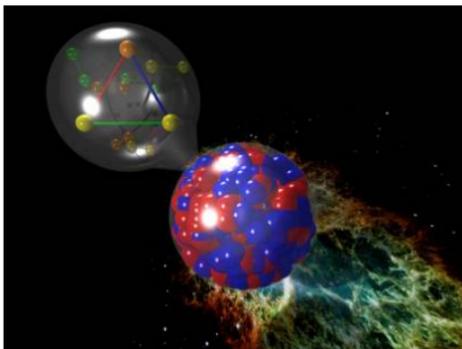


# Tema 6. Estructura nuclear

Física II, Grado en Matemáticas



# Contenido

- 1 Introducción
- 2 Partículas nucleares
  - Nucleones y número másico
  - Isótopos
  - Tamaño y densidad nucleares
- 3 Estabilidad nuclear
  - Fuerzas nucleares
  - Masa y energía de enlace
  - Estabilidad nuclear
- 4 Radiactividad
  - Definiciones
  - Decaimientos radiactivos
    - Decaimiento  $\alpha$
    - Decaimiento  $\beta$
    - Decaimiento  $\gamma$
  - Series radiactivas
  - Reacciones nucleares
- 5 Aplicaciones de la Física nuclear
  - Datación radiactiva
  - Energía nuclear
    - Fisión nuclear
    - Fusión nuclear
  - Aplicaciones en Medicina
  - Otras aplicaciones
- 6 Problemas



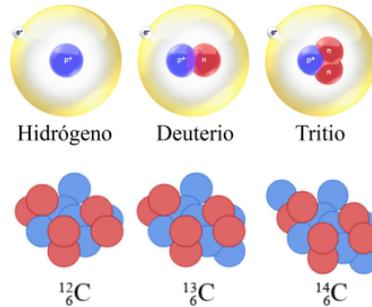


# Isótopos

## Isótopo

Se llama **isótopo** a cada uno de los núclidos que puede tener un elemento de número atómico dado.

- Los distintos isótopos difieren entre sí en el número de neutrones que contienen. También tienen, por tanto, distinto número másico.
- Los isótopos de un mismo elemento tienen iguales propiedades químicas, pero distintas propiedades nucleares.
- Los isótopos de un cierto elemento  $M$  se etiquetan como  ${}^A_ZM$ .



## Abundancia natural

Se llama **abundancia natural de un isótopo** al porcentaje de ese isótopo presente en la naturaleza, con relación a un elemento dado.

Hidrógeno ( $Z = 1$ )

${}^1\text{H}$  ( $1p$ )  $\rightarrow$  99.985 %

${}^2\text{H}$  ( $1p + 1n$ )  $\rightarrow$  0.014 %

${}^3\text{H}$  ( $1p + 2n$ )  $\rightarrow$  despreciable

Oxígeno ( $Z = 8$ )

${}^{16}\text{O}$  ( $8p + 8n$ )  $\rightarrow$  99.762 %

${}^{18}\text{O}$  ( $8p + 9n$ )  $\rightarrow$  0.200 %

${}^{17}\text{O}$  ( $8p + 10n$ )  $\rightarrow$  0.038 %

Uranio ( $Z = 92$ )

${}^{238}\text{U}$  ( $92p + 146n$ )  $\rightarrow$  99.276 %

${}^{235}\text{U}$  ( $92p + 143n$ )  $\rightarrow$  0.720 %

${}^{234}\text{U}$  ( $92p + 142n$ )  $\rightarrow$  0.0054 %

Algunos isótopos de un elemento dado pueden ser **radiactivos**.

## Tamaño y densidad nucleares

- La mayoría de los núcleos son **esféricos**; su radio depende del número másico:

$$R \approx R_0 A^{1/3}$$

$$(R_0 \approx 1.2 - 1.4 \text{ fm})$$

- El volumen del núcleo es entonces aproximadamente proporcional al número de nucleones que contiene.
- La densidad nuclear es aproximadamente la misma para todos los núcleos:

$$\rho = \frac{A}{V} \approx \frac{3}{4\pi R_0^3}$$

$$\rho \approx 2.3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

Esta situación es análoga a la de una gota de un líquido, cuya densidad es independiente del tamaño de la gota. De hecho, el **modelo de la gota líquida** es un modelo que permite estudiar algunos aspectos de la **fisión nuclear**.

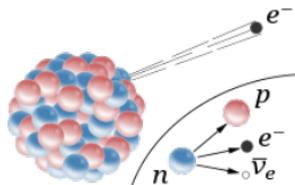


# Fuerzas nucleares

## Interacciones nucleares

Las interacciones que tienen lugar en las proximidades de los núcleos atómicos se denominan **interacciones nucleares**. Son de dos tipos, llamadas **débil** y **fuerte**.

- La interacción nuclear débil es la responsable de la **radiactividad**, y es la iniciadora del proceso de **fiisión nuclear**.
- La interacción nuclear fuerte (o **fuerza hadrónica**) es la responsable de la cohesión de los núcleos atómicos.



## CARACTERÍSTICAS DE LA FUERZA NUCLEAR FUERTE

- Es mucho más intensa que la fuerza (repulsiva) electrostática entre los protones del núcleo:

$$F_{\text{nuclear}}(N - N) \gg F_{\text{electrostática}}(p - p) \gg F_{\text{gravitatoria}}$$

- La fuerza nuclear fuerte entre dos nucleones es independiente de su tipo:

$$F_{\text{nuclear}}(p - p) \approx F_{\text{nuclear}}(n - n) \approx F_{\text{nuclear}}(p - n)$$

- Es de **muy corto alcance**, y se anula a distancias de algunos femtómetros.

# Masa y energía de enlace

La masa de un núclido es menor que la suma de las masas de sus constituyentes:

$$M_N(Z, A) < Zm_P + (A - Z)m_n$$

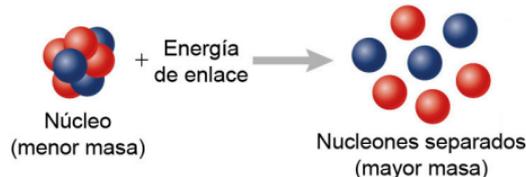
En otras palabras, cuando dos o más nucleones se unen entre sí, parte de la masa de estos se pierde transformándose en energía, que se desprende. Esta diferencia de masa, o **defecto de masa**, permite definir la energía de enlace de los núcleos

## Energía de enlace

Se llama **energía de enlace** a la energía asociada al defecto de masa de formación de un núclido:

$$E_b = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_N(A, Z)]c^2$$

Alternativamente, la energía de enlace es la energía que hay que suministrar a un núclido para separarlo en sus nucleones constituyentes. Esta energía produce un aumento neto de masa.



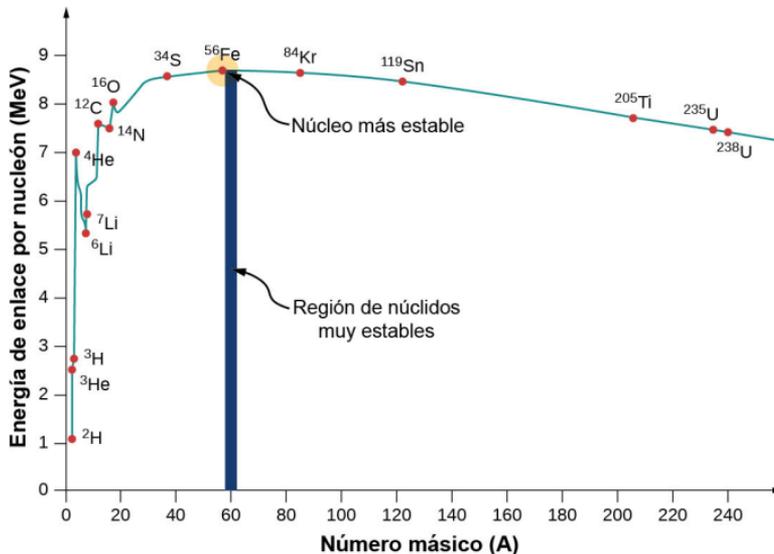
Una expresión aproximada para la energía de enlace es

$$E_b = [ZM_H + (A - Z)m_n - M_A]c^2$$

En Física nuclear se utiliza la **unidad de masa atómica**, u, definida como

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} M_A(^{12}\text{C}) = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

# Masa y energía de enlace

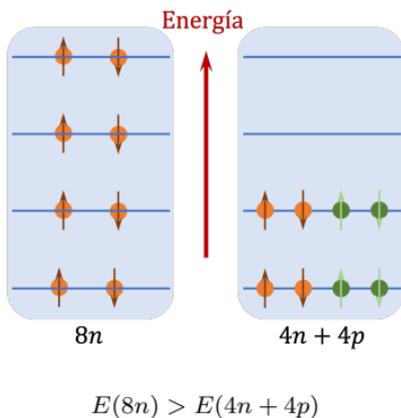


- Para  $A$  pequeño,  $E_b/A$  aumenta porque el número de nucleones vecinos aumenta rápidamente.
- La energía de enlace por nucleón es aproximadamente constante para  $A \gtrsim 40$ .
- La pendiente negativa para  $A \gtrsim 50$  se debe a la repulsión coulombiana, que aumenta con  $Z^2$ .
- Para  $A$  muy grandes, los núcleos se vuelven inestables, y fisionan espontáneamente.

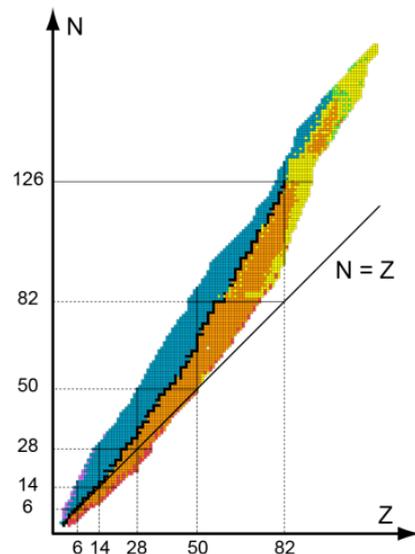
# Estabilidad nuclear

La estabilidad de los núclidos depende del número relativo de neutrones y protones que contienen.

- Los núclidos ligeros son **estables con  $N = Z$** , debido a que el principio de exclusión de Pauli dificulta que aumente el número de nucleones iguales.



- Los núclidos pesados son **estables con  $N > Z$** , para minimizar la repulsión electrostática entre protones.



# Radiactividad: definiciones

## Radiactividad

Se llama **radiactividad** al proceso físico mediante el que un núcleo inestable, llamado **radionúcleo**, pierde energía emitiendo partículas o radiación electromagnética.

La radiactividad es un proceso **estadístico**. No se puede saber qué átomo se va a descomponer o cuando; solo se puede conocer la probabilidad de que un núcleo se desintegre en un cierto intervalo de tiempo.

## Constante radiactiva

Se llama **constante radiactiva** de un núcleo,  $\lambda$ , a la probabilidad de que éste se desintegre en un cierto intervalo de tiempo.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \Rightarrow \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

## Actividad

Se llama **actividad** de un núcleo,  $A$ , a la velocidad con la que se desintegra por radiactividad.

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

La unidad de actividad en el SI es el **bequerelio** (Bq), definida como una desintegración por segundo. Un múltiplo del Bq es el **curie** (Ci), definido de modo que

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

# Radiactividad: definiciones

## Tiempo de vida media

Se llama **tiempo de vida media** de un radionúclido,  $\tau$ , al tiempo que se necesita para que el número de radionúclidos en una muestra se reduzca en un factor  $e$ .

## Periodo de semidesintegración

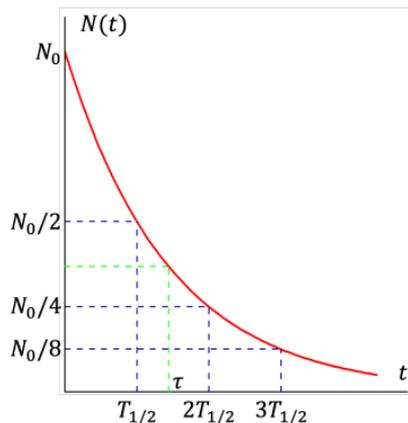
Se llama **periodo de semidesintegración** de un radionúclido,  $T_{1/2}$ , al tiempo que se necesita para que el número de radionúclidos en una muestra (o su actividad) se reduzca a la mitad.

Los tiempos  $\tau$  y  $T_{1/2}$  verifican, por definición,

$$N_0 e^{-\lambda\tau} = \frac{N_0}{e} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \quad \Rightarrow \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

Los sucesivos múltiplos de  $T_{1/2}$  corresponden a los tiempos para los que se desintegra la mitad de los núcleos existentes en el tiempo inmediatamente anterior.



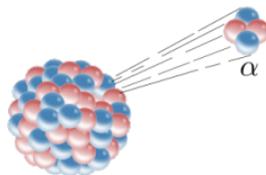
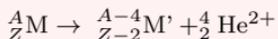
## Radiactividad: definiciones

Núcleo	$T_{1/2}$	Decaimiento
$^{238}\text{U}$	$4.468 \cdot 10^9$ años	$\alpha$
$^{234}\text{U}$	235500 años	$\alpha$
$^{230}\text{Th}$	75380 años	$\alpha$
$^{226}\text{Ra}$	1602 años	$\alpha$
$^{234}\text{Th}$	24.1 días	$\beta$
$^{222}\text{Rn}$	3.82 días	$\alpha$
$^{234}\text{Pa}$	6.70 horas	$\beta$
$^{214}\text{Pb}$	26.8 minutos	$\beta$
$^{218}\text{At}$	1.5 s	$\alpha$
$^{218}\text{Rn}$	35 ms	$\alpha$

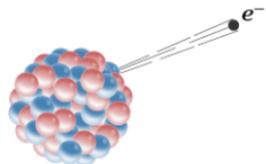
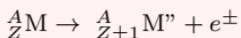
## Decaimientos radiactivos

De forma natural, los radionúclidos pierden energía mediante tres procesos radiactivos:

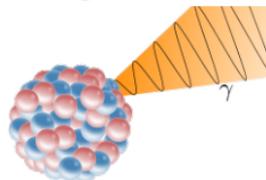
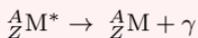
**Desintegración  $\alpha$ :** Un radionúclido  ${}^A_ZM$  emite una **partícula  $\alpha$** , formada por dos neutrones y dos protones (núcleos de Helio):



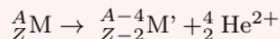
**Desintegración  $\beta$ :** El radionúclido  ${}^A_ZM$  emite un electrón o un positrón:



**Desintegración  $\gamma$ :** El radionúclido  ${}^A_ZM$  emite radiación electromagnética, sin cambio en  $Z$  y  $A$ :



Artificialmente se pueden observar otros procesos radiactivos, como la emisión de un neutrón o la captación de un electrón.

Decaimiento  $\alpha$ 

El decaimiento  $\alpha$  se produce si la masa del radionúclido de partida es mayor que la de los productos del decaimiento. La conservación de la energía y del momento se escriben

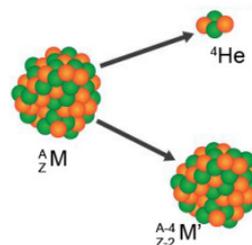
$$m_M c^2 = m_{M'} c^2 + T_{M'} + m_\alpha c^2 + T_\alpha$$

$$\vec{p}_{M'} = -\vec{p}_\alpha,$$

de donde

$$[m_M - (m_{M'} + m_\alpha)] c^2 = T_{M'} + T_\alpha \equiv Q > 0$$

$$T_\alpha = \frac{Q}{1 + m_\alpha/m_{M'}} \approx Q \left(1 - \frac{4}{A}\right)$$



## Ejemplo

Consideremos el posible decaimiento  $\alpha$  del  ${}^{232}\text{Th}$  en  ${}^{228}\text{Ra}$ . Las masas de los núclidos involucrados son  $m_{232\text{Th}} = 232.038124$  u,  $m_{228\text{Ra}} = 228.031139$  u y  $m_{4\text{He}} = 4.002603$  u. Entonces

$$Q = 0.004382 \text{ u} \times 931.5 \text{ MeV/u} = 4.08 \text{ MeV} > 0,$$

de manera que el  ${}^{232}\text{Th}$  es, teóricamente, inestable bajo decaimiento  $\alpha$ . La energía cinética de la partícula  $\alpha$  emitida es

$$T_\alpha = 4.009 \text{ MeV}$$

Teóricamente, este tipo de decaimiento se puede dar en todos los núcleos pesados ( $Z > 83$ ).

# Decaimiento $\beta$

Tiene lugar en núclidos que tienen neutrones en exceso o en defecto para conseguir su estabilidad.

Existen dos tipos de decaimientos  $\beta$ :

**Decaimiento  $\beta^-$** : Corresponde a la descomposición de un neutrón en un protón, un electrón y un **antineutrino**



y se da espontáneamente para neutrones libres con  $T_{1/2} = 10.8$  min.

## Ejemplo

El  $^{60}\text{Co}$  experimenta decaimiento  $\beta^-$  a  $^{60}\text{Ni}$ , según  $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$

**Decaimiento  $\beta^+$** : Corresponde a la descomposición de un protón en un neutrón, un positrón y un **neutrino**



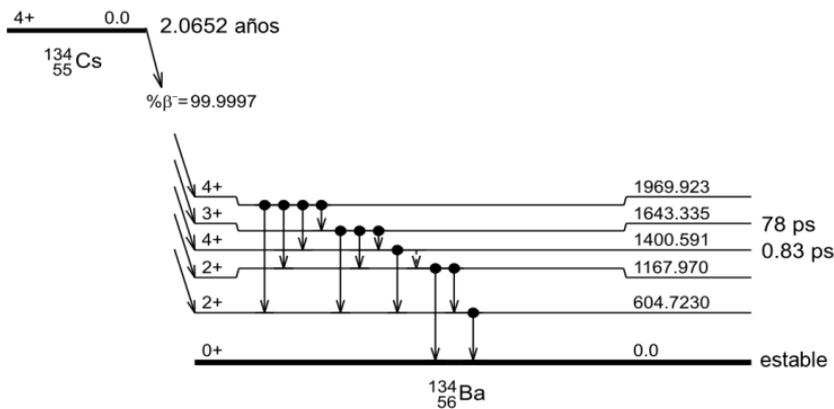
Los protones libres no experimentan este decaimiento, aunque sí los protones ligados en núclidos.

## Ejemplo

El  $^{13}\text{N}$  experimenta decaimiento  $\beta^+$  a  $^{13}\text{C}$ , según  $^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$

# Decaimiento $\gamma$

- Corresponde a la desexcitación de un núcleo mediante la emisión de un fotón, sin cambio en los números atómico y másico.
- En general, aparece acompañando a un decaimiento  $\alpha$  o  $\beta$  a un núclido hijo en estado excitado, que se estabiliza mediante la emisión de un fotón.



- Las energías de los niveles nucleares son del orden del MeV, por los que los fotones  $\gamma$  tienen energías comprendidas entre  $10$  keV y algunos MeV.
- Las vidas medias de los emisores  $\gamma$  son pequeñas (del orden de  $10^{-12}$  s o inferiores), por lo que estos no se suelen observar directamente.

# Series radiactivas

El decaimiento de un núclido radiactivo da lugar, en general, a otro núclido radiactivo, que es a su vez inestable. El proceso continua hasta que se alcanza un núclido estable.

## Serie radiactiva

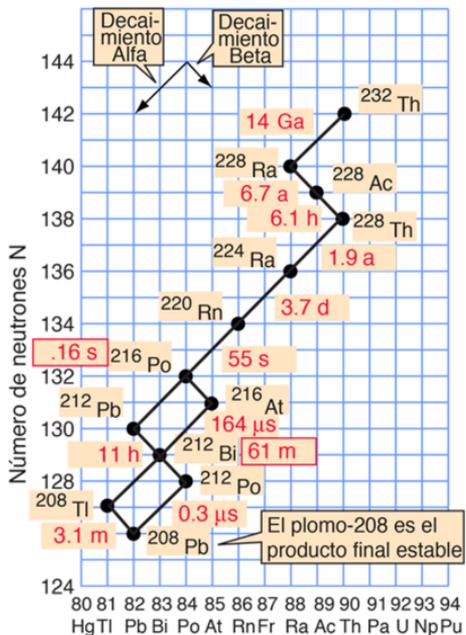
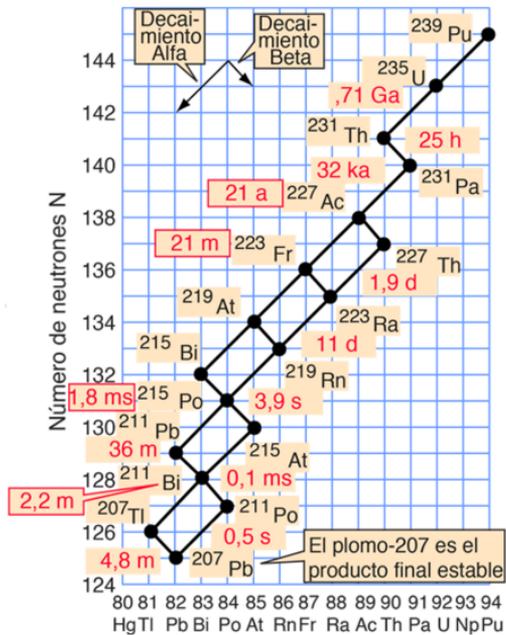
El conjunto de desintegraciones radiactivas generadas a partir de un radionúclido inicial hasta concluir en uno estable se llama **serie radiactiva**.

- El decaimiento  $\alpha$  cambia los números másicos en 4 unidades, mientras que los decaimientos  $\beta$  y  $\gamma$  no lo cambian. Así pues, **los números másicos de radionúclidos de una serie se diferencian en cuatro unidades**.
- Se conocen cuatro series radiactivas naturales:

Serie	Radionúclido padre	Número másico	Vida media (años)
Torio	${}_{90}^{232}\text{Th}$	$4n$	$1.39 \cdot 10^{10}$
Neptunio	${}_{93}^{237}\text{Np}$	$4n + 1$	$2.23 \cdot 10^6$
Uranio	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4n + 2$	$4.51 \cdot 10^9$
Actinio	${}_{92}^{235}\text{U}$	$4n + 3$	$7.07 \cdot 10^8$

- La serie del Neptunio ya no existe, puesto que su núclido de vida más larga, el  ${}^{237}\text{Np}$ , tiene una semivida menor que la edad de la Tierra (del orden de  $4.5 \cdot 10^9$  años).
- Existen también **series radiactivas artificiales**. En ellas, el radionúclido padre se obtiene de una reacción nuclear, que se desintegra mediante los procesos que conocemos.

## Series radiactivas

Serie del  $^{232}\text{Th}$ Serie del  $^{235}\text{U}$ 

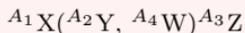
# Reacciones nucleares

Una forma de obtener información acerca de los núcleos consiste en “bombardearlos” con partículas de distinta naturaleza. El resultado de este “bombardeo” contiene información física.

Esencialmente, existen tres tipos de **reacciones nucleares**:

- **Dispersión elástica.** En este proceso, la partícula incidente es dispersada por el núcleo (cambia su velocidad), sin que el núcleo sea alterado.
- **Dispersión inelástica.** En este caso, la partícula incidente produce la excitación del núcleo. Este, a su vez, se desexcita emitiendo un fotón (decaimiento  $\gamma$ ).
- **Absorción.** En este proceso, la partícula incidente es absorbida por el núcleo, que se desestabiliza y puede producir radiactividad por distintos procesos.

La forma general de una reacción nuclear es  ${}_{Z_1}^{A_1}X + {}_{Z_2}^{A_2}Y \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}Z + {}_{Z_4}^{A_4}W$ , o bien



con

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

## Factor $Q$

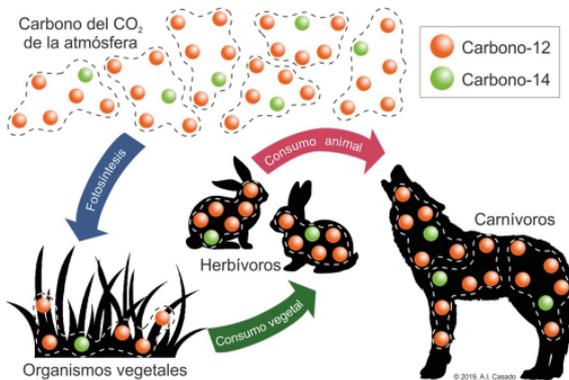
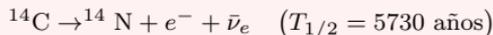
Se llama **factor  $Q$**  de una reacción nuclear a la energía liberada o absorbida en ella:

$$Q = \left[ \sum_i m_{\text{reactivos}} - \sum_j m_{\text{productos}} \right] c^2$$

Si  $Q > 0$ , la reacción se llama **exotérmica**; en ella se libera energía. Por el contrario, si  $Q < 0$ , la reacción se llama **endotérmica**, y es necesario suministrar energía para que se produzca.

# Datación radiactiva

El hecho de que ciertos núclidos tengan una vida media permite utilizarlos como **datadores**.



- El  $^{14}\text{C}$  se produce continuamente en la atmósfera debido a reacciones nucleares originadas por los rayos cósmicos.
- Los organismos vivos intercambian  $\text{CO}_2$  con la atmósfera, por lo que la proporción entre  $^{14}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$  en ellos es igual que en la atmósfera,  $1.3 \cdot 10^{-12}$ .
- Cuando un organismo muere, la absorción de carbono se detiene, y la razón  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  va disminuyendo por la desintegración del  $^{14}\text{C}$ .

La concentración de  $^{14}\text{C}$  en un instante  $t$  desde la defunción del individuo es

$$C(t) = C_{eq} e^{-\lambda t},$$

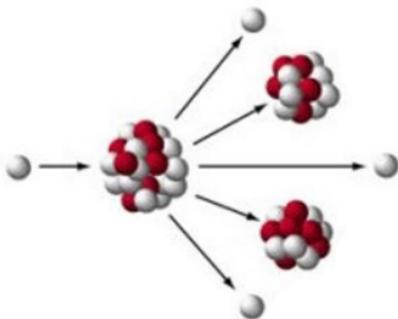
donde  $\lambda = \frac{\ln 2}{5730 \text{ años}}$ .

# Energía nuclear

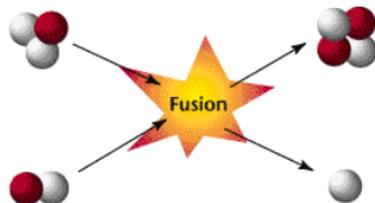
Existen dos formas de obtener energía a partir de núcleos atómicos:

- **Fisión nuclear**, que consiste en la escisión de un núcleo pesado inestable en dos núcleos más pequeños con liberación de energía.
- **Fusión nuclear**, que consiste en la unión de dos núcleos ligeros para formar otro más pesado, también con liberación de energía.

## FISIÓN NUCLEAR



## FISIÓN NUCLEAR



La liberación de energía se debe a la transformación de masa en energía, según la ecuación  $E = \Delta mc^2$ . La energía puesta en juego aparece como energía cinética de los productos de las reacciones.

# Fisión nuclear

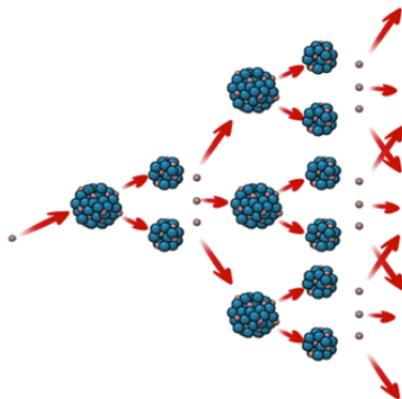
- Algunos núcleos pesados ( $Z > 92$ ) se pueden romper (“fisionar”) espontáneamente en dos núcleos más ligeros. Este proceso se llama **fisión espontánea**.
- Otros núcleos pesados pueden fisionarse cuando capturan un neutrón al ser “bombardeados” con un haz de energía adecuada.
- La energía liberada en una fisión nuclear es muy alta, del orden de 200 MeV por reacción. Por comparación, una combustión produce unos 4 eV.
- Entre los productos de una fisión se encuentran neutrones, que pueden incidir en otros núcleos cercanos y producir nuevas fisiones. Este proceso se llama **reacción en cadena**, y es la base física de los reactores nucleares.

## Constante de reproducción

Se llama **constante de reproducción**,  $K$ , al número medio de neutrones emitidos en cada fisión que producen de nuevo una fisión.

La constante de reproducción marca las características de una fisión nuclear en cadena:

- Si  $K < 1$ , la reacción se extingue.
- Si  $K = 1$ , la reacción se mantiene autosuficiente, y el proceso puede generar energía de forma controlada en **reactores de fisión**.
- Si  $K > 1$ , la reacción es descontrolada. El efecto es destructor.

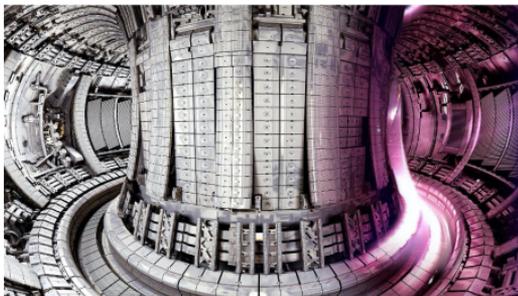


# Fusión nuclear

La fusión nuclear más simple corresponde a la del deuterio y el tritio para dar helio:



- La energía liberada es menor que en la fisión, aunque la energía por unidad de masa es mayor en la fusión.
- Las fundamentales de la fusión son la gran abundancia de combustible y la ausencia de residuos radiactivos.
- La desventaja principal es que la tecnología de fusión nuclear no está muy desarrollada, por las altas energías puestas en juego.

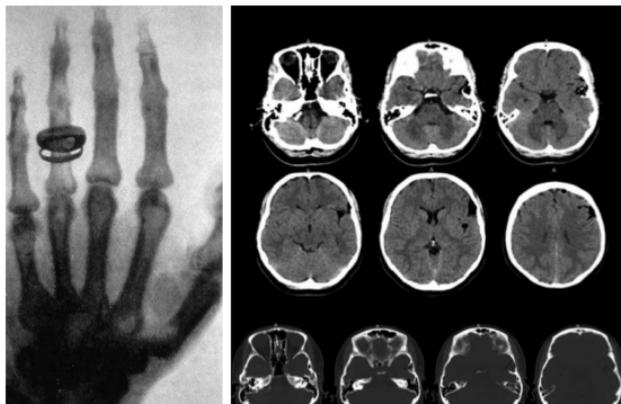


- La fusión nuclear solo puede producirse a **presiones** y **temperaturas altas**, del orden de 108 K. A esas temperatura, los sistemas se presentan en forma de **plasma**.
- Tecnológicamente, el confinamiento de estos plasmas es el problema a resolver para que la fusión sea una fuente estable de energía.

La fusión nuclear no estará disponible como fuente de energía hasta dentro de varias décadas, como poco. En la actualidad, solo se ha alcanzado el punto de equilibrio, en el que la energía liberada con la fusión es igual a la consumida para producirla.

# Aplicaciones en Medicina

Las radiaciones ionizantes se utilizan en medicina de forma habitual desde principios del siglo XX. Entre las aplicaciones principales, están las siguientes:



- **Diagnóstico**, en equipos de rayos X, gammagrafías, tomografía axial computerizada (TAC), tomografía por emisión de positrones (PET), resonancia magnética nuclear (RMN), etc.
  - La **gammagrafía** ósea consiste en la inyección en la sangre de una sustancia radiactiva que se fija al hueso y se detecta externamente. Determinadas patologías pueden afectar a la fijación de la sustancia al hueso y, por tanto, un aumento o disminución en la actividad esperada revela la existencia de esa patología.
- **Radioterapia**, en el tratamiento de ciertos tumores mediante bombardeo con radiaciones de intensidad y energía adecuadas.
  - La **braquiterapia** consiste en la implantación de radioisótopos en el interior de un organismo, de tal forma que las emisiones de estos afecten localmente a zonas afectadas por enfermedades, con un efecto pequeño en otras zonas o personas.
- **Medicina nuclear**, mediante administración de sustancias radiactivas para seguir su curso desde su exterior.

# Otras aplicaciones

## Aplicaciones industriales

- Imágenes de estructura interna de estructuras (como, por ejemplo, soldaduras o uniones).
- Detección de fugas de gas y líquidos.
- Esterilización de materiales.
- Medidas de espesores y densidades.
- Medidas de niveles en plantas embotelladoras.
- Detección de humos.



## Otras aplicaciones

- **Agricultura:** Comprobación del grado de absorción por plantas, erradicación de plagas, obtención de cultivos de alto rendimiento, ...
- **Alimentación:** Aumento del tiempo de conservación de alimentos.
- **Arqueología:** Dataciones de yacimientos y objetos de interés.
- **Arte:** Conservación y restauración de obras de arte, identificación de periodos artísticos, comprobación de autenticidad.
- **Geología:** Trazadores en el estudio de la geosfera y en limnología.



## Problemas

## Problema 1

Calcular la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para los siguientes núcleos: a)  ${}^2_1\text{H}$ ; b)  ${}^4_2\text{He}$ ; c)  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ; d)  ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ ; e)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

(Sol.: a) 2.224 MeV, 1.112 MeV; b) 28.3 MeV, 7.08 MeV; c) 342.0 MeV, 8.55 MeV; d) 551.4 MeV, 8.75 MeV; e) 1801.7 MeV, 7.57 MeV.)

## Problema 2

Completar las siguientes reacciones nucleares: a)  ${}^{27}\text{Al}(p, n)?$ ; b)  ${}^{32}\text{S}(\alpha, \gamma)?$ ; c)  ${}^{197}\text{Au}({}^{12}\text{C}, ?){}^{206}\text{At}$ ; d)  ${}^{116}\text{Sn}(?, p){}^{117}\text{Sn}$ .

(Sol.: a)  ${}^{27}\text{Si}$ ; b)  ${}^{36}\text{Ar}$ ; c)  $3n$ ; d)  ${}^2\text{H}$ )

## Problema 3

La actividad de una muestra, cuyo periodo es de 7.5 minutos, fue medida desde las 10:03 hasta las 10:13 horas. El número total de cuentas obtenidas en el detector durante ese tiempo fue de 34650. Calcular la actividad de la muestra, en cuentas por minuto, a las 10:00 horas.

(Sol.:  $11359.085 \text{ min}^{-1}$ )

## Problema 4

La actividad del carbono en seres vivos es de  $0.007 \mu\text{Ci}/\text{kg}$  debido a la presencia del  ${}^{14}\text{C}$ . El carbón proveniente de un fogón situado en un campamento indio tiene una actividad de  $0.0048 \mu\text{Ci}/\text{kg}$ . Teniendo en cuenta que la vida media del  ${}^{14}\text{C}$  es de 5730 años, calcular el año en que ese campamento estuvo habitado.

(Sol.: Hace 3119 años.)