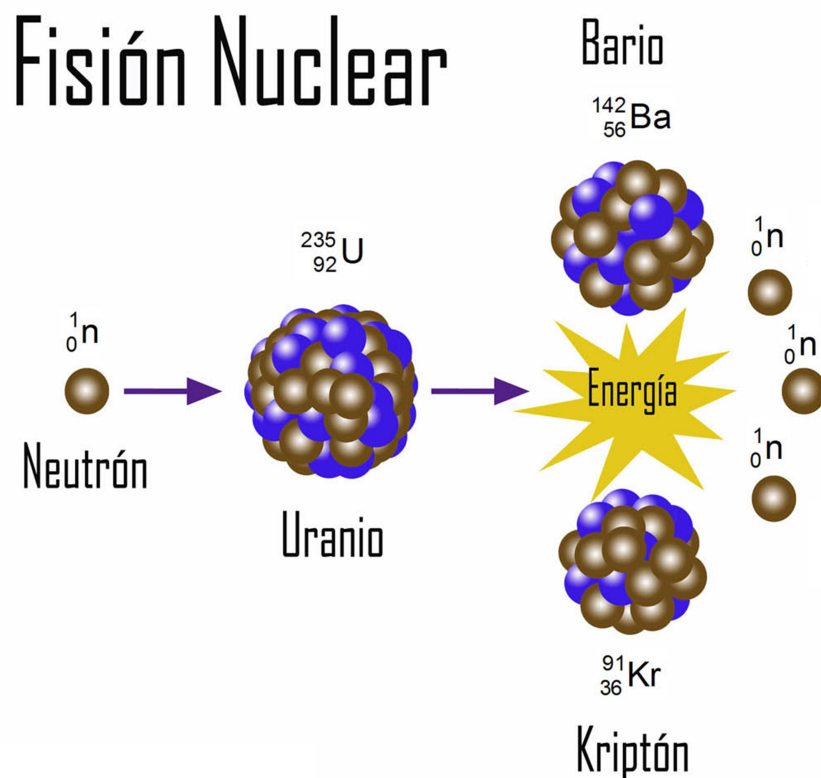
En las reacciones nucleares se conservan el número atómico y el número másico.



La ventaja que presentan los neutrones al ser utilizados como proyectiles, sobre las partículas alfa y los protones, es que al no tener carga eléctrica penetran fácilmente en el núcleo utilizado como blanco.

## Reacciones Nucleares | La Fisión Nuclear

La fisión nuclear consiste en la división de un núcleo pesado en dos núcleos más ligeros. Estos últimos núcleos son más estables ya que tienen mayores energías de enlace por nucleón que el núcleo de partida y, por tanto, en el proceso se libera energía.

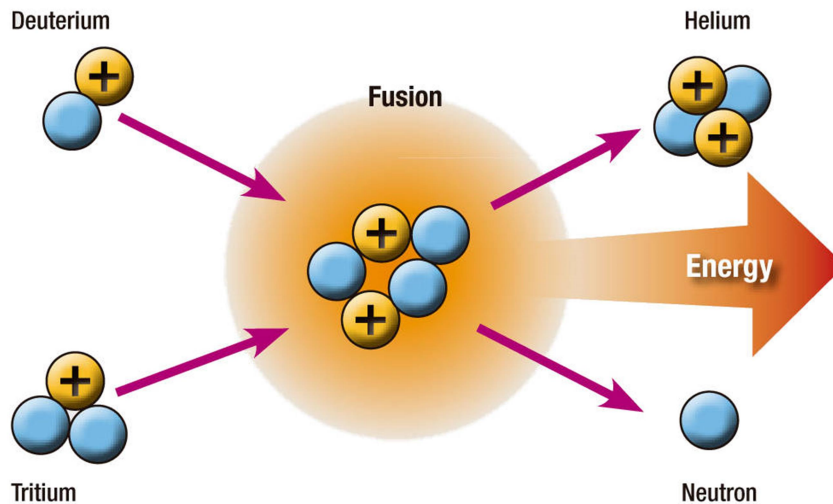
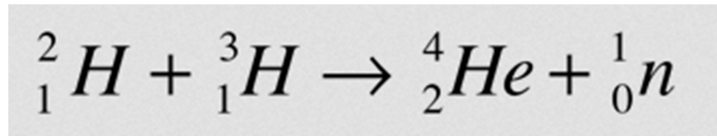


En el proceso de fisión de un núcleo se liberan proyectiles que pueden iniciar nuevas reacciones de fisión, convirtiendo el proceso en una reacción en cadena.



## Reacciones Nucleares | La Fusión Nuclear

La fusión nuclear consiste en la unión de núcleos ligeros para generar núcleos más pesados. Cuando se unen dos núcleos ligeros, se obtiene un núcleo más estable, con mayor energía de enlace por nucleón y, en el proceso se libera energía.



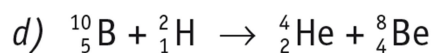
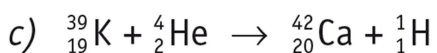
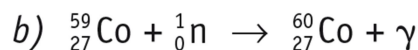
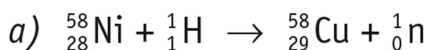
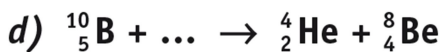
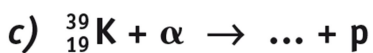
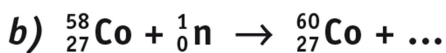
Ejercicio 11|

¿Cuál de las siguientes reacciones nucleares representa el resultado de la fisión del  ${}^{235}_{92}\text{U}$  cuando absorbe un neutrón?

- a)  ${}^{209}_{82}\text{Pb} + 5\alpha + 3p + 4n$
- b)  ${}^{90}_{38}\text{Sr} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 6n + \beta$
- c)  ${}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 3n$

Ejercicio 12|

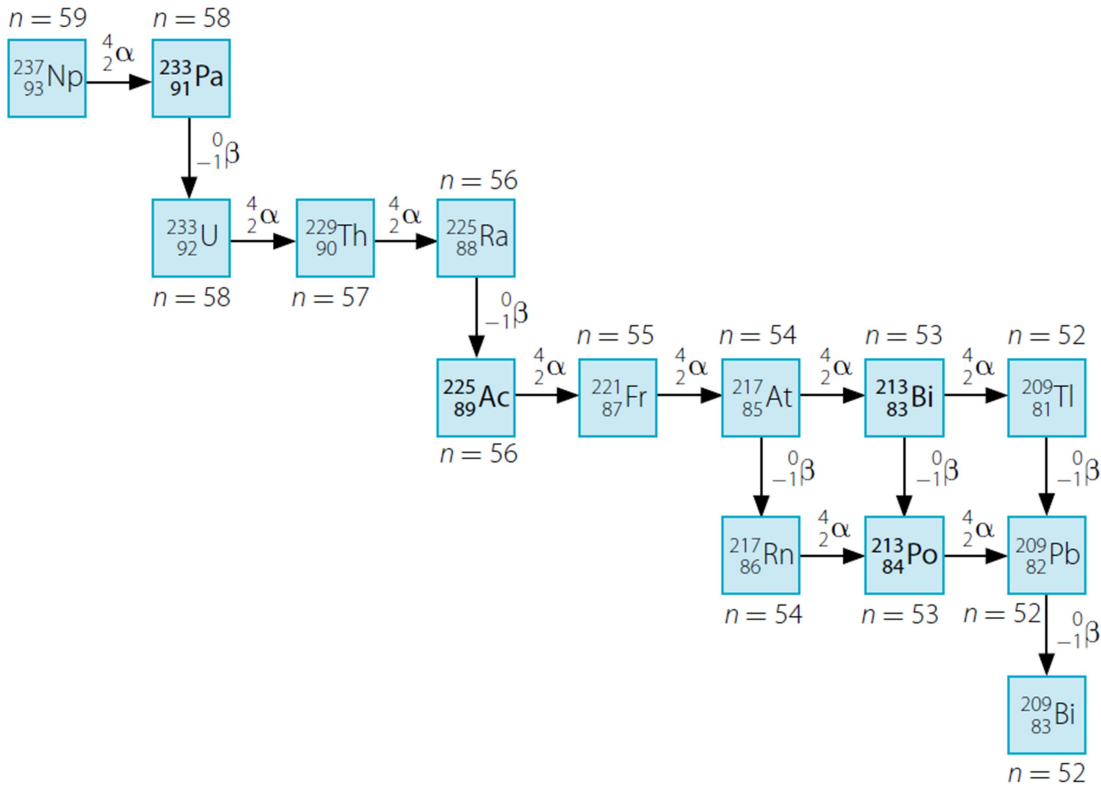
Escribe y completa las siguientes reacciones nucleares:



## Ejercicios Propuestos

<p><b>A </b>                      La constante de desintegración de una sustancia radiactiva es <math>2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}</math>. Si tenemos 200 g de ella, ¿cuánto tiempo debe transcurrir para que se reduzca a 50 g? ¿Cuál es su periodo de semidesintegración y su semivida?</p> <p>Al aplicar la ecuación fundamental de la radiactividad se obtiene:  <math>m = m_0 e^{-\lambda t}; \quad 50 \text{ g} = 200 \text{ g} \cdot e^{-2 \cdot 10^{-6} t}</math></p> $L\left(\frac{50}{200}\right) = 2 \cdot 10^{-6} t; \quad t = 6,9 \cdot 10^5 \text{ s}$ $\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 5 \cdot 10^5 \text{ s}$ $T_{1/2} = \tau \cdot L2 = 5 \cdot 10^5 \text{ s} \cdot 0,693 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ s}$	<p><b>B </b>                      El periodo de semidesintegración de un elemento radiactivo es de 28 años. ¿Cuánto tiempo tiene que transcurrir para que su cantidad se reduzca al 75% de la muestra inicial?</p> <p>El valor de la constante de desintegración es el siguiente:</p> $\lambda = \frac{L2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{28 \text{ años}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ años}^{-1}$ <p>El tiempo se calcula a partir de la ecuación fundamental de la radiactividad:</p> $N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad 0,75 N_0 = N_0 e^{-2,5 \cdot 10^{-2} t};$ $L0,75 = -2,5 \cdot 10^{-2} t; \quad t = 11,5 \text{ años}$
<p><b>C </b>                      Una sustancia radiactiva se desintegra según la ecuación <math>N = N_0 e^{-0,4 t}</math> en unidades del SI. Calcula su periodo de semidesintegración.</p> <p>De acuerdo con la ecuación fundamental de la radiactividad, se cumple:</p> $N = N_0 e^{-0,4 t}; \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-0,4 T_{1/2}}$ <p>Aplicando logaritmos neperianos se obtiene</p> $-L2 = -0,4 T_{1/2}; \quad T_{1/2} = 1,7 \text{ s}$	<p><b>D </b>                      La semivida del polonio-210 es 138 días. Si disponemos inicialmente de 1 mg de polonio, ¿al cabo de cuánto tiempo quedarán 0,25 mg?</p> <p>Habrán transcurrido dos semividas, es decir, dos periodos de semidesintegración:</p> $t = 2 \cdot 138 \text{ días} = 276 \text{ días}$
<p><b>E </b>                      El siguiente esquema indica los núclidos de la desaparecida serie del neptunio. Complétala señalando el número atómico de cada núclido y las partículas que se emiten cada vez que uno se transforma en el siguiente.</p> <pre>                     graph TD                         Np["237 Np"] -- alpha --&gt; Box1[" "]                         Box1 -- beta --&gt; U["233 U"]                         U --&gt; Th["229 Th"]                         Th --&gt; Ra["225 Ra"]                         Ra -- beta --&gt; Box2[" "]                         Box2 --&gt; Fr["221 Fr"]                         Fr -- alpha --&gt; At["217 At"]                         At -- beta --&gt; Box3[" "]                         Box3 -- alpha --&gt; Tl["209 Tl"]                         Tl -- alpha --&gt; Pb["209 Pb"]                         Pb -- beta --&gt; Bi["209 Bi"]                     </pre>	

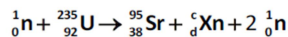
Solución:



F|

El uranio-235 tiene unos cuarenta modos posibles de desintegración por absorción de un neutrón.

a) Completa la reacción nuclear siguiente, que ocurre cuando un núcleo de  $^{235}\text{U}$  absorbe un neutrón:



Indica también cuántos neutrones y protones tiene este núcleo de uranio.

b) Calcula la energía producida en la fisión de un núcleo de uranio 235, de acuerdo con la reacción anterior.

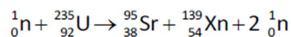
Datos:  $m_n = 1,008\ 66\ \text{u}$ ;  $m(^{235}\text{U}) = 235,124\ \text{u}$ ;  $m(^{95}\text{Sr}) = 94,9194\ \text{u}$ ;  $m(^{139}\text{Xe}) = 138,919\ \text{u}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8\ \text{m s}^{-1}$ ;  
 $1\ \text{u} = 1,660\ 54 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$ .

a) Para completar la reacción hay que tener en cuenta que debe conservarse tanto el número de nucleones como la carga eléctrica. Por tanto:

$$1 + 235 = 95 + c + 2 \cdot 1 \rightarrow c = 236 - 95 - 2 = 139$$

$$92 = 38 + d \rightarrow d = 54$$

La reacción queda entonces:



El núcleo de uranio tiene 92 protones y  $235 - 92 = 143$  neutrones.

b) La energía producida depende de la diferencia de masa entre los reactivos y los productos. Para la reacción en la que se fisiona un núcleo:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1\text{n}) - m({}_{38}^{95}\text{Sr}) - m({}_{54}^{139}\text{Xe}) - 2 \cdot m({}_0^1\text{n}) = m({}_{92}^{235}\text{U}) - m({}_{38}^{95}\text{Sr}) - m({}_{54}^{139}\text{Xe}) - m({}_0^1\text{n}) = \\ &= 235,124\ \text{u} - 94,9194\ \text{u} - 138,919\ \text{u} - 1,008\ 66\ \text{u} = 0,2769\ \text{u} \end{aligned}$$

Ahora convertimos esta masa en energía mediante la fórmula de Einstein.

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 0,2769\ \mu\text{g} \cdot \frac{1,660\ 54 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}{1\ \mu\text{g}} \cdot (3 \cdot 10^8\ \text{m/s})^2 = 4,138 \cdot 10^{-11}\ \text{J/núcleo}$$